



HAL
open science

Mesurer la viscosité des laves

Oryaëlle Chevrel

► **To cite this version:**

Oryaëlle Chevrel. Mesurer la viscosité des laves. Liaison des amateurs de volcanologie européenne, 2020, 197, pp.28-32. hal-04663312

HAL Id: hal-04663312

<https://uca.hal.science/hal-04663312v1>

Submitted on 27 Jul 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Mesurer la viscosité des laves

Magdalena Oryaëlle CHEVREL

Chargée de recherche à l'IRD, rattachée au LMV, UCA

Les coulées de lave constituent l'un des aléas volcaniques les plus fréquents à l'échelle du globe, cependant ce n'est que rarement qu'elles présentent un risque pour les populations (Harris, 2015).

Un exemple de coulée de lave meurtrière est fourni par l'éruption du Nyiragongo en République Démocratique du Congo (RDC) en 2002. Deux grandes coulées de lave extrêmement fluides et rapides ont atteint la ville en quelques heures. Plusieurs dizaines de personnes sont décédées (asphyxie par dioxyde de carbone, effondrements de bâtiments à cause de la lave ou des tremblements de terre, explosion de station-service entourée de lave encore chaude), environ 120 000 personnes se sont retrouvées sans abri et 15 % de la ville ont été complètement recouverts par la lave.

Hormis cet exemple, dans la plupart des cas, les coulées de lave sont assez lentes pour permettre aux populations d'évacuer. Cependant, même si les pertes humaines dues aux coulées de lave sont minimales comparées à celles dues aux éruptions explosives, les coulées de lave détruisent absolument tout sur leur passage (figure 1), ce qui peut avoir des répercussions durables sur les économies locales.



Figure 1 : coulée de lave (écoulement du haut vers le bas) provenant de la fissure 16-20 de l'éruption du volcan Kilauea le 19 mai 2018, Hawaï. Image © USGS.

La lave est un mélange de roche fondue (liquide), de cristaux (solides) et de bulles (gaz). Physiquement, les coulées de lave sont décrites comme des courants de gravité se propageant sous leur propre poids, ralentis par les obstacles, les faibles pentes ou par leur viscosité qui augmente avec le refroidissement. Leur mise en place (vitesse, aspect morphologique, épaisseur, longueur) dépend principalement du taux d'effusion volumétrique à l'événement, du volume total émis, de la topographie du sol et des propriétés thermo-rhéologiques de la lave.

Les propriétés thermo-rhéologiques représentent la dépendance de la viscosité en fonction de la température et de la composition (chimique et texturale) de la lave. Plus la viscosité sera faible et la pente abrupte, plus la coulée s'épan-

chera rapidement. Plus le taux d'effusion et la durée (donc le volume) sont importants, plus la coulée sera longue.

La viscosité est l'une des propriétés physiques les plus importantes en volcanologie physique car elle contribue à la détermination du style d'une éruption volcanique : si la viscosité du magma est trop élevée, le magma se fragmente (éruption explosive) et, si la viscosité est assez faible, le matériel s'écoule (éruption effusive). Lors d'une éruption effusive, si la viscosité est très faible, les coulées de type pāhoehoe ont tendance à se former mais si la viscosité est un peu plus élevée, alors des coulées de type a'ā' ou en blocs se formeront.

Afin d'anticiper et de comprendre le comportement d'une coulée de lave, il faut donc une

bonne connaissance de ces propriétés thermo-rhéologiques. Cependant, celles-ci changent constamment au cours d'une éruption, suivant le refroidissement et l'interaction avec l'environnement.

Si la lave refroidit lentement, des cristaux se forment et contribuent à la solidification (évolution du liquide et formation de particules solides) et donc à l'augmentation progressive de la viscosité de la lave jusqu'à son arrêt. Si la lave se refroidit rapidement, les cristaux n'ont pas le temps de se former, et la lave se vitrifie et se fige rapidement.

Pour comprendre un système volcanique, il faut donc contraindre la gamme de viscosité du magma et de la lave afin d'anticiper la dynamique des éruptions. Ce travail consiste à explorer les changements de viscosité et les interactions entre les différentes phases présentes dans la lave lors de son refroidissement en utilisant diverses approches telles que les mesures en laboratoire, sur le terrain et la modélisation numérique.

Mesures de viscosité en laboratoire

Les méthodes expérimentales pour mesurer la viscosité d'une lave varient en fonction de la nature de l'échantillon étudié et des conditions de mesure (température, pression, conditions redox). La viscosité des laves peut s'étendre sur douze ordres de grandeur.

Les méthodes les plus fréquemment utilisées en laboratoire à haute température sont :

- la méthode des cylindres concentriques (viscosimètre rotationnel) ;
- les mesures de déformation par la compression uniaxiale à l'aide de plaques parallèles ou par torsion avec une presse Paterson.

La méthode des cylindres concentriques est faite pour mesurer une gamme de viscosité inférieure à 10^5 Pa s, à des températures au-dessus du liquidus (c'est-à-dire pour une lave 100 % liquide) ou contenant une faible teneur en cris-

taux (approx. < 30 vol. %). La roche est en général d'abord broyée puis complètement fondue (figure 2). Le liquide est ensuite vitrifié (refroidissement extrêmement rapide) puis refondu dans un creuset cylindrique (5 cm de haut et 2,5 cm de rayon), placé dans un four vertical. Une ouverture à l'aplomb du four permet d'insérer une tige cylindrique dans le liquide.

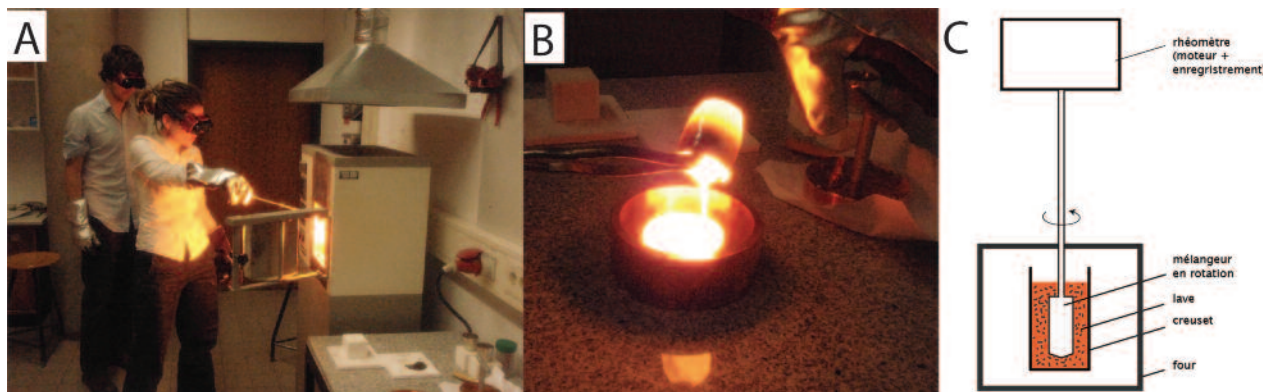
Ce cylindre intérieur est attaché à un rhéomètre qui permet sa mise en rotation alors que le creuset reste fixe, et l'enregistrement de la force nécessaire à la rotation, qui est proportionnelle à la viscosité du liquide (figure 2).

En changeant la température du four, il est possible d'obtenir la variation de la viscosité en fonction de la température. Cependant, ces expériences sont à pression ambiante et il n'est donc pas possible de garder la présence de bulles ou de composants volatils dans le liquide.

Pour mesurer des laves de plus haute viscosité ($> 10^5$ Pa s), c'est-à-dire soit à des températures plus basses soit contenant plus de cristaux, les presses uniaxiales ou en torsion sont utilisées. En général, l'échantillon est une roche (lave refroidie naturellement) qui est découpée en forme de cylindre et placée dans la presse.

La température est ensuite augmentée jusqu'à ce que l'échantillon commence à se déformer. Ces expériences sont effectuées à des températures juste au-dessus de la transition vitreuse pour permettre à l'échantillon de se déformer mais assez basses pour ne pas fondre toute la roche (700 à 950 °C). Dans le cas d'une presse uniaxiale, l'échantillon subit une compression entre deux plaques parallèles ; dans le cas d'une presse Paterson, l'échantillon est fixé aux extrémités dont l'une reste fixe et l'autre exerce une rotation.

La dépendance de la viscosité d'un liquide silicaté en fonction de la température et de sa composition chimique est maintenant bien établie grâce l'élaboration de modèles empiriques basés sur des centaines de mesures.



Figures 2: a) fusion d'un basalte à 1500 °C dans un four et b) vitrification sur une plaque en cuivre, c) schéma de la méthode de cylindre concentrique. Images © O. Chevrel, Université de Munich, 2012.

Cependant, le comportement rhéologique d'une lave multiphasique (liquide + cristaux + bulles) dans son état naturel reste encore mal contraint. En effet, il s'est avéré difficile, voire impossible, de reproduire les conditions naturelles en laboratoire, notamment en ce qui concerne l'état d'oxydo-réduction, la concentration en volatiles et le contenu en cristaux et en bulles, leurs tailles, formes et leurs distributions respectives.

Des mesures de la viscosité de la lave directes sur le terrain, en utilisant une instrumentation dédiée, ont donc été développées pour tenter de capturer la courbe rhéologique de la lave dans son état naturel, en capturant toutes les caractéristiques intrinsèques et extrinsèques telles que le contenu en cristaux et en bulles, la température, la fugacité en oxygène...

Mesures de viscosité sur le terrain

La viscosité des coulées de lave actives peut être déduite par des mesures indirectes (telles que des mesures de la vitesse d'épanchement ou de la température). Par contre, les mesures directes de rhéologie restent très rares, en raison des défis associés au développement et au déploiement d'instruments spécialisés et aux risques inhérents aux travaux sur des volcans actifs (Chevrel, Harris & Pinkerton, 2019).

Leur succès est fortement dépendant du développement technologique pour avoir une instrumentation adéquate mais aussi de la dynamique éruptive du volcan, de l'accessibilité au site éruptif et des conditions météorologiques.

Bien qu'une éruption puisse être en cours et que l'infrastructure soit disponible, les mesures sur le terrain ne sont pas toujours possibles car

une approche et un contact avec la coulée de lave active sont nécessaires. Toutes les conditions susmentionnées doivent être favorables pour réaliser les mesures de viscosité de manière précise et reproductible.

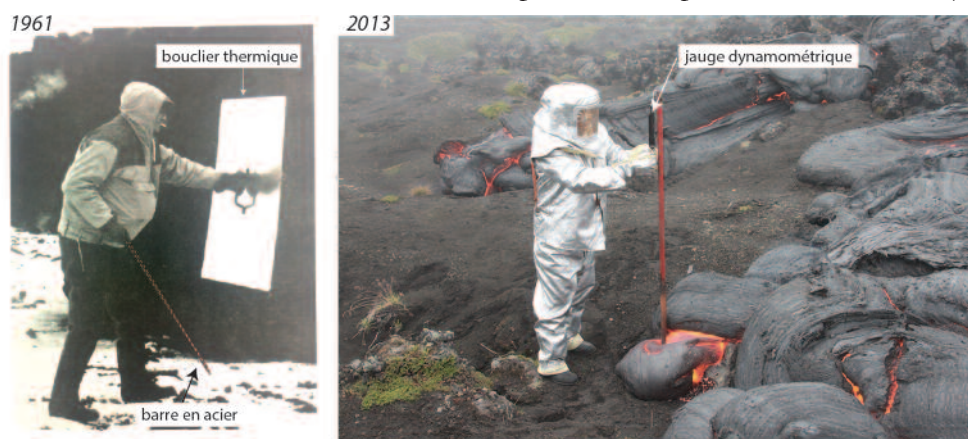
Travailler dans un environnement dynamique comme une coulée de lave active implique que les propriétés de la lave changent rapidement (refroidissement, cristallisation, dégazage) et que, par conséquent, les conditions stables nécessaires pour faire des mesures utilisables afin de calibrer les modèles sont rarement atteintes.

Les mesures directes de viscosité sur le terrain sont limitées aux laves de faible teneur en silice (< 55 %) et contenant une faible teneur en cristaux (< 45 %). Ceci est dû à leur viscosité relativement basse aux températures d'éruption (< 10⁵ Pa).

Cependant, même dans les systèmes à faible viscosité, le refroidissement rapide de la surface de lave constitue une limitation importante. Le temps des mesures doit donc être plus court que la formation de la croûte.

Les laves de viscosité élevée n'ont pas été mesurées à ce jour en raison des conditions d'approche extrêmement difficiles. Pour les coulées de type a'a' ou en blocs (avec une surface externe fragmentée) l'accès au cœur fondu de la coulée est extrêmement difficile (dangerosité des fronts instables).

De plus, il n'existe actuellement aucun instrument de terrain permettant de mesurer de telles viscosités élevées. Les appareils utilisés dans les études existantes sont donc réduits pour une gamme étroite de types de coulées (lobes de pāhoehoe et petits chenaux de lave).



Figures 3 : mesures de viscosité de la lave sur le terrain avec des pénétromètres.

À gauche: T. Einarsson s'avance vers la coulée de lave avec une simple barre de fer (se protégeant avec un bouclier thermique) qu'il plantera dans la lave pour estimer sa viscosité. La photo a été prise en 1961 à Askja en Islande (image © Solnes et al. 2013), mais la première mesure avait été faite en 1948 à Hekla en Islande (image © Einarsson, 1949); À droite, A. Belousov utilise un pénétromètre équipé d'une jauge dynamométrique qu'il enfonce verticalement dans un lobe de pāhoehoe lors de l'éruption du Tolbachik (Kamtschaka, Russie) en 2013 (image © Belousov & Belousova, 2018).

Depuis 1948 à ce jour, seules onze études de mesures de rhéologie sur le terrain ont été publiées (voir Chevrel, Harris & Pinkerton, 2019).

Deux types d'instruments ont été utilisés (dérivés de méthodes de laboratoire) :

- des pénétrromètres (*figure 3*), dans lesquels un piston est poussé dans la lave, utilisés pour les laves de viscosité relativement élevée ($> 10^3$ Pa s)
- des viscosimètres rotatifs (*figures 4 et 5*), analogues à la méthode des cylindres concentriques (voir ci-dessus), dans lesquels un corps est inséré dans la lave puis mis en rotation ; cette méthode est utilisée pour les laves de plus faible viscosité ($< 10^3$ Pa s).

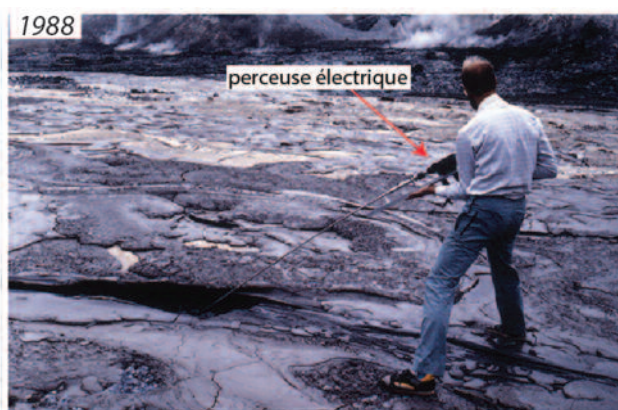
Ces instruments sont composés d'alliages d'acier inoxydable à faible teneur en carbone car ils sont résistants à la fois mécaniquement et thermiquement et sont facilement disponibles à un coût raisonnable.

Les premières tentatives de mesure de la viscosité de la lave ont été produites avec des pénétrromètres simples (une barre de fer enfoncée à la main dans la lave, *figure 3 gauche*), ou plus sophistiqués tels qu'une arbalète permettant d'envoyer une tige à grande vitesse dans une coulée (Gauthier, 1973). Cependant, ces pénétrromètres ne permettaient pas un enregistrement continu de la mesure. Plus récemment, en 2012, un pénétrromètre équipé d'une jauge dynamométrique et l'acquisition vidéo a permis la mesure de profils de viscosité de lobes de pāhoehoe (Belousov & Belousova, 2018, *figure 3 droite*). Les pénétrromètres sont des instruments légers et donc pratiques pour être emmenés sur le terrain, mais leurs capacités de mesure sont limitées car ils ne permettent pas de faire varier la force de pénétration.

Les viscosimètres rotatifs sont technologiquement plus élaborés pour produire une courbe rhéologique complète (variation de la vitesse de rotation) et équipés de système d'acquisition à temps réel (*figures 4*).

Dans les années 80, l'équipe de H. Pinkerton de l'Université de Lancaster a conçu le premier viscosimètre rotatif. Après une version manuelle (*figure 4 gauche*), Pinkerton a utilisé une perceuse électrique à batterie (peu coûteuse et pratique) pour mettre en rotation un axe plongé dans la lave. Les premières mesures ont été effectuées sur des laves carbonatites qui sont à une température de 500 °C (Pinkerton et al. 1995, *figure 4 droite*). Pour approcher des laves silicatées, ce viscosimètre a été transformé (axe en acier et protection thermique) pour résister à de plus hautes températures et associé à un système d'enregistrement de données automatique (acquisition en temps réel). Celui-ci n'a été utilisé qu'une fois dans des laves pāhoehoe au Kilauea en 1994 (Pinkerton, 1994). Après cela, faute de financement pour de telles recherches et plusieurs essais ratés, l'instrument a été mis de côté pendant des années.

Ce n'est qu'en 2016 que ce même instrument (unique au monde) a été remis en état grâce à un projet soutenu par le laboratoire Magmas et Volcans (Auvergne Fellowship du Labex ClerVolc attribué à M. O. Chevrel). Une série de mesures a pu être obtenue dans des laves pāhoehoe au Kilauea (Chevrel et al., 2018, *figure 5*), celles-ci restent les dernières mesures à ce jour. L'utilisation de l'instrument de Pinkerton n'est pas évidente car il est très lourd, imposant et d'une technologie obsolète. Un nouvel instrument, plus petit, plus moderne et plus efficace



Figures 4 : mesures de viscosité de la lave sur le terrain avec des viscosimètres rotatifs.

À gauche : H. Pinkerton utilise le premier viscosimètre rotatif dans un chenal de lave sur l'Etna en 1976 (Pinkerton & Sparks, 1978). L'instrument est une simple manivelle qu'il faut tourner à la main.

À droite : H. Pinkerton utilise la version motorisée du viscosimètre rotatif dans des carbonatites au Ol Doinyo Lengai (Tanzanie) en 1988 (Pinkerton et al. 1995). L'instrument est constitué d'une perceuse électrique à batterie qui permet la mise en rotation d'une tige trempée dans la lave.

vient d'être construit au LMV et est maintenant en phase de tests (soutient Actions Incitatives OPGC et projet LAVAANR-16-CE39-0009).

Nous espérons prochainement pouvoir l'utiliser afin d'établir des séries de données qui permettront d'améliorer nos modèles numériques. □



Figures 5 : mesures de viscosité des laves pahoehoe au Kilauea en 2016 (Chevrel et al., 2018). L'instrument est le même viscosimètre rotatif à moteur conçu par H. Pinkerton mais adapté pour les laves silicatées. La rénovation de l'instrument en 2016 (après 20 ans hors service) a permis le fonctionnement d'un système d'enregistrement en temps réel. Deux personnes sont nécessaire pour maintenir l'instrument dans la lave et deux autres personnes (situés à gauche hors champs) pour l'acquisition des données.

Orientations bibliographiques

- Belousov, A. & Belousova, M. (2018). Dynamics and viscosity of 'a'ā and pāhoehoe lava flows of the 2012-2013 eruption of Tōlbachik volcano, Kamchatka (Russia). *Bulletin of Volcanology*, 80(6). <https://doi.org/doi.org/10.1007/s00445-017-1180-2>
- Chevrel M. O., Harris A. J. L., James M. R., Calabrò L., Gurioli L. & Pinkerton H. (2018). The viscosity of pāhoehoe lava: In situ syn-eruptive measurements from Kilauea, Hawaii. *Earth and Planetary Science Letters*, 493, 161–171. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.04.028>
- Chevrel M. O., Harris A. J. L. & Pinkerton H. (2019). Measuring the viscosity of lava in the field: A review. *Earth-Science Reviews*, 196, 102852. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.024>
- Einarsson T. (1949). The flowing lava. Studies of its main physical and chemical properties. In *The eruption of Hekla 1947-1948: Vol. IV* (pp. 1–70). Soc Scientiarum Islandica, Reykjavik.
- Gauthier F. (1973). Field and laboratory studies of the rheology of Mount Etna lava. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 274 (1238), 83–98.
- Harris A. J. L. (2015). Basaltic Lava Flow Hazard. In *Volcanic Hazards, Risks, and Disasters*. (pp. 17–46). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396453-3.00002-2>
- Pinkerton H. (1994). Rheological and related properties of lavas. In F. Dobran (Ed.), *Etna: Magma and lava flow modeling and volcanic system definition aimed at hazard assessment*. (pp. 76–89). Global Volcanic And Environmental System Simulation.
- Pinkerton H., Norton G. E., Dawson J. B. & Pyle D. M. (1995). Field observations and measurements of the physical properties of Oldoinyo Lengai alkali carbonatite lavas, November 1988. In K. Bell & J. Keller (Eds.), *LAVCEI Proceedings in Volcanology 4. Carbonatite volcanism of Oldoinyo Lengai - petrogenesis of natrocarbonatite*. (pp. 23–36). Springer-Verlag, Berlin.
- Pinkerton H. & Sparks R. S. J. (1978). Field measurements of the rheology of lava. *Nature*, 276, 383–385.
- Sólnes J., Ásgeirsson Á., Besson B. & Sigmundsson F. (2013). *Náttúruvá Á Íslandi, Eldgos og Jarðskjálftar*. Reykjavík: Viðlagatrygging/Háskólaútgáfan.