

# AVANT-PROPOS et TABLE DES MATIERES

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 ont 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.

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.

# Première partie : METAMORPHISME ET PROCESSUS METAMORPHIQUES

## Chapitre 1 - Le métamorphisme : définition, limites et variables

- 1.1 Définition du métamorphisme
  - 1.1.1 Recristallisation et équilibre
  - 1.1.2 Préservation des roches métamorphiques et métastabilité
- 1.2 Les limites du métamorphisme
  - 1.2.1 Diagenèse et métamorphisme
  - 1.2.2 La limite à hautes températures et anatexie
- 1.3 La température, la pression et les fluides dans le globe terrestre
  - 1.3.1 Température et chaleur
    - a) Flux de chaleur et production de chaleur ; b) Isothermes et géothermes c) Equation du géotherme
  - 1.3.2 Pression et profondeur
    - La pression lithostatique ; Le déviateur des contraintes
  - 1.3.3 Les fluides
    - Situation des fluides dans une roche ; Fluides libres ; Fluides adsorbés sur les surfaces cristallines ; « Fluides liés » ; « Fluides dissous » dans les liquides silicatés

## Chapitre 2 - Les roches métamorphiques : des marqueurs des perturbations thermiques et mécaniques dans la lithosphère

- 2.1 Evolution PT, trajet PTt et géothermes
- 2.2 Pourquoi les roches recristallisent-elles ?
- 2.3 Le trajet PTt et le gradient métamorphique
- 2.4 Trajets PTt et contextes géodynamiques :
- En conclusion : que préservent les roches métamorphiques ?

## Chapitre 3 - Les roches métamorphiques : localisation, textures, structures et classification

- 3.1 Localisation géographique des roches métamorphiques
  - 3.1.1 Les différents types de métamorphismes
  - 3.1.2 Répartition des roches métamorphiques à la surface du globe
  - 3.1.3 Répartition des roches métamorphiques sur un profil de la croûte
- 3.2 Cartographie du métamorphisme - Minéraux index et isogradés du métamorphisme
- 3.3 Localisation des roches métamorphiques dans l'espace P- T

- 3.3.1 Les limites du métamorphisme et les faciès métamorphiques
- 3.3.2 Les principaux gradients métamorphiques
  - a) le gradient de HP-BT ; b) le gradient de MP-HT ; c) le gradient de BP-HT

HT

- 3.4 Structures et textures.
  - 3.4.1 La recristallisation dynamique
  - 3.4.2 La recristallisation statique
- 3.5 Structures et contraintes
  - 3.5.1 Schistosité et foliation
  - 3.5.2 Les linéations

La linéation d'intersection ; La linéation d'allongement ou d'étirement ; La linéation minérale

- 3.6 Les principales textures des roches métamorphiques
- 3.7 Nomenclature des roches métamorphiques

a) Nature du protolithe ; b) textures des roches ; c) Composition minéralogique des roches

## Chapitre 4 Relations géochronologiques entre déformation et recristallisation métamorphique

- 4.1 Structures et relations chronologiques cristallisation-déformation
  - 4.1.1 La chronologie des phases de déformation
  - 4.1.2 Relations chronologiques cristallisation - déformation
    - 4.1.2 a Les phases antécinématiques
    - 4.1.2 b Les phases syncinématiques
    - 4.1.2 c Les phases postcinématiques
  - 4.1.3 La dimension des structures

4.2 Un exemple de relation cristallisation – déformation : le métamorphisme hercynien au Cap Creus (Espagne)

- 4.3 Trajets PTt et chronologie

## Chapitre 5 - Le rôle de la composition chimique sur la minéralogie des roches métamorphiques

- 5.1 Les différentes séquences métamorphiques
- 5.2 La règle des phases
- 5.3 La représentation graphique des paragenèses
  - 5.3.1 Système à 2 constituants
  - 5.3.2 Système à 3 constituants

5.3.3 Système à n constituants – le diagramme ACF pour les roches de la séquence basique

Système chimique anhydre ; Système chimique hydraté

5.3.4 Système à n constituants – les diagrammes A'KF et AFM pour les roches de la séquence pélitique

5.3.5 Représentation graphique des paragenèses des faciès métamorphiques

### **Exercices**

1.1 : Représentation graphique des paragenèses.

2.2 : Les paragenèses d'un gradient métamorphique.

## **Chapitre 6 - Les réactions métamorphiques**

6.1 Interprétation thermodynamique sommaire d'une réaction minéralogique

6.2 Réactions solide-solide entre minéraux anhydres

6.2 .1 Réactions de transition polymorphique : les silicates d'alumine

6.2 .2 Réactions d'exsolution

6.2 .3 Réactions interminérales solide-solide entre minéraux anhydres :

6.3 : Réactions entre solide - solide hydraté ou réactions de dévolatilisation et libération de fluides

6.3.1 : Eau, pente des réactions métamorphiques et rétro-morphose

6.3.2 Pression partielle de fluide et champ de stabilité des phases hydratées et carbonatées

6.3.3 Infiltration de la phase vapeur ou système fermé aux fluides extérieurs

6.4 Le métamorphisme est-il isochimique ?

6.4.1 Le quartz d'exsudation :

6.4.2 Réactions de lessivage :

**Exercice** - Influence de la nature des fluides sur les paragenèses métamorphiques

## **Chapitre 7 - Analyse géométrique des réactions métamorphiques et élaboration d'une grille pétrogénétique**

7.1 Système à 1 constituant indépendant

7.2 Système à 2 constituants indépendants

7.3 SYSTEME A 3 CONSTITUANTS INDEPENDANTS ET ELABORATION D'UNE GRILLE PETROGENETIQUE

7.4 Système à plus de 3 constituants indépendants

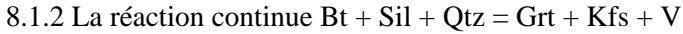
### **Exercices**

1.1 Construction d'une grille pétrogénétique.

1.2 Utilisation d'une grille pétrogénétique

## Chapitre 8 - Les réactions métamorphiques multivariantes : Thermométrie et barométrie géologiques

### 8.1 Réaction continue et réaction discontinue



### 8.2 Le principe de la géothermobarométrie

8.3 Un thermomètre basé sur la réaction d'échange Fer - Magnésium entre biotite et grenat

8.4 Un exemple de géothermobaromètre basé sur l'équilibre cordiérite = grenat + sillimanite + quartz +  $\text{H}_2\text{O}$

### 8.5 Les logiciels de calculs thermodynamiques multi-équilibres

### 8.6 Précautions d'utilisation de la géothermobarométrie

8.7 Etude des inclusions fluides : caractérisation de la phase fluide et géothermobarométrie

#### 8.7.1 Composition des inclusions fluides

#### 8.7.2 Caractérisation des isochores et thermobarométrie

**Exercice** - Prédiction de la succession des paragenèses d'une metabasite le long d'un trajet PTt

## Chapitre 9 - Cinétique des réactions et préservation des roches métamorphiques

### 9.1 Qu'est-ce que la vitesse de réaction ?

### 9.2 Quels sont les facteurs qui contrôlent une réaction ?

#### 9.2.1 La vitesse de diffusion

#### 9.2.2 L'influence de la phase vapeur

#### 9.2.3 L'influence de la déformation

### 9.3 Métastabilité des paragenèses : l'exemple des silicates d'alumine

### 9.4 Cinétique de réaction et préservation des roches métamorphiques

## Chapitre 10 - Migmatisation et anatexie

### 10.1 Définition des migmatites et de l'anatexie

### 10.2 Origines des migmatites

### 10.3 Fusion partielle des métagéolites

### 10.4 Migmatites, granites, charnockites et faciès granulite

10.4.1 Influence de l'eau sur la transition faciès amphibolite – faciès granulite et anatexie

#### 10.4.2 Migmatites et granites

#### 10.4.3 Charnockites et gneiss charnockitiques

**Exercice** – Anatexie et diagramme de phases

## Seconde partie : METAMORPHISME ET GEODYNAMIQUE

### Chapitre 11 - Le métamorphisme de contact

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

### Chapitre 12 - Le métamorphisme de haute pression (ultra haute pression) – basse température : l'exemple alpin

- 12.1 Les Alpes : de la subduction à la collision
- 12.2 La carte métamorphique des Alpes Occidentales  
Le schéma structural ; La cartographie du métamorphisme
- 12.3 Lithologies et associations minéralogiques types  
Les métasédiments ; Les méta-ophiolites ; Les méta-granitoïdes
- 12.4 Le métamorphisme sur la transversale Queyras – Viso – Dora Maira dans les Alpes occidentales  
L'unité des Schistes lustrés du Queyras ; L'unité éclogitique du Viso ; Le massif cristallin interne de Dora Maira
- 12.5 Le métamorphisme d'ultra haute pression (UHP) dans le monde  
Les âges des formations d'UHP ; La dimension des unités d'UHP
- 12.6 Exhumation des unités de HP-UHP
  - 12.6.1 L'évolution rétrograde sur la transversale Queyras – Viso – Dora Maira
  - 12.6.2 Des modèles d'exhumation
    - a) Exhumation dans le prisme d'accrétion ; b) Exhumation dans le chenal de subduction ; c) Exhumation des unités de HP-UHP dans les Alpes
- 12.7 Les reliques de HP dans le Dôme Lépointin, Alpes Centrales

### Chapitre 13 - Le métamorphisme de moyenne pression – haute température

- 13.1 La série métamorphique de moyenne pression – haute température du massif du Lévezou
- 13.2 Le gradient métamorphique de moyenne pression : un coup de frein à l'enfouissement
  - 13.2.1 Les reliques de HP et leur évolution rétrograde  
Les metabasites ; Les métapéridotites ; Les métapélites granulitiques
  - 13.2.2 De la subduction à la collision

13.2.3 Rareté et préservation du faciès des Schistes Bleus dans les chaînes anciennes

13.3 Sous charriage et métamorphisme inverse

### **Exercices**

1.1 : Influence de la composition chimique des roches sur leur minéralogie :

1.2 : Evolution rétrograde contrastée des éclogites des Monts du Lyonnais dans le Massif Central Français

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

14.1 Arrière subduction et ceintures métamorphiques doubles

14.2 Hypercollision et dômes migmatitiques dans la croûte continentale médiane – la chaîne hercynienne d'Europe occidentale

14.2.1 Le massif hercynien nord-pyrénéen de l'Agly

14.2.2 Le massif du Pilat et le dôme anatectique du Velay

14.2.3 La Montagne Noire : dôme gneissique extensif ou anticlinal post-nappe ?

14.2.4 Vitesses d'exhumation et gradients métamorphiques

14.3 Le magmatisme infracrustal et les granulites tardives de moyenne pression de la croûte inférieure – la Zone d'Ivrée

14.3.1 Le magmatisme infracrustal et les granulites tardives de moyenne pression

14.3.2 Zone d'Ivrée et différenciation de la croûte

14.4 Métamorphisme d'ultra haute température (UHT)

14.4.1 Les granulites de UHT de la formation d'Andriamena (Madagascar)

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

15.1 Amincissement lithosphérique et déchirure crustale : le métamorphisme de la Zone Nord Pyrénéenne

15.1.1 La zone Nord Pyrénéenne (ZNP) : couloir d'amincissement lithosphérique au Crétacé

15.1.2 Le métamorphisme de basse pression dans la ZNP

15.1.3 La ZNP : métamorphisme et «transtension» senestre intracontinentale

15.2 Métamorphisme océanique et Hydrothermalisme dans la lithosphère océanique et dans les ophiolites

15.2.1 Le métamorphisme océanique au niveau des dorsales rapides

a) L'ophiolite d'Oman

b) La croûte océanique de l'est pacifique



Le puits 504B dans la plaque de Nazca ; Le puits 1256D dans la plaque de Cocos ; Le site 894 : le métamorphisme des gabbros de Hess Deep

#### 15.2.2 Le métamorphisme océanique au niveau des dorsales lentes

a) Les ophiolites des Alpes

b) La croûte océanique des océans atlantique et indien

Le banc de Gorringe dans l'Atlantique ; Les métagabbros du puits 735B de la ride sud-ouest indienne

#### 15.2.3 La semelle métamorphique des ophiolites

#### 15.2.4 En conclusion

**Exercice** - Ophiolite du Chenaillet – La chronologie des événements magmatiques et métamorphiques au niveau d'une dorsale lente

## Chapitre 16 - Les granulites et éclogites dans le manteau : magmatisme intra-mantellique et recyclage de la lithosphère océanique

16.1 Mode de gisement des roches du manteau

16.2 Les xénolithes du plateau océanique des îles Kerguelen : magmatisme et métamorphisme intra-mantellique

16.3 Les éclogites du manteau supérieur : cristallisation à haute pression d'un magma basaltique ou témoins des océans engloutis dans le manteau ?

## Chapitre 17 - En guise de conclusion : évolution du métamorphisme dans le temps

17.1 Un modèle simplifié d'évolution thermique d'une chaîne de montagnes

17.2 Evolution du métamorphisme au cours du temps

## Annexe

1. Diagramme ACF-A'KF
2. Abréviations des minéraux
3. Formules structurales des principaux minéraux
4. Quelques assemblages minéralogiques caractéristiques des principaux faciès métamorphiques.

Références des articles et ouvrages cités dans le texte

Légendes complètes des planches couleurs

Index