

LOUIS LLIBOUTRY

Géophysique et géologie

ST

Enseignement
des
Sciences de la Terre



MASSON 

Enseignement des SCIENCES DE LA TERRE

GL81

Géophysique et géologie

Louis LLIBOUTRY

Agrégé de sciences physiques
Docteur ès sciences physiques

21649

1
2



21649/1

MASSON

Paris Milan Barcelone

Table des matières

Prologue : Bases logiques de la discipline.	1
0.1. Sciences géologiques et sciences géophysiques	1
0.2. Régularités géologiques réduites aux lois de la physique	2
0.3. Utilité des modèles physiques	3
0.4. Approche baconienne et approche poppérienne du Réel	4
Chapitre 1 : Séismes et exploration sismique.	7
1.1. Séismes tectoniques. Failles	7
1.2. Séismes induits, volcaniques, etc.	9
1.3. Macrosismique : intensité en un lieu d'un séisme	10
1.4. Généralités sur les ondes sismiques	11
1.5. Sismographes	14
1.6. Énergie dissipée, rendement sismique, moment sismique	15
1.7. Magnitude d'un séisme	17
1.8. Réflexion et réfraction des rais. Ondes coniques, de surface	19
1.9. Constitution interne du Globe et phases d'un séisme.	23
1.10. Techniques de la prospection sismique	26
1.11. Mécanisme au foyer. Sismogrammes synthétiques	26
Chapitre 2 : Pétrographie et métamorphisme.	29
2.1. Principaux minéraux des roches cristallines	29
2.2. Généralités sur les roches	32
2.3. Principales roches cristallines	33
2.4. Formation et ascension des magmas	35
2.5. Nature de la croûte océanique et du manteau supérieur	38
2.6. Roches métamorphiques.	40
2.7. Géothermo-baromètres	41
2.8. Divers faciès et roches métamorphiques	44
2.9. Nature de la croûte continentale	45
Chapitre 3 : Géomagnétisme et aimantation des roches.	49
3.1. Champs magnétiques produits par les corps aimantés	49
3.2. Champs magnétiques créés par les courants électriques	53
3.3. Appareils de mesure	55
3.4. Origine du champ magnétique terrestre régulier	56
3.5. Champ géomagnétique externe et prospection magnéto-tellurique	58

3.6. Analyse du potentiel géomagnétique en harmoniques sphériques	59
3.7. Aimantation produite par une excitation magnétique	60
3.8. Processus microscopiques du ferromagnétisme	62
3.9. Ferrimagnétisme monodomaine des petites inclusions	63
3.10. Minéralogie magnétique. Ferri- et antiferromagnétisme	64
3.11. Aimantation thermo-rémanente, rémanente chimique	65
3.12. Archéomagnétisme	66
3.13. Inversions du champ géomagnétique	68
3.14. Aimantation rémanente des sédiments	69
Chapitre 4 : Dorsales océaniques et points chauds	71
4.1. Exploration géophysique des océans	71
4.2. Dorsales océaniques	71
4.3. Bandes d'anomalies magnétiques	76
4.4. Failles transformantes et direction de l'expansion	78
4.5. Le modèle des plaques (coques) de lithosphère	79
4.6. Limites de validité de la théorie des plaques classique	80
4.7. Processus aux dorsales	82
4.8. Modifications des dorsales au cours du temps	84
4.9. Marges continentales passives	88
4.10. Volcanisme intra-plaques et points chauds	89
Chapitre 5 : Mouvement des coques de lithosphère	95
5.1. Cinématique d'une figure rigide dans le plan ou sur la sphère	95
5.2. Formules de la cinématique « instantanée » des plaques	97
5.3. Détermination des vitesses de rotation relatives	99
5.4. Prolongation de la chronologie paléomagnétique	101
5.5. Référentiel à rotation globale nulle et vitesses absolues NNR	102
5.6. Référentiel des points chauds et vitesses absolues HS	105
5.7. Évolution de la plaque Pacifique	106
5.8. Techniques de géodésie spatiale	107
5.9. Mouvement relatif des coques de lithosphère, à l'échelle de la décennie	112
5.10. Mouvements dans les zones frontières	115
Chapitre 6 : Zones de subduction et arcs insulaires	117
6.1. Fosses océaniques et arcs insulaires du Pacifique	117
6.2. Surfaces de Wadati-Benioff	120
6.3. Volcanisme et flux géothermique	125
6.4. Phases d'extension des bassins intra-arc	125
6.5. Prismes d'accrétion et auges externes	128
6.6. Subduction ablative	129
6.7. Mise en place d'ophiolites	129
6.8. Subduction de bassins océaniques intra-arcs sous des arcs insulaires continentaux	131
6.9. Initiation d'une subduction	132
6.10. Subduction du continent australien sous la plaque océanique de la mer de Banda	133

Chapitre 7 : Rotation de la Terre, gravimétrie, isostasie	137
7.1. Rotation de la Terre et force de Coriolis	137
7.2. Potentiel newtonien dans un référentiel galiléen	139
7.3. Potentiel de la pesanteur et géoïde	141
7.4. Détermination du géoïde	142
7.5. Altitude d'un lieu	144
7.6. Gravimétrie	144
7.7. Isostasie	146
7.8. Équilibre isostatique et poussée d'Archimède	148
7.9. Mouvements verticaux dus à l'érosion ou à la sédimentation	150
7.10. Temps nécessaire pour l'ajustement isostatique	151
7.11. Moment cinétique du couple Terre-Lune	151
7.12. Ralentissement de la rotation terrestre et éloignement de la Lune	153
7.13. Variations de la vitesse de rotation non dues aux marées	156
7.14. Formation de la Terre et de la Lune	156
Chapitre 8 : Chaleur terrestre	159
8.1. Diffusion de la chaleur	159
8.2. Mesure du flux géothermique	161
8.3. Influence du relief : cas avec solution analytique	162
8.4. Températures dans un milieu mobile	163
8.5. Solutions de la forme $T = f(z) \times g(\kappa t)$	164
8.6. Solutions pour un demi-espace, avec un point singulier	166
8.7. Températures dans une calotte polaire	167
8.8. Subsidence de la lithosphère océanique	169
8.9. Modélisation du refroidissement des plaques océaniques	171
8.10. Franchissement par le flux géothermique d'une LVZ partiellement fondue	173
8.11. Estimation des flux géothermiques	174
8.12. Origines de la chaleur terrestre	175
8.13. Concentration de la radioactivité dans les terrains granitiques	177
8.14. Épaisseur de la lithosphère et subsidence des bassins	179
8.15. LVZ sous les continents	181
Chapitre 9 : Modèles élastiques et isovisqueux	183
9.1. Définition des contraintes dans un milieu continu	183
9.2. Déformations élastiques et contraintes visqueuses	184
9.3. Tenseur des contraintes et équations d'équilibre	185
9.4. Invariants des contraintes et déviateur	188
9.5. Petites déformations et taux de déformation	188
9.6. Élasticité isotrope	190
9.7. Équation de Navier et ses conséquences	193
9.8. Solution de quelques problèmes d'élasticité	194
9.9. Viscosité newtonienne isotrope	197
9.10. Charge répartie sur une couche élastique ou isovisqueuse	198
9.11. Écoulement d'un fluide isovisqueux dans un conduit cylindrique	200
9.12. Perméabilité, porosité et surface volumique d'un sol	202

Chapitre 10 : Fluage des roches	205
10.1. Plasticité et fluage	205
10.2. Textures et déformation des roches	206
10.3. Plasticité parfaite et viscosité loi puissance n isotrope	210
10.4. Dislocations dans les cristaux	212
10.5. Rôle des défauts ponctuels dans le fluage	214
10.6. Du fluage microscopique au fluage macroscopique	216
10.7. Fabriques et tension superficielle des grains	218
10.8. Fluage transitoire	220
10.9. Matériaux anisotropes	223
Chapitre 11 : Rupture des terrains et prévision des séismes	227
11.1. Contrainte normale et cisaillement sur un plan quelconque	227
11.2. Divers types d'état de contraintes	228
11.3. Striction et rupture ductile	230
11.4. Théorie de l'enveloppe de Mohr	231
11.5. Mécanismes microscopiques de la rupture	232
11.6. Le corps plastique en mécanique	235
11.7. Plasticité, consolidation et dilatance des sols	237
11.8. Rupture des roches, diaclases et failles	240
11.9. « Mécanisme au foyer » et vrai mécanisme de la rupture	241
11.10. Glissement saccadé et récurrence des séismes	243
11.11. Glissement aisé et séismes silencieux	245
11.12. Séismes intermédiaires et profonds	247
11.13. Estimation du risque sismique d'après les séismes historiques	248
11.14. Paléosismicité	250
11.15. Prévision sismique à long et moyen terme	252
11.16. Prévision sismique à court terme	252
Chapitre 12 : Mécanique des plaques de lithosphère	255
12.1. Modèle de la plaque élastique homogène	255
12.2. Déformation d'une plaque océanique	260
12.3. Corrélation entre la topographie et l'anomalie de Bouguer	264
12.4. Épaisseur de la lithosphère élastique	266
12.5. Mesure des contraintes dans la croûte	268
12.6. Mécanisme moteur des coques de lithosphère	269
12.7. Équilibre des forces agissant sur les plaques	272
12.8. Forces s'exerçant sur les plaques plongeantes	274
12.9. Extrusions latérales et modèle du plastique parfait	274
Chapitre 13 : Processus orogéniques	279
13.1. Datation des événements	279
13.2. L'ancien concept de géosynclinal	280
13.3. Phases et cycles orogéniques	282
13.4. Plissements	283
13.5. Théorie de l'initiation du plissement	285
13.6. Nappes gravitaires	287

13.7. Les grands charriages du socle	288
13.8. Réchauffement d'une plaque brusquement rétrécie horizontalement	291
13.9. Propriétés mécaniques de la lithosphère continentale	292
13.10. Conséquences de l'existence d'une asthénosphère crustale	294
13.11. Subsidence post-orogénique	296
13.12. Contrainte tectonique post-orogénique	298
13.13. Exhumation par rétro-subduction	300
13.14. Processus orogéniques propres aux chaînes liminaires	302
13.15. Fossés passifs	305
13.16. Fossés actifs ou rifts	307
13.17. Croûte amincie et subsidence de marges continentales passives	310
Chapitre 14 : Brève histoire du post-Paléozoïque	311
14.1. Formation et dislocation de la Pangée	311
14.2. Formation de l'Asie	314
14.3. Le poinçonnement par l'Inde et ses conséquences	319
14.4. La Thétys et les chaînes péri-méditerranéennes	321
14.5. Les Alpes occidentales	328
14.6. Les Apennins et le bassin tyrrhénien	334
14.7. Autres arcs et bassins en Méditerranée	340
14.8. Mécanismes cricogéniques en Méditerranée occidentale	341
14.9. Arc des Antilles	342
14.10. Isolement progressif de l'Antarctique	344
Chapitre 15 : Dérive du pôle, dérive des continents au Paléozoïque	347
15.1. Facteurs astronomiques du climat	347
15.2. Polhodie et dérive du Pôle géographique	350
15.3. Causes des dérives absolues HS du PN et du PGM	352
15.4. Le noyau et la dynamo terrestre	352
15.5. Paléopôles géomagnétiques	355
15.6. Dérives du PGM de l'Ordovicien au Permien	356
15.7. Phases orogéniques du Paléozoïque	357
15.8. La dérive des continents entre 1000 et 500 Ma avant le présent	362
Chapitre 16 : Chimie du manteau et formation des continents	365
16.1. Étude de la matière à très haute pression	365
16.2. Densités et changements de phase dans le manteau	368
16.3. Pénétration des plaques plongeantes dans le manteau inférieur	370
16.4. Tomographie sismique	372
16.5. Nucléosynthèse et radioactivité naturelle	374
16.6. Radiochronologie jusqu'à 300000 ans d'âge	376
16.7. Datage des minéraux des roches	377
16.8. Datages par le plomb	379
16.9. Âge de la Terre	380
16.10. Marquage par les éléments en trace ou par les rapports isotopiques	382
16.11. Formation de la Terre	387

16.12. Les chondrites	388
16.13. Apparition progressive des continents	390
16.14. Évolution et recyclage de la croûte continentale	391
16.15. Recyclage de la croûte océanique	392
Chapitre 17 : Glaciations, glacio-isostasie et niveau des mers	395
17.1. Banquise, shelves et nappes de glace	395
17.2. Glaciations antérieures au Pléistocène	397
17.3. Stratigraphie du Pléistocène	398
17.4. Étapes de la dernière déglaciation	402
17.5. Glacio-isostasie	403
17.6. Premières modélisations du soulèvement glacio-isostatique	405
17.7. Modélisation par des couches sphériques visco-élastiques	408
17.8. Solution du problème inverse pour une Terre corps de Maxwell	410
17.9. Épaisseur des calottes glaciaires	411
17.10. Objections au modèle classique de Terre visco-élastique	412
Chapitre 18 : Convection thermique dans le Globe	415
18.1. Équations gouvernant vitesses et températures dans un milieu isovisqueux	415
18.2. Convection de Bénard-Boussinesq	417
18.3. Équations de Lorenz	420
18.4. Bifurcations; attracteurs métastables, périodiques, apériodiques	422
18.5. Études expérimentales de la convection de Bénard-Boussinesq	425
18.6. Transfert de chaleur par convection : nombre de Nusselt	426
18.7. Températures sur-adiabatiques et nombre de Rayleigh dans le manteau	427
18.8. Influence des plaques et d'une viscosité variable sur la convection	430
18.9. Turbulence « dure » et brassage du manteau	432
18.10. La couche D' et l'origine des points chauds	435
18.11. Exploitation des données de la tomographie sismique	436
Annexe : Compléments de mathématiques	441
A.1. Propriétés intrinsèques d'une fonction de x, y, z ou d'un champ de vecteurs	441
A.2. Harmoniques sphériques	444
A.3. Fonction d'erreur	445
A.4. Transformation de Fourier	445
A.5. Réponse impulsionnelle et transformation de Laplace	447
Index	451

LOUIS LLIBOUTRY

Géophysique et géologie

ST

Enseignement
des
Sciences de la Terre

L'ouvrage

- La géologie et la géophysique sont deux disciplines enseignées de manière distincte mais dont la complémentarité mérite d'être mise à profit, permettant ainsi une compréhension profonde des phénomènes étudiés. L'auteur nous propose une synthèse entre géologie structurale et géophysique, construite sur les faits les mieux établis et incontournables et constituant ainsi un véritable ouvrage de référence dans le domaine des sciences de la Terre.

Le public

- Ce livre s'adresse aux étudiants de second cycle en sciences de la Terre : géologie, géophysique, géosciences, ainsi qu'aux élèves ingénieurs et aux candidats au Capes et à l'agrégation en sciences de la vie et de la Terre. Les étudiants plus avancés (3^e cycle), les chercheurs et enseignants de ces disciplines trouveront une synthèse particulièrement réussie entre géologie structurale et géophysique.

L'auteur

Louis Lliboutry est normalien, agrégé de sciences physiques et docteur ès sciences physiques. Il a dirigé le laboratoire de Glaciologie et géophysique de l'environnement (CNRS, Grenoble).

ISBN : 2-225-82922-5



9 782225 829222