Retrouver ce titre sur Numilog.com

Jean-Marc Montel
François Martin

Minéralogie

Cours et exercices corrigés

DUNOD

Retrouver ce titre sur Numilog.com

Illustration de couverture :
Clivage dans la biotite © Jean-Marc Montel

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.
Le Code de la propriété intellectuelle du 1er juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.
Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).

DANGER
LE PHOTOCOPILLAGE TUE LE LIVRE

© Dunod, Paris, 2014
ISBN 978-2-10-060012-0

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).
Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Retrouver ce titre sur Numilog.com

Table des matières

Avant-propos VII

Remerciements IX

Chapitre 1. Introduction 1

1.1 Définitions 1

1.1.1 La minéralogie 1

1.1.2 Un minéral 2

1.2 Utilité de la minéralogie 4

1.2.1 Les minéraux comme éléments constitutifs des roches 4

1.2.2 Les minéraux comme indicateurs de l'histoire géologique 4

1.2.3 Les minéraux comme substances utiles 5

1.3 Éléments d'histoire de la minéralogie 5

1.3.1 Naissance de la minéralogie 5

1.3.2 Le XIXe siècle 6

1.3.3 La minéralogie moderne 8

1.3.4 La minéralogie aujourd'hui 8

Chapitre 2. Le minéral en tant que structure chimique 11

2.1 La composition chimique des minéraux 11

2.2 Les liaisons chimiques 12

2.2.1 Nature des liaisons chimiques 12

2.2.2 Les liaisons fortes 13

2.2.3 Les liaisons faibles 13

2.3 Un modèle simple : le potentiel de Born 14

2.3.1 Les hypothèses 14

2.3.2 Liaison ionique entre deux atomes 15

2.3.3 Un modèle de cristal en deux dimensions 16

2.4 Construction des structures chimiques : les règles de Pauling 19

2.4.1 Les bases du modèle 19

2.4.2 Règle n° 1 : organisation des anions autour des cations 19

2.4.3 Règle n° 2 : l'organisation des cations autour des anions 21

2.4.4 Règle n° 3 : la polymérisation des polyèdres 22

© Dunod – Toute reproduction non autorisée est un délit.

Retrouver ce titre sur Numilog.com

2.4.5 Règle n° 4 : les formateurs de réseau 23
2.4.6 Règle n° 5 : la règle de parcimonie 23
2.4.7 Utilisation des règles de Pauling 23
2.5 La variabilité de composition des minéraux 24
2.5.1 Les substitutions 24
2.5.2 Les solutions solides 25
2.6 Interprétation de la composition chimique des minéraux : les formules structurales 28
2.6.1 Analyse des minéraux et formules structurales 28
2.6.2 Calcul des formules structurales, deux cas simples 28
2.6.3 Détermination de la base 31
2.6.4 Calcul des formules structurales complexes 31

Chapitre 3. La structure des minéraux, introduction à la cristallographie 37
3.1 Introduction 37
3.1.1 La cristallographie 37
3.1.2 Les trois lois de la cristallographie au XVIIIe siècle 38
3.2 Le réseau, le système cristallin 40
3.2.1 Les réseaux en deux dimensions 40
3.2.2 Les réseaux en trois dimensions 43
3.3 Le repérage dans un cristal 48
3.3.1 Le système d'axes 48
3.3.2 Les plans 49
3.3.3 Repérage des droites et des rangées 53
3.3.4 Cas particulier du système hexagonal-rhomboédrique 54
3.3.5 Le réseau réciproque 55
3.4 Du réseau au cristal 55
3.4.1 Cas général 55
3.4.2 Les groupes d'espace en deux dimensions 57
3.4.3 Groupes d'espace et classes de symétrie en trois dimensions 61
3.4.4 Les tables internationales de cristallographie 65
3.5 Les surstructures 67
3.5.1 Les macles 67
3.5.2 L'épitaxie 68
3.6 Composition chimique et structure 68
3.6.1 De la formule au motif 68
3.6.2 Isotypes et polymorphes 68
3.6.3 La description d'une structure cristalline 69

Retrouver ce titre sur Numilog.com

Chapitre 4. Caractérisation des minéraux 73
4.1 Introduction 73
4.1.1 Buts de la caractérisation 73
4.1.2 Sur le terrain 74
4.1.3 En laboratoire 74
4.1.4 Les produits d'intérêt industriel 75
4.2 La caractérisation macroscopique 75
4.2.1 Propriétés optiques 75
4.2.2 Morphologie 77
4.2.3 Autres propriétés déterminatives 78
4.3 Le microscope pétrographique 81
4.3.1 Introduction 81
4.3.2 La lumière 81
4.3.3 La polarisation de la lumière 82
4.3.4 La propagation de la lumière 82
4.3.5 Le fonctionnement du microscope pétrographique 89
4.4 Le microscope métallographique 101
4.4.1 Principe 101
4.4.2 Observations au microscope métallographique 102
4.5 La diffraction des rayons X 103
4.5.1 Le phénomène physique 103
4.5.2 Les informations contenues dans le diffractogramme 109
4.5.3 Utilisation des diffractogrammes de rayons X 113
4.6 Les faisceaux électroniques 115
4.6.1 Interactions électrons-matière 115
4.6.2 Microscope électronique à balayage (MEB) 118
4.6.3 Analyse par microsonde électronique 123
4.6.4 Microscopie électronique en transmission (MET) 125
4.7 Les spectroscopies moléculaires 133
4.7.1 Principes 133
4.7.2 Spectroscopie infrarouge (FTIR) 134
4.7.3 Résonance magnétique nucléaire (RMN) du solide 138

Chapitre 5. Les minéraux 143
5.1 La classification des minéraux 143
5.2 La classification des silicates 144
5.3 L'olivine 147
5.4 Le quartz 149
5.5 La calcite 152
5.6 La pyrite 153
5.7 Le talc 155

© Dunod – Toute reproduction non autorisée est un délit.

Retrouver ce titre sur Numilog.com

Exercices et problèmes 157
Exercices se rapportant au chapitre 2 157
Exercices se rapportant au chapitre 3 160
Problèmes 162
Solutions des exercices 168
Solutions des problèmes 178
Références bibliographiques 189
Illustrations 191
Index 193

Retrouver ce titre sur Numilog.com

AVANT-PROPOS

L'idée d'écrire un livre de minéralogie en français vient d'un échange avec un collègue québécois, qui cherchait un support pour son cours. Force a été de constater à cette occasion que cette discipline ne disposait d'aucun ouvrage moderne adapté à l'enseignement en premier cycle universitaire, et que la meilleure référence restait l'ouvrage *Minéralogie*, d'Alain Baronnet, publié par les éditions Dunod en 1988, et épuisé depuis longtemps.

Entre 1988 et 2014, la minéralogie a profondément évolué. Ses outils se sont diversifiés et les techniques d'avant-garde d'hier comme les microscopies électroniques, les spectroscopies, les analyseurs ponctuels, la modélisation, sont devenus les outils de routine d'aujourd'hui. Le rôle fondamental des minéraux comme porteurs du signal géochimique, des propriétés pétrophysiques, des géochronomètres, des géothermobaromètres est maintenant reconnu de toute la communauté scientifique. Le développement des sciences de l'environnement, en posant des problèmes d'une grande complexité à la communauté a été particulièrement stimulant. Une nouvelle génération de minéralogistes, nourrie de physique du solide, de géochimie, de géochronologie, de pétrologie, mais peut-être un peu moins de la connaissance exhaustive des minéraux, a émergé et s'est organisée en une communauté dynamique et ouverte.

Cet ouvrage essaie modestement d'être en phase avec cette évolution. Il est conçu pour donner aux étudiants des bases solides, à la fois sur le minéral et la façon de l'étudier. Il ne demande pas de prérequis qui dépassent le niveau d'une terminale scientifique, en accord avec la tradition qui place l'enseignement de la minéralogie en début de la formation des géologues.

Certains choix de contenus ont été faits, qui comme toujours peuvent être discutés. Une large place a été consacrée aux méthodes de caractérisation, y compris les méthodes spectroscopiques et celles basées sur les faisceaux électroniques. Au contraire, les méthodes avancées de la microscopie optique, comme l'observation en lumière convergente, ne sont pas développées. Certains concepts fondamentaux de la minéralogie comme la croissance cristalline, les défauts, les macles, sont peu ou pas abordés, car dépassant le niveau du premier cycle universitaire. Au contraire la cristallographie, qui est une excellente introduction aux problèmes de symétrie qui sont de portée très générale, a été traitée avec une certaine profondeur. Cet ouvrage ne comporte pas de présentation systématique des minéraux. Seuls quelques-uns d'entre eux sont détaillés à titre d'exemple.

© Dunod – Toute reproduction non autorisée est un délit.

Retrouver ce titre sur Numilog.com

Enfin, bien que ne leur étant pas destiné, cet ouvrage peut être abordé par des amateurs nantis de bases scientifiques en physique et en chimie et qui souhaitent voir dans leurs collections autre chose qu'un objet esthétique ou systématique.

Que le lecteur prenne du plaisir à la lecture de ce livre et à la découverte de la richesse de la minéralogie !

Retrouver ce titre sur Numilog.com

Remerciements

Cet ouvrage a bénéficié de l'aide et du soutien de nombreuses personnes qui méritent d'être ici remerciés.

En premier lieu Anne-Magali Seydoux-Guillaume et Philippe de Parseval, qui sont les rédacteurs principaux des parties consacrées aux microscopies électroniques et aux microanalyses associées, ainsi que Christiane Cavare-Hester et Anne-Marie Cousin qui ont réalisé les figures de cette partie.

Le résultat final doit beaucoup aux nombreuses discussions que nous avons pu avoir avec des collègues enseignant la minéralogie, comme Didier Béziat (Toulouse), Jacky Bouloton (Clermont-Ferrand), Georges Calas (Paris), Karine Devineau (Nancy), Bertrand Devouard (Marseille), François Farges (Paris), François Faure (Nancy), Damien Guillaume (Toulouse), John M. Hanchar (Terre-Neuve), Wilhelm Heinrich (Berlin), Olivier Jaoul (Toulouse), Richard Wirth (Potsdam), et Jacques Yvon (Nancy).

Il nous est également très agréable de rendre hommage à ceux qui nous ont appris les bases de cette science magnifique : Alain Weisbrod et Bernard Charoy à Nancy et Jean-Pol Fortuné et Pierre Monchoux à Toulouse.

Enfin nous ne pouvons pas oublier ceux qui sont, en fait, les principaux contributeurs à cet ouvrage : les étudiants de Toulouse, Nancy, ou Clermont-Ferrand, qui ont eu à subir nos premiers pas hésitants d'enseignants de minéralogie.

© Dunod – Toute reproduction non autorisée est un délit.

Retrouver ce titre sur Numilog.com

Retrouver ce titre sur Numilog.com

INTRODUCTION 1

PLAN

1.1 Définitions
1.2 Utilité de la minéralogie
1.3 Éléments d'histoire de la minéralogie

OBJECTIFS

- Définir la minéralogie et les minéraux.
- Expliquer l'utilité de la minéralogie pour l'étude de la Terre et, comme science appliquée, pour l'industrie.
- Rappeler quelques grandes dates de l'histoire de la minéralogie.

1.1 DÉFINITIONS

1.1.1 La minéralogie

La minéralogie peut être définie comme la science qui étudie les minéraux. C'est donc une science qui s'intéresse avant tout à des objets. Elle est née au XVIIIe siècle, en même temps que la cristallographie, dont elle a été longtemps indissociable. Elle est étroitement liée à la géologie, dont on peut considérer qu'elle fait partie.

Les minéraux sont des objets naturels remarquables, utilisés initialement par l'homme à des fins décoratives (gemmes), en tant que matière première (minerais) et probablement pour leurs vertus magiques supposées. Leurs couleurs, la perfection de leurs formes, la variété de leur éclat fascinent toujours les hommes. Au cours des siècles, il s'est constitué un savoir empirique qui a nourri les premiers pas de la minéralogie comme discipline scientifique. À l'instar de tout corps de connaissance qui a commencé de se constituer avant son organisation suivant des principes scientifiques, on trouve dans la minéralogie des usages, des traditions, voire des archaïsmes, qui sont la marque de l'ancienneté de cette science.

La minéralogie est une activité pratiquée en amateur par de nombreux passionnés. Elle est aussi à la base d'une activité commerciale significative. De très nombreux musées exposent des collections de minéralogie, de taille et d'importance très variable, au contact desquelles naissent de nombreuses vocations de scientifiques et en particulier de géologues. La popularité grandissante de la lithothérapie montre que, pour le grand public, les minéraux sont restés des objets suffisamment exceptionnels pour que l'on continue de leur attribuer des propriétés magiques.

© Dunod – Toute reproduction non autorisée est un délit.

Retrouver ce titre sur Numilog.com

Comme toutes les sciences qui s'intéressent à des objets, la minéralogie fait appel à d'autres disciplines scientifiques qu'elle a parfois largement contribué à développer, en particulier la géologie, la cristallographie, la physique du solide, la chimie minérale.

La minéralogie est une science naturelle. Elle a donc pour rôle non seulement d'expliquer comment les minéraux se forment ou se transforment, mais aussi de les décrire et de les inventorier, comme la botanique décrit les espèces végétales. Cette partie de la discipline, nommée minéralogie systématique, peut sembler stérile, voire ennuyeuse, mais elle est fondamentale.

1.1.2 Un minéral

Un minéral est un solide, naturel, homogène avec une structure atomique ordonnée et une composition définie.

Cette définition scientifique donne au mot « minéral » un sens différent de celui du sens commun qui assimile en général « minéral » et « cristal », et même « minéral » et « cristal montrant des formes géométriques nettes ». La définition ci-dessus nécessite quelques explications et restrictions.

Solide

Ceci ne demande pas de précision, mais l'on peut noter que le mercure métallique, que l'on trouve à l'état naturel sous forme liquide, est considéré comme un minéral, alors que la glace, qui répond à la définition ci-dessus, ne l'est pas.

Naturel

Ce point est important, car pour être qualifiée de minéral, une substance doit avoir été observée dans la nature. Les innombrables produits synthétisés dans les laboratoires ne sont pas des minéraux, sauf s'ils existent aussi à l'état naturel. Ainsi, un silicate de zirconium quadratique fabriqué en laboratoire peut être qualifié de zircon, parce qu'il existe aussi à l'état naturel, mais un germanate de hafnium, qui est très proche d'un zircon, ne peut pas être qualifié de minéral parce qu'il n'a jamais été observé à l'état naturel.

À partir du moment où une nouvelle **espèce minérale** a été définie, on lui donne un nom, qui se termine en « –ite », constitué à partir du nom d'un personnage plus ou moins célèbre (proustite), d'une localité (autunite) ou d'une propriété (apatite = trompeur). Il existe des règles de nomenclature particulières pour les minéraux qui ne sont que des variations de minéraux déjà répertoriés. Les minéraux connus depuis longtemps, décrits avant la structuration de la minéralogie comme science et l'édiction de règles de nomenclature, peuvent avoir un nom qui ne se termine pas en « –ite » (quartz, blende).

Naturel ne veut pas dire terrestre. Il existe des minéraux lunaires, martiens et des minéraux propres aux météorites. Il existe des minéraux dont on sait qu'ils existent,

Retrouver ce titre sur Numilog.com

même si l'on ne les a jamais vus : les minéraux du manteau profond. Ils ont d'ailleurs des noms. Enfin, il existe une classe de minéraux à la frange de la « légalité », ce sont ceux qui se sont formés de façon naturelle, mais à cause de l'activité humaine. Un bon exemple est fourni par les minéraux des mines de Laurion en Grèce. Dans ces mines, exploitées depuis l'Antiquité, on découvre de nouveaux minéraux qui ne se seraient probablement pas formés si le gisement n'avait pas été exploité.

L'autorité chargée de statuer sur la légitimité d'une nouvelle espèce minérale est une société savante internationale nommée International Mineral Association (IMA). Le processus de qualification est long et s'accompagne du dépôt d'un échantillon de référence dans une collection où il sera accessible. Il existe actuellement environ 3 500 minéraux répertoriés. Une vingtaine de nouveaux minéraux sont décrits par an. L'immense majorité des minéraux nouvellement décrits sont très rares et ne seront peut-être plus jamais observés. Certains ne sont que des variétés de minéraux déjà décrits. Les minéraux vraiment utiles pour les activités humaines scientifiques ou industrielles ne sont pas plus d'une cinquantaine.

Homogène

C'est un point délicat de la définition. Pour être plus précis, il faudrait dire « macroscopiquement homogène », car l'homogénéité d'un minéral dépend de l'échelle à laquelle on l'observe. Au cours des 30 dernières années, beaucoup de minéraux ont été disqualifiés, car, observés à très petite échelle, ils étaient en fait constitués d'un mélange de minéraux.

Structure atomique ordonnée

Ceci veut dire qu'un minéral doit être cristallisé, c'est-à-dire qu'il doit présenter une structure atomique périodique organisée à longue distance. Il existe des exceptions : par tradition, l'opale et l'ambre, qui ne sont pas cristallisés, sont considérés comme des minéraux.

Les minéraux **métamictes** sont des minéraux initialement cristallisés, mais dont l'ordre à longue distance a été détruit par une auto-irradiation due à la présence de quantités significatives d'uranium et de thorium. On peut noter que certains minéraux comme les minéraux argileux sont en général mal cristallisés. Les verres naturels, qui ne sont pas cristallisés (on les dit « **amorphes** »), ne sont pas des minéraux.

Composition chimique définie

C'est la partie de la définition la plus difficile à appréhender. Quelques minéraux ont des compositions chimiques simples et invariables (quartz : SiO_2, calcite : $CaCO_3$), mais la plupart sont des **solutions solides**, c'est-à-dire que leur composition chimique varie, parfois dans des proportions importantes, suivant des lois précises et bien connues. La notion de solution solide est fondamentale en minéralogie. Elle sera développée dans le chapitre 2. La composition chimique de l'olivine, par exemple, varie de façon continue entre Mg_2SiO_4 et Fe_2SiO_4.

La définition d'un minéral implique donc trois composantes :

Minéral = structure + composition chimique + observation

© Dunod – Toute reproduction non autorisée est un délit.

Retrouver ce titre sur Numilog.com

1.2 Utilité de la minéralogie

La minéralogie est une discipline scientifique indispensable pour pratiquer la géologie fondamentale ou appliquée. Elle est donc enseignée très précocement dans les formations de sciences de la Terre. Connaître un peu de minéralogie est également utile en chimie minérale et en physique du solide.

1.2.1 Les minéraux comme éléments constitutifs des roches

Les roches sont essentiellement constituées de minéraux. Les seuls constituants significatifs des roches (volcaniques) qui ne sont pas des minéraux sont les verres. Il n'existe pas de roches qui ne contiennent pas de minéraux, et la plupart sont exclusivement constituées de minéraux. Certaines roches sont monominérales (un sable est constitué en général quasi exclusivement de quartz, les calcaires sont essentiellement formés de calcite), mais la plupart sont polyminérales : un granite contient comme minéraux principaux (on dit aussi « cardinaux ») du quartz, du feldspath plagioclase, du feldspath potassique, accompagnés d'un autre minéral comme la biotite ou l'amphibole, et de plusieurs minéraux dits « accessoires », car présents en faible quantité, comme le zircon, la monazite et l'apatite.

Beaucoup des propriétés macroscopiques des roches proviennent des caractéristiques des minéraux qui les composent :

- la densité d'une roche est la moyenne pondérée des densités des minéraux, corrigée de sa porosité (la proportion de vide) ;
- la résistance à l'érosion ou à la déformation d'une roche dépend de la résistance du minéral le plus faible ;
- les caractéristiques mécaniques des roches proviennent souvent de celles des minéraux ;
- les propriétés magnétiques des roches dépendent de celles des minéraux.

Mais la nature des minéraux n'est pas la seule à intervenir, la façon dont ils sont agencés entre eux et la taille des cristaux sont également des paramètres importants.

1.2.2 Les minéraux comme indicateurs de l'histoire géologique

Les minéraux nous permettent de reconstituer l'histoire des roches :

- l'existence de diamants montre que le carbone existe en profondeur ;
- la stishovite (variété de silice SiO_2) à structure quadratique particulièrement dense indique un cratère de météorite ;
- la composition chimique des minéraux dépend des conditions de pression et de température ayant régné lors de leur formation. La répartition du fer et du magnésium entre la biotite et le grenat, par exemple, dépend de la température.
- les minéraux qui contiennent des éléments radioactifs, comme les micas contenant du potassium ou le zircon contenant de l'uranium, peuvent être datés.

Retrouver ce titre sur Numilog.com

1.2.3 Les minéraux comme substances utiles

Certains minéraux sont des minerais, c'est-à-dire qu'ils contiennent des éléments, en général métalliques, qui rendent leur exploitation économiquement intéressante. La scheelite ($CaWO_4$), par exemple, est un minerai de tungstène, et la magnétite (Fe_3O_4) est le principal minerai de fer. D'autres minéraux sont intéressants par eux-mêmes, et non pour les éléments qu'ils contiennent, tels que le quartz ou le corindon (Al_2O_3), utilisé comme abrasif, ou le talc ($Mg_6Si_8O_{20}(OH)_4$), qui a de nombreuses applications industrielles, comme lubrifiant ou dans les cosmétiques. D'autres minéraux sont des matières premières pour la fabrication de produits manufacturés, comme les feldspaths, utilisés par l'industrie des céramiques, les argiles utilisées pour faire des briques et des tuiles, et l'andalousite (Al_2SiO_5), utilisée pour élaborer des éléments réfractaires. Enfin, il faut citer les gemmes, sources de rêves, de phantasmes, de création artistique, mais surtout, de commerce.

1.3 Éléments d'histoire de la minéralogie

1.3.1 Naissance de la minéralogie

La minéralogie, en tant que science, naît au XVIIIe siècle, à partir d'un corpus de connaissances empiriques accumulé au cours des siècles, qui a fait émerger progressivement la notion de minéral. À cette époque, les minéraux sont décrits à partir de leurs propriétés macroscopiques telles que la forme, la couleur, la densité, etc. Georg Bauer, dit Agricola (1494-1555), rassemble les connaissances des mineurs européens de l'époque dans son ouvrage majeur, *De re metallica,* qui décrit également des minerais et des minéraux. En 1546, il publie *De natura fossilium*, considéré comme premier traité de minéralogie. On attribue en général la paternité du terme « minéralogie » à Bernardo Cesi (1581-1630), qui l'utilise comme titre de son ouvrage publié en 1636.

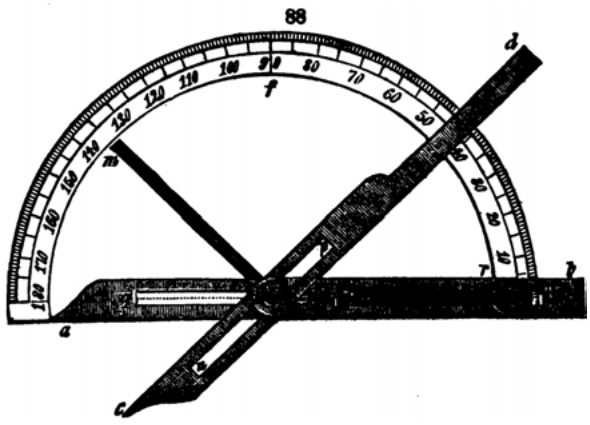

Figure 1.1 – Représentation d'un goniomètre de Carangeot
Cet appareil permet de mesurer avec une grande précision les angles entre les faces d'un cristal réel, en appliquant les tiges sur les faces, d'où son nom de goniomètre d'application.

C'est la cristallographie qui fait entrer la minéralogie dans le cercle des sciences : Jean-Baptiste Romée de L'Isle (militaire et minéralogiste français, 1736-1790 ; *Essai de cristallographie*, 1772) et surtout René Just Haüy (professeur et minéralogiste

© Dunod – Toute reproduction non autorisée est un délit.

Retrouver ce titre sur Numilog.com

français, 1743-1822, *Essai d'une théorie sur la structure des crystaux*, 1784) vont poser les bases de la cristallographie géométrique et de l'étude des cristaux comme objets d'étude scientifique.

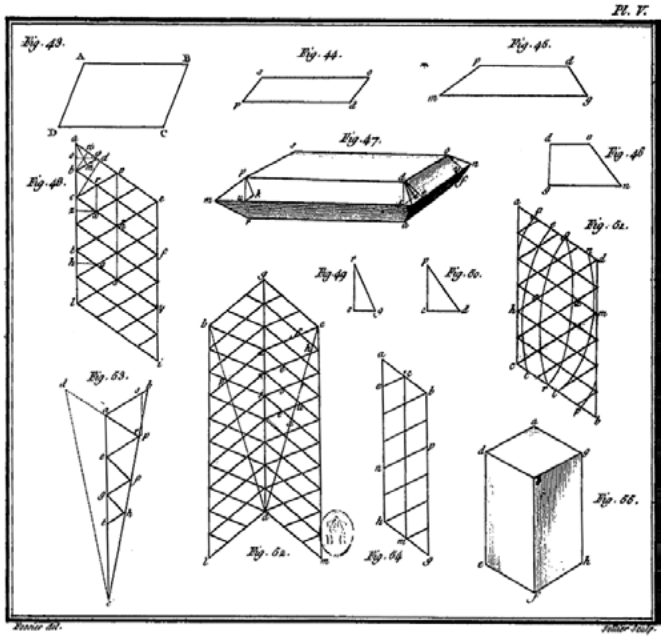

Figure 1.2 – Extrait de l'*Essai d'une théorie sur la structure des crystaux*, d'Haüy, 1784, représentant diverses formes de cristaux de gypse.
Les figures géométriques montrent que les diverses formes de cristaux de gypse peuvent être obtenues par empilement d'un petit volume élémentaire.

1.3.2 Le XIXe siècle

La minéralogie se développe au cours du XIXe siècle selon trois axes complémentaires : la cristallographie et la caractérisation des cristaux par des méthodes physiques comme l'optique cristalline ; la détermination de la composition chimique des minéraux ; et la description des espèces minérales et de leurs gisements. Auguste Bravais (officier et professeur, 1811-1863) apporte des contributions décisives à la cristallographie théorique (*Sur les polyèdres symétriques*, 1849, *Étude sur la cristallographie*, 1851). Elles trouveront leur aboutissement dès la fin du XIXe siècle avec les travaux de Evgraf Fedorov (mathématicien et minéralogiste russe, 1853-1919) et Arthur Moritz Schoenflies (1853-1928, mathématicien allemand), qui, en 1891, définissent et dénombrent les groupes d'espaces. Utilisant une approche différente, Jöns Jacob Berzelius (chimiste suédois, 1779-1848) montre que la composition chimique des minéraux est un critère pertinent pour les décrire et les classer, complémentaire d'une classification s'appuyant sur les caractères cristallographiques (*Nouveau Système de minéralogie*, 1819). Cette approche est poursuivie au cours du XIXe siècle, en particulier par Eilhard Mitscherlich (chimiste allemand, 1794-1863) et Gustav

Retrouver ce titre sur Numilog.com

Tschermak von Seysenegg (minéralogiste autrichien, 1836-1927), qui définissent les concepts d'isomorphisme, de polymorphisme et de solution solide.

La caractérisation des minéraux par leurs propriétés optiques se révèle une méthode extrêmement féconde et efficace. À partir des théories optiques d'Augustin Fresnel (physicien français, 1788-1827), les propriétés des minéraux sont expliquées et mesurées systématiquement. Le microscope polarisant est mis au point par Giovanni Battista Amici (astronome et microscopiste italien, 1786-1863) vers 1830, en combinant l'utilisation de lentilles achromatiques et du prisme polarisant de Nicol (William Nicol, physicien et géologue écossais, 1770-1851). Au cours de la seconde moitié du XIXe siècle, les progrès techniques de la construction des microscopes et de la fabrication des lames minces font du microscope polarisant un outil de caractérisation majeur des minéraux. Les travaux de Henry Clifton Sorby (savant anglais, 1826-1908), Harry Rosenbusch (pétrographe allemand, 1836-1914), François Ernest Mallard (cristallographe et minéralogiste français, 1833-1894), Auguste Michel-Lévy (minéralogiste français, 1844-1911) aboutissent à la mise au point des méthodes d'étude des roches au microscope polarisant, toujours utilisées aujourd'hui.

Figure 1.3 – Les débuts de la microscopie optique

À gauche, le premier microscope construit par Émile Bertrand lorsqu'il était élève de l'École des mines de Paris, vers 1870. À droite, exemples de lames minces anciennes. Les plus vieilles, présentées ici, datent du début du XXe siècle. Elles ont déjà leur format actuel.

Au cours du XIXe siècle, la description des espèces et de leurs gisements est l'œuvre de très nombreux géologues et minéralogistes amateurs et professionnels, mais l'on peut citer, pour la France, l'œuvre exceptionnelle d'Alfred Lacroix (minéralogiste français, 1863-1948).

© Dunod – Toute reproduction non autorisée est un délit.

Retrouver ce titre sur Numilog.com

Très tôt, les minéralogistes tentent, avec succès, de synthétiser en laboratoire des minéraux. Gabriel Auguste Daubrée (géologue français, 1814-1896) et Paul-Gabriel Hautefeuille (1836-1902) seront les pionniers de cette activité.

1.3.3 La minéralogie moderne

La découverte de la diffraction des rayons X par Max von Laue (physicien allemand, 1879-1960) révolutionne la minéralogie, car à partir de ce moment, la structure des minéraux peut être déterminée à l'échelle atomique dans ses moindres détails. Dès 1937, William Lawrence Bragg (physicien australien, 1890-1971) publie une compilation de plusieurs dizaines de structures de minéraux courants. L'analyse détaillée des structures des solides cristallisés permet à Linus Pauling (chimiste américain, 1901-1994) d'énoncer en 1929 les règles qui gouvernent la constitution des structures cristallines ioniques. Victor Moritz Goldschmidt, en 1926 (géochimiste suisse, 1888-1947) combine les données de la cristallographie et de la chimie des minéraux pour fonder une nouvelle branche de la minéralogie nommée « cristallochimie ». L'étude directe de la structure des minéraux est rendue possible par le microscope électronique à transmission, inventé en 1933 et constamment amélioré depuis.

L'étude de la composition chimique des minéraux ne progresse significativement que grâce à la mise au point de la microsonde électronique en 1951 par Raimond Castaing (physicien français, 1921-1998). Elle permet de déterminer la composition chimique des minéraux à une échelle (quelques μm^3) compatible avec l'échelle d'hétérogénéité des minéraux.

La synthèse des minéraux devient, sous l'impulsion de pionniers comme Norman L. Bowen (géologue américain 1887-1956), la pétrologie expérimentale, qui étudie le comportement des roches et des minéraux en conditions géologiques. Les développements technologiques vont permettre d'atteindre progressivement des conditions de pression et de température de plus en proche des conditions naturelles.

1.3.4 La minéralogie aujourd'hui

Aujourd'hui, la minéralogie est plus que jamais une discipline scientifique indispensable à la géologie, mais est également très proche de la chimie minérale et de la physique du solide. La structure des minéraux peut être étudiée avec les spectroscopies Raman, infra-rouge, Mössbauer, avec les méthodes utilisant le rayonnement synchrotron et la résonnance magnétique nucléaire. La microscopie électronique en transmission, mais aussi la microscopie à force atomique ou à effet tunnel révèlent les structures jusqu'à l'échelle nanométrique. La composition chimique des cristaux, pour les éléments majeurs, mais aussi les éléments en trace et les rapports isotopiques, peut quant à elle être déterminée par les microsondes électroniques, les microsondes ioniques et divers systèmes utilisant l'ablation par faisceau laser à l'échelle de quelques μm^3. Les méthodes expérimentales permettent, grâce aux presses multienclumes et aux enclumes diamant, d'atteindre les conditions de température et de pression du manteau inférieur et même du noyau terrestre. Cependant, le progrès le plus notable est indubitablement le développement de la modélisation numérique des structures cristallines. Les progrès conceptuels et l'augmentation de

Retrouver ce titre sur Numilog.com

la puissance de calcul des ordinateurs permettent de calculer avec une précision et une fiabilité sans cesse améliorée les propriétés des structures cristallines. Toutefois, à côté de ces formidables progrès rendus possibles par des appareils couteux et sophistiqués, il reste toujours une place pour la recherche patiente et méticuleuse de minéraux inconnus sur le terrain.

© Dunod – Toute reproduction non autorisée est un délit.