

COLLECTION « INTERACTIONS »  
DIRIGÉE PAR PATRICK DE WEVER

ANNE NÉDÉLEC & JEAN-LUC BOUCHEZ

# PÉTROLOGIE DES GRANITES

STRUCTURE – CADRE GÉOLOGIQUE

LICENCE – MASTER – CAPES – AGRÉGATION

Vuibert

SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DE FRANCE



# Table des matières

Avant-propos .....	1
Remerciements .....	3
CHAPITRE 1. QU'EST-CE QU'UN GRANITE ? .....	5
1. Classifications .....	5
<i>E1 - Granite et granit</i> .....	6
2. Pétrographie .....	9
2.1. Texture .....	9
2.2. Minéralogie .....	10
3. Les granites : roches caractéristiques de la croûte continentale .....	11
3.1. Structure de la croûte continentale .....	11
3.2. Composition de la croûte continentale .....	13
4. Granites et roches associées .....	13
4.1. Notion de série magmatique .....	13
4.2. Types de granites et séries magmatiques .....	14
Conclusion.....	14
CHAPITRE 2. ORIGINE DES GRANITES ET FUSION CRUSTALE.....	15
1. Données d'observation : migmatites et granites .....	15
<i>E2 - Un peu d'histoire : du neptunisme au magmatisme moderne</i> .....	16
2. Données expérimentales .....	18
2.1. Les premiers travaux .....	18
2.2. Importance de l'eau .....	21
2.3. Expériences de fusion en présence de minéraux hydratés .....	23
3. Fertilité des protolithes crustaux et nature des liquides granitiques .....	27
4. Les isotopes, traceurs des sources .....	28
4.1. Le couple Rb-Sr et le traceur $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ .....	28
4.2. Le couple Sm-Nd et le traceur $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ .....	31
4.3. Couplage des traceurs Sr et Nd .....	32
4.4. Le rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ .....	33
<i>E3 - Intérêt paléothermométrie des isotopes de l'oxygène</i> .....	34
4.5. Application des traceurs isotopiques .....	35
Conclusion .....	38



CHAPITRE 3. SÉGRÉGATION DU LIQUIDE GRANITIQUE .....	39
1. Viscosité des liquides granitiques .....	39
<i>E4 - Viscosité en fonction de la composition, de la température</i> <i>et de la teneur en eau</i> .....	41
2. Comportement du liquide au cours de la fusion partielle .....	41
3. Expériences de fusion partielle progressive .....	42
3.1. Localisation du liquide dans un agrégat statique .....	43
3.2. Fusion d'un granite sous contrainte .....	43
3.3. Fusion partielle d'une amphibolite sous contrainte .....	45
4. Distribution du liquide dans les migmatites .....	46
4.1. Vitesse de ségrégation .....	48
4.2. Rôle de la réaction de fusion .....	50
4.3. Rôle de la compaction gravitaire .....	50
<i>E5 - Le filtre-presse : mode de compaction dynamique</i> .....	51
4.4. Fracturation assistée par la pression du liquide .....	51
5. Les migmatites sur le terrain .....	53
5.1. Le litage des migmatites .....	53
5.2. Les autres structures migmatitiques .....	53
Conclusion .....	55
CHAPITRE 4. MÉLANGES DE MAGMAS ET GRANITOÏDES HYBRIDES .....	57
1. Observations de terrain .....	57
2. Viscosité des magmas et mélange de magmas .....	58
<i>E6 - Viscosité d'une suspension : Einstein était aussi là</i> .....	59
3. Caractérisation des roches hybrides .....	61
3.1. Caractères minéralogiques .....	61
3.2. Caractères chimiques (majeurs et traces) .....	62
3.3. Signatures isotopiques .....	63
4. Les processus de mélange de magmas .....	64
4.1. Interdiffusion d'éléments dans les liquides silicatés .....	64
4.2. Transfert de liquide granitique dans un magma basique .....	65
4.3. Dispersion de magma basique dans un magma granitique .....	66
5. Où se forment les magmas hybrides? .....	67
Conclusion .....	69
CHAPITRE 5. TRANSPORT DU MAGMA GRANITIQUE .....	71
1. Le diapirisme .....	72
2. Le transport filonien .....	75
2.1. Analyse et ordres de grandeur .....	75
2.2. Relation source-transport .....	76



2.3. Rôle de la pression du magma .....	76
2.4. Fracturation de la croûte .....	77
2.5. Vitesse d'ascension .....	79
3. Les données de terrain .....	81
Conclusion .....	82
 CHAPITRE 6. MISE EN PLACE ET FORME DES PLUTONS GRANITQUES.....	83
1. Arrêt du transport vertical .....	83
<i>E7 - Mise en place en contexte extensif : petit exercice de mécanique</i> ...	84
2. Rencontre de sites dilatants .....	87
2.1. Fracturation en contexte extensif .....	87
2.2. Fracturation en contexte compressif .....	90
3. Mise en place dans la croûte ductile .....	93
3.1. Les sills et granites stratoïdes .....	94
3.2. Les dômes migmatitiques .....	95
4. Profondeur de mise en place .....	96
5. Forme tridimensionnelle des plutons .....	97
5.1. Carte de l'anomalie de Bouguer .....	98
5.2. Anomalie résiduelle et contraste de densité .....	98
5.3. Modélisation de la profondeur et de la forme du plancher .....	100
5.4. Forme des plutons .....	100
6. Mise en place forcée ou passive .....	103
Conclusion .....	104
 CHAPITRE 7. ASPECTS THERMOMÉCANIQUES DANS L'ENCAISSANT.....	105
1. Échanges de chaleur conductifs .....	105
<i>E8 - Transport conductif de chaleur : la vertu des variables</i> <i>nondimensionnelles</i> .....	106
2. Échanges de chaleur convectifs .....	109
3. Diachronisme du métamorphisme et modification rhéologique au contact ...	110
4. Paragenèses du métamorphisme de contact .....	111
4.1. Roches pélitiques .....	111
4.2. Roches carbonatées .....	114
5. Aspects thermomécaniques à l'échelle crustale .....	117
5.1. Métamorphisme de contact régional .....	117
5.2. Découplages crustaux et métamorphisme HT-BP .....	120
Conclusion .....	122



## CHAPITRE 8. LA CRISTALLISATION DES MAGMAS GRANITIQUES ..... 123

1. Généralités sur la nucléation et la croissance des cristaux .....	123
1.1. La nucléation .....	123
1.2. La croissance cristalline .....	125
1.3. Les distributions de tailles de grains (CSD) .....	126
1.4. Évolution de la cristallinité en fonction du temps et conséquences rhéologiques .....	130
2. Ordre de cristallisation des minéraux .....	132
2.1. Observations texturales .....	132
2.2. Influence de la composition du magma sur l'ordre de cristallisation ....	133
3. Cristallisation fractionnée et différenciation magmatique .....	136
3.1. La différenciation magmatique : historique .....	136
3.2. Mise en évidence de la cristallisation fractionnée .....	136
<i>E9 - Éléments compatibles et incompatibles</i> .....	139
3.3. Mécanismes de la cristallisation fractionnée .....	142
3.4. Assimilation et cristallisation fractionnée .....	143
4. Phénomènes tardi-magmatiques .....	144
4.1. Composition des liquides granitiques résiduels .....	144
4.2. Saturation en eau du magma et conséquences .....	145
4.3. Pegmatites et aplites .....	147
5. Transformations minéralogiques subsolidus .....	148
5.1. Altérations hydrothermales .....	148
5.2. Exsolutions .....	149
Conclusion .....	150

## CHAPITRE 9. MICROSTRUCTURES ET FABRIQUES DES GRANITES ..... 151

1. Microstructures des granites .....	151
<i>E10 - Une histoire de dislocation</i> .....	153
1.1. Microstructure magmatique .....	154
<i>E11 - De la microstructure à la nanostructure</i> .....	156
1.2. Microfractures « sub-magmatiques » .....	157
1.3. Microstructures de déformation à l'état solide .....	158
2. Fabrique des granites .....	160
2.1. Foliation et linéation .....	160
2.2. Origine des fabriques magmatiques .....	161
<i>E12 - Cisaillement pur ? Cisaillement simple ?</i> .....	162
2.3. La non-cyclicité des fabriques magmatiques .....	166
2.4. Linéation magmatique et direction d'extension finie .....	167
3. Fabrique du complexe de Brême-Saint-Sylvestre-Saint-Goussaud .....	169
4. Fabriques et imagerie numérique .....	170
4.1. La technique des intercepts .....	170
4.2. La technique de l'analyse en ondelettes 2D .....	172
Conclusion .....	174



CHAPITRE 10. FABRIQUES MAGNÉTIQUES DES GRANITES .....	175
1. Magnétisme des matériaux .....	175
1.1. Quelques bases .....	175
1.2. États magnétiques de la matière .....	176
2. Susceptibilité magnétique des granites .....	178
<i>E13 - Le comportement ferromagnétique de la magnétite</i> .....	179
2.1. Granites paramagnétiques et granites ferromagnétiques .....	181
2.2. Ellipsoïde d'ASM .....	181
3. Fabrique magnétique des granites .....	184
3.1. Fabrique des granites paramagnétiques .....	184
3.2. Fabrique des granites ferromagnétiques .....	184
3.3. Granites à minéralogie magnétique mixte .....	186
3.4. La pratique des fabriques d'ASM .....	188
3.5. Fabriques d'AAR .....	189
4. La remarquable homogénéité structurale des granites : exemples et enseignements .....	191
4.1. Le granite du Sidobre (Massif central français) .....	191
4.2. Le complexe granitique du Tesnou (Hoggar, Algérie) .....	193
4.3. Le pluton granitique de Mono-Creek (Californie) .....	195
4.4. Le complexe granitique de Cauterets-Panticosa (Pyrénées) .....	196
4.5. Le pluton de Bassiès (Pyrénées) .....	196
Conclusion .....	198
CHAPITRE 11. PLUTONS ZONÉS .....	199
1. Exemples de plutons zonés .....	199
1.1. Zonation concentrique .....	199
1.2. Zonation verticale .....	199
1.3. Zonation complexe .....	201
1.4. Zonation rythmique ou litage .....	203
2. Origine de la zonation .....	205
2.1. Différenciation magmatique <i>in situ</i> .....	205
<i>E14 - Qu'est-ce qu'une chambre magmatique ?</i> .....	206
2.2. Intrusions magmatiques successives .....	209
Conclusion .....	212
CHAPITRE 12. GRANITES ET TECTONIQUE DES PLAQUES .....	213
1. Granites et accréation océanique .....	213
2. Granites et points chauds .....	213
2.1. Le granite du Bushveld .....	215
2.2. Les granites jurassiques du Nigeria .....	217



3. Granites et subduction océanique .....	217
3.1. Cadre thermotectonique .....	217
3.2. Granitoïdes d'arcs insulaires .....	220
3.3. Granitoïdes de marges continentales actives .....	222
4. Granites et collision continentale .....	224
4.1. Cadre thermotectonique .....	224
4.2. Les leucogranites de l'Himalaya .....	226
4.3. Les granites hercyniens français .....	228
5. Granites et extension continentale .....	232
5.1. Cadre thermotectonique .....	232
5.2. Granites et extension tardi-orogénique hercynienne .....	233
5.3. Les granites du rift d'Oslo (Norvège) .....	234
<i>E15 - Y a-t-il une relation entre géochimie et contexte tectonique ?</i> .....	236
Conclusion .....	237
 CHAPITRE 13. GRANITOÏDES PRÉCAMBRIENS .....	239
1. La datation des granites .....	239
1.1. Âges de cristallisation .....	239
1.2. Âges de refroidissement .....	241
<i>E16 - Les TTG : granitoïdes archéens</i> .....	243
2. Les granitoïdes archéens : tonalites - trondhjemites - granodiorites (TTG).....	243
2.1. Données pétrographiques et structurales .....	243
2.2. Géochimie .....	246
2.3. Pétrogenèse : contraintes géochimiques et expérimentales .....	246
2.4. Contexte géodynamique .....	248
3. Les granitoïdes fini-archéens .....	249
3.1. Évolution des TTG au cours du temps .....	249
3.2. Des granitoïdes de transition : les sanukitoïdes .....	250
3.3. Premiers granites de recyclage crustal .....	251
4. Les granitoïdes protérozoïques .....	252
4.1. Granitoïdes éburnéens ou transamazoniens (autour de 2 Ga) .....	252
4.2. Associations AMCG (anorthosites - mangérites - charnockites - granites) .....	254
5. Les granites d'impact .....	258
Conclusion .....	260
 CHAPITRE 14. MÉTALLOGÉNIE .....	261
1. Formation des concentrations minérales .....	262
1.1. Importance de la source magmatique et spécialisation des granites .....	262
1.2. Les mécanismes orthomagmatiques .....	265
1.3. Le stade pegmatitique .....	265
<i>E17 - La classification des éléments chimiques</i> .....	266



## Avant-propos

1.4 Processus de concentration dans la phase fluide hydratée .....	268
1.5. Transport et dépôt des minéralisations .....	270
2. Exemples .....	273
2.1. L'étain et le kaolin de Cornouaille britannique .....	273
<i>E18 - Kaolin et porcelaine</i> .....	276
2.2. L'uranium du Limousin (Massif central) .....	277
2.3. Le tantale de Tanco (Canada) .....	279
2.4. Le cuivre du Chili .....	280
2.5. La fluorine du Bushveld .....	283
Conclusion .....	284
Références bibliographiques .....	285
Glossaire .....	299
Index .....	305

Quand on parle de la Terre, de ses roches, l'une des premières dont le nom vient à l'esprit est le granite, cette pierre qui défend la résistance, la solidité. C'est aussi la roche qui caractérise la croûte continentale et la différence de niveau et de rayon. Le granite est déformable et mobile, il s'enfonçait parfois un peu dans le manteau quand il était assis, des mélanges et des couplages interagissent. C'est donc et ce livre a sa place dans la collection « interactions ».

Jean Nedelec et Jean-Luc Boedeker, professeurs à l'Université Paul Sabatier de Toulouse, engagés en recherche et en enseignement, sont spécialistes des roches granitiques, tant en pétrologie au sens strict que dans les aspects structuraux et géodynamiques. Ils travaillent depuis une vingtaine d'années sur les granites de la zone de la Pyramide, mais aussi en Afrique, à Madagascar, au Brésil et en Iran principalement. Leur présentation complète et moderne de la pétrologie des granites devrait intéresser aux étudiants et aux enseignants des cycles de Licence et de Master. Ils parlent de la Terre, et aussi aux chercheurs, de montrer des éléments de compréhension de la relation dans ce domaine de la géologie de la Terre solide et alors de partager leur passion des auteurs de ce livre.

Patrick De Wever

Directeur de la collection « interactions »



Les granites sont les roches emblématiques de la croûte continentale. Issus d'un magma cristallisé en profondeur, ils affleurent aujourd'hui en surface sur tous les continents et témoignent de l'histoire géologique passée.

ANNE NÉDÉLEC &amp; JEAN-LUC BOUCHEZ

# PÉTROLOGIE DES GRANITES

## STRUCTURE – CADRE GÉOLOGIQUE

Ce manuel traite des granites au sens large, autrement dit de tous les granitoïdes, de la genèse à la mise en place et à la cristallisation des magmas. Sont également évoquées l'acquisition des structures magmatiques, la forme des plutons et leurs relations avec l'encaissant.

Résultats récents et méthodes d'étude modernes (géochimiques, structurales et géophysiques) sont présentés en détail. Les granites sont replacés dans leur cadre géologique spatio-temporel, en relation avec la tectonique des plaques et avec l'histoire de la Terre. L'intérêt économique de ces roches fait l'objet d'un chapitre dédié.

Abondamment illustré, l'ouvrage s'appuie sur de nombreux exemples français et étrangers.

Il est destiné aux étudiants de licence 3 et de master en Sciences de la Terre, ainsi qu'à ceux qui préparent le CAPES et l'Agrégation de Sciences naturelles. Il sera aussi utile à tous ceux qui s'intéressent à la géologie, qu'ils soient professionnels ou amateurs éclairés.

**Jean Luc Bouchez** sont professeurs à l'Université de Toulouse et membres du  
des et Transferts en Géologie (LMTG), unité mixte (Université-CNRS-IRD)  
nées maintenant dénommée GET (Géosciences Environnement Toulouse).  
Précambrien, **Anne Nédélec** a travaillé durant plusieurs années en Afrique  
Agrégation de Sciences de la vie et de la Terre. **Jean Luc Bouchez**, géologue  
tion des roches, s'est d'abord illustré par ses travaux sur la déformation  
uis par le développement de méthodes d'études structurales des roches  
n particulier.

ISBN 978-2-311-00286-7  
ISSN 1775-6650

**WWW.VUIBERT.FR**



En couverture : le Kilmar Tor (Bodmin Moor)  
Cornouaille britannique  
photofile@redgatesmithy.co.uk