

SCIENCES SUP



Cours et exercices corrigés

MÉTAMORPHISME ET GÉODYNAMIQUE

Préface de Jacques Kornprobst



Christian Nicollet

DUNOD

TABLE DES MATIÈRES

Préface	V
Avant-propos	XIII

PARTIE I

MÉTAMORPHISME ET PROCESSUS MÉTAMORPHIQUES

Chapitre 1 • Le métamorphisme : définition, limites et variables	3
1.1 Définition du métamorphisme	3
1.1.1 Recristallisation et équilibre	3
1.1.2 Préservation des roches métamorphiques et métastabilité	5
1.2 Les limites du métamorphisme	6
1.2.1 Diagenèse et métamorphisme	6
1.2.2 La limite à hautes températures et anatexie	7
1.3 La température, la pression et les fluides dans le globe terrestre	7
1.3.1 Température et chaleur	7
1.3.2 Pression et profondeur	12
1.3.3 Les fluides	13
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
3.1.1 Les différents types de métamorphismes	27
3.1.2 Répartition des roches métamorphiques à la surface du globe	28
3.1.3 Répartition des roches métamorphiques sur un profil de la croûte	29

Table des matières

3.2	Cartographie du métamorphisme - Minéraux index et isogrades du métamorphisme	31
3.3	Localisation des roches métamorphiques dans l'espace P-T	32
3.3.1	Les limites du métamorphisme et les faciès métamorphiques	32
3.3.2	Les principaux gradients métamorphiques	35
3.4	Structures et textures	37
3.4.1	La recristallisation dynamique	37
3.4.2	La recristallisation statique	38
3.5	Structures et contraintes	38
3.5.1	Schistosité et foliation	39
3.5.2	Les linéations	39
3.6	Les principales textures des roches métamorphiques	41
3.7	Nomenclature des roches métamorphiques	43
Chapitre 4 • Relations chronologiques entre déformation et recristallisation métamorphique		45
4.1	Structure et relations chronologiques cristallisation-déformation	45
4.1.1	La chronologie des phases de déformation	45
4.1.2	Relations chronologiques cristallisation-déformation	47
4.1.3	La dimension des structures	50
4.2	Un exemple de relation cristallisation-déformation : le métamorphisme hercynien au Cap Creus (Espagne)	51
4.3	Trajets PTt et chronologie	54
Chapitre 5 • Le rôle de la composition chimique sur la minéralogie des roches métamorphiques		58
5.1	Les différentes séquences métamorphiques	58
5.2	La règle des phases	60
5.3	La représentation graphique des paragenèses	61
5.3.1	Système à 2 constituants	61
5.3.2	Système à 3 constituants	62
5.3.3	Système à n constituants – le diagramme ACF pour les roches de la séquence basique	63
5.3.4	Système à n constituants – les diagrammes A'KF et AFM pour les roches de la séquence pélitique	67
5.3.5	Représentation graphique des paragenèses des faciès métamorphiques	70
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
6.2.1	Réactions de transition polymorphique : les silicates d'alumine	80

31	6.2.2 Réactions d'exsolution	82
32	6.2.3 Réactions interminérales solide-solide entre minéraux anhydres	83
32	6.3 Réactions entre solide-solide hydraté ou réactions de dévolatilisation et libération de fluides	84
35	6.3.1 Eau, pente des réactions métamorphiques et rétro-morphose	84
37	6.3.2 Pression partielle de fluide et champ de stabilité des phases hydratées et carbonatées	85
37		
38	6.3.3 Infiltration de la phase vapeur ou système fermé aux fluides extérieurs	88
38	6.4 Le métamorphisme est-il isochimique ?	88
39	6.4.1 Le quartz d'exsudation	88
39	6.4.2 Réactions de lessivage	89
41		
43	Chapitre 7 • Analyse géométrique des réactions métamorphiques et élaboration d'une grille pétrogénétique	94
	7.1 Système à un constituant indépendant	95
45	7.2 Système à deux constituants indépendants	96
45	7.3 Système à trois constituants indépendants et élaboration d'une grille pétrogénétique	98
45		
47	7.4 Système à plus de trois constituants indépendants	101
50		
51	Chapitre 8 • Les réactions métamorphiques multivariantes : thermométrie et barométrie géologiques	105
54	8.1 Réaction continue et réaction discontinue	106
	8.1.1 La réaction continue $Chl + Ms = St + Bt + Qtz + V$	106
	8.1.2 La réaction continue $Bt + Sil + Qtz = Grt + Kfs + V$	109
58	8.2 Le principe de la géothermobarométrie	111
58		
60	8.3 Un thermomètre basé sur la réaction d'échange fer-magnésium entre biotite et grenat	112
61	8.4 Un exemple de géothermobaromètre basé sur l'équilibre cordiérite = grenat + sillimanite + quartz + H ₂ O	114
61		
62	8.5 Les logiciels de calculs thermodynamiques multi-équilibres	116
63	8.6 Précautions d'utilisation de la géothermobarométrie	119
67	8.7 Étude des inclusions fluides : caractérisation de la phase fluide et géothermobarométrie	120
70	8.7.1 Composition des inclusions fluides	122
78	8.7.2 Caractérisation des isochores et thermobarométrie	122
79	Chapitre 9 • Cinétique des réactions et préservation des roches métamorphiques	124
80	9.1 Qu'est-ce que la vitesse de réaction ?	124
80		

Table des matières

9.2	Quels sont les facteurs qui contrôlent une réaction ?	125
9.2.1	La vitesse de diffusion	125
9.2.2	L'influence de la phase vapeur	125
9.2.3	L'influence de la déformation	126
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	133
10.3	Fusion partielle des métapélites	134
10.4	Migmatites, granites, charnockites et faciès granulite	135
10.4.1	Influence de l'eau sur la transition faciès amphibolite-faciès granulite et anatexie	136
10.4.2	Migmatites et granites	138
10.4.3	Charnockites et gneiss charnockitiques	139

PARTIE II

MÉTAMORPHISME ET GÉODYNAMIQUE

Chapitre 11 • Le métamorphisme de contact 145

11.1	L'auréole de contact de l'intrusion de Ballachulish	145
11.2	Diffusion de la chaleur dans l'encaissant et modélisation du métamorphisme de contact	148

Chapitre 12 • Les métamorphismes de haute pression et ultra-haute pression-basse température : l'exemple alpin 152

12.1	Les Alpes : de la subduction à la collision	153
12.2	La carte métamorphique des Alpes occidentales	154
12.3	Lithologies et associations minéralogiques types	156
12.4	Le métamorphisme sur la transversale Queyras-Viso-Dora Maira dans les Alpes occidentales	161
12.5	Le métamorphisme d'ultra-haute pression (UHP) dans le monde	163
12.6	Exhumation des unités de HP-UHP	165
12.6.1	L'évolution rétrograde sur la transversale Queyras-Viso-Dora Maira	166
12.6.2	Des modèles d'exhumation	169
12.7	Les reliques de HP dans le dôme Lépointin, Alpes centrales	173

125	Chapitre 13 • Le métamorphisme de moyenne pression-haute température	177
125	13.1 La série métamorphique de moyenne pression-haute température	
125	du massif du Lévezou	177
126	13.2 Le gradient métamorphique de moyenne pression : un coup de frein	
127	à l'enfouissement	181
130	13.2.1 Les reliques de HP et leur évolution rétrograde	182
	13.2.2 De la subduction à la collision	188
	13.2.3 Rareté et préservation du faciès des Schistes bleus	
132	dans les chaînes anciennes	189
132	13.3 Sous-charriage et métamorphisme inverse	190
133		
134	Chapitre 14 • Le métamorphisme de basse pression-haute température	
134	 dans les zones de convergence	200
135	14.1 Arrière-subduction et ceintures métamorphiques doubles	201
136	14.2 Hypercollision et dômes migmatitiques dans la croûte continentale	
138	médiane – la chaîne hercynienne d'Europe occidentale	203
139	14.2.1 Le massif hercynien nord-pyrénéen de l'Agly	204
	14.2.2 Le massif du Pilat et le dôme anatectique du Velay	207
	14.2.3 La Montagne Noire : dôme gneissique extensif ou anticlinal post-nappe ?	210
	14.2.4 Vitesses d'exhumation et gradients métamorphiques	211
	14.3 Le magmatisme infracrustal et les granulites tardives de moyenne pression	
	de la croûte inférieure – la zone d'Ivrée	213
145	14.3.1 Le magmatisme infracrustal et les granulites tardives de moyenne pression	213
145	14.3.2 Zone d'Ivrée et différenciation de la croûte	213
	14.4 Métamorphisme d'ultra-haute température (UHT)	216
148	14.4.1 Les granulites de UHT de la formation d'Andriamena (Madagascar)	218
152	Chapitre 15 • Métamorphisme de basse pression-haute température	
152	 dans les zones d'extension	223
153	15.1 Amincissement lithosphérique et déchirure crustale : le métamorphisme	
154	de la zone nord-pyrénéenne	223
156	15.1.1 La zone nord-pyrénéenne (ZNP) : couloir d'amincissement lithosphérique	
	au Crétacé	223
	15.1.2 Le métamorphisme de basse pression dans la ZNP	225
161	15.1.3 La ZNP : métamorphisme et « transtension » senestre intracontinentale	228
163	15.2 Métamorphisme océanique et hydrothermalisme dans la lithosphère	
165	océanique et dans les ophiolites	228
166	15.2.1 Le métamorphisme océanique au niveau des dorsales rapides	231
169	15.2.2 Le métamorphisme océanique au niveau des dorsales lentes	235
173	15.2.3 La semelle métamorphique des ophiolites	244
	15.2.4 En conclusion	244

Table des matières

Chapitre 16 • Les granulites et éclogites dans le manteau : magmatisme intra-mantellique et recyclage de la lithosphère océanique	249
16.1 Mode de gisement des roches du manteau	249
16.2 Les xénolithes du plateau océanique des îles Kerguelen : magmatisme et métamorphisme intra-mantellique	250
16.3 Les éclogites du manteau supérieur : cristallisation à haute pression d'un magma basaltique ou témoins des océans engloutis dans le manteau ?	252
Chapitre 17 • En guise de conclusion : évolution du métamorphisme dans le temps	255
17.1 Un modèle simplifié d'évolution thermique d'une chaîne de montagnes	256
17.2 Évolution du métamorphisme au cours du temps	260
Annexe	265
1. Diagrammes ACF-A'KF	265
2. Abréviations des minéraux d'après Kretz (1983) et Fettes et Desmons (2007)	268
3. Formules structurales des principaux minéraux	269
4. Quelques assemblages minéralogiques caractéristiques des principaux faciès métamorphiques	271
Références des articles et ouvrages cités dans le texte	272
Légendes complètes des planches couleurs	280
Index	285

La dynamique de la Terre est un processus thermique. C'est la dissipation de l'énergie thermique interne du globe par conduction, convection et tectonique des plaques qui permet de maintenir le manteau dont le moteur est le

Pour nous renseigner sur les conditions de différents moments de son histoire, les géologues ont enregistré cette évolution à travers les roches métamorphiques. Les conditions minéralogiques, à l'échelle locale, la profondeur changeaient. Les variations de la T en fonction du temps

L'objectif de cet ouvrage est de décrire l'évolution géodynamique des différentes parties. La première partie concerne les processus qui sont responsables et les processus qui sont en dehors des seules P et T. Comment interpréter un assemblage minéralogique en terme de trajet P-T-temps dans un contexte géodynamique ? Les roches métamorphiques : diagrammes

Cette première partie des chapitres sont incontournables pour la nomenclature des roches métamorphiques et le pétrologue du métamorphisme. Nous ne les détailler dans les chapitres de géologie qui nous permet de comprendre la dynamique interne. Le chapitre 9 décrit les roches métamorphiques : celles-ci sont classées qui est portée dans de nombreux ouvrages. Si non (ou partiellement) ce que vous souhaitez, le lecteur peut consulter les ouvrages ainsi pour le chapitre 7 traitant de la tectonique du chapitre 8 présentant les outils présentés dans les chapitres régionaux, principalement

SCIENCES SUP

Christian Nicollet

MÉTAMORPHISME ET GÉODYNAMIQUE

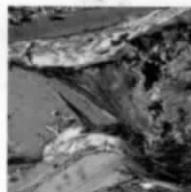
Cet ouvrage destiné aux étudiants en Licence (L3) de Sciences de la Terre et de l'Univers et en Master, intéressera également les candidats au Capes et à l'agrégation de SVT.

Ce manuel explicite le phénomène du métamorphisme des roches, c'est-à-dire l'ensemble des transformations entraînant un réarrangement à l'échelle atomique des éléments d'une roche. Ces transformations sont provoquées par des changements de température, de pression ou de la nature des fluides.

Ce cours a pour objectif de relier les processus métamorphiques avec l'évolution géodynamique de la Terre. Il se compose de deux parties.

- La première partie propose la définition et les causes du métamorphisme, ainsi que les processus pétrogénétiques.
- À partir d'exemples régionaux et grâce à l'étude de roches métamorphiques, la seconde partie fournit des interprétations géodynamiques aux processus évolutifs se produisant à l'intérieur de la Terre.

Ce cours abondamment illustré et agrémenté d'un cahier couleur, propose aussi de nombreux exercices corrigés. Des suppléments sont proposés sur le Web.



CHRISTIAN NICOLLET
est professeur à l'université
Blaise-Pascal de Clermont-
Ferrand.

MATHÉMATIQUES

PHYSIQUE

CHIMIE

SCIENCES DE L'INGÉNIEUR

INFORMATIQUE

SCIENCES DE LA VIE

SCIENCES DE LA TERRE

