



Michel Detay

Traité de

volcanologie physique

*L*avoisier
TEC & DOC

Michel Detay

TRAITÉ DE VOLCANOLOGIE PHYSIQUE

Préface d'Édouard Kaminski

Préambule de Pierre Thomas


TEC & DOC

editions.lavoisier.fr

Direction éditoriale : Fabienne Roulleaux
Édition : Laurence Sourdillon
Fabrication : Estelle Perez
Couverture : Isabelle Godenèche
Illustrations : Élise Bonhomme
Composition : Patrick Leleux, PAO

© 2017, Lavoisier, Paris
ISBN : 978-2-7430-2258-7

Photos : © Michel Detay (www.detayphoto.com) sauf mention contraire.

Illustration de couverture :

Lac de lave du Nyiragongo, République Démocratique du Congo, juin 2011. Cliché Michel Detay.

Pour plus d'informations sur nos publications



newsletters.lavoisier.fr/9782743022587

SOMMAIRE

Préface, par Édouard Kaminski	VII	CHAPITRE 2 CADRE GÉODYNAMIQUE DU VOLCANISME	43
Préambule, par Pierre Thomas	IX	1. La Terre : machine thermique	44
Introduction	1	1.1. Refroidissement séculaire de la Terre	47
CHAPITRE 1 GÉOMORPHOLOGIE VOLCANIQUE	5	1.2. Structure interne de la Terre	50
1. Grandes classifications géomorphologiques	6	Rebond post-glaciaire	50
1.1. Selon la géométrie des volcans	7	Équations de la dynamique du manteau	52
Caldeiras	9	1.3. Teneur en eau dans la Terre profonde	54
Le volcan agent de changements topographiques	10	1.4. Modèle conceptuel actuel	55
1.2. Selon « la couleur » des volcans	11	2. Le paradigme de la tectonique globale	56
Volcan rouge aux éruptions effusives	11	2.1. La subduction	58
Volcan gris aux éruptions explosives	11	L'eau : responsable de l'activité magmatique	
2. Principaux dynamismes éruptifs	12	des zones de subduction	60
2.1. Éruption hawaïenne et islandaise	12	Quand la plaque océanique devient plus dense	
2.2. Éruption strombolienne	13	que l'asthénosphère	60
2.3. Éruption vulcanienne et péléenne	14	2.2. Les dorsales et la décompression	60
2.4. Éruption plinienne et ultraplinienne	15	2.3. Collisions continentales et chaînes	
3. Grands types morphologiques de lave	17	de montagnes	61
3.1. Coulées de lave (fluides)	18	3. Les volcans : marqueurs de la tectonique	
3.2. Dômes et aiguilles d'extrusion (visqueux)	19	des plaques	62
3.3. Quelques figures morphologiques singulières	19	3.1. Volcans de dorsales	62
Prismation	19	3.2. Volcans de marges continentales actives	64
Pseudo-cratères	22	3.3. Volcans d'arc insulaire	65
Cratères égueulés	23	3.4. Volcans intraplaques et points chauds	66
Montagnes en table et glaciovolcanisme	23	4. Taux de production magmatique terrestre actuel	67
3.4. Verres volcaniques	24	5. Développements	69
4. Retombées volcaniques	25	CHAPITRE 3 FONDAMENTAUX DE PÉTROLOGIE	
4.1. Cendres et bombes volcaniques	26	MAGMATIQUE	71
4.2. Constructions de scories	26	1. Notion de magma	72
Spatter cones et hornitos	26	1.1. Principales variables physiques	74
4.3. Remobilisation des laves par des agents externes	27	Viscosité	75
4.4. Produits pyroclastiques	28	Densité	75
Ignimbrites	28	Teneur en composés volatils	76
5. Magmatisme profond et expression après érosion	30	1.2. Quelques éléments de classification	
5.1. Formes d'inversion de relief	30	des roches volcaniques	77
5.2. Principales formes de dénudation	30	Couleur de la roche	78
Cheminées volcaniques, necks, dykes	30	Taux de saturation en silice	78
Sills et laccolites	31	Alcalinité	79
Maars et diatèmes	32	Taux de saturation en magnésium	80
Quelques reliefs magmatiques caractéristiques	32	Taux de saturation en alumine	80
6. Signatures et indices éruptifs	33	1.3. Éléments majeurs et éléments traces	81
7. Indice d'explosivité volcanique	34	Signature géochimique des terres rares	81
7.1. Paramètres éruptifs : magnitude, dispersion		1.4. Fractionnement chimique : éléments compatibles	
et intensité	36	et incompatibles	84
7.2. Étude de la répartition et de l'épaisseur des dépôts	36	1.5. Les isotopes traceurs des processus	
7.3. Fréquence des éruptions	41	magmatiques	85
8. Conséquences	41	Âges radiométriques	85
		Tracage isotopique des processus magmatiques	88

2. Fusion partielle	89
2.1. Fusion partielle à l'équilibre.....	91
2.2. Fusion partielle fractionnée ou distillation de Rayleigh.....	92
2.3. Isotherme, solidus et liquidus.....	94
2.4. La roche-mère des magmas mantelliques : les péridotites.....	96
Des nodules de péridotites.....	97
Les réactions de fusion des péridotites.....	98
2.5. Notion de magma primaire.....	99
3. Cristallisation fractionnée	100
3.1. Règle des phases de Gibbs.....	102
3.2. Bilan de masse.....	102
3.3. Distillation de Rayleigh dans une chambre magmatique.....	103
3.4. Nucléation et croissance cristalline.....	104
4. Notions de séries magmatiques cogénétiques	105
4.1. La série alcaline.....	108
4.2. La série tholéiitique.....	109
4.3. La série calco-alcaline.....	111
4.4. La série transitionnelle.....	112
4.5. La série shoshonitique.....	112
5. Le magmatisme dans le temps	112
5.1. Komatiites.....	113
5.2. Adakite.....	114
5.3. Carbonatites.....	114
5.4. Kimberlites.....	115
5.5. Boninites.....	117
5.6. Géodynamique archéenne et mise en place des continents.....	117
6. Conclusion	118

CHAPITRE 4 RÉSERVOIR ET PLOMBERIE MAGMATIQUE-VOLCANIQUE

1. Concept de réservoir et de plomberie magmatique	122
2. Enseignement des granites, IBL, ophiolites	124
2.1. Granites d'origine mantellique.....	124
2.2. Granites d'origine crustale et d'anatexie.....	126
En contexte de collision et d'hypercollision.....	127
En contexte de décompression : relaxation-étirement.....	128
Granites S.....	129
Granites A.....	130
2.3. Granites mixtes (contamination et mélange).....	130
Contamination.....	130
Mélange.....	132
2.4. Granites et processus pétrogénétiques.....	133
3. Flux et mélanges intra-chambre	134
3.1. Réalimentation magmatique – exemple du Bushveld.....	134
3.2. Mélange de magmas.....	136
3.3. Assimilation de l'encaissant.....	137
Présence des xénolites.....	138
3.4. Couche limite thermique.....	138
4. La chambre magmatique : un réacteur à part entière	139
4.1. Mouvements de convection dans la chambre magmatique.....	140
Convection continue ou intermittente.....	140

Convection thermique et compositionnelle (double-diffusive).....	140
Établissement d'une stratification chimique par double convection.....	141
4.2. Courants de densité dans le magma et ségrégation de flux	141
Courants magmatiques.....	141
Effet Bagnold.....	142
Filtre presse et veines de ségrégation.....	142
Ségrégation par densité.....	143
Cristallisation fractionnée et apports de magma « frais ».....	144
Évolution de la cristallinité.....	146
Distribution des tailles de cristaux.....	147
4.3. Processus connexes et tardifs	148
Variation de potentiel redox.....	148
Fluctuation de la fugacité d'oxygène.....	148
Métagénèse.....	149
Immiscibilité.....	149
Mûrissement d'Ostwald.....	149
Cortège filonien : pegmatites et aplites.....	149
4.4. Litage des IBL	150
5. Perspectives	152

CHAPITRE 5 VOLCANOLOGIE PHYSIQUE 155

1. Ségrégation et migration des liquides de fusion	156
1.1. Angle de mouillage.....	157
1.2. Longueur de compaction et déformations syn-magmatiques.....	158
2. Ascension du magma	159
2.1. Flottabilité.....	159
2.2. Ascension du magma en milieu poreux.....	161
2.3. Ascension du magma dans un dyke.....	162
Dynamique des fluides.....	162
Loi de Stokes.....	164
2.4. Ascension des magmas très visqueux.....	164
2.5. Éruptions de plusieurs magmas distincts.....	165
2.6. Quelques ordres de grandeur.....	166
Analogie du trou du phoque dans la banquise.....	167
Vitesse ascensionnelle du magma déduite de la présence de nodules de péridotites.....	167
Vitesse d'ascension du magma déduite de la hauteur des fontaines de lave.....	169
3. Éruption d'un magma basaltique	169
3.1. Modélisation des coulées de lave.....	169
Physique de l'écoulement.....	172
Longueur d'une coulée de lave.....	178
3.2. Tunnels de lave.....	179
Lavaclides.....	180
Similitudes entre tunnel de lave et chenaux de dissolution.....	182
3.3. Lacs de lave.....	183
Nyiragongo.....	184
Erta Ale.....	185
Hawaï.....	185
4. Éruption d'un magma silicique	187
4.1. Dômes de lave.....	187
Mise en place.....	189
Déstabilisation d'un dôme de lave.....	190

Modélisation de la mise en place d'un dôme de lave	192	5.1. Provinces tholeiitiques continentales des CFB ...	255
4.2. Courants de densité pyroclastiques	194	5.2. Volcanisme potassique continental	257
Écoulements pyroclastiques	196	6. Modèles du manteau et distribution des hétérogénéités	258
Déferlantes	197	6.1. Rapport initial ou « âge modèle »	258
Unité et diversité des CDP	198	6.2. Rapport isotopique de He et Ar et dynamique du dégazage	259
5. Exposé	198	Quid de la nature du manteau primitif ?	259
CHAPITRE 6 LE PHÉNOMÈNE ÉRUPTIF	201	7. Éléments de synthèse	262
1. Origine et importance des gaz volcaniques	202	CHAPITRE 8 HYDROVOLCANOLOGIE	265
1.1. Un magma riche en eau	203	1. Éruptions hydrovolcaniques	266
1.2. Influence de la présence d'une phase fluide	205	1.1. Phréatisme et phréatomagmatisme	266
1.3. Comportement métastable de certains minéraux hydroxylés	205	1.2. Hyaloclastites	267
2. Composés volatils et phénomène éruptif	207	1.3. Maars-diatrèmes	268
2.1. Nucléation et apparition d'une phase gazeuse ...	207	1.4. Systèmes hydrothermaux	269
2.2. Diffusion, décompression, coalescence	208	2. Volcanisme sous-marin	271
Mousse magmatique	210	2.1. Caldeira sous-marine et VMS	272
2.3. De l'exsolution à la fragmentation	211	2.2. Volcans hors axe	273
Fragmentation secondaire	213	2.3. Événements hydrothermaux sous-marins	273
3. Déclenchement de l'éruption	214	3. Hydrovolcanologie superficielle	275
3.1. Éruption explosive ou effusive ?	215	3.1. Fumerolles et solfatares	275
3.2. Colonnes pliniennes et/ou coulées pyroclastiques ?	216	3.2. Geysers	277
3.3. Instabilité intrinsèque d'une colonne plinienne	222	3.3. Lacs acides	278
3.4. Modélisation des panaches pliniens	223	Lacs à forte teneur en CO ₂ et risque d'éruption limnique	280
3.5. Styles éruptifs fonction de la vitesse et du flux de masse	224	Proposition de classification des lacs de cratère	282
4. Contingence	226	3.4. Mofettes et sources thermominérales	283
CHAPITRE 7 PROCESSUS VOLCANIQUE ET GÉODYNAMIQUE	229	3.5. Volcans de boue et de sable	283
1. Zones de divergence (MORB)	232	4. Extrémophiles en environnement volcanique	285
1.1. Chambres magmatiques	232	5. Ressources minérales et industrielles paravolcaniques	288
Chambres des dorsales rapides	232	5.1. Diamants	288
Chambres des dorsales lentes	234	5.2. Industrie lithique	289
Chambres des dorsales ultra-lentes	235	5.3. Géothermie	289
1.2. Processus magmatiques	236	5.4. Roches volcaniques et ressources en eau	290
2. Zones de convergence	237	5.5. Eau, volcan et santé	291
2.1. Magmatisme d'arc insulaire	238	5.6. Ressources minérales	291
2.2. Magmatisme de cordillère (marge continentale active)	239	5.7. Sites hydrothermaux sous-marins : ressources minérales du futur	293
Influence de l'âge et du pendage de la plaque subduite	240	6. Résumé	294
Slab roll-back, slab break-off et délamination lithosphérique	240	CHAPITRE 9 VOLCANISME PAROXYSMAL	297
Magmatisme MASH caractéristique des arcs	243	1. Caldeiras	298
Magmas d'arrière arc	243	1.1. Super-caldeiras ignimbritiques	299
Ouverture d'une fenêtre asthénosphérique	243	1.2. Très grandes éruptions acides	300
2.3. Cycle de la croûte océanique	244	Taille et fréquence des très grosses éruptions acides	301
3. Îles océaniques (OIB)	245	1.3. Dynamique de formation des caldeiras	302
3.1. Guirlandes et archipels basaltiques	247	Éruption caldérique < 100 km ³	302
Guirlande basaltique d'Hawaii : OIT et OIA	247	Éruption caldérique > 100 km ³	303
Archipels volcaniques (OIA)	248	Modèle générique	304
Lignes chaudes	248	Éruptions « expresses »	304
3.2. Différents réservoirs mantelliques sources des basaltes océaniques	248	Importance de l'effondrement	305
Pôles géochimiques et modèle dynamique simplifié du manteau	253	Caldeira hydrothermale	305
4. Plateaux océaniques (OPB)	253	2. Essaims de dykes géants	307
5. Domaine intraplaque continental	255	3. Supervolcans	309
		3.1. Modélisation de la super-éruption du Yellowstone	311
		3.2. Supervolcans et super-caldeiras	314
		3.3. Supervolcans et supercycles	315

3.4. Toba et l'extinction partielle des Hominidés	316	3. Nuées ardentes et courants de densité pyroclastiques	372
4. Grandes provinces magmatiques (LIP)	317	3.1. Shadocks et Gibis	373
4.1. Trapps, CFB et OP	318	Éruption de la Soufrière de Guadeloupe – 1976	373
4.2. Trapps et extinctions	320	Éruption de la Soufrière de Montserrat – 1995	374
Comparaison entre l'énergie libérée		3.2. La difficile question de l'évacuation	375
par une éruption majeure et un géocroiseur	321	3.3. Des éclairs dans les CDP	377
5. Panaches mantelliques	322	4. Cendres volcaniques	377
5.1. Panache et séries magmatiques	323	5. Séismes	377
5.2. Sous-placage magmatique et accrétion crustale	325	6. Tsunami	378
5.3. Les points chauds, un référentiel fixe ?	326	7. Jökulhlaups et lahars	379
5.4. Les super-panaches, super-bombements	326	7.1. Jökulhlaups	379
6. Crypto-continents et crypto-volcans	328	7.2. Lahars	380
7. Déductions	329	8. Avalanches de débris et glissements de terrain	381
CHAPITRE 10 INFLUENCE DU VOLCANISME SUR LE CLIMAT	331	9. Coulées de débris	385
1. Effet de serre	333	10. Instabilité des lacs acides	386
1.1. Sans effet de serre : une Terre gelée	333	11. Pollution radioactive ?	387
1.2. Entrée et sortie de phase « Snowball Earth »	333	12. Géotourisme volcanique et hydrothermal	388
1.3. Des rétroactions positives et négatives	334	13. Mitigation	389
Altération des basaltes	335	13.1. Prévisions volcaniques	389
Influence de la tectonique des plaques	336	Tomographie sismique	391
Incidence des téphras sur le phytoplancton	337	Tomographie cosmique	392
2. Indicateurs et essais de quantification	337	InSAR	393
2.1. Mesure de l'épaisseur optique de l'atmosphère		Aléas et risque volcanique	394
(DVI - Sato)	338	Niveaux d'alerte	395
2.2. Glaciological Volcanic Index (GVI)	339	13.2. De la cohabitation des volcans	
2.3. Instrumentation embarquée à bord		avec l'aéronautique	395
des satellites artificiels	341	Nuage de cendres	397
2.4. Couche d'ozone	343	Gaz et acide sulfurique	398
3. Gaz à effet de serre (GES) volcaniques		Décharge électrostatique	398
en période normale	344	Quelques incidents	398
3.1. Cycle de l'eau	344	14. Bilan	399
3.2. Cycle du carbone	345	CHAPITRE 12 LES VOLCANS EXTRATERRESTRES	401
Gaz carbonique : CO ₂	345	1. La Lune	402
Méthane : CH ₄	347	1.1. Formation de la Lune	403
3.3. Cycle du soufre	347	1.2. Une géochronologie lunaire basée	
3.4. Cycle des halogènes	349	sur l'étude des cratères d'impact	403
Chlore atmosphérique	349	Des tunnels de lave sur la Lune et Mars	403
3.5. Contribution du volcanisme en période normale	350	2. Mars	404
4. GES volcaniques en période paroxysmale	351	2.1. Volcanisme	404
4.1. Émissions volcaniques pliniennes		2.2. Géomorphologie volcanique et dynamisme	
et ultra-pliniennes	352	éruptif martien	405
Éruptions de l'Eldgjá et du Laki	353	2.3. Tectonomagmatisme	406
Petit âge glaciaire expliqué par l'éruption		3. Mercure	406
du Samalas	354	4. Vénus, musée de la morphologie volcanique	407
4.2. Contribution du volcanisme paroxysmal	355	5. Durée de vie du volcanisme des planètes	
5. GES volcaniques des supervolcans	356	telluriques	409
5.1. Méga-coulées	357	6. Un volcanisme extraterrestre atypique	410
5.2. Contribution d'une super-éruption	358	6.1. Volcanisme gravitationnel d'Io	410
6. GES volcaniques en période de trapps, LIP et CFB	359	6.2. Cryovolcanisme	411
6.1. Contribution des trapps, LIP et CFB	359	Encelade	411
7. Raisonnement	362	Europe	411
CHAPITRE 11 RISQUES VOLCANIQUES ET MITIGATION	365	7. Mises en perspectives	412
1. Coulées de lave	369	8. Interrogations	413
2. Gaz volcaniques	370	Annexes	415
2.1. Gaz carbonique et risque d'éruption limnique	370	Glossaire	421
2.2. Dioxyde de soufre et acide sulfurique	370	Orientation bibliographique	433
2.3. Matières particulaires PM _{2,5}	371	Index des noms propres	455
		Index général	459

PRÉFACE

Les volcans sont terre de paradoxes. Manifestation quasiment négligeable de l'activité terrestre d'un point de vue thermodynamique, ils n'en représentent pas moins un des phénomènes naturels les plus fascinants, pouvant être tour à tour majestueux, silencieux, instables, meurtriers, pourvoyeurs de terrains fertiles ou perturbateurs du climat mondial. De tels objets – on parlera plutôt de systèmes – naturels ne peuvent être cernés que par une approche scientifique multidisciplinaire qui combine physique, chimie et géologie de terrain.

Cette approche, dont la richesse a peu à céder à la richesse même des phénomènes étudiés, a profondément renouvelé la volcanologie depuis les années 1980 et quelques éruptions que l'on peut qualifier de fondatrices, comme celles du Mont St Helens en 1980 et du Pinatubo en 1991. Elle a permis aux scientifiques de dépasser les anciens paradigmes qui se ramenaient le plus souvent à une classification des types volcaniques voire des édifices eux-mêmes, et de proposer un cadre physique cohérent dans lequel on peut replacer, modéliser et comprendre les phénomènes magmatiques et volcaniques.

Mais ce qui est aujourd'hui le cadre commun utilisé dans les laboratoires de sciences de la Terre étudiant les volcans n'est encore que partiellement et parfois imparfaitement transmis aux élèves de collèges et lycées, aux étudiants, voire aux futurs et actuels enseignants du secondaire. Une partie de l'intérêt pour les classifications continue ainsi à conserver un poids important dans les enseignements, au détriment de la présentation et de l'explication des processus physiques à l'œuvre au cœur des volcans.

Cette difficulté est de mon point de vue à relier à un autre paradoxe des volcans : fascinant le grand public, ils font l'objet de très nombreux livres de vulgarisation, le plus souvent exceptionnellement illustrés, mais réduits à la partie congrue pour ce qui concerne les modèles physiques. Les ouvrages d'un niveau universitaire, bien que de qualité, se comptent sur les doigts d'une main et ne sont pas exhaustifs.

La volcanologie physique en tant que telle n'avait pas fait jusqu'à présent l'objet d'un ouvrage de synthèse glo-

bale d'envergure, du moins en Français, nos collègues anglo-saxons bénéficiant de l'*Encyclopedia of Volcanoes*. C'est ce manque que vient combler l'ouvrage de Michel Detay.

Cet ouvrage s'inscrit dans une longue tradition, qui débute dès l'Antiquité par le livre II des « Météorologies » de Platon où est proposée la théorie des vents pour expliquer le fonctionnement des volcans, théorie reprise par Lucrèce dans le *De Natura Rerum*. On retiendra bien sûr comme publication majeure de l'Antiquité en volcanologie la lettre de Pline le Jeune dans laquelle il décrit l'éruption du Vésuve en 79. Mais gardons en tête qu'il s'agit ici d'une description – tout à fait remarquable – et qu'il n'y a pas de tentative d'explication physique, le scientifique Pline l'Ancien mourant quant à lui au pied du Vésuve sans avoir pu interpréter ses propres observations.

C'est au XIII^e siècle, à la suite de l'essor de la philosophie naturelle, des universités et des ordres mendiants, ainsi que du renouveau de la pratique scientifique insufflée par Alhazen ou Robert Grossetête, que des théories alternatives à la vision aristotélicienne seront proposées. Celle d'Albert le Grand, appuyée sur le travail encyclopédique d'Arnold de Saxe, représente les volcans comme un réservoir d'eau posé sur un feu et exhalant des vapeurs par des orifices. Ce rôle du feu sera repris par Kircher dans son traité de 1665, *Mundus subterraneus*, où les volcans sont vus comme les soupiraux d'où s'échappent les vapeurs incandescentes produites par le feu interne de la Terre, ancien Soleil refroidit.

Cette vision est à la base du Plutonisme qui s'opposera au XVIII^e siècle au Neptunisme, développé par Buffon dans son *Histoire Naturelle*, où l'eau joue un rôle central dans les phénomènes volcaniques, y compris les volcans issus en partie de la fermentation de minéraux... Le Plutonisme, défendu par James Hutton et Charles Lyell, s'imposera à partir de 1752 quand Guettard comprend que la roche de Volvic est issue d'une coulée de lave.

La période suivante sera celle de la volcanologie descriptive, avec des contributions majeures de Sir Hamilton concernant l'Etna et le Vésuve à la fin du XVIII^e siècle, ou la publication en 1829 du cinquante-huitième tome

du dictionnaire des *Sciences Naturelles* où Brongniart en particulier livre une synthèse remarquable des connaissances de l'époque.

La prochaine étape majeure à retenir dans l'histoire de la volcanologie et des publications est celle de 1902, quand se produit la catastrophique et meurtrière éruption de la montagne Pelée en Martinique et où est décidée la construction du premier observatoire volcanologique français. Si Lacroix publie à cette époque ce qui sera longtemps l'ouvrage de référence, *La Montagne Pelée et ses éruptions*, c'est son collègue Gautier, du Museum, qui comprend le premier le rôle de la phase gazeuse dans les éruptions explosives.

Après l'avènement de la tectonique des plaques dans les années 1970, la géologie opère sa véritable mue pour devenir les Sciences de la Terre quantitatives. Mais la volcanologie restera plus longtemps qualitative que d'autres branches des Sciences de la Terre. C'est ainsi qu'Haroun Tazieff ou les époux Krafft, dont le rôle dans la popularisation de la volcanologie est tout à fait remarquable, n'ont pas livré d'œuvres scientifiques en tant que telles. L'heure de la volcanologie physique « moderne » n'avait pas encore sonné en France ; elle était cependant bien avancée dans le monde anglo-saxon.

S'il ne fallait retenir qu'un nom comme père de la volcanologie physique, ce serait ainsi celui de George P.L. Walker. Titulaire d'une thèse de minéralogie obtenue en 1956 à Leeds, George Walker fut le premier à entreprendre des observations systématiques des dépôts volcaniques et à les synthétiser dans un cadre physique pour le fonctionnement des volcans, en s'intéressant en particulier à la connexion entre les phénomènes éruptifs et leur signature dans les dépôts. Il sut dépasser les frontières de l'approche naturaliste pour collaborer avec le physicien Lionel Wilson qui allait devenir un de ses influents disciples, aux côtés de Steve Self et de Steve Sparks. Il fut également le premier volcanologue à comprendre dans les années 1970 l'importance de la mécanique des fluides pour comprendre l'écoulement des laves, et à déduire, à partir de données de terrain, le rôle primordial du débit éruptif. George Walker est l'inventeur des méthodes d'étude des dépôts pyroclastiques sur le terrain, et propo-

sa également une classification des éruptions explosives, basée sur les caractéristiques des éjecta et des dépôts, qui n'a depuis pas été remise en question.

À la suite de George Walker, son ancien étudiant Steve Sparks est sans nul doute devenu le plus grand volcanologue actuel ; il est l'auteur, en collaboration souvent avec le dynamique des fluides Herbert Huppert, d'un ensemble de publications fondatrices, publiées à partir des années 1980, sur le fonctionnement physique des volcans. On peut d'ailleurs noter que Herbert Huppert a produit dans le milieu des années 1980 le modèle de mécanique des fluides démontrant que le rôle du débit éruptif était bien celui prêté par George Walker.

Cette école « anglo-saxonne » de la volcanologie physique a donné les principaux noms de la volcanologie physique actuelle, comme l'anglais Andy Woods, le japonais Takehiro Koyaguchi, l'américain Steve Carey, ou l'islandais Thor Thordarson. Mais elle a également des ramifications en France, en particulier à l'Institut de physique du globe de Paris où Claude Jaupart, un des plus influents leaders mondiaux de la discipline, a monté sous l'impulsion de Claude Allègre un laboratoire de dynamique des fluides géologiques traitant entre autre de volcanologie physique.

C'est en grande partie sur les travaux de Steve Sparks, de Claude Jaupart et de leurs étudiants, post-doctorants et collaborateurs, que s'est construite à la fin du xx^e siècle notre compréhension actuelle du fonctionnement des volcans. Ces enseignants-chercheurs ont produit et enseigné une masse de connaissances remarquable ; ce sont ces connaissances qui se retrouvent enfin synthétisées et démocratisées dans le *Traité de volcanologie physique* que nous présente Michel Detay.

Travail de synthèse colossal, c'est ainsi un corpus de connaissances tout à fait complet qui est proposé aux étudiants, aux enseignants et plus généralement à tout public intéressé par un aspect particulier du volcanisme, ou par le sujet dans sa globalité.

Édouard Kaminski

Professeur de volcanologie physique
Institut de physique du globe de Paris

PRÉAMBULE

Voici une nouvelle approche des volcans et de la volcanologie ! Un livre rédigé par un spécialiste de la dynamique des fluides (et ça tombe bien, les magmas sont des fluides) et de l'eau (et là encore, ça tombe bien, puisque l'eau interagit très souvent directement ou indirectement dans les processus magmatiques). Cet ouvrage est écrit par un spécialiste de géologie appliquée¹ qui a passé toute sa carrière dans l'Industrie. Il va à l'essentiel, à l'opérationnel, au quantifiable. Il traite le phénomène volcanique comme un processus physique et non comme un phénomène qu'on se contenterait de décrire même en détail. La volcanologie était sa passion depuis toujours : cela se sent bien et cela en fait l'intérêt. C'est un autre regard qui croise approche académique, pragmatisme et réalité du monde.

Étudiant, il dirigeait déjà des expéditions sur l'Etna, puis en Islande (Krafla en 1978, Tholeiite en 1980) pour observer et étudier les systèmes volcaniques. Il a ainsi eu l'opportunité d'être confronté, très vite et très tôt, à des manifestations volcaniques et leurs problématiques qui lui ont fourni la matière première pour participer à la vie des laboratoires de géologie (pétrologie, géochimie) et rédiger ses premières publications scientifiques en 1981. Étudiant il a remporté de nombreux prix (prix de l'Aventure 1978, 1980 notamment) et pu réaliser ses premières expositions (Museum d'Histoire naturelle de Nice en 1980, salle Pleyel à Paris...) grâce à ses photographies d'expéditions.

Après une thèse d'État en 1986 (que l'on appellerait aujourd'hui « Habilitation à diriger des recherches ») dédiée à des problèmes complexes d'hydrogéologie en domaine sub-sahélien, les activités professionnelles de Michel Detay l'ont amené à travailler dans le domaine de l'eau sur les 5 continents. Son amour des volcans des geysers, des lacs acides... s'est ainsi élargi à la rencontre des systèmes volcaniques d'Afrique, des Philippines, de Nouvelle-Zélande, des États-Unis, de l'Asie-Pacifique... et autres pays où Michel a vécu et travaillé.

Cet ouvrage est donc la combinaison d'une longue expérience des volcans, d'une approche résolument appliquée et de la mise en équation des phénomènes volcaniques grâce à la mécanique des fluides, la géochimie et la recherche opérationnelle. On ne peut que se féliciter que cette approche originale soit aujourd'hui mise à disposition du public. Ce livre sera très certainement utile à tous les étudiants en géologie, en particulier à ceux préparant CAPES et Agrégation qui profiteront ainsi d'un nouveau regard qui donne à comprendre. Regard à la fois pertinent et scientifiquement juste, mais aussi actualisé, dépoussiéré des lieux communs, loin des modes, habitudes et écoles de pensée qui encombrant encore trop souvent l'enseignement.

J'ai connu Michel Detay quand, grâce à un ami commun, il m'a proposé en 2011 des articles sur des tunnels de lave islandais pour « Planet terre² ». Notre collaboration s'est élargie à l'hydrovolcanologie en 2013, puis au verre libyque et à l'éruption d'un volcan indonésien, le Paluweh, en 2014. Il m'a ensuite annoncé vouloir écrire un livre de volcanologie physique et m'a demandé des conseils pour que cet ouvrage soit adapté à des élèves comme les miens, à savoir les étudiants en L3 et Master de géologie, et des futurs professeurs de SVT en préparation à l'Agrégation SV-STU de l'ENS de Lyon. Dix-huit mois plus tard, le livre était fini, et il apportera certainement à « mes » futurs élèves un regard souvent très nouveau et complémentaire sur la volcanologie.

Cet ouvrage comprend trois parties principales, découpées en douze chapitres. Certains chapitres sont « classiques » dans le sens où ils représentent un point de passage obligatoire pour entrer dans le vif du sujet et pouvoir accéder à la suite si on a fait peu de géologie auparavant ; d'autres sont assez inédits pour les niveaux de licence ou master. Ils constituent des ouvertures, des compléments, des passerelles qui permettront aux étudiants (1) de mieux intégrer le phénomène volcanique dans le contexte géologique global et dans le cadre de la physique et (2) de l'associer aux réalités du monde dans

1. La géologie appliquée désigne l'ensemble des applications de la géologie au sein des activités humaines et de la société (environnement, économie, gestion des risques naturels...).

2. <http://planet-terre.ens-lyon.fr/>

lequel nous vivons (aspects sociétaux, environnementaux, économiques, financiers...).

Le livre *sensu stricto* commence par une première partie (Chap. 1 et 2) consacrée à la description « naturaliste » des édifices, des systèmes et des éruptions (Chap. 1) et au cadre géodynamique du volcanisme (Chap. 2) : volcanisme et dorsale, volcanisme et subduction... Bien que cette entrée en matière soit « classique », on en apprend beaucoup sur des édifices trop souvent oubliés comme les spatter cônes, les diatrèmes et autres lacs de lave. Vient ensuite le chapitre 3 qui constitue un rappel essentiel de pétrologie magmatique (notion de série magmatique, de fusion partielle, de différenciation...).

La deuxième grande partie, la plus novatrice à mon sens, qui renforce la spécificité et la raison d'être (et d'acheter) cet ouvrage, est dédiée aux réservoirs et à la plomberie magmatique (Chap. 4), à la volcanologie physique (Chap. 5) et au phénomène éruptif (Chap. 6). Ces chapitres s'appuient sur les équations qui décrivent les phénomènes (l'écoulement d'une coulée par exemple), et des descriptions naturalistes de ce qu'engendrent ces écoulements comme les tunnels de lave et leurs lavaclides ainsi que sur des données économiques et sociétales. Je ne connais que bien peu de livres qui donnent accès à une telle synthèse. Le chapitre qui suit (Chap. 7) replace tout ce qui précède dans les différents contextes géodynamiques où ont lieu ces éruptions. Il introduit notamment divers processus magmatiques moins connus, mais essentiels comme le *slab roll back*, le magmatisme MASH, la délamination lithosphérique...

La troisième partie traite aussi de domaines souvent bien peu abordés dans les livres classiques, ou abordés trop succinctement. Le chapitre 8 fait le lien entre la volcanologie et le parcours professionnel de Michel Detay avec l'introduction de « l'hydrovolcanologie ». Quelles sont les relations des magmas avec l'eau ? Cela va des pillow lavas des dorsales aux geysers et à la géothermie en passant par les *jökulhlaups* et les lahars ! Les chapitres 9 et 10 concernent deux domaines rarement présentés dans les ouvrages classiques. Le chapitre 9 aborde ce que Michel Detay nomme le volcanisme « paroxysmal », ces éruptions qui n'arrivent que toutes les quelques centaines de milliers ou de millions d'années. Cela va des « super-volcans »

(terme maintenant popularisé dans les médias), aux essaims de dykes géants et aux méga intrusions basiques. Le chapitre 10 est consacré aux relations entre climat et volcans (*global warming* ou *global cooling*) où l'auteur présente un débat sociétal important et repositionne l'objet volcan au cœur de la problématique des variations climatiques, mais aussi dans une perspective historique (au sens géologique du terme) des épisodes de *snowball Earth* aux risques volcaniques actuels (chap. 11) et aux moyens d'en assurer la mitigation. Le livre se termine par un court chapitre (Chap. 12) recadrant le volcanisme dans le Système solaire, puis par une « webothèque » et par des « annales » de sujets d'écrit ou d'oral proposés dans les concours d'entrée aux Grandes Écoles, du Capes et de l'Agrégation.

Tout cela fait un « gros » et riche ouvrage, un véritable traité de volcanologie. Ouvrage abordable à plusieurs niveaux de lecture grâce aux nombreux exemples et encadrés et à un riche glossaire. Un naturaliste à tendance biologiste qui passe le CAPES de SVT ne dominera pas nécessairement toutes les équations lors d'une lecture rapide, mais il verra que derrière un phénomène naturel, qu'il découvrira plus complexe que dans les simplifications classiques de l'Éducation nationale, il n'y a pas que des mots et des notions qualitatives mais de la physique et de la chimie finalement abordables avec un niveau mathématique de bac +2.

Un géologue-géophysicien verra qu'au-delà des équations de mécanique des fluides, il y a de vrais et beaux objets naturels, avec un fonctionnement parfois plus complexe que l'on ne l'imagine.

Il fallait sans doute disposer de cette rare multicompetence : formation universitaire à la recherche, pragmatisme d'un géologue appliqué, approches multiculturelles et déterminisme d'un dirigeant de l'industrie, pour oser se lancer et réussir cette aventure en rédigeant un tel ouvrage : une réussite indiscutable dont je recommande vivement la lecture.

Pierre Thomas

Laboratoire de Géologie de Lyon –

Terre, Planètes, Environnement

Professeur à l'École Normale Supérieure de Lyon

INTRODUCTION

« *La Terre nous en apprend plus long sur nous que tous les livres.* »

Antoine de Saint-Exupéry, *Terre des hommes*, 1939.

L'objectif de cet ouvrage est de proposer des éléments de volcanologie physique aux étudiants en Sciences de la Terre et de l'Univers (niveaux L2-L3 et M1-M2) ainsi qu'aux étudiants en STU et SVT et aux candidats au CAPES et à l'Agrégation de SVT. Il apportera également un éclairage scientifique et technique aux enseignants de SVT (lycée et classes préparatoires) et aux amoureux des volcans et de la nature qui souhaiteraient approfondir leurs connaissances.

En effet, la volcanologie a énormément évolué au cours des trente dernières années et il nous a semblé utile d'écrire un ouvrage de synthèse actualisé, recadrant l'objet géologique « volcan » dans son contexte géodynamique, ainsi que dans les problématiques contemporaines en fournissant des éléments de quantification techniques, mais aussi financiers et sociétaux.

Cet ouvrage propose une synthèse des problématiques volcanologiques comme la plomberie magmatique, l'impact du volcanisme sur le climat, l'hydrovolcanologie, les phénomènes para-volcaniques, la notion de risque volcanique (800 millions de personnes, réparties dans 86 pays, vivent à moins de 100 km d'un volcan actif), il introduit le volcanisme paroxysmal (grandes provinces acides, caldeiras, supervolcans, trapps, mise en place des grandes provinces magmatiques) responsable des extinctions de masse à l'origine des ères géologiques, ainsi que le volcanisme extraterrestre. Nous avons choisi de permettre une lecture à plusieurs niveaux en incorporant des encadrés, des annexes et des graphiques, illustrant les phénomènes présentés, ainsi qu'un glossaire qui permet au lecteur d'accéder aux principales définitions dans leur perspective volcanologique.

Cet ouvrage est construit autour des axes structurants suivants :

– le texte intègre l'ensemble des sujets scientifiques impliqués dans la volcanologie du XXI^e siècle. Nous avons

choisi de rédiger des chapitres courts. Il ne s'agit pas d'une encyclopédie, mais d'une synthèse, d'un traité. Nous nous sommes focalisés sur la nécessité de donner à comprendre car selon l'un des principes fondateurs de la géologie, « aucune roche n'est là par hasard » ;

– notre approche s'inscrit délibérément dans la vision contemporaine d'une discipline en plein essor. En effet, beaucoup de principes et de concepts anciens sont toujours utilisés en volcanologie. Ils souffrent toutefois d'obsolescence et il était utile de les mettre à jour pour travailler sur une plateforme conceptuelle commune et actualisée. Nous avons pris de nombreux exemples récents pour illustrer les phénomènes décrits autour de cas concrets. Notre présentation est complétée par des données numériques, techniques et économiques indispensables pour quantifier les impacts sociétaux que représentent les conséquences du volcanisme sur le climat et les risques et aléas volcaniques notamment ;

– l'iconographie est articulée autour de nombreux tableaux, graphiques et photographies originales pour aider à la compréhension et à l'identification ;

– nous présentons le plus souvent les définitions et les concepts en spécifiant, entre parenthèses, leur traduction en langue anglaise. En effet, la majorité des publications scientifiques sont rédigées en anglais et il nous a semblé important que le lecteur puisse s'y référer en connaissant la terminologie internationale ;

– en accord avec Jean-Claude Guillebaud (2003) sur le fait qu'« *Il faut cesser le recyclage querelleur des pensées mortes* », nous abandonnons certains termes obsolètes et intégrons quelques anglicismes et néologismes comme *dyke* (fracture remplie de magma), *mush* (bouillie cristalline structurée), *silicique* (pour remplacer acide), *slab* (plutôt que plaque plongeante)... ;

– nous faisons référence à des éruptions volcaniques récentes et des cas concrets pour permettre au lecteur

d'intégrer la suite d'événements que représente le phénomène éruptif dans le temps et dans l'espace. Par ailleurs, nous avons choisi de décrire de nombreux exemples français en métropole ou dans les départements et territoires d'outre-mer afin de répondre aux attentes du lectorat étudiant français ;

– enfin, nous présentons de nombreux encadrés ouvrant des visions synthétiques, des instantanés. Le but est à la fois de comprendre la physique du processus et d'ac-

céder à des ordres de grandeur réalistes. En effet, nous verrons que certaines variables physiques sont hors d'atteinte : teneur en composés volatils dans le magma ascendant avant une éruption, évolution temporelle de la géométrie du cratère, capacité d'entraînement dans les panaches pliniens... Des approches probabilistes permettent souvent d'accéder à des grandeurs physiques là où de longs développements mathématiques sont illusoire.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tous ceux qui m'ont aidé à réaliser ce livre. En particulier Pierre Thomas (ENS-Lyon, Laboratoire de géologie) qui m'a accompagné tout au long de sa réalisation et qui m'a fait bénéficier, très vite et très tôt, de nombreuses suggestions et remarques. Édouard Kaminski (IPGP) qui a accepté de préfacier cet ouvrage et René Maury (Professeur émérite à l'université de Bretagne occidentale) pour sa relecture critique et ses suggestions constructives.

De nombreuses connaissances et amis ont joué un rôle crucial à divers moments de l'élaboration de ce travail par leur avis, leurs encouragements, leur enthousiasme : Patrick Allard, IPGP ; Claude Allègre, Académie des Sciences, IPGP, université Paris Diderot ; Jacques-Marie Bardintzeff, Université Paris-Sud, Orsay ; David Bond, University of Hull, Kingston ; Bernard Bonin, Université Paris-Sud, Orsay ; Vincent Courtillot, IPGP, Académie des Sciences ; Tim Druitt, Laboratoire Mag-

mas et Volcans, Université Blaise Pascal de Clermont Ferrand ; Fabien Dubuffet, Laboratoire de Sciences de la Terre, UMR 5570, Université Claude Bernard Villeurbanne ; Yves Emsellem (Watermodel) ; Bjorn Hróars-son, Extremiceland, Reykjavik ; Claude Jaupart, IPGP, Académie des Sciences ; Fabrice Jégou, Laboratoire de physique et de chimie de l'environnement et de l'espace, Université d'Orléans ; Stéphane Labrosse, ENS-Lyon, Laboratoire de Géologie ; Volter Laurentz, University of Wuerzburg ; Michael Manga, University of California, Berkeley ; Caroline Martel, ISTO, UMR 6113 CNRS, Université d'Orléans ; Lisa A. Morgan, U.S. Geological Survey Denver ; Jean-François Moyen, Université Jean Monnet, Saint-Étienne ; Christian Nicollet, Université Blaise Pascal de Clermont Ferrand ; Olivier Roche, Équipe de Volcanologie, Université Blaise Pascal ; Anja Schmidt, University of Leeds ; Steve Sparks, University of Bristol ; William M. White, Cornell University ; John Winter, Whitman College, Washington.



Les volcans sont terre de paradoxes. Manifestation quasiment négligeable de l'activité terrestre d'un point de vue thermodynamique, ils n'en représentent pas moins un des **phénomènes naturels les plus fascinants**, pouvant être tour à tour majestueux, silencieux, instables, meurtriers, pourvoyeurs de terrains fertiles ou perturbateurs du climat mondial. De tels objets naturels ne peuvent être cernés que par une **approche scientifique multidisciplinaire** qui combine physique, chimie et géologie de terrain.

Traité de volcanologie physique propose une synthèse actualisée, recadrant l'objet géologique « volcan » dans son contexte géodynamique, mais aussi dans les problématiques contemporaines en fournissant des éléments de quantification techniques, financiers (ou économiques) et sociétaux. Sont tour à tour abordées des **problématiques volcanologiques essentielles** telles que la plomberie magmatique, l'impact du volcanisme sur le climat, l'hydrovolcanologie, les phénomènes para-volcaniques, la notion de risque volcanique ainsi que le volcanisme paroxysmal, responsable des extinctions de masse à l'origine de nombreuses ères géologiques, et le volcanisme extraterrestre.

C'est un corpus de connaissances complet, richement illustré, que propose Michel Detay aux étudiants en STU et SVT ainsi qu'aux candidats au CAPES et à l'Agrégation de SVT. Il apporte également un éclairage scientifique et technique aux enseignants de SVT et plus généralement à tout public intéressé par un aspect particulier du volcanisme, ou par le sujet dans sa globalité.

Michel Detay présente la double compétence d'être à la fois un universitaire (géologue, docteur d'État) et un industriel (au sein du secteur privé - tant en France qu'à l'international), ce qui lui permet une mise en perspective novatrice et pratique de la volcanologie physique.