

Simulation numérique des écoulements pyroclastiques: reconnaissance sur le terrain (Mont Saint-Helens, États-Unis)

Valentin GUEUGNEAU

Docteur au laboratoire Magmas et Volcans à Clermont-Ferrand, mon sujet de thèse porte sur les écoulements (ou courants) de densité pyroclastique (PDCs). Ces écoulements sont des mélanges de fragments de lave et de gaz à haute température se déplaçant à grande vitesse. Le modèle commun les décrit comme un écoulement en deux parties: la partie basale très concentrée en particules appelée écoulement pyroclastique ou écoulement dense, et la partie supérieure turbulente et très diluée appelée déferlante ou écoulement dilué.

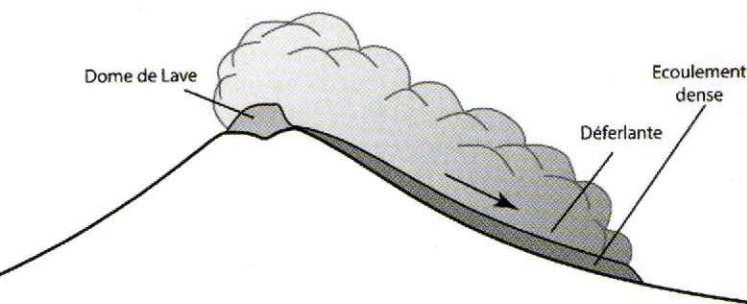


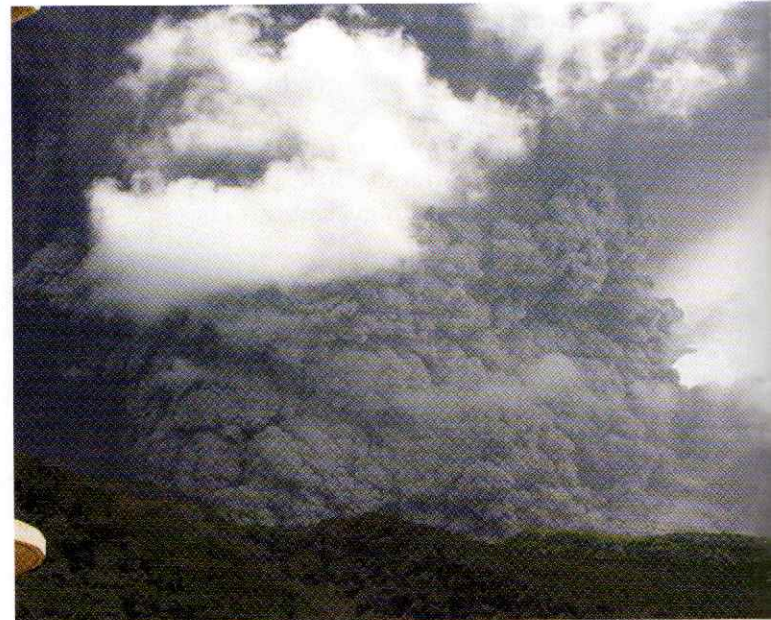
Figure 1: Schéma de la mise en place d'un écoulement de densité pyroclastique suite à l'effondrement d'un dôme de lave. (Roche, 2012).

La physique des écoulements de densité pyroclastique est complexe et, à l'heure actuelle, aucun modèle ne permet de la décrire précisément. Mon travail de recherche est de comprendre et déterminer les relations entre les écoulements denses et les déferlantes car elles sont complexes. Dans le cas d'effondrements de dômes de lave, les écoulements dilués semblent naître des écoulements denses. Cependant, ce mécanisme n'a jamais été démontré expérimentalement. Il est essentiel de mieux contraindre ces relations afin de développer des modèles numériques fiables pour l'évaluation des risques naturels générés par ces écoulements.

Afin de communiquer les premiers résultats de ma thèse, j'ai participé à la conférence internationale de volcanologie IAVCEI¹ qui a eu lieu du 8 au 18 août 2017 à Portland aux États-Unis. Pour cela j'ai bénéficié de la bourse LAVE. Ce séjour s'est déroulé en deux étapes: un stage de terrain au Mont Saint-Helens organisé par l'IAVCEI afin d'étudier les dépôts de l'éruption de 1980, puis la conférence.

Objectif

Il s'agissait de profiter du stage de terrain pour explorer le Mont Saint-Helens et déterminer s'il pouvait devenir une nouvelle cible pour la simulation numérique d'écoulements pyroclastiques à l'aide de notre nouveau modèle numérique (Gueugneau et al., 2017; Kelfoun, 2017; Kelfoun et al., 2017). Cette mission de ter-



Effondrement partiel du dôme de lave de la Soufrière Hills à Montserrat (Antilles) le 11 février 2010 générant des écoulements pyroclastiques importants et un panache de cendre associé qui a atteint 15 km d'altitude. Image © Jean-Guillaume Feignon.

rain me permettait aussi de rencontrer les personnes travaillant aujourd'hui sur le Mont Saint-Helens. Les discussions sont essentielles pour évaluer l'importance et la faisabilité du projet. La conférence me permettait la présentation de mes travaux de thèse par deux communications, un poster puis un oral.

Mission de terrain

Le stage s'est étalé sur quatre jours au pied du volcan, en majorité dans la plaine de ponces (cf. figure 2). Le campement était assuré par l'USGS, au camp de Windy Ridge. Le premier jour fut consacré aux premières vues sur la face Sud du volcan et à la visite de Ape Cave un tunnel de lave accessible dans une ancienne coulée de lave du Mont Saint-Helens. L'après-midi était réservée à la reconnaissance des unités stratigraphiques du volcan afin d'en comprendre l'histoire mais aussi s'imprégner des faciès des



Panorama du Mont Saint-Helens depuis la plaine de ponces, avec une vue entière de l'amphithéâtre formé après l'éruption du 8 mai 1980. Le dôme aujourd'hui stable est visible au centre du cratère entouré de son glacier. Cette vue du Nord vers le Sud est dans le sens opposé de propagation des écoulements pyroclastiques de l'éruption. Sur les bords gauche et droit de la vallée, les dépôts blancs sont des dépôts d'écoulements pyroclastiques. La colline sombre entre les deux au bout de la vallée est un « hummock », un des blocs de l'avalanche de débris. Image © Valentin Guengneau.

dépôts pour mieux les reconnaître les jours suivants. Mikael Clynné, géologue de l'USGS ayant consacré toute sa carrière au Mont Saint-Helens, était le guide de cette journée.

Les deuxième et troisième journées étaient consacrées à l'étude des dépôts d'écoulements pyroclastiques dans la plaine des ponces (cf. figure 2). Ils ont été déposés durant le paroxysme² de l'éruption (colonne plinienne). Le blast ayant eu lieu peu après 8h30 le matin du 8 mai 1980, l'éruption a laissé place à une phase soutenue (pendant environ 12h) d'une colonne éruptive (d'environ 20 km de haut) affectée par des effondrements périodiques générant des écoulements pyroclastiques. Ces deux jours nous ont permis de distinguer les six phases de l'éruption (cf. figure 2), la phase I étant l'effondrement latéral et le blast associé (Criswell, 1987). Nous avons aussi étudié les relations entre topographie et écoulements pyroclastiques avec le phénomène de chenalisation³ (Brand et al., 2014) que l'on observe dans les dépôts. Une autre observation très intéressante concerne les cratères d'explosion phréatique au sein même des dépôts. Ils correspondent à des explosions post-sédimentation de poches de vapeur d'eau à la base générées par le passage des écoulements très chauds (cf. figure 3).

Le dernier jour était réservé à l'étude des dépôts de déferlantes proches du cratère (autour

de Sugar Bowl sur la figure 2), très stratifiés et fins (figure 3), dont le mécanisme de mise en place est plus complexe (sédimentation d'un écoulement turbulent). C'était l'occasion de s'approcher au maximum du cratère, nous sommes montés jusqu'à l'entrée de l'amphithéâtre (à gauche de Sugar Bowl – figure 2) afin d'observer le dôme. Malheureusement les conditions météo nous ont pas permis d'observer pleinement le cratère et nous avons quitté assez rapidement les pentes pour un retour en soirée à Portland.

L'exploration des dépôts fut riche d'informations. Certains modèles numériques sont capables de reproduire la dynamique de l'éruption (Ongaro et al., 2012) et apportent des explications aux observations de terrain notamment au niveau du blast, comme sa vitesse par exemple qui ne pourrait pas dépasser les 150 m/s d'après les modèles. L'un des apports majeurs est notamment l'explication des similitudes entre dépôts de déferlante et dépôts de blast. Ongaro et al. (2012) montrent par simulation numérique que le blast (où les particules sont transportées par dépression comme lors d'une explosion) se transforme rapidement en déferlante de haute énergie (où les particules sont transportées dans un écoulement turbulent). En ce qui concerne notre modèle, il n'est pas possible de reproduire parfaitement l'éruption de 1980 car il ne peut reproduire la décompression initiale du blast

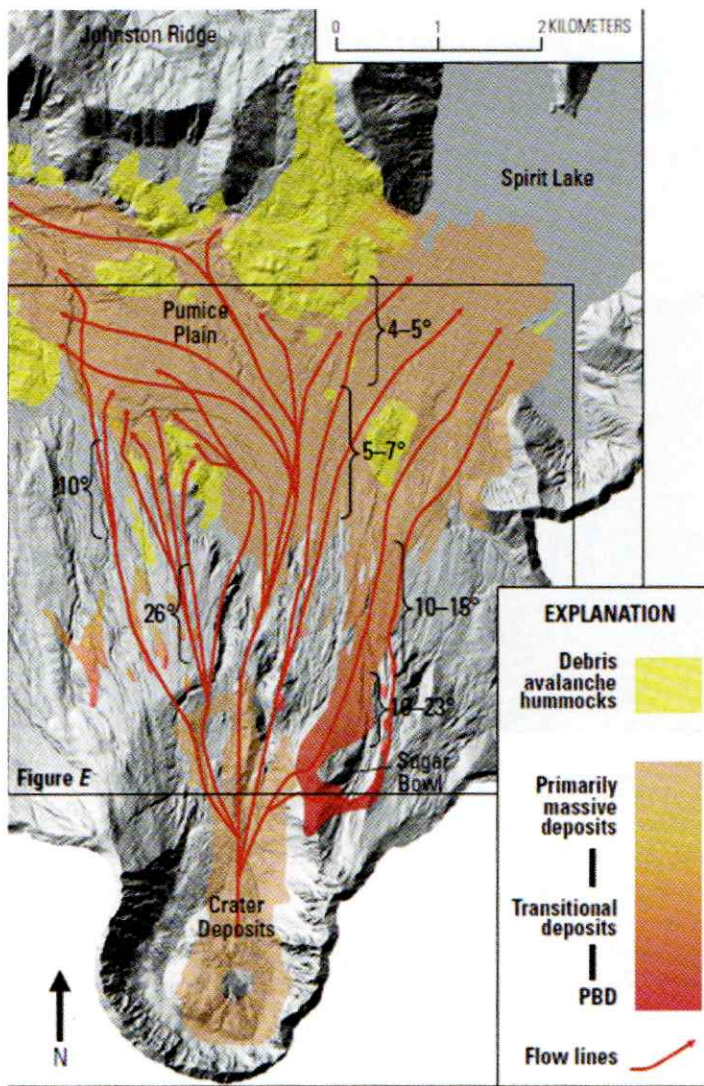


Figure 2: Carte des dépôts d'écoulements pyroclastiques ponceux (orange) ainsi que de l'avalanche de débris (jaune). Les flèches rouges indiquent les directions des écoulements pyroclastiques déterminés sur le terrain.

Phases de l'éruption :

I: Effondrement massif suivi d'un blast latéral;

II: Éruption plinienne initiale;

III: Écoulements pyroclastiques initiaux;

IV: Phase climactique (paroxysme) avec écoulements pyroclastiques;

V: Écoulements pyroclastiques tardifs;

VI: Phase post-éruptive.

D'après Brand et al. (2014).

appelé « burst phase »⁴ (Belousov et al., 2007), mais uniquement des écoulements de densité. Nous pouvons alors tenter de reproduire les cartes de dépôts de ponces et d'avalanche de débris⁵ afin de comprendre leurs interactions, mais ce projet ne concernera pas mon projet de thèse. Néanmoins cette mission fut aussi intéressante pour le phénomène de chenalisation, déjà observé dans les modèles de fluidisation⁶ (Gueugneau et al., 2017), mais aussi pour l'identification de dépôts d'écoulements dilués sur de forte de pentes. Cette caractéristique que l'on ne retrouve pas forcément sur les simulations m'a poussé à retravailler la rhéologie⁷ utilisée en adoptant un comportement physique (plastique) capable de reproduire ces morphologies. Elle fut aussi extrêmement enrichissante sur le plan personnel car j'ai pu étudier et observer les dépôts d'une des plus célèbres éruptions volcaniques.

La conférence

L'autre objectif de ce voyage était la présentation de mes résultats de thèse. Cet exercice est nécessaire afin de communiquer les résultats à toute la communauté scientifique. Mon projet de thèse est constitué de trois études liées aux différentes techniques utilisées pour étudier les écoulements pyroclastiques. Les mécanismes internes comme la genèse et la mise en place des déferlantes sont des mécanismes complexes difficiles à étudier car la dangerosité de ces écoulements rend leur étude in-situ impossible, et leur opacité empêche l'observation de la dynamique interne même à distance. Aujourd'hui, l'étude des dépôts laissés par les écoulements pyroclastiques est la seule manière de comprendre leur comportement et leur physique interne sur le terrain. Ils servent alors de base aux études en laboratoire, expérimentales ou modélisations numériques, constituant alors la meilleure méthode d'étude de leur physique interne. Mon projet de thèse utilise la complémentarité des trois méthodes, étude de terrain, expérience de laboratoire et modélisation numérique afin de construire un modèle de formation des déferlantes à partir de l'écoulement dense basal. Ce projet permet aussi de développer un modèle numérique afin de rendre fiable pour une utilisation dans la prévention des risques et aléas liés à ces écoulements.

Les deux études présentées à la conférence concernaient le modèle numérique dont le développement est toujours en cours. La première étude numérique a été présentée lors d'un oral de quinze minutes. Il s'agissait de reproduire numériquement la fluidisation dans les écoulements pyroclastiques, suspecté d'être le mécanisme expliquant leur grande mobilité (O. Roche et al., 2010; Roche, 2012), en calibrant le modèle

numérique à partir d'expériences d'écoulements granulaires en laboratoire. Cette étude avait donnée lieu à une publication en février 2017 (Gueugneau et al., 2017). La deuxième étude concernait un autre aspect du modèle numérique, la reproduction des écoulements pyroclastiques secondaires, liés à la remobilisation des dépôts de déferlantes devenus trop épais. Elle est basée sur les études de terrain de l'éruption du 25 juin 1997 de Soufrière Hill's à Montserrat (Druitt et al., 2002; Loughlin et al., 2002) où ces écoulements furent précisément décrits. Reproduire numériquement la formation des écoulements denses secondaires est probablement la clé pour comprendre le comportement physique des écoulements denses.

L'identification de ce mécanisme nous a per-

mis de mettre en lumière un comportement physique général pour les écoulements denses. Les résultats ont été présentés sous forme de poster qui a été nommé parmi les six meilleures présentations étudiantes de la conférence (*Outstanding Student Presentation Award from LAVCEI*). La troisième étude de ma thèse évoquée dans le poster est une expérience en laboratoire pour étudier la loi physique régissant la formation d'une déferlante. Elle permettra d'améliorer le modèle numérique (aujourd'hui utilisant des lois empiriques) et servira de clé de voûte à ma thèse afin de relier les deux premières études pour construire un modèle physique global de création des déferlantes à partir des écoulements denses.

Je remercie l'association LAVE et ses membres qui m'ont accordé leur confiance dans ce projet. □

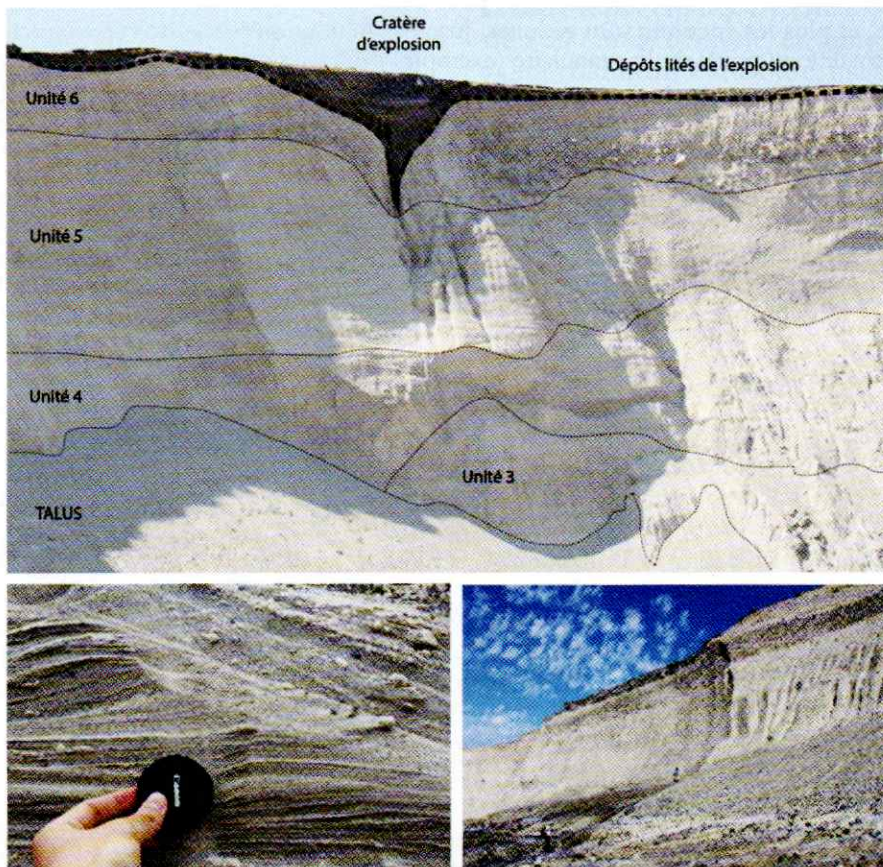


Figure 3: Photos des différents dépôts d'écoulements pyroclastiques du Mont Saint-Helens. En haut, un cratère d'explosion phréatique post-éruptif d'environ 15 m, en forme d'assiette (au centre de l'image en haut des dépôts) dont l'enracinement n'est pas clair. En bas à gauche, photo des dépôts de déferlante près de Sugar Bowl très fins et stratifiés. En bas à droite, photo des dépôts denses de la phase plinienne (phases 3 à 6) au centre de la plaine de ponces (hauteur 25 m).

Glossaire

¹ *LAVCEI: International Association for Volcanology and Chemistry of Earth Interior*, association de volcanologues qui a pour objectif de regrouper et organiser cette communauté scientifique et aider à son développement. Elle se réunit tous les quatre ans pour une assemblée générale (Portland 2017). Elle est l'éditrice du journal scientifique «*Bulletin of Volcanology*».

² *Paroxysme*: Phase culminante d'une éruption volcanique. De durée variable, elle marque l'intensité maximale qu'a atteinte une éruption (hauteur de colonne la plus haute, volume émis le plus important, taux d'émission le plus important,...).

³ *Chenalisation* : Mécanisme physique commun à tous les écoulements granulaires, c'est l'organisation spontanée d'une masse de grains en mouvement en un ou plusieurs chenaux dus à une forte pente. L'écoulement forme alors un chenal central où les grains vont continuer à s'écouler, bordé par deux levées latérales où les grains se freinent et s'accumulent. Il en résulte une morphologie en canaux et lobes au front.

⁴ *Burst Phase* : Phase initiale d'un blast décrite comme la plus énergétique. Il s'agit d'une phase de transport des particules uniquement par la décompression des gaz autour de la zone d'émission. Les particules ne sont donc pas suspendues comme dans un écoulement de densité mais transportées par dépression comme lors d'une explosion. Cette phase démarre dès les premiers instants de l'éruption et se poursuit jusqu'à ce que les gaz soient totalement décomprimés et aient atteint la pression atmosphérique. Le blast peut parcourir plusieurs kilomètres autour de la zone d'émission. Les particules et les gaz se remobilisent alors en un écoulement de densité : une déferlante.

⁵ *Avalanche de débris* : Écoulement de grande ampleur généré par le glissement brutal d'une masse de roches (de quelques dizaines à plusieurs millions de kilomètres cubes de roches). La gravité étant le moteur de l'écoulement, les roches mises en mouvement à haute vitesse se fragmentent en de petites particules lors du mouvement pour constituer une matrice granulaire se comportant comme un fluide, procurant à l'écoulement sa capacité à parcourir de longues distances.

⁶ *Fluidisation* : Mécanisme physique des écoulements granulaires où la pression des fluides interstitiels de cet écoulement (principalement eau ou gaz) contrebalance le poids des particules et réduit ainsi les frottements entre grains. Les frottements étant réduits, l'écoulement peut parcourir une distance bien plus importante. Plus la pression est forte, et plus les frottements sont réduites, jusqu'à fluidisation totale de l'écoulement où la pression contrebalance la totalité du poids du lit granulaire (exemple : sables mouvants, écoulements pyroclastiques,...).

⁷ *Rhéologie* : Discipline de physique des matériaux visant à étudier la déformation d'un corps (fluide ou solide). Pour les écoulements pyroclastiques, il s'agit de comprendre comment ils s'écoulent et quelles lois mathématiques permettent de décrire leurs frottements internes et basaux.

Références bibliographiques

- Belousov A., Voight B. & Belousova M. (2007). Directed blasts and blast-generated pyroclastic density currents: a comparison of the Bezymianny 1956, Mount St Helens 1980, and Soufrière Hills, Montserrat 1997 eruptions and deposits. *Bulletin of Volcanology*, 69(7), 701–740. <http://doi.org/10.1007/s00445-006-0109-y>
- Brand B. D., Mackaman-Lo C., Pollock N. M., Bendaña S., Dawson B., & Wichgers P. (2014). Dynamics of pyroclastic density currents: Conditions that promote substrate erosion and self-channelization — Mount St Helens, Washington (USA). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 276, 189–214. <http://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.01.007>
- Criswell C. W. (1987). Chronology and pyroclastic stratigraphy of the May 18, 1980, eruption of Mount St. Helens, Washington. *Journal of Geophysical Research*, 92(B10), 10.
- Druitt T. H., Young S. R., Baptie B., Bonadonna C., Calder E. S., Clarke A. B.,... Voight B. (2002). Episodes of cyclic Vulcanian explosive activity with fountain collapse at Soufriere Hills Volcano, Montserrat. *Geological Society, London, Memoirs*, 21 (January), 281–306. <http://doi.org/10.1144/GSL.MEM.2002.021.01.13>
- Gueugneau V., Kelfoun K., Roche O., & Chupin L. (2017). Effects of pore pressure in pyroclastic flows: Numerical simulation and experimental validation. *Geophysical Research Letters*, 44(5), 2194–2202. <http://doi.org/10.1002/2017GL072591>
- Kelfoun K. (2017). A two-layer depth-averaged model for both the dilute and the concentrated parts of pyroclastic currents. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122, 1–19. <http://doi.org/10.1002/2017JB014013>
- Kelfoun K., Gueugneau V., Komorowski J.-C., Cholik N., & Merciecca C. (2017). Simulation of block-and-ash flows and ash-cloud surges of the 2010 eruption of Merapi volcano with a two-layer model. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122, 1–16. <http://doi.org/10.1002/2017JB013981>
- Loughlin S. C., Calder E. S., Clarke A., Cole P. D., Luckett R., Mangan M. T., ... Watts R. B. (2002). Pyroclastic flows and surges generated by the 25 June 1997 dome collapse, Soufriere Hills Volcano, Montserrat. *Geological Society, London, Memoirs*, 21(1), 191–209. <http://doi.org/10.1144/GSL.MEM.2002.021.01.09>
- Ongaro T. E., Clarke A. B., Voight B., Neri A., & Widiwijayanti C. (2012). Multiphase flow dynamics of pyroclastic density currents during the May 18, 1980 lateral blast of Mount St. Helens. *Journal of Geophysical Research*, 117(May), 1–22. <http://doi.org/10.1029/2011JB009081>
- Roche O. (2012). Depositional processes and gas pore pressure in pyroclastic flows: an experimental perspective. *Bulletin of Volcanology*, 74(8), 1807–1820. <http://doi.org/10.1007/s00445-012-0639-4>
- Roche O., Montserrat S., Niño Y., & Tamburrino A. (2010). Pore fluid pressure and internal kinematics of gravitational laboratory air-particle flows: Insights into the emplacement dynamics of pyroclastic flows. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(9), 1–18. <http://doi.org/10.1029/2009JB007133>