MIGFLOW · UCLOUVAIN · CSMA 2026 · 21 MAI 2026

COMMENT SE FORMENT LES PLIS DE LAVE ?

Simulation de lave cordée à l'aide de MigFlow

J. Gosselet · M. Henry · T. Leyssens · J. Lambrechts · V. Legat

OBSERVATIONS DE TERRAIN

Où trouve-t-on des plis de lave ?

Les plis de lave constituent l'élément morphologique caractéristique des lavas cordées. Ces structures apparaissent au sein des champs de lave pāhoehoe, des coulées basaltiques, qui s'écoulent généralement sur les pentes douces d'un volcan effusif. Lorsqu'une telle coulée progresse à l'air libre, sa surface se refroidit rapidement pour former une fine croûte visqueuse, tandis que l'intérieur reste fluide et à haute température.
Ce contraste de viscosité entre la surface et le cœur de l'écoulement crée une instabilité mécanique : lorsque la pente diminue, la croûte, soumise à une compression, ne peut plus se déformer suffisamment par écoulement visqueux. Elle devient alors instable, se plisse et génère les structures ondulées typiques des laves cordées.



Coulée de lave cordée — Hawaii | Yusuke Suzuki – YouTube | Longueur d'onde typique : 10 cm à 1 m

Ces plis se développent généralement pour des vitesses d'écoulement de 10^{-3} à 10^{-1} m/s, sur des pentes inférieures à 5°, avec des longueurs d'onde allant de quelques centimètres à plusieurs décimètres. Leur formation s'étale sur des échelles de temps de quelques secondes à plusieurs minutes, selon l'épaisseur de la croûte, la viscosité de la lave et les conditions topographiques.

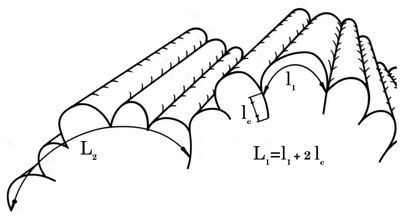


Coupe transversale solidifiée de plis de lave — Fagradalsfjall (Islande) | Sketchfab, Universität Hamburg | Longueur d'arc ~10 cm

Scan to see the 3D mode

Comment mesure-t-on ces plis ?

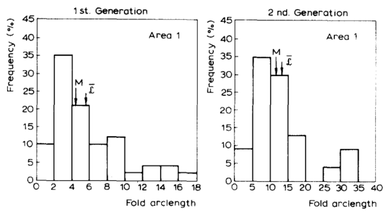
La caractérisation quantitative de ces plis repose sur la méthodologie développée par Fink et Fletcher. Elle consiste à mesurer précisément les longueurs d'arc sur le terrain par des relevés topographiques, permettant de distinguer les différentes générations de plis qui se superposent lors du refroidissement. Pour les plis de première génération (L_1), la mesure directe entre deux pointes est souvent incomplète : la forte compression replie la croûte sur elle-même, dissimulant une partie de la surface. L'analyse de coupes transversales au niveau de fractures naturelles a permis à Fink et Fletcher d'établir qu'un facteur de correction d'environ 1,5 doit être appliqué à la distance visible (l_c) pour obtenir la longueur d'arc réelle. En revanche, pour les plis de seconde génération (L_2), la mesure est prise comme la distance d'arc lissée entre les sommets, sans correction additionnelle.



Mesure des générations L_1 et L_2

Relation d'échelle : Les travaux de Fink et Fletcher démontrent un processus de plissement hiérarchique où la longueur d'arc double typiquement d'une génération à l'autre.

$$L_2 \approx 2L_1$$



Histogramme de mesures: M (médiane) et $\bar{L}$ (moyenne). Fink et Fletcher

MODÉLISATION DE L'INSTABILITÉ DE SURFACE

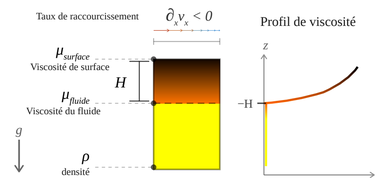
Quel mécanisme est à l'origine des plis de lave ?

Si les laves cordées sont typiques des laves basaltiques, le mécanisme qui les engendre est plus général. Il se manifeste partout où un fort contraste de viscosité entre une surface visqueuse et un intérieur fluide, combiné à une compression longitudinale, sélectionne une longueur d'onde dominante. On parle alors de **flambage visqueux de surface**. Ce phénomène se décline à de multiples échelles :

Phénomène	Échelle typique	Contexte physique et mécanisme
Physique domestique/industrielle	~ 1 mm – 1 cm	Un liquide chauffé ou en séchage forme une fine peau rigide en surface (lait chaud, peinture, chocolat fondu, métaux liquides, films polymères). Sa compression peut engendrer l'apparition de plis.
Laves basaltiques	10 cm – 1 m	Dans les coulées pāhoehoe, une croûte superficielle refroidit rapidement et devient très visqueuse, tandis que le cœur de la lave reste mobile. Lorsque la pente diminue ou que le flux ralentit, cette croûte est comprimée longitudinalement et se replie en cordes de lave.
Laves andésitiques	1 m – 50 m	Ces laves plus riches en silice sont globalement plus visqueuses. Leur surface refroidie forme une enveloppe plus épaisse et plus rigide, qui peut se déformer en arches et rides massives lors de l'avancée lente de la coulée.
Laves rhyolitiques	50 m – 500 m	Dans les coulées et les dômes rhyolitiques très visqueux, l'ensemble de la lave se déplace lentement comme une pâte. Une croûte externe plus froide et plus rigide se développe, puis se plisse à grande échelle sous l'effet des contraintes internes.
Planétologie	100 m – 2 km	Sur Mars ou Vénus, des rides visibles depuis l'orbite témoignent d'anciennes coulées dont la surface s'est plissée. L'analyse de leur longueur d'onde permet d'estimer indirectement la viscosité et la composition des laves extraterrestres.
Tectonique des plaques	50 km – 200 km	À très grande échelle, la lithosphère terrestre peut être assimilée à une couche rigide reposant sur l'asthénosphère plus ductile. Sous compression tectonique, elle développe de longues ondulations, formant bassins et bombements crustaux.

Qu'est-ce qui contrôle la forme des plis ?

Le modèle analytique de Fink et Fletcher définit les conditions critiques de plissement et prédit la longueur d'onde résultante λ en fonction des paramètres R, S et δ.



RAPPORT DE VISCOSITÉ

$$R = \frac{\mu_{\text{surface}}}{\mu_{\text{fluide}}}$$

ÉPAISSEUR THERMIQUE

$$\delta = \frac{H}{\ln R}$$

RAPPORT DES CONTRAINTES

$$S = \frac{\rho g \delta}{4\mu_{\text{surface}} \partial_x v_x}$$

LONGUEUR D'ONDE ADIMENSIONNALISÉE

$$\lambda^* = \frac{\lambda}{\delta}$$

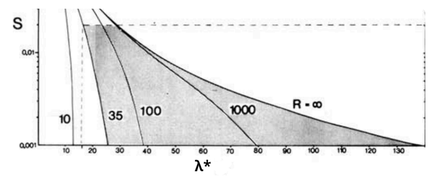
Le flambage visqueux se produit lorsque R ≳ 35 et S ≲ 0,02 ; λ* est alors entièrement déterminée par R et S.

Fink et Fletcher modélisent la formation des plis comme une perturbation sinusoïdale de faible amplitude A et de longueur d'onde λ sur la surface d'une coulée de lave dont la viscosité décroît exponentiellement depuis une valeur maximale en surface μ_{surface} jusqu'à une profondeur caractéristique H, où elle atteint une valeur constante μ_{fluide} correspondant à la partie interne plus fluide. Le taux de raccourcissement horizontal uniforme $\partial_x v_x$ n'amplifie pas toutes les longueurs d'onde de manière identique : certaines perturbations croissent plus rapidement que d'autres. Leur objectif est donc d'identifier la longueur d'onde dominante, c'est-à-dire celle dont le taux d'amplification est maximal. En raison de la très forte viscosité de la lave (nombre de Reynolds << 1), les forces d'inertie peuvent être négligées, ce qui permet de simplifier les équations de Navier–Stokes en équations de Stokes. Les auteurs résolvent d'abord le problème non perturbé, puis introduisent la perturbation sinusoïdale.

En imposant la continuité des vitesses et des contraintes à l'interface, ainsi que des contraintes nulles à la surface libre (linéarisées à l'ordre 1 en A, sous l'hypothèse de petites perturbations), ils obtiennent une solution générale dépendant explicitement de la longueur d'onde. Cette solution permet alors d'estimer le taux d'amplification de la perturbation :

$$\tfrac{1}{A}\tfrac{dA}{dt} = \partial_x v_x (1 + q(R, S, \lambda^*))$$

Les plis deviennent observables lorsque l'amplification domine le raccourcissement homogène de la surface, selon le critère arbitraire de Fink et Fletcher : $q > 10$, zone représentée dans le graphique à droite.



Source: J.H. Fink & R.C. Fletcher – Ropy pāhoehoe: Surface folding of a viscous fluid, J. Volcanol. Geotherm. Res. 4, 1978 – doi:10.1016/0377-0273(78)90034-3

SIMULATION NUMÉRIQUE

Notre modèle numérique reproduit-il les mécanismes de flambage et les relations d'échelle observés sur le terrain ?

GÉOMÉTRIE

Hauteur (entrée)	**0.20 m**
Hauteur (front)	**0.05 m**
Longueur à l'étape 4	**1.50 m**
Flux (entrée)	**0.0075 m²/s**

NUMÉRIQUE

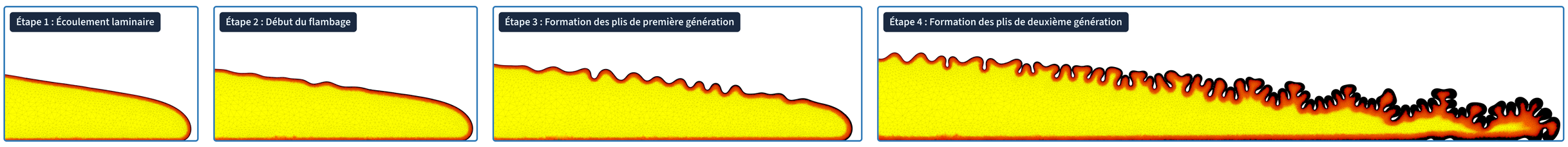
Maille minimale	**0.001 m**
Maille maximale	**0.100 m**
Pas de temps	**0.008 s**

PHYSIQUE

Conditions frontières	**Surface libre, vitesse nulle au sol**
Tension superficielle	**0.350 N/m**
Étalement latéral	**Modulé par la pression et la viscosité**

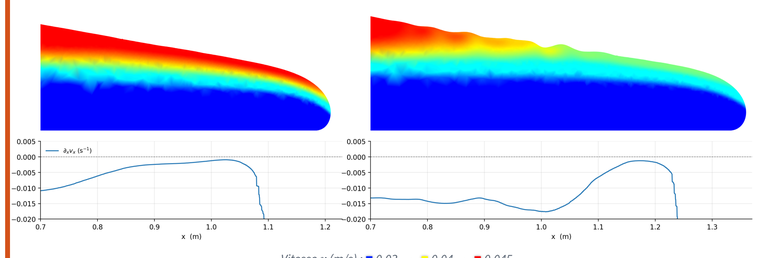
CONDITIONS THERMIQUES

Température magma	**1273.2 K**	Conductivité k	**1.5 W/m·K**
Température sol	**573.1 K**	Convection sol	**100 W/m²·K**
Température air	**293.1 K**	Convection et rayonnement air	**139 W/m²·K**



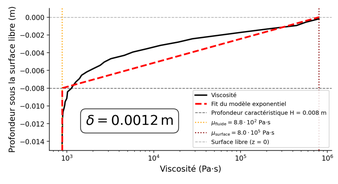
Viscosity μ (Pa·s) : 10^3 → 10^4–10^5 → 10^6

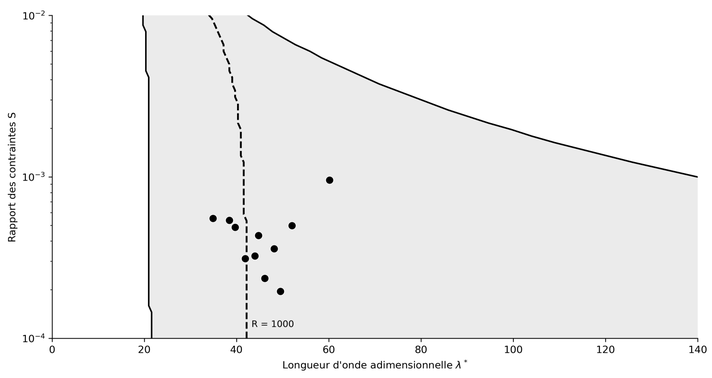
Le flambage apparaît lorsque le taux de raccourcissement local dépasse une valeur critique. Cette transition s'accompagne d'une augmentation marquée de la compression locale et de la formation des premiers plis.



Vitesse v (m/s) : 0.03 → 0.04 → 0.045

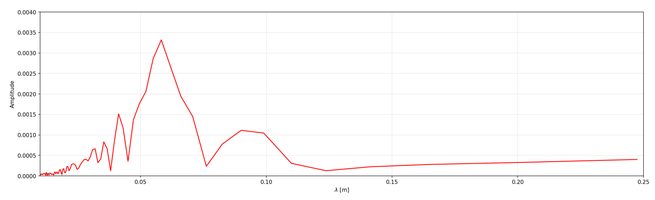
Le profil de viscosité en fonction de la profondeur permet d'identifier les viscosités caractéristiques à la surface μ_{surface} et dans le fluide μ_{fluide}. Ces deux valeurs ne varient pas au cours de la simulation et définissent directement le contraste de viscosité R. L'épaisseur thermique caractéristique δ est ensuite obtenue par ajustement exponentiel du profil vertical de viscosité.



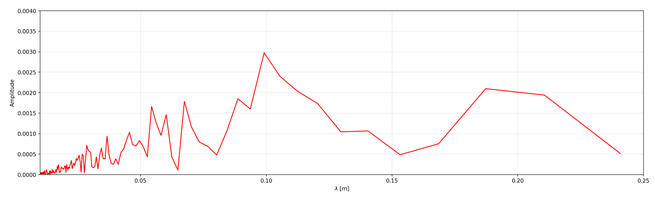


Pour chaque nouveau pli détecté, nous mesurons localement le taux de raccourcissement $\partial_x v_x$, l'épaisseur thermique δ et la longueur d'arc λ. Ces quantités permettent de calculer les paramètres adimensionnels S et λ^*. Chaque pli est ensuite reporté sur le diagramme de Fink et Fletcher, dont la zone de flambage théorique est représenté en gris clair. Les résultats montrent que les plis de première génération sont cohérents avec les prédictions théoriques. La courbe théorique correspond au cas où $R = 1000$, ce qui correspond aux résultats de notre simulation. Les bords pointillées de la zone grisée correspondent aux cas limites $R = 35$ et $R \to \infty$.

Une analyse spectrale de la surface libre, réalisée en excluant les pointes comme proposé par Fink et Fletcher, met en évidence une hiérarchie de longueurs d'onde entre générations de plis. Les plis de première génération apparaissent initialement avec une longueur d'onde proche de 10 cm, puis se contractent sous l'effet de la compression, expliquant le pic observé autour de 5 cm. Les plis de seconde génération présentent quant à eux des longueurs caractéristiques proches de 20 cm, soit approximativement le double des plis de première génération. Les signatures spectrales des plis de première génération qui apparaissent en amont restent également visibles.



Analyse spectrale des plis de première génération montrée à l'étape 3



Analyse spectrale des plis de seconde génération montrée à l'étape 4

Relation d'échelle : Notre simulation vérifie la relation d'échelle prédite par le modèle analytique et observée sur le terrain par Fink et Fletcher.

$$L_2 \approx 2L_1$$

Calibration des paramètres

Propriétés physiques : La densité ρ est supposée constante. Bien que la vésicularisation puisse induire des variations locales, son influence sur la dynamique de plissement reste ici de second ordre. La gravité g correspond à la valeur terrestre standard.

Rhéologie et Contrastes : μ_{fluide} est dictée par la loi VFT et la température initiale du magma. La viscosité de surface μ_{surface} est régulée par une valeur plafond numérique, agissant comme un proxy pour la solidification de la croûte.

Épaisseur thermique δ **:** Ce paramètre est contrôlé par la diffusivité thermique du matériau (conductivité, capacité thermique), le gradient de température initial imposé au système ainsi que le temps écoulé entre l'initiation de la simulation et le flambage.

Moteur de l'instabilité : Le taux de raccourcissement $\partial_x v_x$ simule les processus naturels de compression (rupture de pente, pulsations de flux). Dans ce modèle, il est généré par une déviation contrôlée du flux incident en amont de la zone d'étude.

MÉTHODE NUMÉRIQUE

Comment modéliser le flambage d'une croûte visqueuse à surface libre ?

Équations gouvernantes

La lave est modélisée comme un fluide newtonien incompressible à surface libre, dont la viscosité dépend fortement de la température. Le système est résolu via une approche thermomécanique couplée, intégrant les équations de Navier-Stokes et l'advection-diffusion thermique sur un maillage triangulaire 2D. Pour traiter les fortes déformations de la surface libre, une formulation lagrangienne de type Méthode des Éléments Finis Particulaires (PFEM) est employée : les nœuds sont advectés selon la vitesse locale, suivis d'un remaillage complet avec GMSH à chaque pas de temps.

$$\rho\left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u}\cdot\nabla\mathbf{u}\right) = -\nabla p + \nabla\cdot(2\mu(T)\mathbf{D}) + \rho\mathbf{g}$$

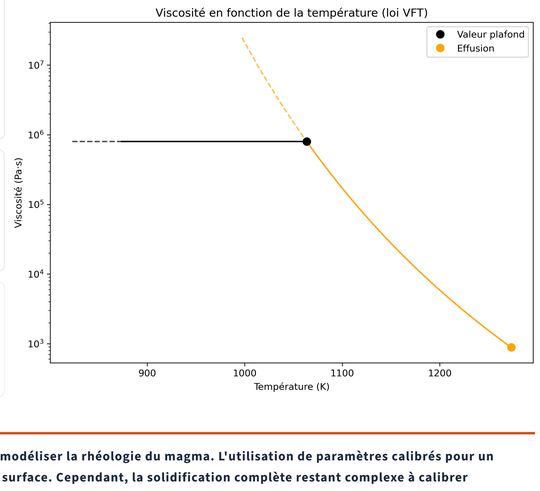
$$\nabla\cdot\mathbf{u} = 0, \quad \mathbf{D} = \frac{1}{2}(\nabla\mathbf{u} + \nabla\mathbf{u}^T)$$

$$\rho c_p\left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u}\cdot\nabla T\right) = \nabla\cdot(k\nabla T)$$

Advection-diffusion thermique

$$\log_{10}\mu(T) = A + \frac{B}{T - C}$$

$$A = -4.55 \quad B = 5555.3 \quad C = 532.1$$



La précision de notre simulation repose sur l'intégration de la loi de Vogel-Fulcher-Tammann (VFT) pour modéliser la rhéologie du magma. L'utilisation de paramètres calibrés pour un basalte typique permet de capturer un contraste de viscosité majeur entre le cœur de la coulée et sa surface. Cependant, la solidification complète restant complexe à calibrer numériquement, nous utilisons un plafonnement de la viscosité maximale comme proxy pour simuler le passage à l'état solide. Ce gradient thermique extrême, traduit par la loi VFT et ce seuil rhéologique, transforme la surface refroidie en une "croûte" quasi-solide mais ductile. C'est précisément cette hétérogénéité, résolue par le couplage thermomécanique, qui permet aux instabilités de flambage d'émerger naturellement des équations de Navier-Stokes.

DISCUSSION & PERSPECTIVES

Quelles sont les prochaines étapes ?

Points forts

- **Formulation PFEM :** Permet un suivi explicite et précis de l'interface, capturant ainsi l'évolution de la topologie complexe de la croûte sous l'effet des déformations.
- **Couplage thermo-rhéologique :** Reconstitue fidèlement la dynamique spatio-temporelle du champ de viscosité, essentielle pour modéliser le comportement hétérogène de la coulée.
- **Robustesse et convergence :** Le solveur garantit une convergence stable malgré la raideur numérique imposée par la loi VFT.
- **Indépendance au maillage :** La phénoménologie des instabilités est préservée lors du raffinement de maillage, assurant une convergence des longueurs caractéristiques dès lors que la résolution est suffisante.
- **Vision dynamique :** Au-delà de la prédiction de la longueur d'onde dominante au seuil du flambage, notre simulation donne accès à l'évolution temporelle complète de l'instabilité — croissance des plis, compression progressive et émergence des générations successives.

Limites actuelles

- **Proxy de solidification :** Le plafonnement de la viscosité est une simplification numérique qui ne peut substituer une véritable transition de phase thermodynamique, essentielle pour modéliser le passage continu du liquide au solide.
- **Rhéologie et Fracturation :** L'hypothèse d'un fluide purement newtonien occulte le seuil de plasticité et les mécanismes de fracturation fragile. La croûte se comporte alors comme une "poche indestructible", une membrane ductile continue incapable de se briser pour libérer le flux interne.
- **Dimensionnalité et effets de paroi :** La restriction au 2D ignore l'étalement latéral et les gradients de vitesse transversaux. Le passage à la 3D est indispensable pour simuler le frottement contre les parois du chenal, moteur principal de la morphologie arquée des laves cordées.
- **Formulation du tenseur des contraintes :** La nature complexe du magma (mélange de phases liquide, cristalline et gazeuse) appelle le développement d'un tenseur de contraintes non-newtonien.

Perspectives futures

- **Modèle Hybride (PFEM-DEM) :** Exploiter l'architecture de MigFlow pour simuler la solidification et la fracturation fragile de la croûte via l'incorporation de particules et la rupture de liens inter-particulaires.
- **Extension 3D :** Capturer l'étalement latéral et le flambage bi-axial pour analyser l'interaction entre le flux central et les zones de cisaillement en bord de chenal (laves cordées).
- **Rhéologie Avancée :** Développer un tenseur de contraintes visco-élastoplastique intégrant un seuil d'écoulement pour modéliser l'arrêt de la coulée et la persistance des plis après refroidissement.
- **Transversalité :** Appliquer le solveur à d'autres fluides à viscosité variable (métaux fondus, laves siliciques, asthénosphère, agroalimentaire, ...) où le couplage thermique régit la morphogenèse.
- **Volcanologie :** Simuler des structures complexes (tumulus, tubes, laves 'a'ā) et intégrer au modèle les micro-phases de cristallisation et de nucléation gazeuse.

Participez au développement : Explorez notre documentation et nos solveurs open-source pour les interactions complexes fluide-particule.

Scannez pour visiter **migflow.be**

James Gosselet (james.gosselet@uclouvain.be) - M. Henry (michel.henry@uclouvain.be) - T. Leyssens (thomas.leyssens@uclouvain.be) - J. Lambrechts (jonathan.lambrechts@uclouvain.be) - V. Legat (vincent.legat@uclouvain.be) - UCLouvain — iMMC - MEMA