

Analyse structurale et des glissements de terrain d'un volcan en phase de «réveil» : utilisation de l'imagerie par drone et observations de terrain à la caldeira d'Askja (Islande)

Nicolás SERRANO

Lauréat de la bourse L.A.V.E. 2023

L'étude présentée dans cet article a été effectuée dans le cadre d'un Master en Sciences de la Terre spécialisé dans les «géorisques» aux Universités de Genève et Lausanne (Suisse). Celle-ci fait partie d'un projet plus étendu mené par le groupe VTLab de l'Université de Genève, en coopération avec l'Université d'Islande, l'École Polytechnique Fédérale (ETH) de Zurich (Suisse), et le Service Météorologique Islandais (IMO). L'objectif du projet est de mieux comprendre les dynamiques internes et externes du volcan Askja situé en Islande Centrale. Plus précisément, il s'agit d'étudier la stabilité des parois de la caldeira d'Öskjuvatn en utilisant l'analyse d'image et de modèles à haute résolution, ainsi qu'en effectuant une étude de terrain, dont la bourse a aidé au financement. Il s'agit d'une première étape pour évaluer les risques de glissement de terrain sur le volcan, avant l'installation d'un système de surveillance visant à réduire les risques pour le tourisme dans la région.



Figure 1. Caldeira et lac d'Öskjuvatn en direction de l'ouest, la zone plane sur la droite correspond à l'ancienne caldeira d'Askja. Photo © Nicolás Serrano.

Introduction

Le volcan Askja est situé au sud de la zone volcanique nord de l'Islande, à moins de 60 km au nord du point chaud. L'influence combinée du point chaud et de la limite de plaque divergente entre l'Eurasie et l'Amérique du Nord en font une zone de forte activité volcanique. Cela se reflète dans l'activité sismique, modérée à haute (>10 000 séismes depuis 2009), et une importante activité hydrothermale, altérant significativement la roche. L'activité volcanique est également très diversifiée, allant d'éruptions effusives basaltiques à des éruptions explosives rhyolitiques, construisant un édifice volcanique extrêmement hétérogène avec des propriétés mécaniques différentes.

Le volcan est composé de trois caldeiras (Figure 2). La caldeira de Kollur, située au nord, est la plus ancienne, mais son âge est peu contraint car elle a été recouverte par des laves postglaciaires. La seconde caldeira est celle d'Askja, et semble s'être formée entre 10 000 et 5 000 ans (10–5 ka), basé sur la présence de tephres datés à 10 ka, qui, selon le principe de

recoupement, constituent le matériel le plus ancien non affecté par les failles générées par la formation de la caldeira (Annertz 1985 dans Graettinger 2013). La caldeira la plus récente, Öskjuvatn, s'est formée après une violente éruption phréatoplinienne le 29 mars 1875. Cette éruption est l'une des plus importantes éruptions explosives de l'histoire islandaise, conduisant à l'abandon de 17 fermes (Graettinger 2013). Elle a été caractérisée par un volcanisme mixte, avec une importante activité rhyolitique dans le cratère principal, éjectant environ 1,85 km³ de matériel dont la fraction la plus fine a atteint l'Allemagne et la Pologne (Carey 2010).

Simultanément, du magma a été injecté dans des dykes depuis la chambre magmatique et a atteint la surface, générant au moins deux fissures éruptives durant le même épisode. Cette décharge considérable de matériel a favorisé l'effondrement graduel de la caldeira pour former le lac d'Öskjuvatn, l'un des plus profonds d'Islande (217 m).

Bien que le processus d'effondrement de la caldeira se soit terminé en 1962, des glissements

de terrain se sont poursuivis sur ses parois internes, principalement à l'est et au sud.

Le 21 juillet 2014 à 23h24, l'un des plus grands glissements de terrain depuis la colonisation de l'Islande s'est produit dans la zone sud-est de la caldeira. L'effondrement a été détecté par plusieurs stations sismiques situées à 90 km de là, et a généré un panache de vapeur et de poussière dû à la mise à jour de zones hydrothermales peu profondes (Helgason *et al.* 2014).

À partir des preuves recueillies sur le terrain, il semble que le mécanisme principal du glissement ait été rotationnel, c'est-à-dire que la surface de rupture avait une forme circulaire. Le volume du glissement est estimé à environ 20 millions de mètres cubes ($20 \times 10^6 \text{ m}^3$). Cependant des incertitudes demeurent car le plan de rupture est profond, et une quantité considérable de matériaux est allée dans le lac. L'entrée du matériel dans le lac a généré un tsunami qui a laissé des marques pouvant atteindre 60 à 80 m de haut (Gylfadottir *et al.* 2017).

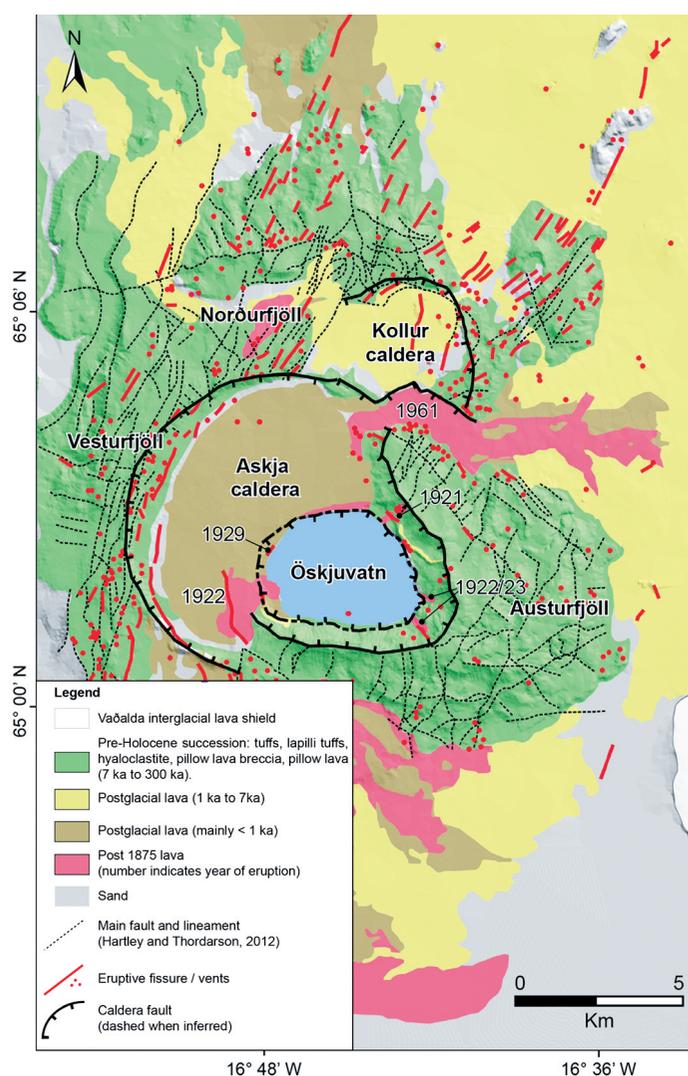


Figure 2. Carte géologique simplifiée du complexe volcanique d'Askja. Modifié de Trippanera *et al.* 2017.

En outre, en août 2021, le volcan a entamé un processus de soulèvement (inflation) après plus de 40 ans d'affaissement (subsidence) constant. Ce processus d'inflation est centré sur la partie centrale de la caldeira d'Askja (partie ouest du lac d'Öskjuvatn), atteignant quasiment 70 cm de déformation verticale en septembre 2023 (Icelandic Meteorological Office, IMO, 2023). Ce processus de déformation a été suivi à l'aide de stations GPS et d'images satellites par interférométrie radar (InSAR), qui nous ont permis de détecter une déformation verticale d'environ 20 cm à la base de la paroi orientale de la caldeira d'Öskjuvatn.

Instabilités des volcans

Il est important de mentionner ici que plusieurs facteurs jouent un rôle essentiel dans l'évaluation de l'instabilité des pentes. Comprendre les conditions inhérentes à la stabilité ou à l'instabilité de la pente est une étape primordiale ; il s'agit de caractériser la composition et la texture des matériaux, le système de discontinuité, et de mesurer les processus qui pourraient potentiellement affecter la roche ou le sol, comme l'altération (de surface ou non). Cependant, dans le cas des volcans, de nombreux autres facteurs entrent dans l'équation, et interagissent avec ces conditions initiales. Ces facteurs peuvent être un changement d'inclinaison de la pente (comme l'inflation actuelle à l'Askja), l'activité sismique, l'altération hydrothermale, un changement de la pression interstitielle en raison de la variabilité de la température, etc. L'objectif de ce projet est de comprendre le système de failles et de discontinuités à une échelle et avec un niveau de détail jamais atteint dans la caldeira d'Öskjuvatn, ce qui constitue une première étape dans l'évaluation des risques de glissement de terrain.

Méthodologie

Pour comprendre les systèmes de discontinuité complexes dans une zone dynamique et hétérogène comme l'Askja, différentes techniques d'étude sont nécessaires. Pour ce projet, nous utilisons :

- (1) l'analyse 2D à partir de modèles numériques de terrain (*Digital Elevation Model*, DEM) et d'orthophotos (images aériennes ou satellites rectifiées et géoréférencées) ;
- (2) l'analyse 3D à partir de modèles générés par des techniques *Structure from Motion* (SfM), qui sont des images 3D générées en combinant des images 2D (photos) d'un objet ou d'une zone prises selon différents points de vue, dans ce cas en utilisant un drone et
- (3) l'analyse sur le terrain.

Chacune de ces trois techniques présente différents avantages et inconvénients, qui, une fois combinés, fourniront un modèle solide des conditions de fracturation et d'instabilité de la pente.

Pour l'analyse 2D, des images à haute résolution (~4 cm/pixel) ont été acquises à l'aide d'un drone Wingtra One en 2021 (Figure 3). Ces images ont été traitées avec des données géographiques de haute précision afin de générer des orthophotos et un modèle d'élévation numérique de la zone. Ces modèles ont été analysés avec le logiciel QGis 3.28 à une échelle moyenne de 1:200 pour identifier les principales structures.

Certaines propriétés des images, telles que le contraste, la saturation, et l'orientation de la lumière, ont été modifiées pour améliorer le rendu visuel et permettre l'identification de certains éléments. L'objectif de ce travail de cartographie était d'identifier et de noter toutes les caractéristiques d'origines volcanique, tectonique et gravitationnelle en utilisant différentes géométries.

Les zones d'altération hydrothermale ont été cartographiées sous forme de polygones, les fractures, escarpements, et drainages sous forme de polygones, les événements volcaniques et «gouffres d'effondrement» sous forme de points. Cela nous permet de réaliser des statistiques sur certaines caractéristiques comme les zones de concentration des fractures et «gouffres», ou l'orientation des structures importantes telles que les escarpements, les alignements d'éléments, etc.



Figure 3. Illustration de la couverture des images acquises en 2021 avec le drone Wingtra One.

Par ailleurs, en raison des difficultés pour cartographier des images 2D dans des zones aussi escarpées, des images complémentaires ont été acquises avec un drone DJI Mavic 2 Pro dans

des secteurs spécifiques où les roches et les fractures présentent une excellente exposition. Ces images ont été traitées à l'aide de techniques SfM afin de générer des modèles 3D qui ont pu être analysés ultérieurement à l'aide du logiciel VRGS (*Virtual Reality Geological Studio*). L'objectif était clairement de repérer des tendances dans le système de discontinuité, mais, dans ce cas, en utilisant des informations sur l'inclinaison et la direction des plans.

Enfin, nous nous sommes rendus sur le terrain en août 2023, principalement pour confirmer la présence des structures observées sur les images ainsi que mesurer et caractériser les discontinuités. Cette caractérisation consiste à relever les différentes caractéristiques des fractures.

Parmi elles, nous avons noté la persistance (longueur), l'ouverture (espace entre deux faces des fractures), le remplissage, la présence d'humidité, les indices de déplacement et les caractéristiques géométriques telles que l'ondulation ou l'irrégularité de la surface. Toutes ces propriétés définissent si ces plans sont susceptibles de se rompre dans certaines conditions. Nous avons également remarqué d'autres facteurs qui pourraient également affecter la stabilité des pentes. De plus, l'un des principaux objectifs était d'acquérir de nouvelles images de drone en vue d'une analyse ultérieure.

Résultats

• Analyse 2D

En tout, 4316 structures ont été cartographiées suite à l'analyse des orthophotos et du DEM. Les polygones constituent la géométrie principale avec 3756 éléments, comprenant principalement des fractures (84%), des escarpements mineurs (6%) et des fissures (4,1%).

Pour les structures ponctuelles, nous avons cartographié 534 éléments, dont 97% correspondent à des «gouffres d'effondrement». Enfin, 26 polygones ont été cartographiés, dont 21 liés à des zones d'altération ou de forte activité hydrothermale.

Il est important de noter que la réalisation de ce type de cartographie orthogonale a été restreinte aux zones bien exposées, généralement situées le long des principaux escarpements en zones élevées. L'exposition est moins bonne dans d'autres secteurs en raison des dépôts de cendres de l'éruption de 1875 ou des coulées de lave des années 1920.

L'analyse des principales structures cartographiées (Figure 4) se concentre sur les fractures, qui incluent tous les éléments ayant une géométrie linéaire correspondant probablement à une discontinuité pouvant mener à une éventuelle rupture de la pente. Ces lignes ont été analysées

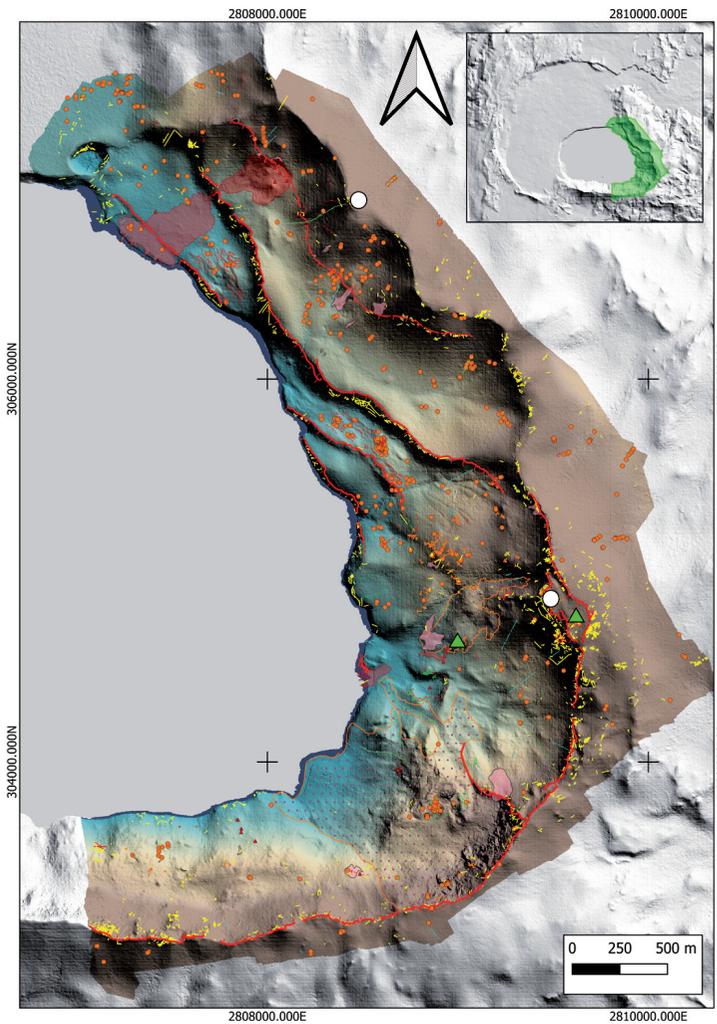


Figure 4. Carte montrant les différentes caractéristiques et structures cartographiées avec une résolution de 4 cm/pixel. L'arrière-plan est un modèle numérique de terrain (DEM) ombré. Les cercles blancs montrent la position des caméras time-lapse, et les triangles verts correspondent aux réflecteurs d'angle.

en fonction de leurs positions dans la caldeira et de leurs orientations afin d'identifier des tendances structurelles spécifiques (celles-ci pouvant être liées au contexte général du rift Nord-Atlantique ou bien superposées au champ de contrainte spécifique de la caldeira).

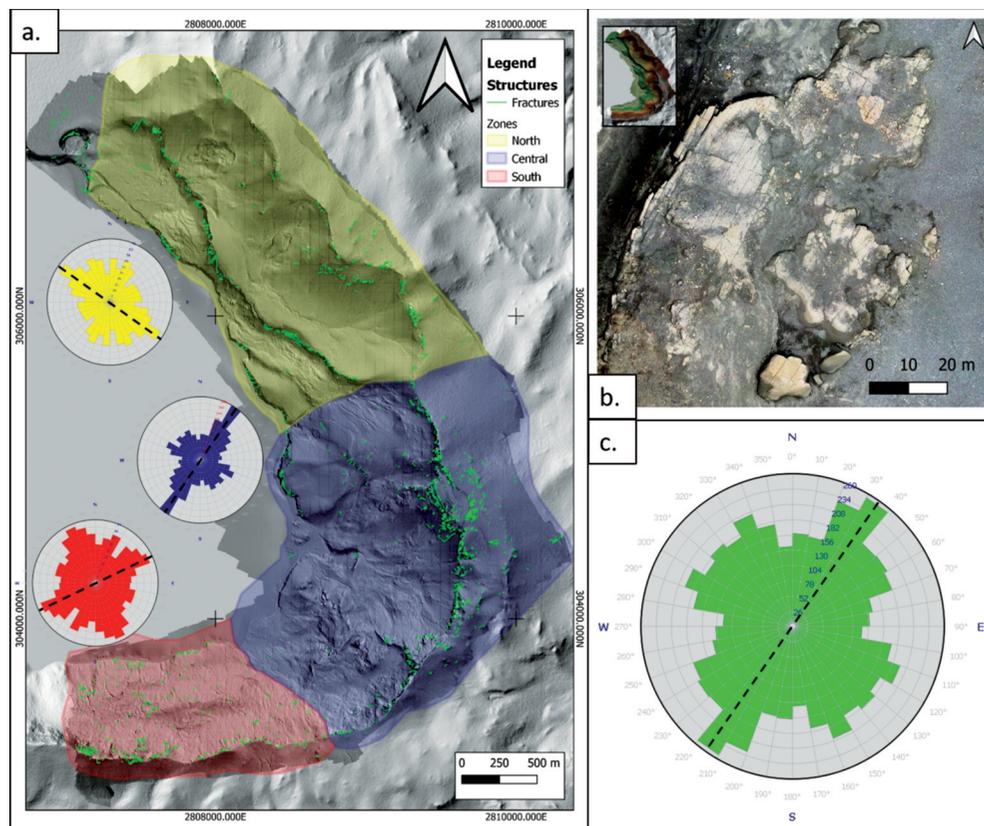
Pour analyser ces tendances, le versant a été divisé en trois parties (nord, centrale, et sud), en se basant sur l'orientation de la pente et de caractéristiques communes (Figure 5).

La zone nord est généralement orientée vers le sud-ouest, et est caractérisée par la conservation de failles d'escarpement liées à l'effondrement de la caldeira.

La zone centrale fait face à l'ouest et est marquée par plusieurs effondrements récents et anciens; de plus, contrairement aux autres, les

Figure 5. Analyse des fractures à partir du modèle numérique de terrain (DEM) et des orthophotos.

a) Directions préférentielles des fractures dans chacune des trois zones. Les fractures sont cartographiées en vert. b) Exemple de fractures observées en orthophoto. c) Diagramme de Rose montrant l'orientation des fractures sur toute la zone d'étude avec une orientation principale NE-SO.



failles d'effondrement sont difficiles à suivre dans cette zone.

Enfin, la zone sud fait face au nord-nord-ouest, et montre une pente moyenne plus forte, avec des éboulements constants.

Dans la zone nord, il y a une légère prédominance des linéaments de direction nord-ouest/sud-est ($N 55^\circ O$). Des familles secondaires peuvent également être identifiées avec des orientations $N 20-30^\circ O$ et $N 20-30^\circ E$.

Dans la zone centrale, on observe une tendance claire $N 30-40^\circ E$, et quelques familles moins importantes à $N 40-50^\circ O$ et $N 20-30^\circ O$.

Enfin, dans la zone sud, les orientations dominantes sont moins claires, les principales étant $N 60-70^\circ E$ et $N 20-30^\circ O$. Cette forte variabilité des directions pourrait être liée à la forte fracturation et la présence de blocs disloqués au milieu de la pente.

• Analyse 3D

Le manque de bonne exposition des roches dans de nombreuses parties de la pente et les difficultés liées à l'analyse 2D dans les zones très raides peuvent affecter les résultats de l'analyse structurale.

En raison de ce problème, trois zones ont été sélectionnées afin de réaliser un modèle 3D basé sur le principe des techniques SfM (voir Méthodologie).

Ces modèles 3D vont permettre de comprendre la disposition des fractures de manière tridimensionnelle. On dispose donc désormais non seulement de l'orientation, mais aussi du pendage (inclinaison) et de la direction du pendage de ces fractures.

L'analyse des modèles 3D est toujours en cours. Seul le modèle le plus au sud, situé dans la partie la plus élevée de la zone centrale du versant, a déjà été analysé (Figure 6). Près de 400 discontinuités ont été identifiées (en comptant les fractures et les plans stratigraphiques) et analysées en utilisant un diagramme stéréographique (*stereonet*) afin de déterminer le système de discontinuité principal du massif.

Les résultats pour cette zone montrent une famille dominante de fractures présentant une orientation $N 35 \pm 15^\circ E$ et un angle de pendage entre $55^\circ NO$ et $40^\circ SE$. En outre, il est possible de repérer une ou deux familles mineures entre $N 40$ et $60^\circ O$.

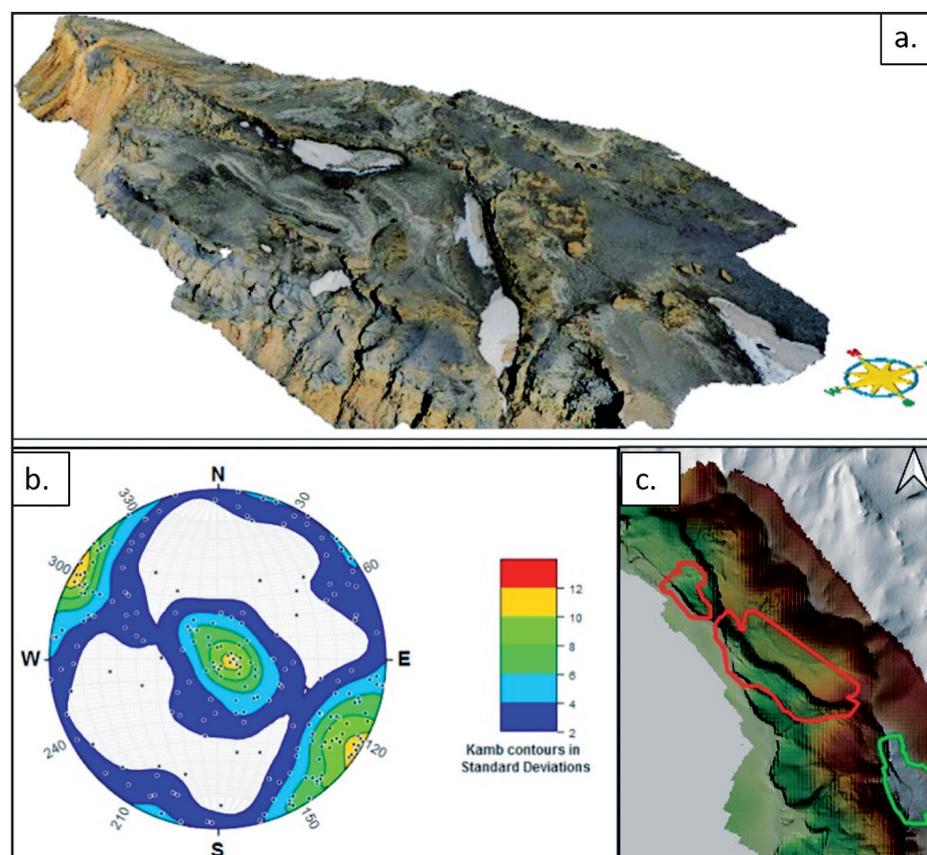
De plus, des plans horizontaux et subhorizontaux peuvent être observés dans ce diagramme, liés principalement à la stratigraphie,

Figure 6. Analyse 3D.

a) Vue générale du modèle sud.

b) Carte de contour des pôles des discontinuités dans le modèle (a).

c) Localisation des trois modèles générés, en vert le modèle déjà analysé (présenté en a).



qui correspond à des séquences de coulées de lave, de hyaloclastites et de couches de cendres et lapilli mises en place au cours d'épisodes éruptifs successifs.

Les zones restant à analyser fourniront des informations sur la partie nord, principalement sur le système de discontinuités associé aux principales fractures d'effondrement de la caldeira.

• Travail de terrain

La campagne de terrain a permis de mesurer et de caractériser les fractures et discontinuités en général. De plus, une observation générale a été faite sur toutes les conditions liées à de possibles instabilités futures.

L'étude des fractures a été en partie limitée par la difficulté d'accès à l'ensemble des falaises. Au total, 140 fractures ont été répertoriées sur le terrain. En ajoutant les stratifications et les dykes, 184 structures ont été mesurées en tout. En général, les 140 fractures montrent une tendance similaire à celle observée dans les analyses 2D et 3D, avec une famille principale de fractures orientées N20–50° E à plongement vertical/subvertical (angles de pendages de 60° NO à 70° SE). Une famille secondaire est également observée, verticale avec une orientation N45–75° O.

Concernant les autres propriétés des fractures, il a été observé que la persistance (la longueur maximale observée de la fracture) va de 0,5 à 16 m. La majorité (24,1%) est comprise entre 3–4 m, ce qui est similaire à ce qui a été mesuré par l'analyse 2D; viennent ensuite les fractures entre 7 et 8 m (13,3%). L'ouverture des fractures (distance entre les deux faces d'une fracture) a été mesurée. Il a été possible d'observer que 30,4% des fractures ne montrent aucune ouverture, et 18,9% montrent une ouverture de 1–2 cm. En général, ces fractures ouvertes ont un remplissage clastique (par exemple des débris), parfois avec de la matière organique en fonction de la saturation en eau.

Discussion

Comme indiqué au début de cet article, l'étude des instabilités des édifices volcaniques présente un haut niveau de complexité en raison des nombreux facteurs à prendre en compte. Lors du développement de ce projet, nous avons essayé d'acquérir autant d'informations que possible, et une analyse détaillée nécessiterait beaucoup de temps. C'est pourquoi, dans cette discussion, nous nous concentrerons sur l'analyse de la direction des fractures, qui est l'un des

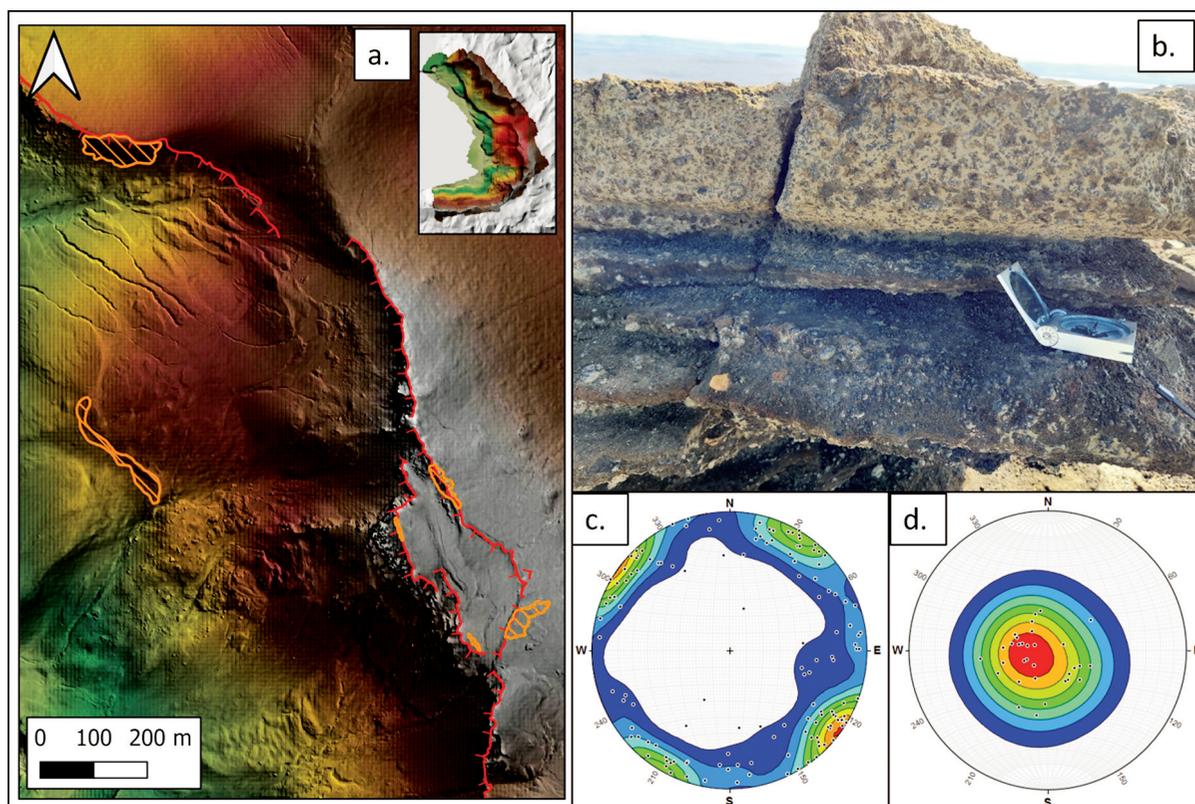


Figure 7. Mesures de terrain.

a) Carte montrant les zones de fracture mesurées (en orange). Notez comment, en général, les affleurements sont liés aux principaux escarpements (en rouge).

b) Exemple de fractures mesurées sur le terrain. La boussole sert d'échelle.

c) Carte de contour des pôles des fractures.

d) Carte de contour des pôles des stratifications.

résultats significatifs et représente une étape fondamentale pour les analyses futures.

À ce stade, après l'analyse de milliers de fractures utilisant différentes méthodologies d'échantillonnage, trois familles de fractures ont été clairement identifiées. La famille la plus fréquente présente une orientation de N 30–40° E et un pendage vertical/subvertical (dans un intervalle entre 60° NO à ~60° SE). Elle est présente dans tous les versants échantillonnés. Les deux autres familles de fractures sont orientées N 60 ± 10° O et N 20–30° O, la première avec un pendage vertical/subvertical et la seconde avec un pendage subvertical légèrement vers le sud-ouest (70–80°). Bien que ces deux dernières familles soient présentes dans les trois zones, leur présence est beaucoup plus variable que la famille principale.

Comme montré dans la *Figure 5*, chaque zone montre une orientation principale des différentes structures. Cependant, les trois familles d'orientations identifiées sont visibles. Il semble que l'orientation dominante dans chaque zone est liée à la fracturation concentrique de la caldeira d'effondrement, avec un centre d'effondrement situé dans le lac. D'un autre côté, nous avons la principale orientation de fracturation (N 30–40° E), qui est présente dans toutes les zones. Cette fracturation semble liée à l'expression du rift de la zone volcanique nord (ZVN) de l'Islande, présentant une orientation de fracturation de N 36–47° E dans la région de l'Askja (Hjartardottir *et al.* 2009).

En termes d'instabilité volcanique, suite à l'analyse géomorphologique du versant est, il y a une zone de faible stabilité dans le secteur sud-est de la caldeira (qui coïncide avec la zone centrale de cette étude). Les preuves de cette instabilité sont :

(1) la faible abondance de structures d'effondrement significatives comme on en observe dans la zone nord du versant, ainsi que

(2) l'existence d'évènements passés comme le glissement de terrain de 2014, ou ceux mis en évidence par la présence d'anciens dépôts de glissements de terrain et d'éboulements. Aussi, à partir des documents historiques réalisés après l'éruption de 1875 et compilés par Hartley et Thordarson (2012), on constate que cette échancrure au sud-est a progressé depuis le début de l'effondrement et est accompagnée par une activité fumerolienne et hydrothermale.

Les informations collectées suggèrent que les processus d'instabilité centrés sur le secteur nord-est de la caldeira, pourraient être expliqués par une conjonction de la subsidence de la caldeira et le système de fractures du rift de la ZVN. L'interaction de ces deux réseaux de frac-

tures selon un angle de direction précis peut mener à des conditions propices à un effondrement de la masse rocheuse.

D'autres facteurs peuvent également affecter le versant à différentes échelles. Comme indiqué précédemment, l'activité hydrothermale est un élément critique de la stabilité d'une pente. En effet, ces processus affectent directement la cohésion de la roche et la qualité des fractures.



Figure 8. Dépôts d'un ancien glissement de terrain dans la zone centrale (~7 m d'épaisseur). Photo © Nicolás Serrano.

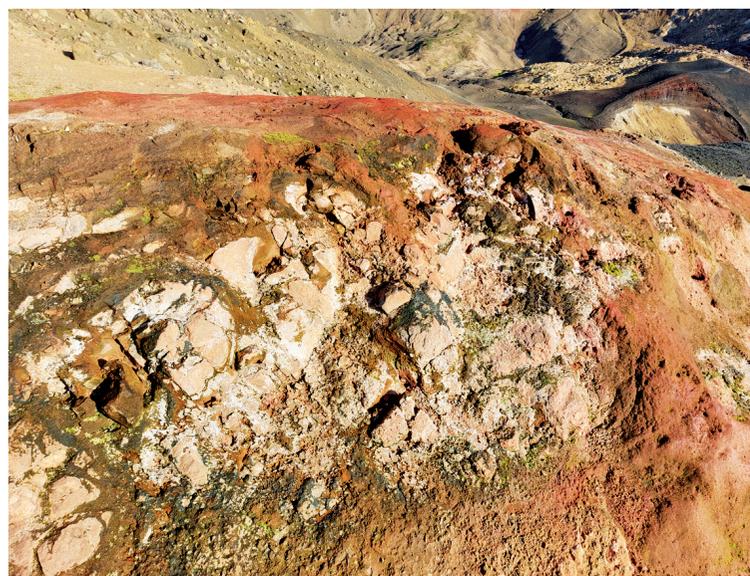


Figure 9. Roches complètement altérées par l'activité hydrothermale, à proximité d'une zone fumerolienne. Photo © Nicolás Serrano.

Une observation intéressante faite sur le terrain est la présence d'une couche de glace relativement constante sous des dépôts de tephra de 2 à 3 m d'épaisseur. L'origine, l'âge, et l'épaisseur de cette couche de glace sont inconnus. Cependant, elle semble être présente dans une

large partie du versant. Sa présence peut avoir deux principaux effets sur la pente, en particulier en cas de fonte. Le premier est l'apparition de glissements de terrain peu profonds et de fissures en raison de la perte de support. Le second est une saturation en eau de la pente si la glace venait à fondre, dont la conséquence serait une rupture. Il s'agit d'un facteur qui pourrait être étudié en détail à l'avenir.



Figure 10. *Couche de glace identifiée sous 2 m de tephra et de matériel de talus. Photo © Joël Ruch.*

Conclusions

Cette étude a mis en évidence que les caldeiras d'Askja et d'Öskjuvatn présentent deux principaux systèmes de fractures :

(1) une fracturation verticale, orientée vers le nord-est et imposée par la présence du rift de la ZVN, et

(2) un système de fractures concentriques sur les pentes de la caldeira d'Öskjuvatn, associé avec le processus de subsidence (ou d'effondrement) de celle-ci. Cela nous amène à proposer l'hypothèse que l'interaction des deux systèmes de fractures avec un angle spécifique entre eux soit un facteur fondamental de l'instabilité des pentes.

D'autres facteurs, comme l'altération hydrothermale des roches et les discontinuités du permafrost, jouent des rôles essentiels qui doivent être considérés dans l'étude de la stabilité de ce type de pentes. Par conséquent, il est nécessaire de comprendre l'étendue des zones affectées par ces phénomènes afin d'estimer les volumes de roche les plus susceptibles de s'effondrer.

Les glissements de terrain volcaniques peuvent poser un risque majeur pour les infrastructures et les populations situées aux alentours. Que ce soit en raison de la fertilité de leurs terres ou de leur beauté exceptionnelle, les volcans attirent les touristes et les populations s'installent sur leurs flancs et aux alentours immédiats.

Comprendre la menace à différentes échelles et l'interaction complexe des facteurs à l'origine de ce phénomène est essentiel pour limiter le risque. En ce sens, cette étude contribue à la connaissance de ces phénomènes sur des volcans présentant des caractéristiques similaires à celles de l'Askja.

Quelles suites ?

L'Askja est un lieu fascinant en termes géologiques, possédant des conditions uniques faisant de ce volcan un laboratoire à ciel ouvert d'une grande beauté. Le travail présenté dans cet article n'est qu'un petit aperçu des multiples aspects à étudier pour comprendre ce volcan. Ceux-ci incluent la dynamique interne, comme les chambres et conduits magmatiques, les différents dynamismes volcaniques, ou les processus externes, comme son soulèvement et les conséquences qu'ils peuvent avoir à la surface.

Cette étude vise à poser des bases solides pour la compréhension des processus affectant la pente du volcan, qui seront complétées à l'avenir par d'autres études envisagées dans le cadre d'un plus grand projet de recherche. Afin d'entamer une surveillance constante, nous avons installé, tout au long du travail de terrain, trois réflecteurs d'angle et trois caméras time-lapse autour de la caldeira (Figure 11).

Les réflecteurs fonctionneront comme des surfaces facilement identifiables à partir d'images satellites qui permettront une surveillance constante de la déformation du sol. D'autre part, les caméras time-lapse acquièrent des images à intervalles définis qui nous permettront d'identifier les changements dans le terrain. □

Remerciements

Je souhaite remercier L.A.V.E. et sa bourse pour avoir contribué à cette étude, me permettant d'accomplir mes objectifs universitaires et professionnels, tout en me donnant la possibilité de contribuer avec mes connaissances à la première étape d'un projet à haute valeur académique.

Je voudrais également remercier mes superviseurs, le Prof. Joël Ruch et le Dr. Nicolas Oestreicher, pour leur soutien et les discussions constructives. Je souhaite aussi remercier tous les autres soutiens qui m'ont permis de réaliser ce projet. Pour leur aide financière, je remercie le Fonds National Suisse (projet PP00P2_176869-TEMPO), la fondation Ernst et Lucie Schmidheiny et la Société de Physique et d'Histoire Naturelle de Genève. Pour leur soutien logistique et technique, je remercie l'Université d'Islande à Reykjavik (en particulier le Prof. Þorsteinn Sæmundsson), l'institut

météorologique islandais (en particulier le Dr. Jón Kristinn Helgason) et le parc national du Vatnajökull. Enfin, je souhaiterai remercier Jean-Guillaume Feignon et Simone Chrétien pour leurs précieux travaux de traduction et d'édition.

Article original rédigé en anglais – Traduction : Jean-Guillaume Feignon.

(Cf. deux photos supplémentaires en page 45)

Figure 11. Sur l'image du haut, l'un des réflecteurs d'angle est installé dans la zone centrale. L'image du bas montre une caméra time-lapse orientée vers la même zone pour acquérir des images. Voir la carte (Figure 4) pour les localisations. Photos © Nicolas Oestreicher.



Bibliographie

- De Zeeuw-van Dalen E., Rymer H., Sturkell E. *et al.* (2013) *Geodetic data shed light on ongoing caldera subsidence at Askja, Iceland. Bulletin of Volcanology*, **75**(5), 709–722.
- Denk T., Grímsson F., Zetter R. & Símonarson L. A. (2011) *Late Cainozoic Floras of Iceland*. Dordrecht, The Netherlands/Heidelberg, Germany/London/New York: Springer, 854 p.
- Graettinger A., Ellis M. K., Skilling I. P. *et al.* (2013) *Remote sensing and geologic mapping of glaciovolcanic deposits in the region surrounding Askja (Dyngjufjöll) volcano, Iceland. International Journal of Remote Sensing*, **34**, 7178–7198.
- Greenfield T., White R. S. & Roecker S. (2016) *The magmatic plumbing system of the Askja central volcano, Iceland, as imaged by seismic tomography. Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **121**, 7211–7229.
- Gylfadóttir S. S., Kim J., Helgason J. K. *et al.* (2017) *The 2014 Lake Askja rockslide-induced tsunami: Optimization of numerical tsunami model using observed data. Journal of Geophysical Research: Oceans*, **122**, 4110–4122.
- Hjartardóttir Á., Einarsson P. & Sigurdsson H. (2009) *The fissure swarm of the Askja volcanic system along the divergent plate boundary of N Iceland. Bulletin of Volcanology*, **71**(9), 961–975.
- Hjartardóttir Á., Einarsson P., Magnúsdóttir S. *et al.* (2015) *Fracture systems of the northern volcanic rift zone, Iceland: an onshore part of the Mid-Atlantic plate boundary. Geological Society of London Special Publications*, **420**, 297–314.
- Hartley M. E. & Thordarson T. (2012) *Formation of Oskjuvatn caldera at Askja, North Iceland: mechanism of caldera collapse and implications for the lateral flow hypothesis. Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **227–228**, 85–101.
- Hartley M. & Thordarson T. (2016 March 7). *Askja*. In: Oladottir B., Larsen G. & Guðmundsson M. T. *Catalogue of Icelandic Volcanoes*. IMO, UI and CPD-NCIP. Retrieved from <http://icelandicvolcanoes.is/?volcano=ASK>
- Rauter M., Viroulet S., Gylfadóttir S.S. *et al.* (2022) *Granular porous landslide tsunami modelling – the 2014 Lake Askja flank collapse. Nature Communications*, **13**, 678.
- Rymer H. & Tryggvason E. (1993) *Gravity and elevation changes at Askja, Iceland. Bulletin of Volcanology*, **75**(5), 362–371.
- Rymer H., Locke C., Ófeigsson B.G. *et al.* (2010) *New mass increase beneath Askja volcano, Iceland – a precursor to renewed activity? Terra Nova*, **22**, 309–313.
- Schöpa A., Chao W.-A., Lipovsky B. P. *et al.* (2018) *Dynamics of the Askja caldera July 2014 landslide, Iceland, from seismic signal analysis: precursor, motion and aftermath. Earth Surface Dynamics*, **6**, 467–485.
- Sigvaldason G. E. (2002) *Volcanic and tectonic processes coinciding with glaciation and crustal rebound: an early Holocene rhyolitic eruption in the Dyngjufjöll volcanic centre and the formation of the Askja caldera, north Iceland. Bulletin of Volcanology*, **76**(3-4), 192–205.
- Soosalu H., Key J., White R. S. *et al.* (2010) *Lower-crustal earthquakes caused by magma movement beneath Askja volcano on the north Iceland rift. Bulletin of Volcanology*, **72**(1), 55–62.
- Sturkell E., Sigmundsson F. & Slunga R. (2006) *1983–2003 decaying rate of deflation at Askja caldera: Pressure decrease in an extensive magma plumbing system at a spreading plate boundary. Bulletin of Volcanology*, **68**, 727–735.
- Trippanera D., Ruch J., Acocella V. *et al.* (2018) *Interaction between central volcanoes and regional tectonics along divergent plate boundaries: Askja, Iceland. Bulletin of Volcanology*, **78**(1), 1–19.