

et sur leur viscosité. Quelques pour cent d'eau suffisent à abaisser la viscosité d'un magma de plus de six ordres de grandeur, c'est-à-dire à la diviser par 1 000 000 !

Au cours du processus de cristallisation fractionnée, des minéraux hydroxylés (amphiboles, micas) se forment en fixant des ions hydroxyles (OH^-), donc de l'eau. Les amphiboles, par exemple, sont stables dans une gamme de pression allant jusqu'à deux ou trois gigapascals (20 000 à 30 000 atmosphères). Elles contiennent environ 2 % d'eau. Lors de la cristallisation des amphiboles, le magma résiduel s'appauvrit en eau.

Toutefois, les amphiboles sont susceptibles de se déstabiliser pendant la remontée avec l'évolution des conditions thermodynamiques, par exemple quand la pression baisse ou quand la température augmente à la suite d'une réalimentation de la chambre magmatique. Elles libèrent alors leur eau dans le magma. Ce phénomène constitue un apport d'eau considérable. Des travaux expérimentaux ont indiqué que cette libération se produit lors de la remontée du magma

BIBLIOGRAPHIE

C. Martel, *Les crises de la montagne Pelée*, Pour la Science n° 439, 2014.

M. Detay et A.-M. Detay, *Volcans. Du feu et de l'eau*, Belin, 2013.

M. Detay et P. Thomas, *Hydrovolcanologie appliquée à la phase hydrothermale*, 2013 : <http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/hydrovolcanologie.xml>

J.-M. Bardintzeff, *Volcanologie*, Dunod, 2011.

E. A. Parfitt et L. Wilson, *Fundamentals of physical volcanology*, Blackwell Publishing, 2008.

C. Jaupart et al., *Le volcanisme, cause de mort et source de vie*, Vuibert-MNHN, 2003.

H. Sigurdsson, *Encyclopedia of volcanoes*, Academic Press, 2000.

à une profondeur de 5000 à 8000 mètres. Les micas, dont la structure contient 4 % d'eau, jouent un rôle similaire.

En restituant leur eau au cours de l'ascension, les minéraux peuvent jouer un rôle critique. Cette eau devient de la vapeur qui, parce qu'elle occupe sous cette forme gazeuse un volume bien plus important (il est plus de 1 400 fois supérieur, à la pression atmosphérique), est susceptible, avec les autres gaz volcaniques, d'entraîner une éruption.

Décompression explosive du magma

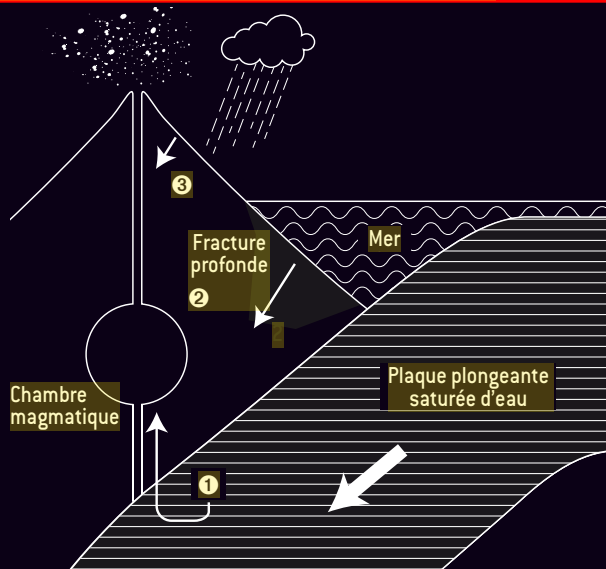
Dans son parcours vers la surface, le magma primaire subit une très importante décompression. L'origine des magmas primaires provenant du manteau dépend du contexte géodynamique, mais elle est généralement située entre 50 et 150 kilomètres de profondeur. Or à 100 kilomètres de profondeur, la pression est de trois gigapascals, soit 30 000 atmosphères. Ainsi, lorsque le magma arrive en surface, la pression qu'il

Comment le magma fait-il l'ascension du Kilimandjaro ?

La poussée d'Archimède explique l'ascension du magma : la densité du liquide magmatique est de 2,8 grammes par centimètre cube (g/cm^3), tandis que les roches du manteau ont une densité de 3,3 g/cm^3 . Toutefois, comment une « bulle » de magma liquide traverse-t-elle les quelque 30 kilomètres de croûte terrestre, dont la densité, 2,7 g/cm^3 , est inférieure ?

Plus étonnant, comment le magma liquide parvient-il à 6 000 mètres d'altitude au sommet du Kilimandjaro ? D'un point de vue hydrostatique, du liquide peut parvenir en hauteur si un canal sous pression l'y conduit. Si l'on suppose qu'une « tuyauterie volcanique » conduit le magma depuis la profondeur h , à laquelle il se forme à la pression P , jusqu'au sommet du Kilimandjaro, alors P doit être égale à la pression créée par les 6 km de volcan, les 30 km de croûte et les $(h - 30)$ km de manteau, donc approximativement à $2,7 \times 30 + 3,3 \times (h - 30)$, à

une puissance de 10 près ; P est aussi égale à la pression au bas d'une colonne de magma liquide de hauteur $(h + 6)$, pression égale donc à $2,8 \times (h + 6)$, à la même puissance de 10 près. En égalisant les deux quantités, on trouve que le magma parvenu au sommet du Kilimandjaro s'est formé à une profondeur de 69,6 km (et à une pression de 21 168 atmosphères) résultat qui n'indique qu'un ordre de grandeur. C'est pour effectuer ce genre de raisonnements que les volcanologues dessinent des tuyauteries volcaniques. À quoi ressemblent-elles ? Et comment



l'eau s'y introduit-elle ? Les processus physico-chimiques et les mécanismes de transport en jeu font l'objet d'hypothèses et de tests en laboratoire : l'intérieur des volcans n'est pas accessible !

DANS UN ÉDIFICE VOLCANIQUE, l'eau peut provenir du manteau (d'une plaque plongeante dans le cas des volcans de subduction, 1), d'infiltrations profondes depuis la mer (cas des volcans sous-marins, 2), voire de la surface (3).



subit a été divisée par un facteur compris entre 15 000 et 50 000.

La pression régnant dans la chambre magmatique va dépendre directement de la teneur initiale en eau du magma. En profondeur, l'eau est entièrement dissoute dans le liquide magmatique. Étant donné les conditions de température et de pression, elle se trouve dans un état dit supercritique, intermédiaire entre ceux de gaz et de liquide. Au cours de sa remontée, lorsque la pression devient inférieure à 218 atmosphères, l'eau passe à l'état gazeux.

Le magma s'échappe s'il parvient à vaincre la pression externe

Le magma s'échappe de la chambre magmatique s'il parvient à vaincre la pression dite externe exercée par les terrains sus-jacents. Pour qu'un filon de magma – ce que les géologues nomment un dyke – s'infiltre dans les roches recouvrant la chambre magmatique, il faut donc que la pression interne dépasse la pression externe. Lorsque l'un de ces dykes atteint

la surface, on assiste à une éruption. Cela exige le développement d'une importante surpression dans la chambre magmatique : le calcul montre qu'elle doit être de l'ordre du double de la pression externe.

C'est pourquoi les éruptions sont rares : d'après les observations d'anciennes chambres magmatiques visibles en surface, seuls 10 à 25 % des dykes atteignent la surface. Si tous les dykes débouchaient en surface, il y aurait donc au bas mot quatre fois plus d'éruptions...

Donnons une idée de l'évolution des volumes due à la décompression. Dans le cas d'un magma contenant 3 % à 6 % d'eau, on calcule que les composés volatils, qui occupaient 1 % du volume à 3 000 mètres de profondeur, en occuperont 91 % à la pression atmosphérique (voir l'encadré page 60).

Comme la pression diminue au cours de l'ascension, le magma finit par se saturer en eau. Les seuils de solubilité des composés volatils sont franchis, ce qui conduit à la formation de nombreuses bulles de vapeur, de dioxyde de carbone et d'autres gaz... Devenu ainsi biphasique (un système liquide-gaz), voire triphasique (un système solide-liquide-gaz) quand il y a

UNE ÉRUPTION RÉSULTE DE LA REMONTÉE

de roches en fusion (ci-dessus le cratère du Nyiragongo, en République démocratique du Congo). Or la fusion des roches du manteau exige des températures et des pressions adéquates. Le solidus est la ligne du diagramme (température, pression) qui délimite la phase purement solide (ci-dessous, lignes jaunes). Lors d'un parcours thermodynamique donné (ligne blanche en pointillé), il y a fusion si le parcours coupe le solidus, ce qui est ici le cas pour des roches hydratées, mais pas pour des roches sèches.

