

Métamorphisme et géodynamisme

Christian Nicollet

Professeur à l'université Blaise-Pascal
(Clermont-Ferrand)

Préface de Jacques Kornprobst

2^e ÉDITION

DUNOD

Illustration de couverture : Agrégat polycristallin de clinopyroxènes dans un métagabbro des Adirondacks (USA).
Microphotographie (1 mm de large) en lumière polarisée analysée.
Source : Christian Nicollet.

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 1^{er} 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).



© Dunod, 2010, 2013, 2015, 2017 pour cette nouvelle présentation

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

www.dunod.com

ISBN 978-2-10-077134-9

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.

PRÉFACE

Pour qui a le goût de la pétrographie, toutes les roches sont intéressantes. Mais les roches métamorphiques et les processus qui sont à leur origine – le métamorphisme – présentent des attraits tout particuliers.

Les séries sédimentaires offrent incontestablement de grandes joies aux géologues : leurs structures stratifiées, tabulaires, fracturées ou plissées, sont souvent impressionnantes ; les fins détails des microfaciès et des laminites, agréables à l'œil, sont révélateurs des milieux de sédimentation ; les figures sédimentaires, spécialement développées dans les turbidites, sont des éléments de premier choix pour définir des critères de polarité tandis que la découverte de fossiles conduit généralement à une excitation proche de la jubilation. Toutefois, sauf cas particuliers (des cristaux de gypses par exemple, vus au microscope polarisant dans des dolomites évaporitiques !), la composition minéralogique des roches sédimentaires, généralement pauvre et monotone, peut être à l'origine de graves frustrations.

De ce point de vue, les roches ignées apportent en revanche beaucoup de satisfaction ! Les très gros grains des roches plutoniques, en particulier dans les pegmatites, et la diversité des espèces minérales, comblent les aspirations des amateurs de minéralogie. Les textures graphiques, le moirage des perthites et des antiperthites, les phénocristaux zonés et maclés tout comme les mésostases finement enchevêtrées des roches volcaniques sont autant d'éléments qui enchantent l'œil et dont l'étude détaillée aux différentes échelles d'observation conduit à une foule d'informations utiles à la compréhension des mécanismes éruptifs. Toutefois, sur le terrain, faute de lignes directrices sur lesquelles l'observateur puisse s'appuyer avec confiance, la structure des ensembles magmatiques est généralement difficile à décortiquer. Ceci est particulièrement vrai pour les édifices volcaniques dont l'évolution est dominée par des phases de construction et de destruction, souvent simultanées, dont la superposition rend souvent obscure la chronologie exacte des événements. Les volcanologues sont bien forts, qui sont capables de débrouiller la complexité de ces ensembles !

Les unités métamorphiques ont l'avantage d'être généralement solidement structurées. Elles présentent des schistosités, des foliations, des crénulations qui laissent parfois encore transparaître la stratification initiale. Elles montrent des linéations variées, d'intersection ou d'allongement et des figures de cisaillement. Pour qui sait

les distinguer et les interpréter, ces structures sont autant de guides qui permettent d'échafauder une géométrie cohérente et une chronologie des déformations. Les minéraux participent à cette enquête puisqu'il est possible d'en distinguer différentes générations développées avant, pendant et après telle ou telle structure caractéristique. Le nombre d'espèces est très grand puisque les assemblages minéralogiques dépendent à la fois de la composition chimique globale des matériaux initiaux et des conditions – température, pression, pression de fluide – des recristallisations. Ces conditions évoluent au cours du temps, en liaison avec le déroulement des processus géodynamiques, et chaque roche peut recéler une superposition d'assemblages qui traduit plus ou moins fidèlement – car la diffusion des éléments n'est pas un phénomène instantané ! – les trajectoires parcourues par les unités métamorphiques à l'intérieur de la Terre. Cette variation des conditions des recristallisations peut même s'observer au microscope sous la forme de réactions minéralogiques, en cours ou inachevées, parmi lesquelles les coronites sont particulièrement fascinantes.

L'étude et l'interprétation des roches et des séries métamorphiques est donc un processus compliqué qui fait appel à de nombreuses techniques, naturalistes, physiques, chimiques et thermodynamiques. L'acquisition de l'expérience nécessaire passe par un apprentissage, rude mais passionnant, sur le terrain et au laboratoire. Cet apprentissage peut être grandement facilité et raccourci en consultant les ouvrages pertinents. Celui de Christian Nicollet, que le lecteur a entre les mains, est certainement l'un des plus agréables à lire et à étudier. Sa présentation très pédagogique et les illustrations, nettes et convaincantes, ont tout pour séduire les étudiants comme les géologues plus chevronnés, et les conduire à une compréhension approfondie des mécanismes complexes des recristallisations métamorphiques dans leurs contextes géodynamiques.

Jacques KORNPROBST

Ancien président de la Société géologique de France

*Ancien président de la Société française
de minéralogie et cristallographie*

*Directeur honoraire de l'observatoire
de physique du globe de Clermont-Ferrand*

TABLE DES MATIÈRES

Préface	V
Avant-propos	XIII
Remerciements	XV

PARTIE I

MÉTAMORPHISME ET PROCESSUS MÉTAMORPHIQUES

Chapitre 1 • Le métamorphisme : définition, limites et variables	3
1.1 Définition du métamorphisme	3
1.2 Les limites du métamorphisme	6
1.3 La température, la pression et les fluides dans le globe terrestre	7
Chapitre 2 • Les roches métamorphiques : des marqueurs des perturbations thermiques et mécaniques dans la lithosphère	17
2.1 Évolution PT, trajet PTt et géothermes	18
2.2 Pourquoi les roches recristallisent-elles ?	19
2.3 Le trajet PTt et le gradient métamorphique	22
2.4 Trajets PTt et contextes géodynamiques	24
Chapitre 3 • Les roches métamorphiques : localisation, textures, structures et classification	27
3.1 Localisation géographique des roches métamorphiques	27
3.2 Cartographie du métamorphisme - Minéraux index et isogrades du métamorphisme	31
3.3 Localisation des roches métamorphiques dans l'espace P-T	32
3.4 Structures et textures	37
3.5 Structures et contraintes	38
3.6 Les principales textures des roches métamorphiques	42
3.7 Nomenclature des roches métamorphiques	44

Table des matières

Chapitre 4 • Relations chronologiques entre déformation et recristallisation métamorphique	46
4.1 Structure et relations chronologiques cristallisation-déformation	46
4.2 Un exemple de relation cristallisation-déformation : le métamorphisme hercynien au Cap Creus (Espagne)	52
4.3 Trajets PTt et chronologie	53
Chapitre 5 • Le rôle de la composition chimique sur la minéralogie des roches métamorphiques	59
5.1 Les différentes séquences métamorphiques	59
5.2 La règle des phases	61
5.3 La représentation graphique des paragenèses	62
Exercices	71
Chapitre 6 • Les réactions métamorphiques	78
6.1 Interprétation thermodynamique sommaire d'une réaction minéralogique	79
6.2 Réactions solide-solide entre minéraux anhydres	80
6.3 Réactions entre solide-solide hydraté ou réactions de dévolatilisation et libération de fluides	84
6.4 Le métamorphisme est-il isochimique ?	88
Exercice	91
Chapitre 7 • Analyse géométrique des réactions métamorphiques et élaboration d'une grille pétrogénétique	94
7.1 Système à un constituant indépendant	95
7.2 Système à deux constituants indépendants	96
7.3 Système à trois constituants indépendants et élaboration d'une grille pétrogénétique	98
7.4 Système à plus de trois constituants indépendants	101
Exercices	101
Chapitre 8 • Les réactions métamorphiques multivariantes : thermométrie et barométrie géologiques	105
8.1 Réaction continue et réaction discontinue	106
8.2 Le principe de la géothermobarométrie	111
8.3 Un thermomètre basé sur la réaction d'échange fer-magnésium entre biotite et grenat	112
8.4 Un exemple de géothermobaromètre basé sur l'équilibre cordiérite = grenat + sillimanite + quartz + H ₂ O	114

8.5 Les logiciels de calculs thermodynamiques multi-équilibres	116
8.6 Précautions d'utilisation de la géothermobarométrie	119
8.7 Étude des inclusions fluides : caractérisation de la phase fluide et géothermobarométrie	120
Exercice	123
Chapitre 9 • Cinétique des réactions et préservation des roches métamorphiques	124
9.1 Qu'est-ce que la vitesse de réaction ?	124
9.2 Quels sont les facteurs qui contrôlent une réaction ?	125
9.3 Métastabilité des paragenèses : l'exemple des silicates d'alumine	127
9.4 Cinétique de réaction et préservation des roches métamorphiques	130
Chapitre 10 • Migmatisation et anatexie	132
10.1 Définition des migmatites et de l'anatexie	132
10.2 Origines des migmatites	134
10.3 Fusion partielle des métapélites	134
10.4 Migmatites, granites, charnockites et faciès granulite	136
Exercice	142

PARTIE II

MÉTAMORPHISME ET GÉODYNAMIQUE

Chapitre 11 • Le métamorphisme de contact	147
11.1 L'auréole de contact de l'intrusion de Ballachulish	147
11.2 Diffusion de la chaleur dans l'encaissant et modélisation du métamorphisme de contact	150
Chapitre 12 • Les métamorphismes de haute pression et ultra-haute pression-basse température : l'exemple alpin	154
12.1 Les Alpes : de la subduction à la collision	155
12.2 La carte métamorphique des Alpes occidentales	156
12.3 Lithologies et associations minéralogiques types	158
12.4 Le métamorphisme sur la transversale Queyras-Viso-Dora Maira dans les Alpes occidentales	163
12.5 Le métamorphisme d'ultra-haute pression (UHP) dans le monde	165
12.6 Exhumation des unités de HP-UHP	167
12.7 Les reliques de HP dans le dôme Léontin, Alpes centrales	175

Table des matières

Chapitre 13 • Le métamorphisme de moyenne pression-haute température	179
13.1 La série métamorphique de moyenne pression-haute température du massif du Lévezou	179
13.2 Le gradient métamorphique de moyenne pression : un coup de frein à l'enfouissement	183
13.3 Sous-charriage et métamorphisme inverse	192
Exercice	195
Chapitre 14 • Le métamorphisme de basse pression-haute température dans les zones de convergence	202
14.1 Arrière-subduction et ceintures métamorphiques doubles	203
14.2 Hypercollision et dômes migmatitiques dans la croûte continentale médiane – la chaîne hercynienne d'Europe occidentale	205
14.3 Le magmatisme infracrustal et les granulites tardives de moyenne pression de la croûte inférieure	215
14.4 La croûte inférieure des marges actives et arcs insulaires	219
14.5 Métamorphisme d'ultra-haute température (UHT)	220
Exercice	227
Chapitre 15 • Métamorphisme de basse pression-haute température dans les zones d'extension	230
15.1 Amincissement lithosphérique et déchirure crustale : le métamorphisme de la zone nord-pyrénéenne	230
15.2 Métamorphisme océanique et hydrothermalisme dans la lithosphère océanique et dans les ophiolites	235
Exercice	254
Chapitre 16 • Les granulites et éclogites dans le manteau : magmatisme intra-mantellique et recyclage de la lithosphère océanique	257
16.1 Mode de gisement des roches du manteau	257
16.2 Les xénolithes du plateau océanique des îles Kerguelen : magmatisme et métamorphisme intra-mantellique	258
16.3 Les éclogites du manteau supérieur : cristallisation à haute pression d'un magma basaltique ou témoins des océans engloutis dans le manteau ?	260
Chapitre 17 • En guise de conclusion : évolution du métamorphisme dans le temps	263
17.1 Un modèle simplifié d'évolution thermique d'une chaîne de montagnes	264
17.2 Évolution du métamorphisme au cours du temps	268

Annexes	273
Références des articles et ouvrages cités dans le texte	280
Légendes complètes des planches couleurs	289
Index	299

AVANT-PROPOS

La dynamique de la Terre est conditionnée, depuis sa genèse, par son évolution thermique. C'est la dissipation de l'énergie thermique qui fait fonctionner la machine Terre. Volcanisme et flux de chaleur sont des exemples manifestes de l'énergie thermique interne du globe : ils résultent des transferts de la chaleur, des profondeurs du globe vers la surface, associés au lent refroidissement de notre planète. De même, la tectonique des plaques est liée à de vastes mouvements de convection dans le manteau dont le moteur est l'énergie thermique.

Pour nous renseigner sur la situation thermique à l'intérieur de la lithosphère, à différents moments de son histoire, il nous faut trouver des « fossiles », des traceurs qui ont enregistré cette situation thermique et les perturbations éventuelles. Les roches métamorphiques représentent de tels témoins. Elles ont subi des transformations minéralogiques, à l'état solide, lorsque la température et la pression, c'est-à-dire la profondeur changeaient. Ainsi, les roches métamorphiques nous informent sur les variations de la T en fonction de la profondeur.

L'objectif de cet ouvrage est de faire le lien entre les processus métamorphiques et l'évolution géodynamique de la Terre. Dans ce but, ce précis est divisé en deux parties. La première concerne la définition du métamorphisme, les causes qui en sont responsables et les processus pétrogénétiques qui en permettent la réalisation. Nous tenterons de répondre à des questions telles que : Quelles variables interviennent, en dehors des seules P et T ? Pourquoi et comment les roches recrystallisent-elles ? Comment interpréter un assemblage de minéraux en fonction de ces variables ? En terme de trajet P-T-temps ? Quelles relations existent entre ce trajet P-T-temps et le contexte géodynamique ? Comment fabrique-t-on les outils de mesure des roches métamorphiques : diagrammes de phases, grilles pétrogénétiques, géothermobaromètres ?

Cette première partie comprend dix chapitres de difficultés variables. Certains chapitres sont incontournables. Les chapitres 1 à 4 introduisent les définitions et nomenclatures des roches métamorphiques ; ils mettent en place le vocabulaire du pétrologue du métamorphisme. Le chapitre 2 est important, car il présente, avant de les détailler dans les chapitres suivants, les processus métamorphiques et la méthodologie qui nous permet de faire le lien entre métamorphisme et géodynamique interne. Le chapitre 9 donne une approche qualitative de la cinétique des processus métamorphiques : celle-ci permet de comprendre dans quelles mesures une roche qui est portée dans de nouvelles conditions P et T enregistre minéralogiquement ou non (ou partiellement) ces nouvelles conditions. Selon le niveau d'approfondissement

souhaité, le lecteur peut reporter à plus tard la lecture de certains chapitres. Il en est ainsi pour le chapitre 7 traitant de l'élaboration des grilles pétrogénétiques ou bien du chapitre 8 présentant la thermobarométrie. Dans la deuxième partie, en appliquant les outils présentés dans la première partie, nous discutons, à l'aide d'exemples régionaux, principalement français, des interprétations géodynamiques – c'est-à-dire les processus évolutifs à l'intérieur de la Terre et l'analyse des forces dont ils résultent – qui peuvent être faites à partir de l'étude des roches métamorphiques. Le plan de cette deuxième partie s'organise autour des trois gradients métamorphiques principaux : HP-BT, MP-HT et BP-HT. La majorité des formations métamorphiques a évolué selon ces trois gradients métamorphiques dont aucun ne coïncide avec le géotherme d'une lithosphère stable. Ainsi, les roches métamorphiques enregistrent les perturbations qu'a subies la lithosphère dans différents contextes géodynamiques.

Pour conclure, nous présentons un modèle simplifié de l'évolution du métamorphisme au cours d'un cycle orogénique et discutons de l'évolution du métamorphisme au cours du temps, depuis le début de l'histoire de notre globe.

Dans cette nouvelle édition, le cahier couleur s'épaissit en passant de 8 à 16 planches. C'est l'occasion de présenter macroscopiquement et microscopiquement des échantillons de roches types. Mais aussi d'illustrer des paragraphes comme par exemple, celui relatif au Cap Creus, ou bien celui concernant l'anatexie.

De nouveaux points sont également développés : la genèse du litage métamorphique, lequel est à l'origine de modifications chimiques significatives ; les superbes migmatites de Port Navalo dans le Morbihan, montrant la complexité de la fusion partielle, en deux étapes ; ou l'étude la croûte continentale inférieure qui est complétée par celle des marges actives et arcs insulaires, sites géodynamiques où cette croûte continentale est créée.

Le lecteur aura tout intérêt à compléter la lecture de cet ouvrage en visitant le site : <http://christian.nicollet.free.fr/> dédié à la pétrologie. Les deux sont complémentaires : le livre privilégie le discours ; le site web privilégie l'image. La page <http://christian.nicollet.free.fr/page/LivreMetam/MetamGeodyn.html> fait le lien entre cet ouvrage et ce site. Elle a pour but de diriger le lecteur vers les photos nombreuses sur ce site susceptibles d'illustrer le texte du livre. Des animations et illustrations en 3D sont également disponibles. Certains processus non métamorphiques ne sont pas toujours développés dans l'ouvrage, mais nécessitent parfois des explications qui peuvent être disponibles sur le site.

Dans le texte qui suit, les nombreux minéraux sont souvent cités par leurs abréviations. Ces abréviations, proposées par Kretz (1983), sont listées dans l'annexe à la fin de cet ouvrage.

REMERCIEMENTS

Il y a dix ans, je commençais un site Web dédié au métamorphisme. Il s'agissait alors de rendre accessibles à mes étudiants les illustrations de mon cours. L'idée de doubler ce travail d'un manuel sur le métamorphisme était assez logique. Jacques Kornprobst m'en a donné l'opportunité en me proposant aimablement de prendre le relais de son ouvrage classique *Métamorphisme et roches métamorphiques*. Jacques m'a donné carte blanche pour utiliser son texte et ses figures. Au fil des pages, on retrouvera une vingtaine de figures et quelques pages que je lui ai empruntées. Jacques est indéniablement l'instigateur de ce manuel et je l'en remercie !

Mes remerciements iront également à tous ceux avec qui j'ai eu l'occasion d'étudier le métamorphisme, à tous ceux qui ont bien voulu lire complètement ou en partie cet ouvrage : J. Marchand, J.-P. Bard, B. Lasnier, R.-P. Ménot, F. Cariou, L. France, S. Guillot, S. Schwartz, M. Fagot-Barraly, P. Goncalves, C. Laverne, V. Bosse, S. Duchêne, J.-M. Lardeaux, J.-E. Martelat, F. Faure, A. Leyreloup, D. Vielzeuf, J. Bouloton, T. Hammouda, Y. Rolland, J.-M. Montel, J.-C. Gehan, J. Barbosa, G. Gosso, I. Spalla, S. Harley, E. Grew, R. Rakotondrazafy, R. Rambeloson, les étudiants de Toliary, d'Antanarivo, de Clermont-Ferrand, de Lyon et tous les autres...

La Société suisse de minéralogie et pétrographie, les revues *Géologie de la France*, *Journal of metamorphic geology* et *Tectonophysics*, la CCGM et S. Schwartz sont remerciés pour avoir permis l'utilisation de quelques figures et des portions des cartes des Alpes (planches 4 et 5).

Partie I

Métamorphisme et processus métamorphiques

