

Volcanologie

Du même auteur

- *Volcans et magmas*, Collection Sciences et découvertes, Le Rocher, Paris, Monaco, 1986.
- *L'homme et ... les volcans*, Le Léopard d'or, Paris, Muséum de Lyon, ARPPAM, Lyon, 1991.
- *Enseigner la géologie au collège et au lycée* (en collaboration), Nathan, Paris, 1992.
- *Volcans et tremblements de terre*, Collection Explorons, Rouge et or, Nathan, Paris, 1993.
- *Volcans*, Armand Colin, Paris, 1993.
- *Réussir le capes et l'agrégation des sciences de la vie et de la Terre* (avec J.P. Dubacq et J.C. Baehr), 2^e édition, Masson, Paris, 1998.
- *Volcans et séismes*, Collection En Savoir plus, Hachette, Paris, 1995 (traduit en taïwanais, 1997 et en chinois, 1999).
- *Le Quaternaire. Géologie et milieux naturels* (en collaboration, sous la direction de J. Riser), Dunod, Paris, 1999 (traduit en anglais, 2002).
- *Vocation volcanologie*, Delachaux et Niestlé, Lausanne, Paris, 2000.
- *L'ABCdaire des Volcans*, Flammarion, Paris, 2001 (traduit en italien, 2003).
- *Le volcanisme, cause de mort et source de vie* (en collaboration, sous la direction de P. de Wever), Vuibert, Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris, 2003.
- *Connaître et découvrir les volcans*, 2^e édition, Minerva, Genève, Paris, 2004.
- *Volcans* (avec O. Grunewald), Le Chêne, Paris, 2007 (traduit en allemand, 2009 et en russe, 2013).
- *Volcanologie. De la passion à la vocation*, Vuibert, Paris, 2009.
- *Le volcan se réveille* (illustrations A. Dufour), Le Pommier, Paris, 2012 (traduit en arabe, 2016).
- *Litchi dans l'espace* (illustrations B. Delaporte), Le Pommier, Paris, 2013 (traduit en arabe, 2016).
- *Les volcans et leurs éruptions*, Collection Les Minipommes, 2^e édition, Le Pommier, Paris, 2013 (traduit en coréen, 2011 et en chinois, 2017).
- Pour les nuls présente *Les volcans* (illustrations F. Grégoire et S. Frécon), Gründ, Paris, 2014.
- *Tout savoir sur les volcans du monde, séismes et tsunamis*, 2^e édition, Orphie, Chevagny-sur-Guye, 2015.
- *À la découverte des volcans d'Auvergne* (illustrations Tomtom), 2^e édition, La vache qui lit, Coren, 2017.
- *Volcanologie*, L'Harmattan, Paris, 2017.

Jacques-Marie Bardintzeff

Volcanologie

6^e ÉDITION

DUNOD

Illustration de couverture :
Lac de lave (détail) au Kilauea, Hawaii (photo J.-M. Bardintzeff).

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage. Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements	d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée. Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).
	

© Dunod, 1991, 1998, 2006, 2011, 2016, 2021

11, rue Paul Bert, 92240 Malakoff

www.dunod.com

ISBN 978-2-10-081914-0

Cet ouvrage a été traduit en anglais (USA) et adapté (avec A. R. McBirney), Jones & Bartlett, Sudbury, 2000 ; et en allemand, F. Enke Verlag, Stuttgart, 1999, repris par Spektrum.

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° 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
---------------------	---

PREMIÈRE PARTIE

DU MANTEAU À LA CHAMBRE MAGMATIQUE

Chapitre 1. La fusion partielle du manteau	7
1.1. L'origine mantellique des magmas	7
1.2. La constitution du manteau terrestre	9
1.3. Mécanisme de la fusion partielle	14
1.4. Les magmas primaires	15
Chapitre 2. La chambre magmatique : réalités et modélisations	18
2.1. La montée du magma primaire	18
2.2. Le massif du Skaergaard (Groenland)	19
2.3. Les complexes annulaires	22
2.4. La chambre magmatique : système ouvert ou fermé ?	24
2.5. Vers une modélisation de plus en plus précise	26
Chapitre 3. La cristallisation fractionnée et la différenciation	28
3.1. Ordre de cristallisation et indice de différenciation	28
3.2. Modèles quantitatifs de cristallisation fractionnée	30
3.3. La série différenciée de la chaîne des Puys	32
3.4. Évolution des paramètres thermodynamiques au cours de la différenciation	38
Chapitre 4. L'eau et les autres fluides	41
4.1. Importance et origines des fluides	41
4.2. L'effet amphibole	43
4.3. Teneur en fluides et viscosité	45
4.4. « Éruptibilité » et vésiculation	48
4.5. Pression des fluides et éruption	51

Table des matières

Chapitre 5. Les mélanges de magmas	53
5.1. Mise en évidence des mélanges	53
5.2. Mélange de magmas (<i>mixing</i>) à la Soufrière de Saint-Vincent	54
5.3. Mélange de magmas (<i>mingling</i>) au Cerro Chiquito	60
5.4. Les mélanges : modalités et conditions thermodynamiques	64
5.5. Mélange et déclenchement de l'éruption	68
5.6. Immiscibilité	69
Chapitre 6. Le déclenchement de l'éruption	70
6.1. Le contrôle tectonique	70
6.2. La différenciation magmatique	75
6.3. Les mélanges de magmas	75
6.4. Les éléments volatils	76
6.5. La résistance à la traction	77
6.6. Conjonction des différents facteurs	78

DEUXIÈME PARTIE

L'ARRIVÉE DU MAGMA EN SURFACE ET LES DYNAMISMES ÉRUPTIFS

Chapitre 7. Les éruptions laviques	83
7.1. Les coulées de lave	83
7.2. Les fontaines et lacs de lave	91
7.3. Les dômes	96
7.4. Les intrusions	103
Chapitre 8. Les retombées	108
8.1. La granulométrie : cendre ou bombe ?	108
8.2. La morphologie des édifices : les cônes	113
8.3. Des cendres sur de grandes surfaces	115
8.4. Épaisseur, fragmentation et dispersion des dépôts	117
8.5. Ponces, lithiques, cristaux	122
8.6. Débit magmatique et colonne éruptive	124
8.7. Indice d'explosivité volcanique	128
8.8. Cratères et caldeiras	130

Chapitre 9. Les écoulements pyroclastiques	135
9.1. Les nuées ardentes : dépôts et mise en place	135
9.2. Les nuées ardentes : origines et classifications	149
9.3. <i>Surges</i> , avalanches et <i>blasts</i>	152
9.4. Les ignimbrites	155
9.5. Les lahars	157
Chapitre 10. Hydrovolcanisme et volcanisme sous-marin	161
10.1. Hydrovolcanisme	162
10.2. Le volcanisme sous-marin	170
Chapitre 11. Les produits volcaniques	179
11.1. Les laves et les tephra	179
11.2. Les verres	182
11.3. Les gaz	187
11.4. Les phases hydrothermales	191
Chapitre 12. Les volcans du monde dans leur contexte géodynamique	196
12.1. Des volcans bien différents	196
12.2. Trapp, dorsale et ouverture océanique	201
12.3. Subduction, marge continentale et arc insulaire	205
12.4. Collision	209
12.5. Points chauds et volcanisme intraplaque	210
12.6. Magmatisme crustal	219
12.7. Volcanisme planétaire	219

TROISIÈME PARTIE

LES VOLCANS ET L'HOMME

Chapitre 13. Risques volcaniques et prévisions	231
13.1. Volcans et catastrophes naturelles	231
13.2. Les sept risques volcaniques	233
13.3. L'estimation des risques	249
13.4. Observatoires et surveillance	256
13.5. La protection civile	264
13.6. À l'échelle de la planète : volcans et climats	265

Table des matières

Chapitre 14. Le volcan utile	275
14.1. Le volcan, source de matières premières utiles et énergétiques	275
14.2. Le volcan, source de santé et de loisirs	280
Glossaire	283
Bibliographie	287
Sites Internet	325
Remerciements	327
Crédits iconographiques	327
Index	329

AVANT-PROPOS

« *L'exploration est le sport du savant.* »
Professeur Auguste Picard

LES ENJEUX DE LA VOLCANOLOGIE

Les volcans ne laissent personne indifférent: leur beauté et leurs dangers fascinent les hommes. Ce qui demeure vrai aujourd'hui l'était sans doute davantage au cours de la Préhistoire ou de l'Antiquité. Les premiers hommes, qui vivaient dans un contexte volcanique (Rift est-africain), ont dû voir des éruptions. De même, en France métropolitaine, nos ancêtres ont assisté à l'éruption de la chaîne des Puys, il y a 8 000 ans environ. Les Grecs, puis les Romains, avaient fait des volcans le lieu de vie d'Héphaïstos, puis de Vulcain. Ce dieu du feu et du métal avait été précipité du haut de l'Olympe par sa mère Héra (Junon). Fort laid et boiteux, il travailla alors dans ces gigantesques forges naturelles, aidé par les Cyclopes. Il entraînait dans des colères folles (éruptives !), quand, selon la légende, il découvrait qu'Aphrodite (Vénus), sa femme légitime, le trompait. Volcan et beauté se trouvaient déjà associés dans la mythologie.

Progressivement, le volcan intéresse les hommes d'esprit. Le poète lyrique grec Pindare signale une éruption de l'Etna en 475 av. J.-C. Empédocle, philosophe d'Agrigente du v^e siècle av. J.-C. se retira sur l'Etna. Il expliqua la production de laves et l'émission d'eaux thermales par la présence d'un « feu interne ». La légende raconte qu'il se donna la mort en se jetant dans le cratère du volcan, qui ne rejeta ensuite qu'une de ses sandales. La Torre del Filosofo, construite près du sommet mais aujourd'hui détruite, perpétuait sa mémoire. Au iv^e siècle av. J.-C., Platon, décrivant la tragédie de l'Atlantide, pourrait relater en fait une version déformée de l'éruption cataclysmale sur l'île de Santorin au xvii^e siècle avant notre ère.

L'éruption de 79 ap. J.-C. du Vésuve marque sans doute la naissance de la volcanologie. Pline l'Ancien, auteur d'une vaste *Histoire naturelle*, fait le premier des observations scientifiques mais périt lors de l'éruption. Son neveu, Pline le Jeune, relate les événements d'une façon étonnamment précise dans sa correspondance avec Tacite. L'oncle et le neveu méritent le titre de premiers volcanologues.

La science volcanologique progresse lentement. Il faut attendre l'année 1752 pour que Guettard attribue de façon formelle une origine volcanique aux monts d'Auvergne. En 1778, Barthélemy Faujas de Saint-Fond, premier professeur de géologie de France, publie ses *Recherches sur les volcans éteints du Vivarais et*

du Velay. La querelle, qui oppose les Neptunistes (Werner et ceux qui pensent que tous les terrains proviennent de dépôts d'origine marine) aux Plutonistes (Hutton et les partisans d'un «feu central» et d'une origine interne des roches), complique le débat durant tout le XVIII^e siècle. Jusqu'à la dernière guerre mondiale, le volcan est considéré comme anecdotique et le volcanisme relégué dans un maigre chapitre des traités de géologie.

La compréhension de la dynamique globale de la planète Terre, dans les années 1960, a montré le rôle premier du volcanisme. Les interactions entre l'homme et les volcans sont multiples. Le volcan est trop souvent nuisible, responsable de catastrophes meurtrières. Des villes entières vivent sous la menace d'un volcan. Ce dernier modifie parfois le climat à l'échelle planétaire. Mais le volcan peut aussi, paradoxalement, s'avérer fort utile car il est source de matières premières utiles (métaux, matériaux de construction) ou énergétiques (géothermie).

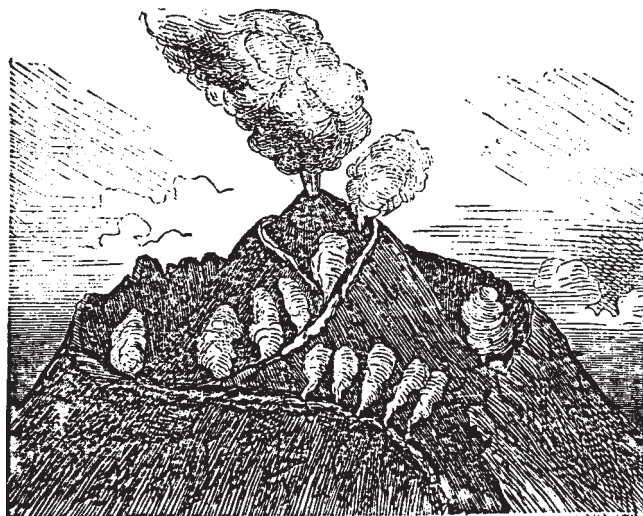


FIGURE 1 — Le sommet du Vésuve en 1774 (in FUCHS, 1878).

En ce début de millénaire, la réduction des risques naturels demeure une priorité. La prévision et la prévention des éruptions volcaniques s'intègrent dans ce cadre.

La connaissance des volcans et des magmas a fait des progrès immenses au cours des dernières années, que le présent livre se propose de refléter : par exemple, les chambres magmatiques sont maintenant bien connues voire modélisées, les quantités de matériaux et d'énergie mises en jeu lors d'éruptions actuelles ou anciennes sont parfaitement quantifiées. La volcanologie, science typiquement interdisciplinaire, s'appuie sur plusieurs domaines : pétrographie et minéralogie (étude des roches et de leurs constituants), sédimentologie (agencements des dépôts), géochimie (analyse des phases solides et fluides), tectonique globale (situation des volcans dans les différents contextes géologiques), géophysique (mesure physique des paramètres), planétologie (reconnaissance des volcans extraterrestres). Il est bien évident que l'ensemble ne peut être traité dans un manuel d'environ 300 pages ! Le lecteur

intéressé par tel ou tel aspect particulier se reportera aux livres spécialisés. En particulier, la tectonique des plaques est supposée connue, la géochimie des éléments en trace et des isotopes, marqueurs du manteau et des magmas et la thermodynamique minéralogique ne seront qu'abordées. Le magma, de sa production à son émission, nous servira de fil conducteur. On insistera sur l'aspect dynamique des phénomènes, profonds et superficiels : un voyage de 100 km entre manteau et croûte terrestres !

Lorsque, en 1990, au cours d'un beau printemps, je m'engageais à remettre à l'éditeur mon manuscrit de la première édition pour le début du mois de mai de l'année suivante, plus précisément le jour de la Saint-Jacques, je ne me doutais pas vraiment du chemin à parcourir.

J'espère simplement avoir résolu davantage de problèmes, que je n'en ai posés !

Jacques-Marie Bardintzeff

Jacques-Marie Bardintzeff est l'auteur de plus de 400 contributions scientifiques et d'une vingtaine de livres, traduits en huit langues, référencés dans les pages web :

www.lave-volcans.com/bardintzeff.html

www.futura-sciences.com/fr/scientifique/t/terre/d/bardintzeff_80/

blog « Volcanmania » : <http://blogs.futura-sciences.com/bardintzeff/>

<http://geops.geol.u-psud.fr/spip.php?article707>

Première partie

Du manteau à la chambre magmatique



FIGURE 1.0 — Les bombes volcaniques renferment parfois une enclave (nodule) de péridotite, fragment du manteau terrestre. Échantillon prélevé au puy Beaunit dans la chaîne des Puys (photo D. DECOBECQ).

LA FUSION PARTIELLE DU MANTEAU

1

« *Felix qui potuit rerum cognoscere causas.* »
Virgile

1.1. L'ORIGINE MANTELLIQUE DES MAGMAS

Les magmas, liquides silicatés, qui s'épanchent à la surface du globe, proviennent bien évidemment de l'intérieur de la Terre. On a longtemps cru, et l'idée reste encore répandue auprès du grand public, que l'intérieur de la planète, siège d'un « feu central », était constitué de matières en fusion, qui montaient lors des éruptions volcaniques. Il est vrai que les températures régnant au centre de la Terre ont été estimées à 5 100 °C, valeur bien supérieure à celle de la fusion des roches (800-1 200 °C) en surface. Mais c'est oublier qu'à de telles profondeurs, et donc à de telles pressions ($4 \times 10^6 \text{ atm} = 4 \times 10^5 \text{ MPa}$ au centre de la Terre), les températures de fusion augmentent considérablement. Les enregistrements des ondes sismiques ont montré que la grande majorité du globe (la croûte superficielle, le manteau sous-jacent limité à 2 900 km de profondeur par la discontinuité de Gutenberg, et le noyau interne, de 5 100 jusqu'à 6 370 km, centre de la Terre) reste solide (Fig. 1.1). Seul le noyau externe entre 2 900 et 5 100 km serait dans un état proche de celui d'un liquide car il ne transmet pas les ondes sismiques transversales. Il n'est cependant pas en relation directe avec la surface et sa densité élevée lui interdit toute montée. La naissance d'un magma implique donc un processus de fusion, à un niveau de profondeur donné du globe.

Une zone particulière de quelques kilomètres d'épaisseur, repérée au sein du manteau supérieur, à une profondeur moyenne de 100 à 250 km sous les continents et de 70 km sous les océans (et de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres seulement sous les dorsales ou dans certaines régions particulières), ralentit sensiblement les vitesses sismiques, d'où son nom de *zone à moindre vitesse* ou *low velocity zone* (LVZ). Cette zone sépare la **lithosphère**, constituée de la croûte continentale ou océanique et d'une partie du manteau supérieur, de l'**asthénosphère** sous-jacente, constituée du reste du manteau supérieur. Par ailleurs, la Terre produit de la chaleur ($4,2 \times 10^{13} \text{ W}$) : une partie (1/5), originelle, date de l'accrétion de la planète et se dissipe depuis, tandis que l'autre partie (4/5) provient de la désintégration des isotopes radioactifs (K, Th, U) contenus dans le globe. Cette chaleur ne peut pas s'évacuer par un simple processus de

Première partie • Du manteau à la chambre magmatique

conduction thermique. Elle entraîne, en se dissipant, des mouvements de convection de l'asthénosphère dont l'état solide reste néanmoins plastique.

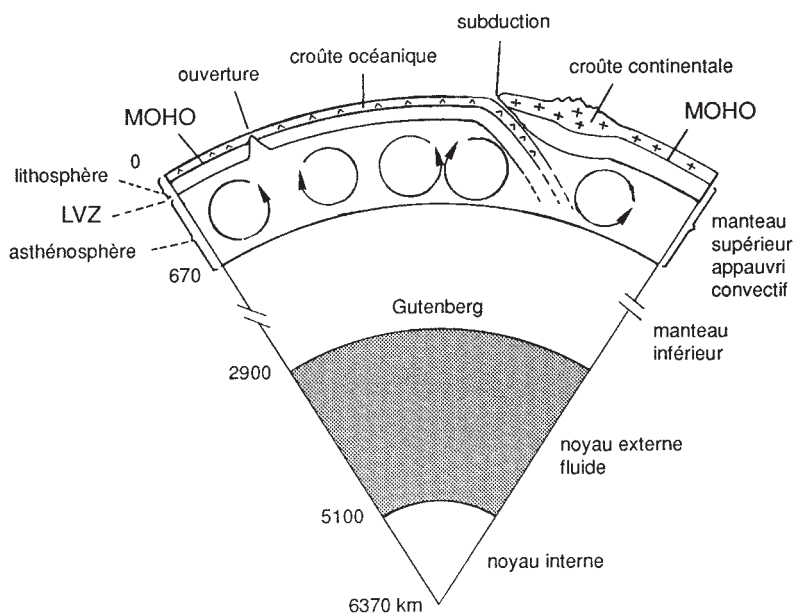


FIGURE 1.1 — Coupe schématique de la Terre.

Les échelles verticales ne sont pas respectées : les épaisseurs des croûtes océanique et continentale, de la lithosphère et de l'asthénosphère sont exagérées.

La LVZ témoignerait d'une fusion très limitée du manteau à ce niveau, de l'ordre de 1 % (c'est-à-dire 10 g de magma pour 1 kg de manteau solide !) ou moins. Les effets contraires de la pression et de la température sur la fusion s'équilibrent presque. La température, voisine de 1 300 °C (on assimile aussi la LVZ à l'isotherme 1 300 °C), se rapproche du point de fusion de l'olivine, minéral constituant principal du manteau. Une faible modification locale des paramètres thermodynamiques peut augmenter sensiblement le taux de fusion du manteau. La LVZ et la zone sus-jacente apparaissent donc comme les lieux privilégiés de formation des magmas, qui, dans leur très grande majorité, prennent naissance au sein du manteau supérieur. Des études sismologiques de l'Observatoire volcanologique d'Hawaii ont en effet montré que des séismes précédant les éruptions se produisent à environ 60 km au-dessous du Kilauea, ce qui suggère une origine du magma à ce niveau (Eaton et Murata, 1960). De fait, la grande majorité des magmas prennent naissance entre 50 et 250 km de profondeur. Certains magmas, cependant, se forment encore plus profondément dans le manteau (certains volcans remontent des fragments — nodules — de 400 km de profondeur), voire même au niveau de la limite manteau-noyau. D'autres magmas, au contraire, naissent plus superficiellement, aux dépens de la croûte terrestre (20-30 km de profondeur) mais ils constituent une minorité (chapitre 12). Pour les magmas mantelliques, deux questions principales se posent : quelle est la constitution du manteau terrestre ? et quels sont les processus de fusion ?

1.2. LA CONSTITUTION DU MANTEAU TERRESTRE

La nature péridotitique du manteau

La roche, longtemps restée énigmatique, qui constitue le manteau supérieur terrestre, fut baptisée « pyrolite », abréviation signifiant « pierre (lithos) en pyroxènes et olivines, d'origine profonde (pyros = feu) ». Trois types principaux d'approche permirent sa connaissance. Des bombes volcaniques tout d'abord, qui remontent, à l'occasion d'explosions violentes, des nodules de péridotite verte (Fig. 1.0), constituée en grande majorité de péridots (olivine), d'origine profonde. Par ailleurs, certains grands accidents tectoniques (Lherz dans les Pyrénées, Lanzo en Italie, Béni Boussera au Maroc), qui affectent le manteau, mettent à jour des massifs de péridotite. Enfin, certaines météorites, appelées chondrites, issues de la ceinture d'astéroïdes située entre Mars et Jupiter, qui tombent sur la Terre, ont une composition supposée très proche de celle de la Terre primitive. Des calculs permettent alors de retrouver la constitution du manteau (tableau 1.1). Ces trois observations, distinctes, prouvent que le manteau a une constitution très voisine de celle d'une péridotite (photo couleur hors texte 33a) de type lherzolite (assemblage d'une majorité d'olivines avec des clinopyroxènes et des orthopyroxènes). Ringwood (1966) en a calculé la composition chimique, en supposant un mélange de 3/4 de péridotite et de 1/4 de basalte (tableau 1.1).

Green et Ringwood (1967a), à partir de travaux expérimentaux, reconstituèrent les assemblages de minéraux en équilibre dans le manteau (Fig. 1.2).

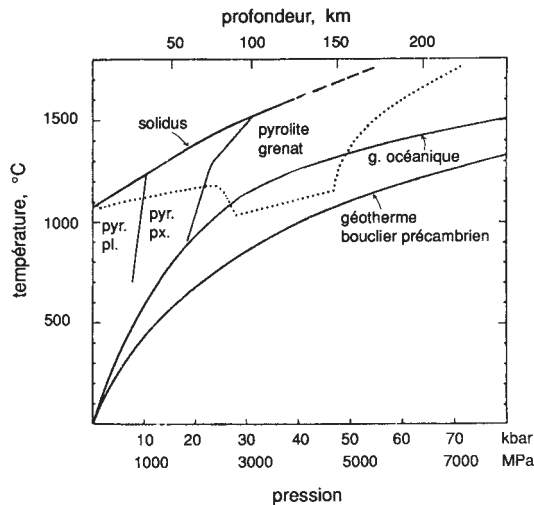


FIGURE 1.2 — Fusion de la pyrolite (d'après GREEN et RINGWOOD, 1967a, modifié).

Champs respectifs de la pyrolite à plagioclase (pyr. pl.), de la pyrolite à pyroxène (pyr. px.) et de la pyrolite à grenat. Le géotherme océanique et le géotherme des boucliers précambriens sont tracés, le géotherme moyen se situant entre les deux. Alors que le solidus de la pyrolite sèche (trait plein) se situe au-dessus de ceux-ci, celui de la pyrolite hydratée (pointillé) recoupe le géotherme entre 100 et 150 km de profondeur, autorisant ainsi une fusion partielle.

Première partie • Du manteau à la chambre magmatique

TABLEAU 1.1 — Analyses chimiques représentatives et normes CIPW de chondrite, de pyrolite et périclase mantelliques et de basaltes « primaires ». (*) signifie que l'ensemble du fer a été analysé, selon les cas, sous forme de FeO ou de Fe₂O₃.

	1	2	3	4	5	6	7
<i>Analyse en % en poids d'oxydes</i>							
SiO ₂	48,00	45,16	44,59	48,28	45,70	42,00	49,78
TiO ₂	0,13	0,71	0,06	0,22	0,05	4,23	0,68
Al ₂ O ₃	3,00	3,54	2,98	4,91	1,60	12,50	15,69
Cr ₂ O ₃	0,55	0,43	0,26	0,25	0,41		
Fe ₂ O ₃	0	0,46	1,68	0	0,77	*14,33	2,73
FeO	*13,00	8,04	6,83	*9,95	5,21	0	9,20
MnO	0,40	0,14	0,17	0,14	0,09	0,19	0,35
MgO	31,00	37,47	41,10	32,53	42,80	9,59	7,79
CaO	2,30	3,08	2,22	2,99	0,70	11,13	11,93
Na ₂ O	1,10	0,57	0,22	0,66	0,09	2,47	1,21
K ₂ O	0,13	0,13	0,05	0,07	0,04	0,93	0,29
NiO		0,20			0,26		
P ₂ O ₅	0,34	0,06	0,01		0,01	0,66	0,07
H ₂ O ⁺			0,09		1,28	1,11	
H ₂ O ⁻			0,00		0,28		
total	99,95	99,99	100,26	100,00	99,29	99,14	99,72
<i>Norme CIPW</i>							
quartz	0	0	0	0	0	0	2,12
orthose	0,77	0,77	0,30	0,41	0,24	5,50	1,71
albite	9,31	4,82	1,86	5,58	0,76	10,94	10,24
anorthite	2,86	6,72	7,00	10,23	3,41	20,27	36,52
néphéline	0	0	0	0	0	5,40	0
clinopyroxène							
* Ca	2,73	3,43	1,65	1,92	0	12,97	9,29
* Mg	1,99	2,72	1,31	1,47	0	8,16	4,92
* Fe	0,49	0,32	0,15	0,25	0	4,00	4,09
orthopyroxène							
* Mg	29,01	16,32	16,64	31,92	30,61	0	14,48
* Fe	7,15	1,94	1,97	5,54	2,44	0	12,03
olivine							
* Mg	32,38	52,06	59,15	33,38	53,25	11,02	0
* Fe	8,79	6,83	7,70	6,38	4,67	5,96	0
magnétite	3,14	2,04	2,02	2,41	1,43	3,12	2,82
ilménite	0,25	1,35	0,11	0,42	0,09	8,03	1,29
apatite	0,74	0,13	0,02	0	0,02	1,44	0,15
corindon					0,16		

Toutes les normes ont été calculées en supposant un rapport Fe³⁺/(Fe²⁺ + Fe³⁺) égal à 0,15. On remarque la richesse en olivines et en pyroxènes normatifs des roches 1 à 5, très proches du manteau terrestre.

(Voir légendes des colonnes du tableau 1.1 ci-contre.)