

Oscillations spontanées dans un gel colloïdal attractif sous cisaillement

A. Kurokawa^a, V. Vidal^b, T. Divoux^c, K. Kurita^a, S. Manneville^b

a. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan

b. Université de Lyon, Laboratoire de Physique, Ecole Normale Supérieure de Lyon – CNRS, 46 Allée d'Italie, 69364 Lyon, France (valerie.vidal@ens-lyon.fr)

c. Université de Bordeaux, Centre de Recherche Paul Pascal, 115 Avenue Dr. Schweitzer, 33600 Pessac, France

Résumé :

Ce travail présente les résultats d'une collaboration originale entre des physiciens spécialistes de matière molle et rhéologie, et des volcanologues. Un analogue du magma en laboratoire doit présenter les caractéristiques suivantes: fluide à seuil, rhéofluidifiant, thixotrope, et possédant une microstructure capable de se modifier sous écoulement – cette dernière propriété permet de prendre en compte le contenu cristallin du magma. Nous avons ainsi étudié la dynamique d'un gel colloïdal sous cisaillement. En pratique, après un précisaillement qui fluidifie entièrement l'échantillon, le gel est laissé au repos pendant un temps de vieillissement t_w . On lui applique ensuite un taux de cisaillement constant, $\dot{\gamma}$. L'analyse de la rhéologie globale, couplée à des mesures de vélocimétrie ultrasonore, permet de caractériser les différents scénarios d'écoulement : pour des taux de cisaillement importants ($\dot{\gamma} > \dot{\gamma}_c$), l'échantillon est entièrement fluidifié et l'écoulement homogène, indépendamment de t_w ; pour des taux de cisaillement faibles ou intermédiaires, la compétition entre vieillissement et rajeunissement sous contrainte de l'échantillon, couplée à du glissement aux parois, conduit à une dynamique plus complexe. Dans ce dernier cas, on observe soit une bande de cisaillement stationnaire, soit la fluidification progressive de l'échantillon par des oscillations spontanées de type avalanche. Nous proposons un diagramme des régimes montrant que l'évolution du taux de cisaillement critique $\dot{\gamma}_c$ a un comportement non monotone avec le temps de vieillissement t_w . Le lien avec la génération de signaux sismiques sur les volcans sera discuté.

Abstract :

This work presents the results of an original collaboration between physicists, specialized in soft matter and rheology, and volcanologists. A magma analogue in the laboratory has to exhibit the following characteristics: yield-stress fluid, shear-thinning, thixotropic, and with a microstructure able to deform under flow – this last property takes into account the magma crystal content. We investigated the transient dynamics of a colloidal gel under flow. In practice, after a preshear which fluidizes the sample, the gel is left to rest for an aging time t_w . We then apply a constant shear rate $\dot{\gamma}$. The global rheology analysis, coupled with ultrasonic velocimetry measurements, makes it possible to characterize the different scenarios for the flow: for high shear rate ($\dot{\gamma} > \dot{\gamma}_c$), the sample is fully fluidized and flows homogeneously, independently of t_w ; for low or intermediate shear rate, the competition between the sample aging and shear rejuvenation, coupled with wall slip, leads to a more complex dynamics. In this last case, we report either steady-state shear banding, or the progressive sample fluidization by successive, spontaneous, avalanche-like events. We propose a regime diagram showing that the critical shear rate $\dot{\gamma}_c$ has a non-monotonic behavior with the aging time t_w . The link with seismic signal generation on volcanoes will be discussed.

Mots clefs : suspension colloïdale, gel, vieillissement, fluidification, avalanches

1 Introduction

Le projet PRC CNRS/JSPS RHEOVOLC "Influence of non-Newtonian rheology on volcanic tremor activity" a pour but de réunir physiciens et volcanologues autour d'une même problématique : l'écoulement de fluides complexes. L'un

des paramètres clé de la dynamique éruptive d'un volcan, en effet, est la rhéologie du magma. Le magma est un fluide complexe, composé d'une suspension de cristaux de formes aléatoires (phase solide) et de bulles (phase gazeuse) dans un fondu de silicates (phase liquide, visqueuse). La fraction volumique de chaque phase varie avec la température, la pression et la séquence éruptive, et a une influence directe sur la rhéologie. Des études précédentes ont permis de caractériser le magma comme un fluide à seuil, rhéofluidifiant et thixotrope [1–6]. Ces propriétés sont importantes, car elles conduisent à différents états du matériau en écoulement. L'existence de courbes d'écoulement multi-valuées peut ainsi engendrer des instabilités et une auto-organisation du milieu [7], déjà rapportée pour les polymères et les systèmes colloïdaux sous cisaillement [8,9].

Nous présentons ici l'étude de la dynamique d'un analogue du magma en laboratoire: un gel colloïdal, sous cisaillement. Dans un premier temps, nous expliquons le choix d'un système analogue, et détaillons ses propriétés. L'échantillon est préparé dans un état reproductible en lui appliquant un précisaillement qui permet de le fluidifier entièrement, puis en le laissant au repos pendant un temps t_w . On lui applique ensuite un taux de cisaillement constant, $\dot{\gamma}$. Les différents scénarios de mise en écoulement sont décrits en fonction des deux paramètres ($\dot{\gamma}$, t_w). En particulier, nous mettons en évidence l'existence d'oscillations spontanées dans une certaine gamme de paramètres.

2 Expérience

Le système étudié est un gel formé à partir d'une suspension colloïdale (Ludox TM-40, SigmaAldrich) à laquelle on ajoute du sel (NaCl, 10%wt.) en proportion massique 6:13 (fraction volumique de colloïde de 7% dans la solution finale). Le sel écrante les répulsions électrostatiques et favorise l'agrégation réversible des colloïdes, qui forment ainsi un gel. Le choix de ce gel est justifié par les propriétés suivantes : (1) il est thixotrope, à seuil, et rhéofluidifiant (mêmes caractéristiques que le magma); (2) des études précédentes [10] ont montré que sa courbe d'écoulement (contrainte vs. taux de cisaillement) présente une branche négative, pouvant conduire à des écoulements non-homogènes (e.g. bandes de cisaillement); (3) ce système a déjà été utilisé comme un analogue au magma [11, 12], montrant une transition entre un liquide newtonien et un solide fragile lorsque la concentration en particules augmente [13].

Le dispositif expérimental permet d'effectuer simultanément, en géométrie Couette, des mesures de rhéologie globale (AR-G2, TA Instruments) et des mesures locales des profils de vitesse grâce à une technique de vélocimétrie ultrasonore (USV) [14, 15]. Nous avons considéré une géométrie Couette avec un rayon de rotor de 23mm, un gap de 2mm et une géométrie lisse. Un transducteur ultrasonore (Panametrics) envoie des ultrasons ($f = 35$ MHz) dans le gap, à un angle θ fixé. Le signal est diffusé, et récupéré par le même transducteur qui sert d'émetteur/récepteur. Le gel a une structure formée d'agrégats dont la taille est d'environ $100 \mu\text{m}$, qui servent naturellement de traceurs ultrasonores. La méthode est donc non-intrusive dans le cas de cette étude. Un algorithme approprié, basé sur des fonctions de corrélation et une calibration du système, permet de remonter au profil de vitesse dans le gap. La technique, décrite ici avec un seul transducteur (USV 1D, un seul profil de vitesse dans le gap) a également été utilisée avec un réseau de 128 transducteurs placés verticalement (USV 2D, cartographie de la vitesse dans le gap sur toute la hauteur de l'échantillon). L'ensemble de l'expérience (stator + transducteurs) est plongé dans un bain thermostaté à 23.5°C .

Après un précisaillement initial qui fluidifie entièrement l'échantillon, l'échantillon est laissé au repos pendant un temps t_w , au cours duquel on mesure ses modules élastiques, G' , et visqueux, G'' . Le gel se reconstruit rapidement, avec $G' \ll G''$ et $G' \sim \log(t)$, ce qui montre ses propriétés fortement dépendantes du temps. Ce point est confirmé lorsque l'on trace la courbe d'écoulement du matériau, qui présente une importante hystérésis.

3 Résultats

L'évolution temporelle de la contrainte en fonction du temps montre des scénarios très différents, selon le taux de cisaillement $\dot{\gamma}$ imposé et le temps de vieillissement t_w de l'échantillon. En corrélant ces mesures de rhéologie globale avec des mesures de vitesse locale dans l'échantillon, nous avons mis en évidence différentes dynamiques d'écoulement, à t_w fixé : (1) à fort taux de cisaillement ($\dot{\gamma} > \dot{\gamma}_c$), l'échantillon est fluidifié, et le profil de vitesse est linéaire dans le gap; (2) à faible taux de cisaillement, le système présente une bande de cisaillement stationnaire; (3) pour des taux de cisaillement intermédiaires, on observe initialement une bande de cisaillement, qui transite aux temps longs vers

la fluidification totale de l'échantillon. La bande de cisaillement initiale se déstabilise par des événements de type avalanche, dont la signature est clairement visible sur la rhéologie globale. La vitesse de glissement au rotor diminue par sauts, en phase avec ces événements, jusqu'à atteindre une valeur négligeable lorsque l'échantillon est entièrement fluidifié. Nous avons enfin quantifié le rôle du paramètre t_w , et établi qu'il contrôle lui aussi la transition entre ces différents scénarios d'écoulement. Un diagramme des régimes est proposé, prenant en compte les deux paramètres gouvernant la dynamique du système, $(\dot{\gamma}, t_w)$. Le lien avec la possible génération de signaux longue période ("LP events") sur les volcans sera évoqué.

Références

- [1] S. L. Webb, D. B. Dingwell, Non-Newtonian rheology of igneous melts at high stresses and strain rates: Experimental results for rhyolite, andesite, basalt, and nephelinite, *J. Geophys. Res.* 95 (1990) 15695-15701.
- [2] H. Pinkerton, G. Norton, Rheological properties of basaltic lavas at sub-liquidus temperatures: laboratory and field measurements on lavas from Mount Etna, *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 68 (1995), 307-323.
- [3] M. O. Saar, M. Manga, K. V. Cashman, S. Fremouw, Numerical models of the onset of yield strength in crystal-melt suspensions, *Earth Planet. Sci. Lett.* 187 (2001), 367-379.
- [4] L. Caricchi, L. Burlini, P. Ulmer, T. Gerya, M. Vassalli, P. Papale, Non-Newtonian rheology of crystal-bearing magmas and implications for magma ascent dynamics, *Earth Planet. Sci. Lett.* 264 (2007) 402-419.
- [5] H. Gonnermann, M. Manga, The fluid mechanics inside a volcano. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 39 (2007) 321-356.
- [6] Y. Lavallée, K.-U. Hess, B. Cordonnier, D. B. Dingwell, Non-Newtonian rheological law for highly crystalline dome lavas, *Geology* 35(9) (2007), 843-846 .
- [7] P. Coussot, Q. D. Nguyen, H. T. Huynh, D. Bonn, Viscosity bifurcation in thixotropic, yielding fluids, *J. Rheol.* 46 (2002) 573-589.
- [8] A. Ya. Malkin, A. V. Semakov, V. G Kulichikhin, Self-organization in the flow of complex fluids (colloid and polymer systems) Part 1: Experimental evidence, *Adv. Colloid Interfac. Sci.* 157 (2010) 75-90.
- [9] A. Ya. Malkin, A. V. Semakov, V. G Kulichikhin, Structuring during flow of polymer and colloidal systems, *Polymer Science, Ser. A* 11 (2010) 1083-1104.
- [10] P. C. F. Møller, S. Rodts, M. A. J. Michels, D. Bonn, Shear banding and yield stress in soft glassy materials, *Phys. Rev. E* 77 (2008), 041507.
- [11] G. Gauthier, V. Lazarus, L. Pauchard, Alternating crack propagation during directional drying, *Langmuir* 23 (2007), 4715-4718.
- [12] G. Gauthier, V. Lazarus, L. Pauchard, Shrinkage star-shaped cracks: Explaining the transition from 90 degrees to 120 degrees, *Europhys. Lett.* 89 (2010) 26002.
- [13] E. Di Giuseppe, A. Davaille, E. Mittelstaedt, M. François, Rheological and mechanical properties of silica colloids: from Newtonian liquid to brittle behaviour, *Rheol. Acta* 51 (2012), 451-465.
- [14] S. Manneville, L. Bécu, A. Colin, High-frequency ultrasonic speckle velocimetry in sheared complex fluids, *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* 28 (2004), 361-373.
- [15] T. Gallot, C. Perge, V. Grenard, M.-A. Fardin, N. Taberlet, S. Manneville, *Rev. Sci. Instrum.* 84 (2013) 045107.