

Jean-Louis Bourdier

Géologie du volcanisme

DUNOD

Uniformisation des illustrations : Bernadette Coléno
Illustration de couverture : Chris - Adobe Stock.com

© Dunod, 2021

11, rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com

ISBN 978-2-10-083035-0

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	VII
Partie I Les processus : la dynamique éruptive	1
1 Propriétés chimiques et physiques des magmas	3
1. Vers une définition des magmas	3
2. Généralités sur la composition chimique des magmas	4
3. Températures des magmas	5
4. Propriétés rhéologiques des magmas	6
2 Ascension et évolution physique des magmas	15
1. L'ascension et la décompression	15
2. L'exsolution des volatils et la vésiculation	16
3. La coalescence des bulles et la perméabilité	20
4. La cristallisation syn-éruptive	22
5. Interactions et complexité des processus syn-éruptifs	26
6. La fragmentation explosive	26
3 Les dynamismes éruptifs	29
1. La diversité des dynamismes éruptifs	30
2. Les éruptions des magmas basaltiques	34
3. Les éruptions pliniennes	45
4. Les éruptions péléennes	51
5. Les éruptions vulcaniennes	60
6. Les éruptions explosives hydrovolcaniques	67
7. Les transitions de dynamismes	74
8. Les grandeurs caractéristiques des éruptions	76

Partie II L'échelle de l'échantillon : les laves	83
4 Composition chimique et minéralogique des laves	85
1. Composition chimique des laves	85
2. Composition minéralogique des laves	90
5 Textures et structures des laves	97
1. Description qualitative des textures	98
2. Approche quantitative des textures	104
3. Structures et rubanements	108
4. Microtextures et dynamique éruptive	111
5. Les textures secondaires	122
Partie III L'échelle de l'affleurement : les formations volcaniques	127
6 Les corps effusifs et intrusifs	129
1. Géométrie et structure des corps laviques	129
2. Les coulées basaltiques	131
3. Les coulées et dômes de laves différenciées	142
4. Les intrusions	152
7 Les dépôts volcanoclastiques	157
1. Pyroclastes et dépôts pyroclastiques : généralités	158
2. Les retombées aériennes et leurs dépôts	161
3. Les écoulements pyroclastiques et leurs dépôts	164
4. Les dépôts épiclastiques	177
Partie IV L'échelle de la carte : les volcans et leurs associations de faciès	185
8 Les volcans monogéniques	187
1. Les différents types de volcans monogéniques	188
2. Les champs de volcans monogéniques	201

9	Les volcans polygéniques	207
1.	Les volcans-boucliers basaltiques	208
2.	Les cônes composites (ou stratovolcans)	222
3.	Les calderas ignimbrtiques	237
	Bibliographie	251
	Index	279

Avant-propos

L'activité volcanique témoigne de la vitalité de la Terre interne. Son étude représente un enjeu pour la compréhension du fonctionnement de notre planète mais aussi de façon plus appliquée, pour l'évaluation et la réduction des risques volcaniques, ou encore pour l'exploration des ressources géothermiques et minérales que cette activité génère. La volcanologie est le champ d'étude scientifique concernant l'activité volcanique ; elle ne se limite pas, comme souvent on l'imagine, à l'activité actuelle. Le géologue est amené à reconstituer des activités volcaniques plus ou moins anciennes à partir de leurs témoins, eux-mêmes plus ou moins bien conservés : les roches, les formations et les terrains volcaniques. L'étude du volcanisme actuel et de ses produits reste essentielle en ce qu'elle sert de référence dans cette démarche.

Ce livre traite des principaux aspects de la volcanologie : la dynamique éruptive, les grands types d'éruptions, les formations (ou faciès) volcaniques et les différents types de volcans. Pour autant, la volcanologie étant pluridisciplinaire, il ne prétend pas à l'exhaustivité. Il laisse de côté par exemple la surveillance géophysique et la prévision des éruptions, pour lesquelles je ne suis pas spécialiste, ou l'évaluation des menaces volcaniques. L'ouvrage s'adresse d'abord aux étudiants de la Licence au Doctorat, dans les cursus de Sciences de la Terre et de préparation aux concours d'enseignement. J'espère qu'il pourra également être utile aux enseignants des collèges et lycées, comme aux géologues praticiens non spécialistes du volcanisme.

Les objectifs de ce livre sont d'une part, de présenter une synthèse des connaissances sur la dynamique éruptive et ses produits, formations volcaniques et volcans, sur la base des données scientifiques actuelles et en fournissant une large ouverture bibliographique ; d'autre part, sur un plan plus pratique, de guider étudiants, enseignants et praticiens dans la description et l'interprétation des objets volcaniques qu'ils sont amenés à observer, en salle de travaux pratiques ou sur le terrain. La motivation ici tient au caractère particulier de ces objets. Leur étude nécessite de fait des approches, concepts et connaissances spécifiques, au-delà du corpus de compétences en pétrographie, sédimentologie ou cartographie que doivent posséder l'étudiant et le géologue généraliste.

Dans cet objectif, quelques lignes directrices ont guidé la rédaction :

(1) le plan de l'ouvrage s'organise selon la démarche naturelle du géologue, en distinguant les différentes échelles d'observation et d'interprétation, depuis le terrain jusqu'au microscope. L'étudiant comme le géologue ont affaire à des roches (l'échelle de l'échantillon), à des faciès volcaniques (l'échelle de l'affleurement) et à des volcans (l'échelle de la carte). Pour chacune de ces catégories d'objets, on doit faire appel à des terminologies et à des concepts qui sont propres à chaque échelle et qu'il est important de distinguer ;

(2) les nomenclatures et définitions sont traitées avec une attention particulière, d'une part parce qu'elles représentent un fort enjeu dans l'acquisition des connaissances académiques, mais aussi parce que beaucoup de confusion est introduite dans ce domaine par la foisonnante littérature de vulgarisation sur les volcans ;

(3) il est largement fait appel à des exemples pris dans le volcanisme français, qui entre dans les programmes des concours d'enseignement et qui sert bien souvent de cadre pédagogique pour les excursions et les camps de terrain : Chaîne des Puys, Piton de la Fournaise, Montagne Pelée et Soufrière de Guadeloupe sont ainsi des exemples privilégiés ;

(4) m'appuyant sur mon expérience d'enseignement en salle et sur le terrain, j'ai cherché à éclairer spécifiquement des points qui font souvent difficulté pour les étudiants, que ce soit d'un point de vue conceptuel ou dans la description et l'interprétation des objets.

Ce livre doit ainsi beaucoup aux étudiants de l'université d'Orléans, de la Licence au Doctorat, à leurs questions et à nos échanges. En outre, je remercie chaleureusement les collègues qui ont apporté une amicale contribution, en relisant des chapitres ou en fournissant des documents : Laurent Arbaret, Pierre Boivin, Jean-François Lénat, Caroline Martel, Pierre Nehlig, Jean-Claude Thouret.

Enfin, un merci du fond du cœur à mon épouse, pour sa compréhension et sa patience pendant la rédaction.

Jean-Louis BOURDIER

Partie I

Les processus : la dynamique éruptive

Le volcanisme est l'expression du magmatisme à la surface de la Terre. Ses manifestations, relativement continues sur le long terme, se font aux courtes échelles de temps de façon discrétisée, sous forme d'**éruptions**. La façon dont les magmas montent puis se mettent en place à la surface terrestre au cours des éruptions, la dynamique éruptive, conditionne les caractères des objets qu'observe le géologue aux différentes échelles courantes, caractères qui seront abordés dans la suite de l'ouvrage : la texture des roches volcaniques, les faciès des formations volcaniques, la forme et la structure interne des volcans. Cette première partie traite de la dynamique éruptive en présentant (1) les principales caractéristiques physiques et chimiques des magmas, (2) les processus fondamentaux de leur dégazage syn-éruptif au cours de leur ascension vers la surface, et (3) les grands types d'éruptions tels qu'ils se manifestent à l'observation et que les modèles physiques les décrivent.

Propriétés chimiques et physiques des magmas

Introduction

Ce chapitre vise à définir les magmas et à en donner les principales propriétés, celles qui contrôlent et expliquent leurs modalités éruptives. Seront ainsi abordés les principaux éléments à connaître concernant leurs compositions chimiques (point qui sera développé au chapitre 4), leurs températures, et surtout leurs propriétés rhéologiques c'est-à-dire leurs propriétés de déformation.

Objectifs

- Définir** les magmas
- Connaître** leurs principales propriétés
- Comprendre** leur complexité physique
- Expliquer** les différents facteurs contrôlant leur comportement rhéologique

Plan

- 1 Vers une définition des magmas
- 2 Composition chimique des magmas
- 3 Température des magmas
- 4 Propriétés rhéologiques des magmas

1 Vers une définition des magmas

La planète Terre n'a cessé de dissiper une chaleur interne héritée des premiers temps de sa formation. Cette dissipation de chaleur depuis le noyau jusqu'à la surface génère une géodynamique interne dont l'une des manifestations est la production de **magmas**. Les magmas sont des liquides naturels, formés en profondeur et donc à haute température. À l'origine des processus magmatiques, des liquides sont produits par fusion partielle (incongruente) de roches, dans la croûte ou dans la partie supérieure du manteau. La fusion partielle affectant le plus souvent des roches silicatées, les magmas sont eux-mêmes, sauf exception, des liquides silicatés. Les liquides issus de la fusion partielle, dits magmas primaires, peuvent ensuite, en se déplaçant vers des niveaux structuraux plus superficiels, donc plus froids, évoluer, notamment en cristallisant. Par le jeu de la cristallisation, par des échanges chimiques avec les roches traversées ou par d'autres processus encore, on obtient à partir des liquides primaires des liquides de compositions

différentes : c'est la différenciation magmatique. Une conséquence de la cristallisation partielle des magmas en profondeur est qu'ils transportent souvent des cristaux en suspension. En outre, lorsque les magmas atteignent des niveaux suffisamment superficiels, ils dégazent par exsolution de constituants volatils précédemment dissous. Une phase gazeuse se rajoute alors, sous forme de bulles. On doit au final regarder les magmas comme des milieux déformables, et pouvant être polyphasiques. Ainsi selon les situations, les magmas sont monophasiques (liquide seul), biphasiques (liquide + cristaux, liquide + bulles), ou triphasiques (liquide + cristaux + bulles) ; un même magma change généralement d'état en cours d'éruption.

DÉFINITION

Une définition générique d'un **magma** pourrait donc être la suivante : un milieu déformable (cf. § 3), de haute température, de composition silicatée sauf exception, et le plus souvent polyphasique. Dans tous les cas, la phase liquide (ou bain fondu, *melt* pour les Anglo-Saxons) est présente.

2 Généralités sur la composition chimique des magmas

Les compositions chimiques des magmas sont variables, mais dans un domaine de variation relativement limité. Ces compositions reflètent au premier ordre la composition des enveloppes terrestres dont les magmas sont issus. Les éléments principaux sont donc attendus, et leur liste est réduite. Exprimés classiquement sous forme d'oxydes, ce sont SiO_2 , Al_2O_3 , $\text{FeO/Fe}_2\text{O}_3$ (le fer est généralement présent sous deux formes d'oxydation), MgO , CaO , Na_2O , K_2O , TiO_2 , MnO , P_2O_5 . Ces éléments dits **majeurs** (représentant chacun en gros plus de 0,1 % poids) constituent environ 99 % en masse de la plupart des magmas. C'est la proportion relative des éléments majeurs qui varie d'un magma à l'autre et génère la diversité compositionnelle des magmas. Parmi ces éléments, la **silice** SiO_2 est de loin dominante, représentant le plus souvent plus de 45 %, et jusqu'à environ 80 %, de tous les magmas. C'est ce qui fait des magmas des milieux silicatés (une exception très rare est constituée par les magmas carbonatitiques). Selon la teneur en SiO_2 , les magmas sont qualifiés d'**ultrabasiques**, **basiques**, **intermédiaires** ou **acides**, à SiO_2 croissante avec des coupures conventionnelles fixées à 45, 52 et 63 % poids SiO_2 , respectivement.

Outre les éléments majeurs, les magmas contiennent à peu près tous les éléments chimiques, à hauteur de quelques ppm à centaines de ppm. La plupart de ces éléments dits **éléments trace** peuvent être des marqueurs importants des processus magmatiques en profondeur mais n'influent pas de façon significative sur le comportement éruptif des magmas. Une exception concerne les constituants **volatils**, qui peuvent être

présents soit sous forme dissoute dans le liquide silicaté, soit sous forme de bulles de gaz. Les composés volatils sont très variés et comportent notamment des composés soufrés, chlorés et fluorés, mais les seuls dont les concentrations sont suffisantes pour influencer significativement sur la dynamique éruptive sont H_2O et dans une moindre mesure CO_2 .

Pour les éléments autres que volatils, la composition chimique est conservée dans les processus volcaniques, de sorte qu'on a accès directement à la composition des magmas en analysant les laves. Il en va différemment pour les composés volatils, dont les laves que l'on analyse ne contiennent que des concentrations résiduelles à la suite du dégazage. On peut néanmoins remonter aux concentrations initiales, pré-éruptives, des composés volatils dissous dans la fraction liquide des magmas, et ce principalement par deux approches :

- l'analyse directe des volatils dissous dans des inclusions vitreuses dans les cristaux intra-telluriques, ces inclusions représentant des gouttes de liquide piégées au cours de la cristallisation ;
- plus indirectement, la détermination expérimentale des équilibres de phases pré-éruptifs, l'assemblage minéralogique qui cristallise dans un liquide silicaté dépendant de T , P , $f\text{O}_2$ (fugacité d'oxygène) mais aussi de la teneur en volatils.

Les données disponibles pour H_2O montrent qu'il s'agit d'un constituant majeur dans les magmas. Les teneurs en eau sont plus élevées dans les magmas différenciés que dans les magmas basiques, l'eau ayant un comportement dit incompatible (c'est-à-dire une affinité plus grande pour la phase liquide). Des concentrations pré-éruptives de 4 % à 7 % poids sont classiquement relevées pour des magmas intermédiaires ou acides (Wallace, 2005). Dans les magmas basiques, les teneurs en eau semblent variables selon le contexte géodynamique : les basaltes de dorsales océaniques sont relativement pauvres en eau (typiquement < 0,5 % poids) tandis que les basaltes des domaines de subduction sont riches en eau (typiquement 4-5 % poids) (Metrich et Wallace, 2008 ; Wallace *et al.*, 2015). Les teneurs en CO_2 dans les magmas sont de quelques dizaines de ppm à 1 000 ppm (soit 0,1 % poids) le plus couramment.

3 Températures des magmas

Les températures des magmas en profondeur, dans leurs zones de genèse ou de stockage, ne sont pas connues directement mais peuvent être reconstituées à partir de géothermomètres minéraux ou des données expérimentales d'équilibres de phases. Les données montrent que les températures sont dépendantes de la composition et tendent à diminuer avec le degré de différenciation (l'augmentation de la teneur en silice) du magma. Les températures sont typiquement dans la gamme 1 000-1 250 °C pour les magmas basiques, 800-1 100 °C pour les magmas intermédiaires, 600-900 °C pour les magmas acides.

Les températures des magmas peuvent par ailleurs être mesurées en surface près de leur point de sortie. Ces températures d'émission sont voisines des températures intracrustales estimées. On en déduit que l'ascension des magmas jusqu'à la surface se fait sans perte significative de température, donc que l'ascension des magmas est rapide au regard de la faible conductivité thermique des roches encaissantes.

Bien sûr les magmas refroidissent au cours de leur mise en place en surface. Les mesures de température sur différentes portions d'un corps lavique actif, comme une coulée de lave par exemple, permettent d'étudier les modalités du refroidissement et leur lien avec le comportement d'écoulement. Les variations de température se traduisent par des différences de couleur, qui permettent une estimation visuelle des températures selon un code de corrélation avec les mesures. Les laves actives montrent une teinte jaune autour de 1 100 °C, orange vers 900-1 000 °C, rouge vif vers 700-800 °C, rouge sombre vers 500-600 °C.

4 Propriétés rhéologiques des magmas

Les propriétés rhéologiques des magmas, qui décrivent leur comportement d'écoulement et de déformation interne, jouent un rôle central dans les processus éruptifs. Elles sont complexes dans la plupart des cas, où les magmas sont constitués non seulement d'un liquide silicaté, mais aussi de cristaux et/ou de bulles.

Les magmas ont un comportement visco-élastique : leur déformation, c'est-à-dire leur réponse à la contrainte de cisaillement exercée (exprimée en force par unité de surface), comporte deux composantes, une composante élastique (déformation réversible) et une composante visqueuse (déformation irréversible). Dans le domaine élastique, la déformation est limitée mais engendre un stockage d'énergie qui sera libérée si on relâche la contrainte, ou si celle-ci dépasse la résistance mécanique du liquide. Le critère déterminant le comportement visqueux ou au contraire élastique/cassant du milieu est un rapport entre la viscosité (en Pa·s) et le module élastique (en Pa), ce dernier représentant la contrainte maximale accumulable sous forme élastique sans atteindre la rupture. Le rapport viscosité/module élastique définit un temps de relaxation structurale (en s), qui correspond physiquement au temps de diffusion des ions Si et O dans le liquide pour évoluer vers une configuration structurale adaptée à la contrainte appliquée (Dingwell et Webb, 1989). Les implications de cette notion pour la fragmentation des magmas seront discutées plus loin (cf. § 6 du chapitre 2). Dans la plupart des situations toutefois, la composante visqueuse est très dominante et seul le comportement visqueux sera abordé dans ce chapitre.

Dans le domaine visqueux, la grandeur caractéristique est la **viscosité**, qui reflète la résistance d'un fluide à l'écoulement.

DÉFINITION

La **viscosité** est le rapport de la contrainte de cisaillement (exprimée en Pa) sur la vitesse (ou taux) de cisaillement/déformation (exprimée dimensionnellement en gradient, s^{-1}).