

25. Approche expérimentale dans la compréhension des dangers liés aux éruptions volcaniques

par

Irene MANZELLA¹, Laura PIOLI¹, Gholamhossein BAGHERI¹, Hélène MONNARD¹,
Jeremy PHILLIPS^{1,2} & Costanza BONADONNA¹

Résumé.—MANZELLA I., PIOLI L., BAGHERI G., MONNARD H., PHILLIPS J. & BONADONNA C., 2013. Approche expérimentale dans la compréhension des dangers liés aux éruptions volcaniques. *Mémoire de la Société vaudoise des Sciences naturelles* 25: 311-318.

Du à leurs puissances destructrices, les phénomènes liés aux éruptions volcaniques (entre autres les coulées pyroclastiques, les retombées de cendres etc.) représentent un aspect critique de l'étude des risques naturels en volcanologie. La complexité des processus de ces phénomènes ainsi que la difficulté d'étude directe *in situ* a poussé le développement d'expériences analogues en laboratoire pour investiguer l'étude de leurs processus fondamentaux. Dès lors, le Laboratoire de Dynamique des Fluides Géophysiques à la Section des Sciences de la Terre et de l'Environnement de l'Université de Genève a été conçu dans une optique d'étude du comportement de certains des ces phénomènes, notamment les avalanches de débris de grande masse, l'ascension du magma dans les conduits volcaniques, la sédimentation et l'agrégation des particules et les instabilités convectives dans les panaches volcaniques. Pour ce faire, les dispositifs suivants ont été construits: une chute modélisant la topographie naturelle d'un terrain en pente, un conduit vertical pour simuler les conditions d'ascension du magma, une soufflerie verticale pour étudier la vitesse terminale de chute et l'agrégation de particules dans l'air ainsi qu'un réservoir en plexiglas divisé en deux couches pour reproduire le contraste de densité nécessaire aux instabilités convectives. Ce document décrit brièvement ces recherches expérimentales et les place dans la perspective d'une meilleure compréhension et d'une meilleure évaluation des dangers liés à ces différents phénomènes.

Mots clés: modélisation analogue, avalanches des débris, éruptions volcaniques, dispersion de tephra, agrégation de particules, dynamique de fluides diphasiques.

Abstract.—MANZELLA I., PIOLI L., BAGHERI G., MONNARD H., PHILLIPS J. & BONADONNA C., 2013. Experimental approaches for a better understanding of hazardous volcanic phenomena. *Mémoire de la Société vaudoise des Sciences naturelles* 25: 311-318.

¹Département de Minéralogie, Université de Genève, Rue des Maraîchers 13, CH-1205 Genève, Suisse; tél.: +41 (0)22 379 66 48.

E-mail: irene.manzella@unige.ch

²Department of Earth Sciences, Centre for Environmental and Geophysical Flows, University of Bristol, Wills Memorial Building, Queen's Road, Bristol BS8 1RJ, UK.

Various phenomena associated with explosive eruptions (e.g. pyroclastic density currents, ash fall) can cause widespread damages and death representing a critical aspect of natural risk. They are very complex phenomena and their understanding is not straightforward. In addition their observation and study in the field could be very difficult, dangerous and sporadic. For this reason one of the best way to investigate them is the study of fundamental processes by means of dedicated laboratory analogue experiments. The Geophysical Fluid Dynamics Laboratory at the Section de Science de la Terre et de l'Environnement of the University of Geneva is designed for the study of such natural phenomena. In particular we are carrying out experiments on large debris avalanches, magma ascending in volcanic conduits, particle sedimentation, particle aggregation and convective instabilities in volcanic plumes. To carry out these experiments we have built respectively a chute that mimics the natural topography of a slope, a vertical pipe which simulates magma ascent conditions in conduits, a four meters vertical wind tunnel to study both terminal velocity and particle aggregation and a Plexiglas tank divided in two layers to reproduce the density contrast necessary to have convective instabilities. The present paper describes briefly these experimental researches and set-ups and how they can be useful to improve the understanding and the hazard assessment of the related phenomena.

Keywords: analogue modelling, debris avalanches, volcanic eruptions, tephra dispersal, aggregation, two-phase flow dynamics.

INTRODUCTION

Lorsque les phénomènes naturels sont complexes et difficiles à étudier sur le terrain, la recherche expérimentale devient un outil important pour améliorer leur compréhension et leur analyse. Dans cette optique, le laboratoire de dynamique des fluides géophysiques de la Section de sciences de la Terre et de l'Environnement de l'Université de Genève a été conçu pour l'étude des risques associés aux écoulements géophysiques tels que les avalanches de débris, l'ascension du magma dans les conduits et la retombée de cendre de panache volcanique, comme expliqué en détail dans les chapitres suivants.

ÉCOULEMENTS GÉOPHYSIQUES GRAVITATIONNELLES

Les avalanches de débris secs de grande masse sont caractérisées par des écoulements extrêmement rapides et des très longs runouts (i.e. distances parcourues), démontrant une mobilité plus importante que celle prédite par de simples modèles de frottement (HUNGR *et al.* 2001). Les avalanches rocheuses (écoulements des roches fragmentées provenant d'une rupture de versant) et les avalanches des débris volcaniques (écoulements provoqués par l'effondrement du secteur volcanique) sont deux exemples de ce phénomène. Toutefois, les observations de terrain montrent que les avalanches volcaniques parcourent des distances généralement plus longues que les avalanches rocheuses (HAYASHI & SELF 1992, LEGROS 2002). À l'heure actuelle, les mécanismes impliqués dans ces phénomènes restent encore largement inconnus. Bien que plusieurs théories ont été élaborées pour expliquer leurs longs runouts, aucun accord général n'a encore été trouvé et de nombreuses questions restent toujours en suspens (HUNGR 1990, DAVIES *et al.* 1999, LEGROS 2006). Au regard de la complexité du comportement de ces écoulements géophysiques et afin d'en évaluer les risques associés, il est également important de dériver une relation empirique entre le volume et la mobilité (souvent exprimée par le runout, c'est à dire la distance totale parcourue par la masse écoulee). Pour cette raison nous avons conçu des expériences de

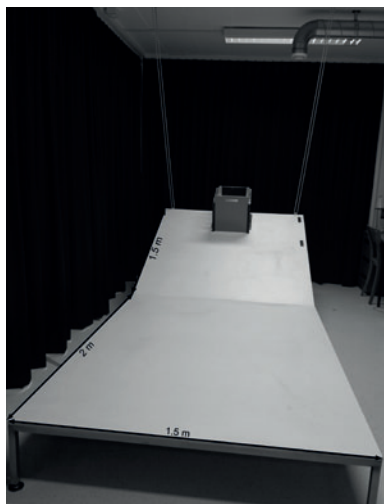


Figure 1.–Vue frontale de la chute construite pour l'étude des avalanches des débris secs en grande masse.

Front view of the chute built for the study of propagation of large debris avalanches.



Figure 2.–La colonne verticale pour l'étude de l'écoulement des bulles de gaz dans les magmas basaltiques.

Vertical pipe for the study of the dynamics of degassing of basaltic magmas.



Figure 3.–a) Instabilités convectives (par exemple celles indiquées par les flèches noirs) à la base du panache généré lors de l'éruption du volcan Eyafjallajökull (4 Mai 2010), b) et dans le réservoir en Plexiglas construit en laboratoire pour les étudier.

a) Convective instabilities (e.g. the ones indicated by the black arrows) at the base of the plume generated during the 2010 Eyafjallajökull eruption (4th May 2010), b) and in the Plexiglas tank built in the laboratory to study them.

laboratoire qui consistent à relâcher soudainement du matériau granulaire, qui représente la masse instable, sur un surface sans ou avec des confinements latéraux qui imite la topographie naturelle d'un versant (figure 1). L'objectif principal de cette recherche est de contraindre expérimentalement l'effet des caractéristiques des matériaux granulaires et de la topographie sur les runouts, la morphologie des dépôts et les mécanismes d'écoulement, ceci afin de pouvoir identifier les principales différences entre les avalanches de débris volcaniques et non volcaniques.

DYNAMIQUE D'ÉRUPTION

La ségrégation de gaz et la dynamique d'écoulement des fluides diphasiques dans les conduits volcaniques jouent un rôle fondamental dans la dynamique d'une éruption. Le magma est en fait, un mélange de liquide siliceux, de bulles de gaz et de cristaux. Pour mieux comprendre la dynamique du dégazage des magmas basaltiques (viscosité entre 10^0 et 10^3 Pa s) dans les volcans à conduit ouvert comme l'Etna (Italie), le Stromboli (Italie) ou le Villarrica (Chili), une série d'expériences a été effectuée en couplant des techniques de surveillance utilisées en routine sur les volcans (infrasons) avec des techniques de laboratoire traditionnelles. L'objectif principal de ce projet est de produire un ensemble complet de données pour l'élaboration d'un modèle de dynamique dans le conduit des systèmes à faible viscosité, crucial à notre compréhension des volcans basaltiques et à l'évaluation du risque associé. Une colonne à bulles (figure 2) a été construite en collaboration avec le Département d'ingénierie chimique et environnementale de l'Université de Nottingham (Royaume-Uni). La colonne à bulles a une hauteur de 6,5 m et un diamètre de 0,24 m. Le gaz est injecté en continu par un système de 25 tubes perforés de 5 mm de diamètre. Les tubes peuvent être gérés de manière individuelle ou en groupes de cinq. Le débit volumétrique du gaz, la pression dans la colonne, à des hauteurs différentes, et à l'extérieur, la fraction moyennée du vide, et sa distribution le long d'une section ont été mesurés à l'aide de débitmètres, de capteurs de pression, d'un système de tomographie de capacitance électrique (ECT), et d'un réseau de capteurs infrasonores montés à l'extérieur de la colonne. Les expériences ont été effectuées en injectant du gaz sous forme de bulles dans l'eau (viscosité d'environ 10^{-5} Pa s), du sirop de glucose (viscosité d'environ 300 Pa s), et du sirop de glucose dilué (avec des propriétés intermédiaires).

Les régimes d'écoulements diphasiques (à bulles, à bouchons, à poches, annulaires) ont été identifiés par l'observation visuelle et analysés en termes de fraction volumétrique moyenne de gaz et de gradient de pression. Les expériences ont montré une dépendance de la viscosité du liquide sur la stabilité des configurations, mais la dynamique et les mécanismes de transitions sont similaires pour tous les liquides utilisés. Cependant, des transitions entre les différents régimes d'écoulement ont été observées pour différents débits de gaz dans les différents liquides. Dans les écoulements eau-air, les configurations à bulles ont été observées pour des petits débits volumétriques de gaz et une transition aux écoulements à poches a été observée pour les débits de gaz élevés. Aucune configuration à bouchons n'est stable dans l'eau en raison de l'instabilité des grosses bulles par turbulence. Cette observation est conforme à des observations expérimentales précédentes (CHENG *et al.* 1998, OHNUKI & AKIMOTO 2000, OMEBERE-IYARI *et al.* 2008). Dans les écoulements sirop-

air, les configurations stables sont à bouchons pour les débits faibles, et à poches pour les débits élevés. Pour chaque expérience, les valeurs des flux volumétriques de gaz ont été corrélées à la fraction moyenne de vide de la colonne de bulles, au régime d'écoulement et à l'amplitude et à la fréquence des oscillations de pression dans l'écoulement et dans l'atmosphère. Les résultats expérimentaux montrent que la fraction de vide moyenne de la colonne augmente régulièrement avec le flux de gaz et la viscosité du liquide et le gradient de pression diminue avec l'augmentation du débit de gaz.

DISPERSION DES TEPHRAS

Les tephras sont des fragments volcaniques produites lors d'éruptions explosives. Leurs retombées peuvent affecter les secteurs économique et sociale, avec des effets globaux, comme il c'est passé en 2010 pour l'éruption du Eyafjallajökull (Islande). Le risque causé par la dispersion de tephra a obligé les autorités à fermer l'espace aérien dans la plus grande partie de l'Europe du Nord pendant plusieurs jours, affectant certains secteurs économiques importantes de l'Islande (l'agriculture, tourisme, etc.). Les modèles numériques actuellement utilisés pour décrire la dispersion de tephra ne tiennent pas compte des trois aspects qui jouent un rôle important dans la sédimentation des particules: les instabilités convectives, l'agrégation de particules et l'effet de la forme des particules sur la vitesse terminale de chute.

Instabilités convectives

La sédimentation des tephras d'un nuage volcanique est typiquement caractérisée par des instabilités convectives (figure 3a). Les instabilités convectives sont une forme d'instabilité retrouvées dans des couches de liquides stratifiés en densité et sont caractérisés par la formation de «fingers». En accord avec HOYAL *et al.* (1999), ces formes d'instabilités sont causées principalement par les mécanismes de double diffusion ou de sédimentation de particules à travers l'interface de deux fluides stratifiés. Les modèles numériques actuels utilisés pour décrire la dispersion des tephras ne prennent pas en considération ces instabilités convectives, qui jouent pourtant un rôle important dans la sédimentation des particules.

La sédimentation des particules, comme principal mécanisme de formation des convections, semble être le phénomène le plus vraisemblable impliqué dans la formation des «fingers» dans les nuages volcaniques. Pour ces raisons, nous élaborons des expériences dédiées à paramétrer ce processus ainsi qu'à développer un modèle adapté pour la sédimentation des particules.

Le dispositif expérimental (figure 3b) est constitué d'un réservoir en plexiglas de 50 cm x 30 cm x 30 cm dans lequel il est possible de glisser une feuille en PET pour le diviser en deux et séparer deux différentes couches de liquides. Un liquide contenant des particules (eau et billes de verre) est placé sur un autre liquide (solution d'eau sucrée) plus dense. L'expérience consiste à enlever la séparation et analyser la formation des «fingers». Le fluide moins dense sur le fluide plus dense constitue une configuration stable initialement; les instabilités convectives commencent à se développer lorsque, due à la sédimentation des particules à l'interface, la partie supérieure du fluide inférieure devient plus lourde. Chaque

expérience est filmée par une caméra haute définition. Un processus de calibration a été réalisé pour corrélérer les différents niveaux de gris d'une image de film à différents niveaux de concentration. Les modèles actuels de la sédimentation des particules en présence d'instabilités convectives (HOYAL *et al.* 1999), sont comparés aux données expérimentales. Les résultats montrent que la formation des fingers n'a pas d'influence sur la sédimentation dans la couche supérieure, mais une forte influence sur la sédimentation dans la couche inférieure. Les fingers semblent changer le flux entrant dans la couche inférieure et agissent comme une couche intermédiaire turbulente. Ces observations expérimentales contestent la vision traditionnelle de la dispersion de tephra, où les fingers ont été observés et donc où la sédimentation en devrait être influencée.

L'agrégation et la vitesse terminale des particules

L'agrégation des particules volcaniques affecte la vitesse terminale de tephra et par conséquent leurs retombées. Les particules de cendres fines forment des agrégats à la fois dans la colonne éruptive et dans le nuage de cendres lors de la dispersion et sont responsables de la formation des maxima dans le dépôt de masse (CAREY & SIGURDSSON 1982, DURANT & ROSE 2009). Cependant, les processus de formation d'agrégats et leurs impacts sur la dispersion de tephra n'ont pas été encore complètement élucidés. Pour cette raison, une soufflerie verticale a été construite en collaboration avec le groupe de compétence en mécanique des fluides et Procédés Énergétiques (CMEFE) de l'École d'ingénieurs de Genève pour étudier l'agrégation des particules et l'effet de la forme sur la vitesse terminale.

La soufflerie (figure 4) est d'environ 4 m de hauteur, 3,5 m de largeur et 1,5 m de profondeur. Afin d'étudier l'agrégation humide et sèche, différents paramètres seront variés comme la taille et la forme des particules, l'humidité de l'air, l'intensité des turbulences, la température et le champ électrostatique dans la section de travail. À travers l'analyse de film à haute vitesse et de techniques de «shadow sizing», l'analyse du nombre de collisions et de l'efficacité d'agrégation des particules ainsi que l'influence de la formation d'agrégats sur la vitesse terminale sera rendue possible.

CONCLUSIONS

La modélisation analogue est un outil important pour améliorer notre compréhension des processus géophysiques et l'élaboration de nouvelles stratégies pour la réduction des risques. Pour cette raison, un nouveau laboratoire de dynamique des fluides géophysiques a été construit à l'Université de Genève afin d'étudier un ensemble des phénomènes naturels tels que les avalanches de débris en grande masse, la montée du magma et la retombée de tephra. Depuis son établissement en 2008, quatre principaux dispositifs expérimentaux ont été construits et plusieurs recherches sont menées. Toutes ces recherches ont une approche multidisciplinaire et profitent de collaborations nationales et internationales. Les résultats ont jusqu'à présent confirmé notre conviction que la compréhension empirique des processus caractérisant la dynamique des fluides et des écoulements granulaires peut fournir des indications fondamentales sur les mécanismes susceptibles de se produire dans les phénomènes géophysiques, avec des implications évidentes pour l'évaluation des risques associés.



Figure 4.–La soufflerie verticale pour l'étude de la vitesse terminale et de l'agrégation des particules;
The wind tunnel for the study of terminal velocity and aggregation of volcanic particles.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier notre technicien Frédéric Arlaud, le Département d'ingénierie chimique et environnementale de l'Université de Nottingham (Royaume-Uni), le Groupe de compétence en mécanique des fluides et Procédés Énergétiques (CMEFE) de l'École d'ingénieurs de Genève, la Fondation Ernst et Lucie Schmidheiny et le Fond National Suisse de la Recherche Scientifique.

BIBLIOGRAPHIE

- CAREY S. & SIGURDSSON H., 1982. *Influence of particle aggregation on deposition of distal tephra from the May 18, 1980, eruption of Mount St. Helens volcano*. J. Geophys. Res., 87(B8), 7061-7072.
- CHENG H., HILLS J.K. & AZZOPARDI B.J., 1998. *A study on the bubble to-slug transition in vertical gas-liquid flow in columns of different diameter*. Int. J. Mult. Flow, 24, 431-452.
- DAVIES T.R., MCSAVENEY M.J. & HODGSON K.A., 1999. *A fragmentation-spreading model for long-runout rock avalanches*. Canadian Geotechnical Journal, 36(6), 1096-1110.
- DURANT A. & ROSE W., 2009. *Sedimentological constraints on hydrometeor-enhanced particle deposition: 1992 eruptions of Crater Peak, Alaska*. J. Volcanol. Geotherm. Res., 186, 40-59.
- HAYASHI J.N. & SELF S., 1992. *A Comparison of Pyroclastic Flow and Debris Avalanche Mobility*. J. Geophys. Res., 97, NO. B6, 9063-9071.

- HOYAL D., BURSIK M.I. & ATKINSON J.F., 1999. *Settling-driven convection: A mechanism of sedimentation from stratified fluids*. J. Geophys. Res., 104, 7953-7966.
- HUNGR O., 1990. *Mobility of rock avalanches*. Reports of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, 46, 11-20.
- HUNGR O., EVANS S.G., BOVIS M. & HUTCHINSON J.N., 2001. *Review of the classification of landslides of the flow type*. Environ. Eng. Geosci., VII, 221-238.
- LEGROS F., 2002. *The mobility of long-runout landslides*. Eng. Geol., 63, 301-331.
- LEGROS F., 2006. *Landslide mobility and the role of water*. In: Landslides from Massive Rock Slope Failure. NATO Sciences Series, IV. Earth and Environmental Sciences, 49, 233-242.
- OHNUKI A. & AKIMOTO H., 2000. *Experimental study on transition of flow pattern and phase distribution in upward air-water flow along a large vertical pipe*. Int. J. Mult. Flow, 26, 367-386.
- OMEBERE-IYARI N.K., AZZOPARDI B.J. & LADAM Y., 2008. *Two-phase flow patterns in large diameter vertical pipes at high pressures*. AIChE J., 53, 2943-2504.

MÉTHODES

(Articles 26, 27 et 28)