

Introduction à la géologie

La dynamique de la Terre

5^e ÉDITION

Gilbert Boillot

Professeur honoraire à l'UPMC (Sorbonne Universités)

Philippe Huchon

Professeur à l'UPMC (Sorbonne Universités) à l'UMR Institut
des Sciences de la Terre Paris, CNRS/UPMC

Yves Lagabriele

Directeur de recherche au CNRS à l'UMR Géosciences Université de Rennes 1

Glossaire des termes physiques : Jacques Boutler

Maître de conférences honoraire à l'UPMC (Sorbonne Universités)

DUNOD

DES MÊMES AUTEURS

- G. Boillot, L. Montadert, M. Lemoine et B. Biju-Duval : Les marges continentales actuelles et fossiles autour de la France. Paris, Masson, 1984, 342 p.
- G. Boillot et C. Coulon : La déchirure continentale et l'ouverture océanique. Paris, Gordon and BreachScience Publishers, 1998, 212 p.
- G. Boillot : Les Laisses de Mer. Chronique d'une carrière scientifique. Paris, L'Harmattan, 2005, 174 p.
G. Boillot est également l'auteur de six autres récits publiés chez le même éditeur.
- Y. Lagabriele et coll. : Mémo visuel de Géologie. Dunod, 2^e édition. Paris, Dunod, 2017, 264 p.
- Y. Lagabriele, S. Leroy et coll. : Le visage sous-marin de la Terre – Éléments de géodynamique CCGM-CNRS, Paris, co-édition, 2005.
- S. Lallemand, P. Huchon, L. Jolivet et G. Prouteau : Convergence lithosphérique. Paris, Vuibert, 2005, 182 p.
- C. Pomerol, Y. Lagabriele, M. Renard et S. Guillot : Éléments de géologie, 16^e édition. Paris, Dunod, 2018, 1152 p.

Illustration de couverture :

Coucher de soleil au sommet du plus haut relief terrestre : Le Maura Kea.
Ce volcan de point chaud situé à l'extrémité de la chaîne Empereur-Hawaii culmine
à environ 10 000 m au-dessus de la croûte océanique de la plaque Pacifique.

Les points chauds sont décrits dans la fiche 1.7

© Photo Mathieu Lagabriele.

© Dunod, 2000, 2003, 2008, 2013,
2020 pour la nouvelle présentation
© Masson, Paris, 1996 pour la 1^{re} édition
11, rue Paul Bert – 92240 Malakoff
EAN 9782100822027

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2^o et 3^o a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Table des matières

AVANT-PROPOS	1
CHAPITRE I • INTRODUCTION	3
1.1 Le temps et l'espace géologiques	3
1.2 Lithosphère et asthénosphère	8
1.2.1 La lithosphère élastique	9
1.2.2 La lithosphère sismique	10
1.2.3 La lithosphère thermique	12
1.3 La tectonique des plaques	14
1.4 La croûte et le manteau	20
1.5 Le comportement mécanique de la lithosphère	23
CHAPITRE II • OCÉAN ET CONTINENT	43
2.1 La fabrication de la croûte aux dépens du manteau	43
2.2 La lithosphère océanique	47
2.3 La lithosphère continentale	54
2.4 Conclusion : océan et continent	61

CHAPITRE III • L'ÉQUILIBRE ISOSTATIQUE ET LES MOUVEMENTS VERTICAUX DE LA LITHOSPHERE	71
3.1 Le principe d'isostasie et l'équilibre isostatique local	71
3.2 Les mouvements verticaux de la lithosphère provoqués par les variations de l'épaisseur crustale	76
3.3 Les mouvements verticaux de la lithosphère provoqués par son état thermique et son épaisseur	81
3.4 Les mouvements verticaux de la lithosphère provoqués par son élasticité	85
 CHAPITRE IV • LES CONSÉQUENCES DES MOUVEMENTS HORIZONTAUX DE LA LITHOSPHERE : LA DIVERGENCE	 91
4.1 La déchirure continentale	91
4.2 Rifting « actif » et rifting « passif »	99
4.3 La rupture continentale et les différentes sortes de marges continentales passives	103
4.4 L'ouverture océanique	107
 CHAPITRE V • LES CONSÉQUENCES DES MOUVEMENTS HORIZONTAUX DE LA LITHOSPHERE : LA CONVERGENCE	 131
5.1 La sismicité et la déformation active dans les zones de subduction	133
5.2 L'accrétion continentale et l'érosion tectonique dans les zones de subduction	137
5.3 La collision continentale	143
5.4 L'effondrement des chaînes de montagnes après la collision	150
5.5 L'exhumation tectonique des roches métamorphiques	153
5.5.1 Le métamorphisme	153
5.5.2 La dénudation tectonique des terrains métamorphiques	156
 CONCLUSION	 204
Pour en savoir plus	206
Glossaire des termes de physique	208
 INDEX	 231
 LÉGENDES COMPLÈTES DES PLANCHES COULEURS	 235

Table des fiches

Fiche 1.1 :	Hawaii	28
Fiche 1.2 :	Groenland-Scandinavie	29
Fiche 1.3 :	Îles Loyauté	30
Fiche 1.4 :	Taiwan	31
Fiche 1.5 :	Mer Rouge et Fossé rhénan	33
Fiche 1.6 :	Subduction et moteur des plaques	35
Fiche 1.7 :	Conceptions récentes sur les points chauds et sur la convection du manteau	37
Fiche 1.8 :	La cinématique des plaques, du modèle de Le Pichon (1968) à MORVEL (2010)	41
Fiche 2.1 :	Vitesses d'expansion des dorsales mondiales	62
Fiche 2.2 :	Dorsales océaniques, flux géothermique et tomographie sismique à 150 km	64
Fiche 2.3 :	Bathymétrie comparée : dorsales lentes et rapides	65
Fiche 2.4 :	Structure et fonctionnement de l'axe des dorsales lentes et rapides	67
Fiche 3.1 :	L'étude de la subsidence des bassins sédimentaires	87
Fiche 3.2 :	La stratigraphie séquentielle et l'analyse des bassins sédimentaires	89
Fiche 4.1 :	Le rift de Corinthe	111
Fiche 4.2 :	Le rift est-africain	112
Fiche 4.3 :	Les rifts de l'Europe	114
Fiche 4.4 :	Marge ouest ibérique et analogues	116
Fiche 4.5 :	Marge de Norvège	119
Fiche 4.6 :	Marge de Ghana-Côte d'Ivoire	121

Fiche 4.7 :	Les zones transformantes océaniques	122
Fiche 4.8 :	Les failles transformantes continentales	124
Fiche 4.9 :	L'exhumation du manteau dans les océans : progrès de l'exploration et évolution des concepts	126
Fiche 5.1 :	Les frontières en subduction : présentation	160
Fiche 5.2 :	Les Antilles et le prisme de la Barbade	162
Fiche 5.3 :	L'Amérique du Sud et le volcanisme des Andes	164
Fiche 5.4 :	L'Ouest-Pacifique	166
Fiche 5.5 :	La Nouvelle-Zélande	168
Fiche 5.6 :	Structure comparée des chaînes de montagne	170
Fiche 5.7 :	La collision dans les Alpes	171
Fiche 5.8 :	La Méditerranée	173
Fiche 5.9 :	La collision Inde-Asie, l'Himalaya et le Tibet	175
Fiche 5.10 :	Une chaîne de subduction, la cordillère des Andes	177
Fiche 5.11 :	La collision arc-continent de Taiwan	181
Fiche 5.12 :	La collision arc-arc du Japon central	183
Fiche 5.13 :	Les sutures ophiolitiques : localisation et signification	185
Fiche 5.14 :	Les sutures ophiolitiques, position dans les chaînes de montagne	187
Fiche 5.15 :	Les ophiolites des Alpes occidentales	188
Fiche 5.16 :	Les ophiolites d'Oman	190
Fiche 5.17 :	Les ophiolites de Nouvelle Calédonie : subduction, obduction et fermeture de bassin arrière-arc	192
Fiche 5.18 :	La province du Basin and Range, un cas particulier d'extension syn- et post-orogénique	197
Fiche 5.19 :	L'exhumation des zones internes des chaînes de montagne, rôles de l'extension et de l'érosion	202

Avant-propos

Ce livre a été écrit pour faire partager une conviction : la géologie devient une science fascinante quand elle vise à comprendre plutôt qu'à décrire. Certes, la première étape des recherches géologiques, encore inachevée aujourd'hui, est nécessairement d'exploration et d'inventaire. Mais les Sciences de la Terre sont aussi devenues, au cours des cinquante dernières années, autant des applications de la physique et de la chimie qu'une branche des Sciences Naturelles. Ainsi est née la « géodynamique », qui analyse les forces et les mouvements animant notre Planète à sa surface et en profondeur.

Plus précisément, cet ouvrage traite de la géodynamique de la lithosphère, c'est-à-dire de l'enveloppe superficielle et rigide du globe. S'adressant à des lecteurs soucieux d'enrichir leur culture plutôt que leur savoir, il a été débarrassé autant que possible du vocabulaire spécialisé qui les décourage trop souvent. Il vise à expliquer les phénomènes naturels par les lois physiques élémentaires, dont les termes sont rappelés dans un « glossaire » préparé par J. Boutler et placé en fin de volume.

Il reste que la géodynamique est avant tout une science naturelle, fondée sur des observations « de terrain ». Pour mieux tenir compte de cette spécificité, le texte des premières éditions du livre, corrigé et mis à jour par G. Boillot avec l'aide de ses co-auteurs, a été enrichi, depuis la troisième édition, par des exemples naturels décrits dans des « fiches » à la fin

des chapitres. Ph. Huchon et Y. Lagabrielle se sont chargés du choix et de la présentation de ces exemples. Les auteurs espèrent ainsi favoriser une double lecture de leur ouvrage, selon le niveau de connaissance et de spécialisation souhaitées :

- le « corpus » du livre offre les clefs donnant accès aux illustrations présentées dans les fiches. Il a été écrit pour être lu et pas seulement consulté, les chapitres s'enchaînant comme dans un récit, celui du fonctionnement de notre planète ;
- les documents réunis dans les fiches visent à apporter au lecteur les arguments concrets à l'appui des concepts exposés dans le corpus.

Ainsi composé, le livre s'adresse aux étudiants, aux enseignants ou plus généralement au grand public intéressé par la géologie, et désireux de mieux connaître et comprendre l'univers dans lequel nous vivons, et à mieux situer l'homme dans cet univers.

Remerciements : Gilbert Boillot remercie ses amis et collègues G. Grau, J. Kornprobst et M. Lemoine, qui ont lu la première version de ce livre, en lui apportant de multiples corrections et en lui faisant de très utiles suggestions. G. Bellaiche, Y. Boillot, J. Deverchère, Ph. Gillet, J. Girardeau, J. et P. Lamarque, F. Michaud, D. Mougenot, J.-Y. Royer et C. Sabouraud l'ont également aidé par de précieux commentaires. V. Gourbaud et Y. Descatoire ont établi le texte et les dessins issus des éditions précédentes.

Jacques Boutler remercie particulièrement G. Grau et P. Mechler qui ont suggéré de judicieuses améliorations au glossaire. Enfin, Y. Lagabrielle et Ph. Huchon sont reconnaissants à M. Lagabrielle-Juguet pour sa contribution efficace à la relecture des fiches et remercient pour leur contribution à l'illustration des fiches M.-O. Beslier, L. Boschi, G. Cabioch, V. Courtillot, E. Garel, L. Geoffroy, L. Jolivet, S. Lallemand, M. Lemoine, J. Malavieille, G. Manatschal, S. Mazzotti, G. Mohn.

Merci également à J. Bébien et J. Kornprobst pour leurs remarques constructives.

Chapitre I

Introduction

1.1 LE TEMPS ET L'ESPACE GÉOLOGIQUES

Souvent dans ce livre il sera question de durées apparemment immenses (des dizaines ou des centaines de millions d'années ou davantage), ou de processus agissant à des vitesses qui peuvent sembler dérisoires (des fractions de millimètre, au mieux des centimètres par an ou par siècle). Ceci compense cela : les fantastiques bouleversements subis par la face de la Terre depuis sa naissance ne se comprennent que si on les inscrit dans la durée géologique : un océan reliant le pôle Nord au pôle Sud qui s'ouvrirait à l'équateur à la vitesse de huit centimètres par an recouvrirait toute la planète en 500 millions d'années. Or, la Terre est née il y a 4,55 milliards d'années... Dans ces conditions, des phénomènes physiques ou chimiques extrêmement lents finissent par avoir des effets prodigieux aux yeux de l'Homme.

Une comparaison souvent faite de la vie de notre planète avec une année civile fera mieux percevoir notre place dans ce temps géologique. Supposons que la formation du système solaire (et donc la naissance de la Terre), il y a 4,55 milliards d'années, corresponde au premier jour de l'année. La vie apparaît au début du printemps (il y a 3,8 milliards d'années, l'âge de traces organiques trouvées dans la formation d'Isua, au Groenland). Après la Toussaint naissent les premiers êtres pluricellulaires

(– 670 millions d'années, comme le montrent les fossiles trouvés à Ediacara, en Australie) et vers le 20 novembre les premiers vertébrés (– 500 Ma). L'océan Atlantique commence à s'ouvrir le 18 décembre (– 160 Ma). Enfin le genre *Homo* paraît le 31 décembre vers huit heures du soir (– 2 Ma), tandis que le Christ meurt quatorze secondes avant minuit. Quant à la vie d'un homme de soixante-dix ans, elle ne dure qu'une demi-seconde...

Il faut donc largement tenir compte du facteur temps lorsque l'on cherche à appliquer aux processus géologiques les lois de la physique et de la chimie. Une dalle de marbre soumise pendant quelques dizaines ou quelques centaines d'années à une contrainte faible mais permanente peut se déformer. L'observation est facile à faire sur les pierres tombales dans les cimetières. À plus forte raison, les terrains réputés les plus rigides sont-ils facilement déformables, surtout si la pression et la température s'élèvent, et si des contraintes s'exercent pendant plusieurs millions d'années. De nos jours, les Alpes et l'Himalaya se soulèvent chaque année de quelques millimètres. Qui l'aurait soupçonné avant la multiplication des nivellements géodésiques ? La nature même de son objet d'étude oblige le géologue à raisonner dans un « espace-temps » immense, tout à fait différent de celui auquel nous sommes habitués.

Comment mesure-t-on le temps en géologie ? Jusqu'au milieu de ce siècle, on ne disposait le plus souvent que d'une échelle relative, établie à partir de l'idée d'évolution des êtres vivants (la paléontologie) et de quelques principes simples permettant d'interpréter les observations de terrain : une couche sédimentaire non déformée est plus jeune que les formations géologiques sur lesquelles elle repose ; le plissement de cette couche est un événement plus récent que sa formation sur le fond marin ; un filon de roche volcanique est plus jeune que les terrains qu'il traverse, etc. Les couches sédimentaires contiennent d'autre part les restes fossiles d'êtres vivants, animaux ou végétaux, qui sont apparus sur le globe à un moment de son histoire, se sont multipliés, puis se sont éteints tandis que d'autres formes vivantes apparaissaient. En étendant sans cesse les collectes des restes fossiles et les observations sur la disposition relative des terrains à la surface de la planète, les géologues sont peu à peu parvenus, en 150 ans de recherche, à corréliser ces terrains à grande distance et à établir une *chronologie relative* des événements géologiques et paléontologiques qui ont bouleversé la face de la Terre depuis sa naissance. Toutefois cette approche purement naturaliste de l'histoire de la Terre avait ses limites : les idées restaient très incertaines sur la durée et l'âge réels des événements rapportés au temps universel. Et la mémoire des terrains étant d'autant plus

fidèle qu'ils sont plus récents, les débuts de cette histoire restaient tout à fait hypothétiques. Cette première étape de la recherche a toutefois permis d'établir une échelle « chronostratigraphique » où le temps géologique est divisé en ères, en systèmes (tableau 1.1) et finalement en étages.

TABLEAU 1.1 ÉCHELLE DES TEMPS GÉOLOGIQUES
d'après K.M. Cohen, S. Finney, P.L. Gibbard (2012) – International
chronostratigraphic chart – *International Commission on Stratigraphy*.

Millions d'années (Ma)	Ères géologiques	Systèmes géologiques
0		
66	CÉNOZOÏQUE (Tertiaire et Quaternaire)	QUATERNAIRE ————— 2,6 Ma NÉOGÈNE ————— 23 Ma PALÉOGÈNE
252	MÉSOZOÏQUE (Secondaire)	CRÉTACÉ ————— 145 Ma JURASSIQUE ————— 201 Ma TRIAS
541	PALÉOZOÏQUE (Primaire)	PERMIEN ————— 299 Ma CARBONIFÈRE ————— 359 Ma DÉVONIEN ————— 419 Ma SILURIEN ————— 443 Ma ORDOVICIEN ————— 485 Ma CAMBRIEN
4 550	PRÉCAMBRIEN	PROTÉROZOÏQUE ————— 2 500 Ma ARCHÉEN

À partir des années 1950 (mais il y eut auparavant des précurseurs), la chimie de la Terre (la géochimie) est venue en aide à la géologie, et nous a progressivement proposé une *échelle absolue du temps géologique*. Fort heureusement, les terrains n'ont pas seulement gardé la mémoire de leur histoire sous la forme de fossiles ou de structures superposées. Ils sont constitués d'éléments chimiques qui ont évolué depuis la formation initiale de l'univers selon des lois que l'on commence à bien connaître. Un peu comme le monde vivant, le monde minéral a changé au cours des temps géologiques. La physique nucléaire nous apprend que l'élément premier, élaboré peu de temps après le « Big Bang », est l'hydrogène, avant que ne se forme, à la suite de collisions d'atomes, l'hélium. Tous les autres éléments ont été produits beaucoup plus tard, après la formation des galaxies, par coalescence d'atomes d'hélium ou par fusion des nouveaux éléments dans les étoiles. Les spécialistes discutent encore aujourd'hui sur l'âge du « Big Bang », qu'ils situent entre 10 et 15 milliards d'années. Ils sont d'accord en revanche sur celui du système solaire dont la Terre fait partie, apparu il y a 4,55 milliards d'années environ.

À partir de là, le relais a été pris par ces sortes d'horloges que sont les isotopes instables des éléments chimiques. Le principe est simple : la quantité d'isotopes radioactifs « pères », instables, suit une loi de décroissance exponentielle définie. Enfermés dans un système chimique clos, ils se transforment en isotopes « fils », le plus souvent stables, suivant un « calendrier » précis. Inversement, le dosage du rapport « père »/« fils » dans une roche ou dans un minéral de cette roche permet de mesurer le temps écoulé depuis la « fermeture » du système géochimique (c'est-à-dire depuis la naissance ou le refroidissement de la roche ou du minéral), à la condition toutefois de connaître par d'autres moyens sa composition isotopique initiale. La géochimie isotopique permet ainsi d'établir une chronologie absolue des événements auparavant situés seulement les uns par rapport aux autres dans une échelle chronologique relative. C'est à partir de toutes les données ainsi réunies depuis un demi-siècle que la comparaison entre une année civile et l'histoire de la planète a pu être tentée au début de ce chapitre, et que l'échelle des temps géologiques, établie naguère par la « chronostratigraphie », a pu être « calibrée » et exprimée désormais en milliards, millions ou milliers d'années (tableau 1.1).

Quant à l'espace géologique, il est plus facile à concevoir, sinon à explorer. Les dimensions de la planète sont à échelle humaine, malgré l'immensité des domaines océaniques et continentaux (rayon moyen de la Terre : 6 371 km ; surface totale : 510×10^6 km²). Naturellement, les trois