

## Modélisation de coulées de lave avec le logiciel MigFlow

J. Gosselet<sup>1</sup>, M. Henry<sup>2</sup>, T. Leyssens<sup>3</sup>, J. Lambrechts<sup>4</sup>, V. Legat<sup>5</sup>

<sup>1</sup> UCLouvain (Université Catholique de Louvain), Louvain-La-Neuve, james.gosselet@uclouvain.be

<sup>2</sup> UCLouvain (Université Catholique de Louvain), Louvain-La-Neuve, michel.henry@uclouvain.be

<sup>3</sup> UCLouvain (Université Catholique de Louvain), Louvain-La-Neuve, thomas.leysens@uclouvain.be

<sup>4</sup> UCLouvain (Université Catholique de Louvain), Louvain-La-Neuve, jonathan.lambrechts@uclouvain.be

<sup>5</sup> UCLouvain (Université Catholique de Louvain), Louvain-La-Neuve, vincent.legat@uclouvain.be

**Résumé** — Nous présentons l'utilisation de MigFlow, un cadre numérique couplant PFEM et DEM, pour simuler la dynamique complexe des coulées de lave. Les simulations portent sur la formation de dômes et d'aiguilles ainsi que sur la transition pahoehoe–'a'ā. Cette approche permet de suivre avec précision les interfaces fluide–solide et les déformations des écoulements. Nos premières simulations illustrent la faisabilité du modèle pour représenter la dynamique des coulées de lave. Les développements futurs viseront l'intégration de la solidification et de la fracturation afin de renforcer la fidélité physique et la prédiction mécanique du modèle.

**Mots clés** — PFEM, DEM, coulées de lave.

### 1 Modélisation des coulées de lave

Prévoir avec précision la trajectoire des coulées de lave reste un défi central en volcanologie, essentiel pour la protection des populations et des infrastructures [5]. C'est précisément ce danger qui inspire l'étude de la dynamique des coulées de lave et motive la recherche sur ces phénomènes complexes. La physique numérique fournit aujourd'hui des outils puissants permettant de simuler ces écoulements avec une précision croissante, offrant des informations qualitatives et quantitatives sur leur comportement.

Les *coulées de lave* sont des systèmes multiphasiques complexes, composés d'un noyau en fusion interagissant avec le substrat et d'une croûte partiellement solidifiée et fracturée. Ces écoulements présentent des changements topologiques rapides [1], liés à la formation de clinker [12], aux variations de pente, au débit variable [10] et aux changements de viscosité [2]. Pour représenter fidèlement ces phénomènes, il est nécessaire de modéliser la solidification et la fracturation de la croûte, le *mouvement de surface libre* du magma et son comportement *viscoplastique*.

Différentes stratégies de modélisation ont été développées pour simuler les coulées de lave, avec des niveaux de réalisme physique et de complexité computationnelle variées. Les approches simplifiées, telles que les *automates cellulaires* [4] ou les *modèles stochastiques* [13], sont efficaces pour cartographier les risques à grande échelle mais manquent de précision physique, contrairement aux modèles thermo-rhéologiques [3], aux modèles d'approximations en eau peu profonde [9], et aux formulations *SPH* (Smoothed Particle Hydrodynamics) [8]. La *Discrete Element Method* (DEM) a déjà été employée pour modéliser le comportement viscoplastique et la dynamique des dômes de lave [7], mais cela reste un champ encore relativement inexploré.

Le logiciel *MigFlow*, développé à l'Université catholique de Louvain (UCLouvain), est un modèle open-source conçu pour simuler les interactions entre fluides et milieux granulaires. Initialement dédié au transport sédimentaire et aux glissements de terrain, il offre aujourd'hui un cadre prometteur pour la modélisation de processus géophysiques tels que les coulées de lave. En intégrant le comportement visqueux du magma et la réponse mécanique de la croûte solide, cette approche pourrait fournir une représentation plus détaillée et physiquement cohérente de la dynamique des écoulements volcaniques.

## 2 Logiciel MigFlow

MigFlow [11, 6] est un cadre numérique open-source développé pour simuler les écoulements granulaires denses et multiphasiques en utilisant une méthode couplée PFEM (Particle Finite Element Method) et DEM (Discrete Element Method). L'idée principale de MigFlow est de traiter le fluide comme un continuum résolu par PFEM, tandis que les grains solides sont modélisés individuellement avec DEM. La formulation lagrangienne de MigFlow facilite le suivi précis des interfaces magma-croûte et des grandes déformations, offrant une base adaptée à la simulation réaliste des coulées de lave.

### 2.1 Phase fluide

Le fluide est décrit par les équations de Navier–Stokes incompressibles moyennées sur le volume, couplées à une équation d'énergie thermique :

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \mathbf{u}) = 0, \quad (1)$$

$$\alpha \rho \frac{d\mathbf{u}}{dt} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{f}_p + \alpha \rho \mathbf{g}(1 + \beta(T - T_R)), \quad (2)$$

$$\alpha \rho c \frac{dT}{dt} = -\nabla \cdot \mathbf{q} + q_p, \quad (3)$$

où  $\alpha$  est la fraction volumique de fluide,  $\rho$  la densité,  $c$  la capacité thermique massique,  $\beta$  le coefficient de dilatation thermique, et  $T_R$  une température de référence. Le tenseur des contraintes  $\boldsymbol{\sigma}$  est donné par

$$\boldsymbol{\sigma} = -p\mathbf{I} + \alpha \boldsymbol{\tau}, \quad (4)$$

avec  $p$  la pression,  $\eta$  la viscosité dynamique,  $\boldsymbol{\tau}$  le tenseur des contraintes visqueuses,

$$\mathbf{q} = -\varepsilon k \nabla T$$

le flux de chaleur,  $\varepsilon$  l'émissivité et  $k$  la conductivité thermique. Les termes  $\mathbf{f}_p$  et  $q_p$  représentent le transfert de quantité de mouvement et de chaleur des particules vers le fluide, incluant la traînée et les effets convectifs aux frontières des particules.

### 2.2 Phase solide

Chaque particule est modélisée comme un corps rigide, avec une dynamique translationnelle et rotationnelle régie par

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{f}_c - \mathbf{f}_p + \rho \mathbf{g}, \quad (5)$$

$$\rho c \frac{dT}{dt} = q_c - q_p, \quad (6)$$

où  $\mathbf{v}$  est la vitesse de la particule,  $\mathbf{f}_c$  les forces de contact, et  $q_c$  le transfert de chaleur dû aux collisions. Les termes d'interaction  $\mathbf{f}_p$  et  $q_p$  assurent le couplage de la quantité de mouvement et de l'énergie avec la phase fluide.

### 2.3 Procédure numérique

À chaque pas de temps, le modèle PFEM résout la vitesse et la pression du fluide sur les nœuds de maillage mobiles, suivi par l'advection–diffusion de la température. Le maillage est reconstruit à chaque étape pour tenir compte des grandes déformations, tandis que les positions et températures des particules sont mises à jour via le modèle DEM.

### 3 Premières simulations

#### 3.1 Modélisation d'un dôme de lave

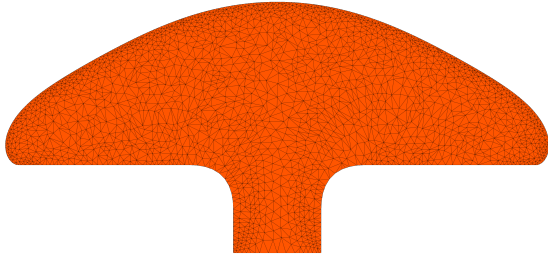


FIGURE 1 – Maillage numérique du dôme.



FIGURE 2 – Dôme de Novarupta.

Nous présentons notre première simulation de formation d'un dôme de lave. La figure 2 illustre le phénomène visé. Les paramètres physiques et numériques sont résumés dans la table 1. Une vitesse nulle est imposée sur les frontières du domaine.

Dans la figure 3, La lave s'écoule sur un mois, avec un pic d'effusion après deux semaines. Le gradient de vitesse varie de  $0,0003 \frac{m}{s}$  (jaune) à  $0 \frac{m}{s}$  (noir), mettant en évidence des zones de mobilité contrastées dans la lave.

Cette simulation ne rend pas encore compte des effets thermiques ni des brèches de coulée, mais reproduit déjà des dimensions caractéristiques de tels dômes. Son amélioration nécessiterait l'intégration du changement de phase magmatisation, l'emploi d'un pas de temps adaptatif pour la partie solidifiée, ainsi que l'ajout d'une force de cohésion entre les grains.

Paramètres	Valeur numérique
<b>Propriétés du fluide</b>	
Densité, $\rho$	$2200 \text{ kg m}^{-3}$
Viscosité dynamique, $\eta$	$1 \times 10^{10} \text{ Pa s}$
Tension de surface, $\sigma$	$0,3 \text{ N m}^{-1}$
<b>Conditions aux limites</b>	
Taux d'effusion	$0,03 \text{ m}^3/\text{s}$
Diamètre du conduit	30 m
Durée de l'effusion	31 jours
<b>Paramètres numériques</b>	
Taille du maillage	1,5 m
Pas de temps	331,34 s

TABLE 1 – Paramètres physiques et numériques.

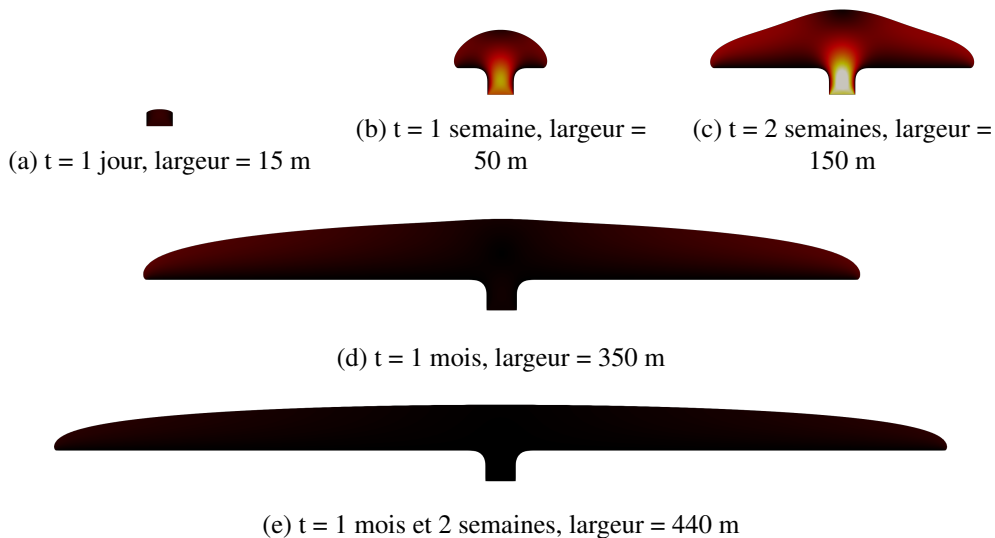


FIGURE 3 – Évolution d'un dôme de lave.

### 3.2 Modélisation d'une aiguille de lave

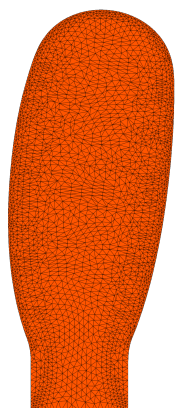


FIGURE 4 – Maillage numérique de l'aiguille.



FIGURE 5 – Aiguille du Mont Saint Héléne 2006.

Cette seconde simulation porte sur la formation d'une aiguille de lave. La figure 5 illustre le phénomène visé. Les paramètres physiques et numériques sont résumés dans la table 2. Une vitesse nulle est imposée sur les frontières du domaine.

Dans la figure 6, la lave s'écoule sur une période de deux mois, avec un pic d'effusion au terme du premier mois. Le gradient de vitesse  $y$  varie de  $0,002 \frac{m}{s}$  (jaune) à  $0 \frac{m}{s}$  (noir), mettant en évidence la forte viscosité de la lave et l'absence de gradient interne notable une fois l'aiguille entièrement formée.

Comme pour la simulation précédente, les effets thermiques et les brèches de coulées ne sont pas encore pris en compte. Les mêmes améliorations du modèle sont nécessaires, mais l'effondrement de l'aiguille nécessiterait probablement aussi de modéliser la fracturation de la croûte solide plus en détail.

Paramètres	Valeurs numériques
<b>Propriétés du fluide</b>	
Densité, $\rho$	$2400 \text{ kg m}^{-3}$
Viscosité dynamique, $\eta$	$10^{12} \text{ Pa s}$
Tension de surface, $\sigma$	$0,3 \text{ N m}^{-1}$
<b>Conditions aux limites</b>	
Taux d'effusion maximal	$0,05 \text{ m}^3/\text{s}$
Diamètre du conduit	30 m
Durée de l'effusion	62 jours
<b>Paramètres numériques</b>	
Taille du maillage	1,875 m
Pas de temps	1325,36 s

TABLE 2 – Paramètres physiques et numériques.

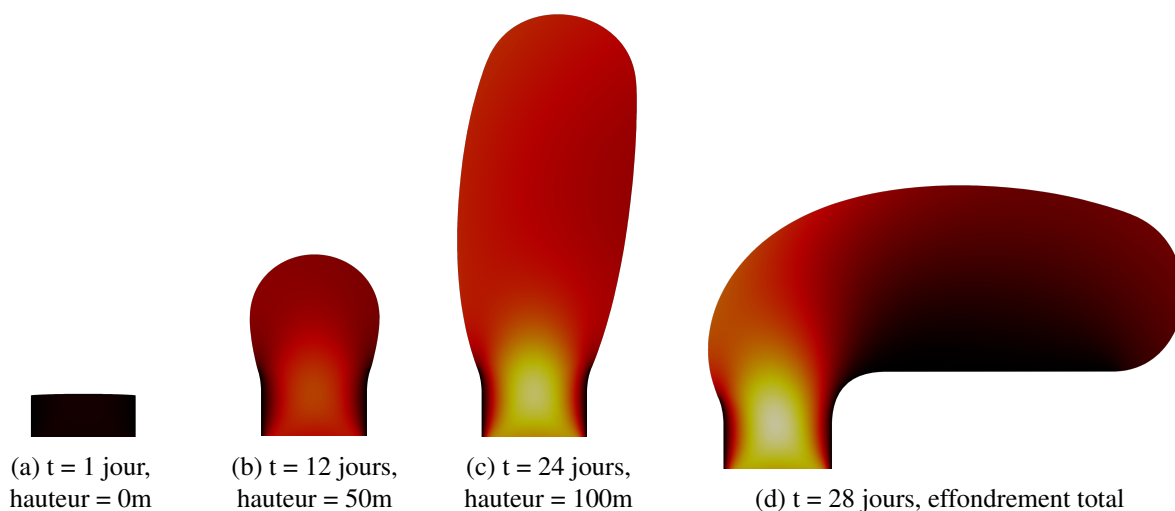


FIGURE 6 – Éruption d'une aiguille.

### 3.3 Modélisation de la transition d'une coulée pahoehoe à une coulée 'a'ā



FIGURE 7 – Lobe d'une coulée pahoehoe.



FIGURE 8 – Front de lave 'a'ā.

Cette troisième simulation porte sur la transition entre un écoulement pahoehoe 7 et un écoulement 'a'ā 8. Ce type de transition se produit souvent lors de ruptures de pente, tandis qu'aucune transition inverse n'est observée même après le retour à une pente douce. C'est précisément ce changement irréversible que nous cherchons à reproduire. Les paramètres physiques et numériques sont récapitulés dans la table 3. Une condition de vitesse nulle est imposée sur les frontières du domaine. Pour des raisons de stabilité numérique, la tension de surface n'est pas prise en compte ; cette simplification n'affecte toutefois que marginalement la simulation, son influence physique restant négligeable.

Dans la figure 10, la lave s'écoule sur une période de 50 secondes, avec un pic d'effusion atteint à la fin de cette période. Le gradient de vitesse  $y$  varie de  $3 \frac{m}{s}$  (jaune) à  $0 \frac{m}{s}$  (noir), soulignant l'effet de la pente sur la dynamique de la coulée.

Les effets thermiques ne sont pas encore intégrés, mais l'interaction avec le substrat et la formation d'une brèche basale sont déjà représentées par l'ajout d'une couche de grains au début de la simulation.

Paramètres	Valeurs numériques
<b>Propriétés du fluide</b>	
Densité, $\rho$	$2700 \text{ kg m}^{-3}$
Viscosité dynamique, $\eta$	$10^4 \text{ Pa s}$
<b>Conditions aux limites</b>	
Taux d'effusion maximal	$5 \text{ m}^3/\text{s}$
Diamètre du conduit	2 m
Durée de l'effusion	50 s
Inclinaison minimal	$5^\circ$
Inclinaison maximal	$15^\circ$
<b>Paramètres numériques</b>	
Taille du maillage surface libre	0,04 m
Taille du maillage fluide-grain	1 m
Pas de temps	0,005 s

TABLE 3 – Paramètres physiques et numériques.

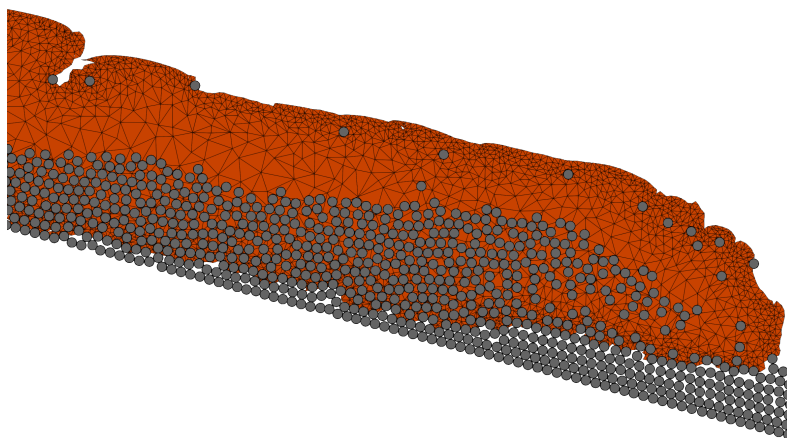


FIGURE 9 – Maillage du front de lave.



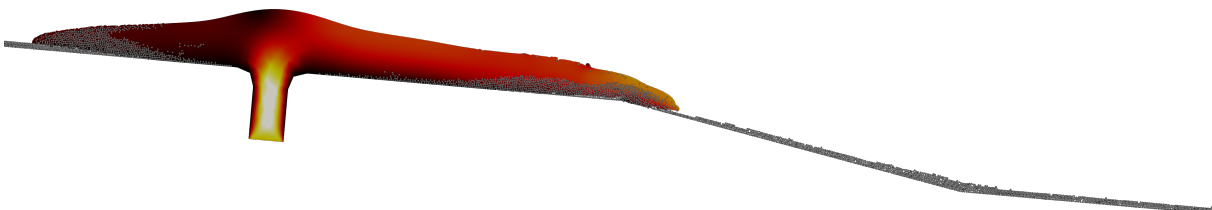
(a)  $t=1s$



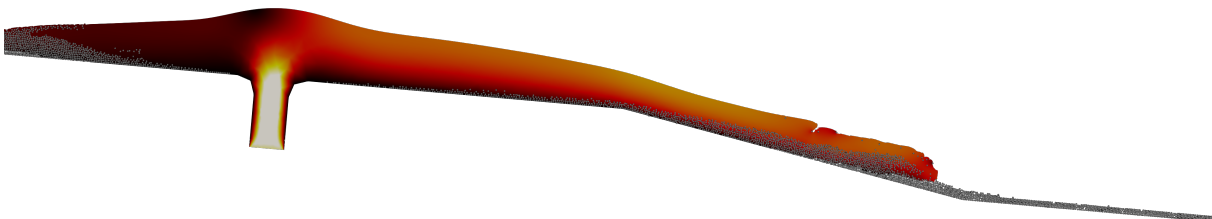
(b)  $t=10s$



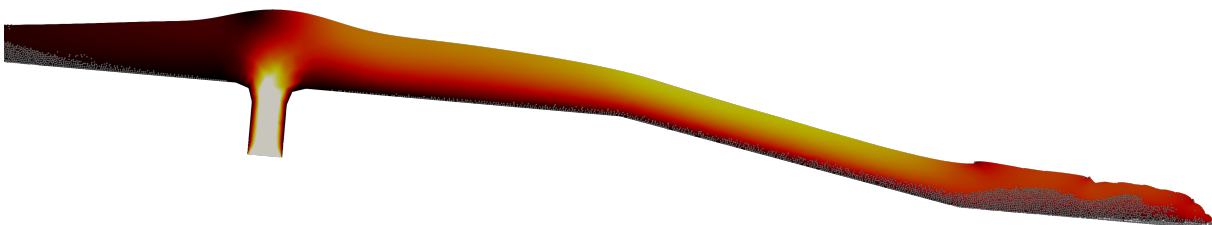
(c)  $t=20s$



(d)  $t=30s$



(e)  $t=40s$



(f)  $t=50s$

FIGURE 10 – Évolution d'une coulée de lave a'a'.

Comme étape intermédiaire dans l'amélioration de notre simulation, nous avons reproduit la même configuration en omettant la phase granulaire mais en intégrant une composante thermique. Les paramètres physiques et numériques sont récapitulés dans le tableau 4. Une vitesse nulle est imposée sur les frontières du domaine, tandis que des transferts convectifs sont appliqués à la surface libre avec l'air et aux frontières avec le sol. Contrairement à la simulation précédente, la tension de surface est ici prise en compte, et la viscosité dépend de la température selon une loi d'Arrhenius. Dans la figure 11, la lave s'écoule sur une période de 50 secondes, avec un pic d'effusion atteint à la fin de cette période. Le gradient de vitesse varie de  $3 \frac{m}{s}$  (jaune) à  $0 \frac{m}{s}$ , tandis que le gradient de température varie de  $1430 \text{ }^\circ K$  (rouge) à  $1400 \text{ }^\circ K$  (bleu). Comparée à la simulation 10, la coulée s'avère plus lente, en raison des conditions imposées aux frontières, qui ne sont pas présentes lorsque l'écoulement se fait directement sur des grains.

Les développements futurs incluront la modélisation du changement de phase magma-croûte ainsi que l'ajout d'une force de cohésion entre les grains afin d'améliorer la fidélité physique du modèle.

Paramètres	Valeurs numériques
<b>Propriétés du fluide</b>	
Densité, $\rho$	$2700 \text{ kg m}^{-3}$
Viscosité à l'effusion, $\eta$	$10^4 \text{ Pa s}$
Température de la lave	$1433.15 \text{ }^\circ K$
<b>Conditions aux limites</b>	
Taux d'effusion maximal	$5 \text{ m}^3/\text{s}$
Diamètre du conduit	$2 \text{ m}$
Durée de l'effusion	$50 \text{ s}$
Inclinaison minimal	$5^\circ$
Inclinaison maximal	$15^\circ$
Convection air-lave	$700 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$
Température de l'air	$293,15 \text{ }^\circ K$
Convection lave-sol	$100 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$
Température du sol	$373,15 \text{ }^\circ K$
Conductivité de la lave	$1.5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
<b>Paramètres numériques</b>	
Taille du maillage surface libre	$0,08 \text{ m}$
Taille du maillage fluide	$0,5 \text{ m}$
Pas de temps	$0,01 \text{ s}$

TABLE 4 – Paramètres physiques et numériques.

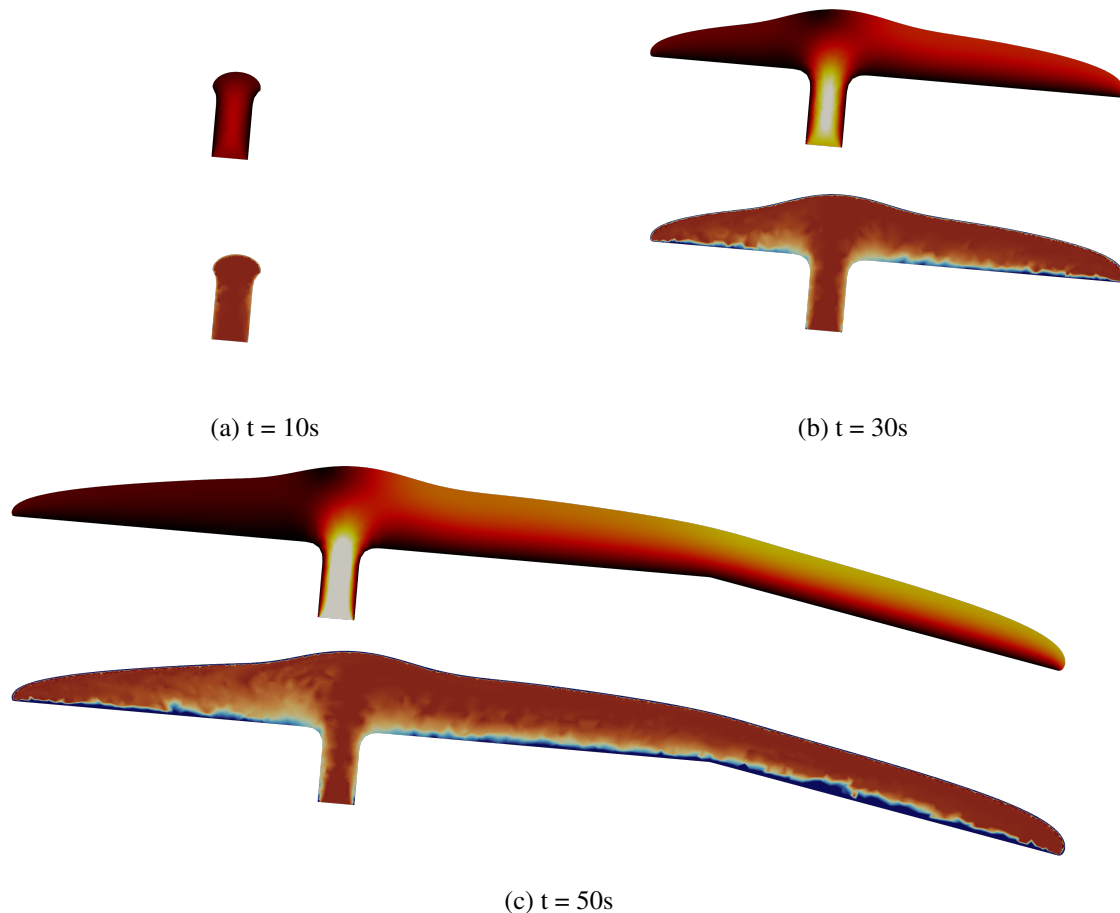


FIGURE 11 – Évolution d'une coulée de lave a'a'.

## Références

- [1] L. J. Applegarth, M. R. James, B. van Wyk de Vries, H. Pinkerton. *Influence of surface clinker on the crustal structures and dynamics of 'a'ā lava flows*, Journal of Geophysical Research : Solid Earth, pages B07203, 2010.
- [2] N. Bagdassarov, H. Pinkerton. *Transient phenomena in vesicular lava flows based on laboratory experiments with analogue materials*, Journal of Volcanology and Geothermal Research, pages 115–136, 2004.
- [3] M. O. Chevrel, J. Labroquère, A. J. L. Harris, S. K. Rowland. *PyFLOWGO : An open-source platform for simulation of channelized lava thermo-rheological properties*, Computers and Geosciences, pages 167–180, 2018.
- [4] G. M. Crisci, R. Rongo, S. Di Gregorio, W. Spataro. *The simulation model SCIARA : the 1991 and 2001 lava flows at Mount Etna*, Journal of Volcanology and Geothermal Research, pages 253–267, 2004.
- [5] H. R. Dietterich, E. Lev, J. Chen, J. A. Richardson, K. V. Cashman. *Benchmarking computational fluid dynamics models of lava flow simulation for hazard assessment, forecasting, and risk management*, Journal of Applied Volcanology, page 9, 2017.
- [6] S. Dorbolo, M. Henry, N. Coppin, V. Legat, J. Lambrechts. *Multiscale FEM-DEM model for spontaneous droplet digging in a hot granular bed*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2025.
- [7] C. E. Harnett, M. E. Thomas, M. D. Purvance, J. Neuberg. *Using a discrete element approach to model lava dome emplacement and collapse*, Journal of Volcanology and Geothermal Research, pages 68–77, 2018.
- [8] A. Hérault, G. Bilotta, A. Vicari, E. Rustico, C. Negro. *Numerical simulation of lava flow using a GPU SPH model*, Annals of Geophysics, 2011.
- [9] K. Kelfoun, S. V. Vargas. *VolcFlow capabilities and potential development for the simulation of lava flows*, Dans : Detecting, Modelling and Responding to Effusive Eruptions, Geological Society of London, 2016.
- [10] E. Lev, E. Rumpf. *Analog experiments of lava flow emplacement*, Annals of Geophysics, 2018.
- [11] T. Leyssens, M. Henry, J. Lambrechts, V. Legat, J.-F. Remacle. *A coupled PFEM-DEM model for fluid-granular flows with free surface dynamics applied to landslides*, Journal of Computational Physics, 2025.
- [12] S. Looock, B. van Wyk de Vries, J.-M. Hénot. *Clinker formation in basaltic and trachybasaltic lava flows*, Bulletin of Volcanology, pages 859–870, 2010.
- [13] S. Mossoux, M. Saey, S. Bartolini, S. Poppe, F. Canters, M. Kervyn. *Q-LAVHA : A flexible GIS plugin to simulate lava flows*, Computers and Geosciences, pages 98–109, 2016.