

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

6.2.2 Réactions d'exsolution	82
6.2.3 Réactions interminérales solide-solide entre minéraux anhydres	83
6.3 Réactions entre solide-solide hydraté ou réactions de dévolatilisation et libération de fluides	84
6.3.1 Eau, pente des réactions métamorphiques et rétromorphose	84
6.3.2 Pression partielle de fluide et champ de stabilité des phases hydratées et carbonatées	85
6.3.3 Infiltration de la phase vapeur ou système fermé aux fluides extérieurs	88
6.4 Le métamorphisme est-il isochimique ?	88
6.4.1 Le quartz d'exsudation	88
6.4.2 Réactions de lessivage	89
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
Chapitre 8 • Les réactions métamorphiques multivariantes : thermométrie et barométrie géologiques	105
8.1 Réaction continue et réaction discontinue	106
8.1.1 La réaction continue $\text{Chl} + \text{Ms} = \text{St} + \text{Bt} + \text{Qtz} + \text{V}$	106
8.1.2 La réaction continue $\text{Bt} + \text{Sil} + \text{Qtz} = \text{Grt} + \text{Kfs} + \text{V}$	109
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_2O	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
8.7.1 Composition des inclusions fluides	122
8.7.2 Caractérisation des isochores et thermobarométrie	122
Chapitre 9 • Cinétique des réactions et préservation des roches métamorphiques	124
9.1 Qu'est-ce que la vitesse de réaction ?	124

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

Chapitre 13 • Le métamorphisme de moyenne pression-haute température 177

13.1 La série métamorphique de moyenne pression-haute température du massif du Lézou	177
13.2 Le gradient métamorphique de moyenne pression : un coup de frein à l'enfouissement	181
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 dans les chaînes anciennes	189
13.3 Sous-charriage et métamorphisme inverse	190

**Chapitre 14 • Le métamorphisme de basse pression-haute température
dans les zones de convergence 200**

14.1 Arrière-subduction et ceintures métamorphiques doubles	201
14.2 Hypercollision et dômes migmatitiques dans la croûte continentale médiane – la chaîne hercynienne d'Europe occidentale	203
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
14.3.1 Le magmatisme infracrustal et les granulites tardives de moyenne pression	213
14.3.2 Zone d'Ivrée et différenciation de la croûte	213
14.4 Métamorphisme d'ultra-haute température (UHT)	216
14.4.1 Les granulites de UHT de la formation d'Andriamena (Madagascar)	218

**Chapitre 15 • Métamorphisme de basse pression-haute température
dans les zones d'extension 223**

15.1 Amincissement lithosphérique et déchirure crustale : le métamorphisme de la zone nord-pyrénéenne	223
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
15.1.3 La ZNP : métamorphisme et « transtension » senestre intracontinentale	228
15.2 Métamorphisme océanique et hydrothermalisme dans la lithosphère océanique et dans les ophiolites	228
15.2.1 Le métamorphisme océanique au niveau des dorsales rapides	231
15.2.2 Le métamorphisme océanique au niveau des dorsales lentes	235
15.2.3 La semelle métamorphique des ophiolites	244
15.2.4 En conclusion	244

Table des matières

Chapitre 16 • Les granulites et élogites 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 élogites 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

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



9 782100 522682

6673537

ISBN 978-2-10-052268-2

