

Minéralogie

Cours et exercices corrigés

3^e édition

Jean-Marc Montel

Professeur de minéralogie à l'École nationale supérieure de géologie (Nancy)

François Martin

Professeur de minéralogie et de cristallographie à l'université Paul Sabatier (Toulouse 3)

Anne-Magali Seydoux

Directrice de recherche au CNRS au laboratoire de géologie : Terre, Planète, Environnement (Lyon/Saint-Étienne)

Philippe de Parseval

Ingénieur de recherche à l'université Paul Sabatier (Toulouse 3)

Ivan Jovovic

Ingénieur d'études au CNRS

DUNOD

© Dunod, 2014, 2020, 2023
11, rue Paul Bert – 92240 Malakoff
ISBN 978-2-10-085693-0

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.

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos	XI
Remerciements	XIII
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 XIX ^e 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

Table des matières

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 XVIII ^e 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

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	87
4.4 Le microscope métallographique	99
4.4.1 Principe	99
4.4.2 Observations au microscope métallographique	100
4.5 La diffraction des rayons X	101
4.5.1 Le phénomène physique	101
4.5.2 Les informations contenues dans le diffractogramme	107
4.5.3 Utilisation des diffractogrammes de rayons X	111
4.6 Les faisceaux électroniques	113
4.6.1 Interactions électrons-matière	113
4.6.2 Microscope électronique à balayage (MEB)	116
4.6.3 Analyse par microsonde électronique	121
4.6.4 Microscopie électronique en transmission (MET)	123
4.7 Les spectroscopies moléculaires	132
4.7.1 Principes	132
4.7.2 Spectroscopie infrarouge (FTIR)	133
4.7.3 Résonance magnétique nucléaire (RMN) du solide	136
Chapitre 5. Les minéraux	141
5.1 La classification des minéraux	141
5.2 La classification des silicates	143
5.3 L'olivine	143
5.4 Le quartz	147
5.5 La calcite	150
5.6 La pyrite	151

Table des matières

5.7	Les amphiboles	153
5.8	Les pyroxènes	155
5.9	Les feldspaths	157
5.10	Les grenats	160
5.11	Les silicates d'alumine	160
5.12	Le staurotide ou staurolite	164
5.13	La cordiérite	166
5.14	Les phyllosilicates	168
5.14.1	Généralités	168
5.14.2	Le talc	171
5.14.3	Les micas	173
5.12.5	Les argiles	174
5.15	L'apatite	176
Chapitre 6. Dessiner une lame mince		179
6.1	Introduction	179
6.2	Le matériel	180
6.2.1	Le tracé	180
6.2.2	La mise en couleur	180
6.2.3	Le papier	181
6.3	La méthode	181
6.3.1	Observation de la lame	181
6.3.2	Éléments structurants	182
6.3.3	Éléments adjacents	182
6.3.4	Éléments intermédiaires	182
6.3.5	Détails et finitions	182
6.3.6	Mise en couleur	183
6.4	Exemples pas à pas	184
6.4.1	Basalte à olivine	184
6.4.2	Calcaire oolithique	186
6.5	Pour aller plus loin	187
6.5.1	Colorer l'irisation	187
6.5.2	Dessiner une matrice	188
Exercices et problèmes		191
Exercices se rapportant au chapitre 2		191
Exercices se rapportant au chapitre 3		194
Problèmes		197
Solutions des exercices		206
Solutions des problèmes		222

Table des matières

Annexes	235
Références bibliographiques	243
Illustrations	245
Index	247

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.

Dans cette nouvelle édition, nous avons introduit quelques nouveaux exercices et un problème supplémentaire, et décrit trois nouveaux minéraux. Nous avons surtout

Avant-propos

ajouté un chapitre qui décrit, de façon très détaillée et très pratique, une méthode pour dessiner une lame mince. Nous sommes convaincus que les étudiants de tous niveaux trouveront ce chapitre très utile.

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 !

REMERCIEMENTS

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

La première édition de cet ouvrage date maintenant de 10 ans. Nous avons, au cours de ces années, eu l'occasion d'échanger avec de nombreux collègues, qui nous font le plaisir de l'utiliser en appui de leurs enseignements. Nous les remercions très sincèrement pour ces échanges, toujours gratifiants pour des auteurs.

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.

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 XVIII^e 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 des 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.

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 et 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 « 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 dans la nature.

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,