

Vers une meilleure compréhension de la dynamique des systèmes volcano-hydrothermaux par la sismicité continue

par

Corentin CAUDRON

Chargé de recherche à l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD)

Chargé de cours Université Libre de Bruxelles

Mots clés : volcans, surveillance, systèmes hydrothermaux, sismologie

Résumé

Les systèmes volcano-hydrothermaux sont des réservoirs d'eau intercalés entre la surface et les réservoirs magmatiques. Ils sont plus ou moins volumineux et composés d'eau, de saumures, de gaz circulant dans une matrice de roches fracturées et poreuses. Leur existence complique la mise en évidence de précurseurs d'éruptions, car ils peuvent tamponner ou inhiber des paramètres qui seraient mis en évidence sur des volcans secs. Par l'utilisation de deux méthodes sismiques basées sur les enregistrements continus, l'interférométrie sismique et le rapport d'amplitude des déplacements dans deux bandes de fréquences (DSAR), ce travail vise à étudier les précurseurs d'éruptions volcaniques. Je présente plus particulièrement les résultats pour des éruptions phréatiques qui sont caractérisées par des explosions sans émission de magma en surface. Ces méthodes permettent de mettre en évidence des signaux parfois quelques mois à l'avance. Deux mécanismes possibles de déclenchement de ces éruptions sont proposés ; (cas 1) un déclenchement par apport de fluides magmatiques vers la surface et (cas 2) par colmatage des événements en surface.

Summary

Volcano-hydrothermal systems are located between the surface and magma reservoirs and composed of water, gas, brine circulating in strongly altered and porous rocks. These relatively voluminous reservoirs complicate the detection of precursors prior to volcanic eruptions as they can buffer or scrub signals that would be typically recorded on dryer systems. This study investigates the existence of precursors using two continuous-based seismic techniques; seismic interferometry and Displacement Seismic Amplitude Ratios (DSAR). I more specifically explore phreatic eruptions that do not release magma at the surface. These relatively new techniques sometimes allow to detect signals a few months before the eruptions occurred. I then discuss two potential mechanisms that may trigger these eruptions and explain the seismic-related observations; (case 1) triggering by magmatic fluids rising towards the surface (2) sealing of the vent.

Introduction

La grande majorité des volcans comprennent des systèmes gorgés d'eau situés entre la surface et les réservoirs magmatiques plus profonds. Ces systèmes volcano-hydrothermaux sont typiquement composés de gaz, de liquide (eau et saumures) ainsi que de roche primaire fortement altérée et des minéraux secondaires. Suite à un apport de chaleur continu fourni par le/les réservoir(s)

magmatique(s) sous-jacent, les fluides (liquide et gaz) circulent constamment, par convection, montant vers la surface.

La présence de systèmes hydrothermaux complique fortement la tâche des volcanologues. En effet, ces réservoirs sont capables de littéralement piéger les gaz magmatiques les plus réactifs. Par exemple, le SO_2 se dissout en sulfates lorsqu'il entre en contact avec l'eau (Delmelle and Bernard, 1994). Par conséquent, un signal précurseur typique comme une augmentation des teneurs en SO_2 figurant une remontée de magma, peut être complètement masqué par un système hydrothermal.

De plus, la circulation constante des fluides hydrothermaux engendre des vibrations continues du sol qui sont enregistrées par les sismomètres installés sur les volcans (Caudron et al., 2015b). Elles sont générées par de la fracturation ou des résonances de fractures ou de cavités. Elles portent le nom de trémor qui fait référence à toute vibration d'amplitude plus élevée que la normale. Ce trémor permanent complique la détection de séismes de faibles magnitudes.

Par leur activité permanente et leurs volumes importants, les systèmes hydrothermaux peuvent donc à la fois masquer des remontées de magma et engendrer une pollution du signal sismique. Néanmoins, leur activité persistante peut également permettre d'illuminer continuellement des portions de l'édifice volcanique. Cette étude vise à présenter brièvement ces techniques, ainsi que des résultats préliminaires obtenus avant des éruptions volcaniques contenant des systèmes hydrothermaux volumineux. Plus précisément, je me focaliserai sur les éruptions de vapeur ou de gaz, sans émission de magma en surface, appelées éruptions phréatiques (Stix and Moor, 2018). Ces éruptions représentent un des défis de la volcanologie moderne. Aujourd'hui encore, les volcanologues n'ont pu mettre en évidence que des précurseurs à très court terme (heures ou quelques jours (Kato et al., 2015)), même dans des pays idéalement équipés en termes de surveillance. Par conséquent, ces éruptions font encore régulièrement des victimes, comme en 2019 en Nouvelle Zélande (>20 victimes lors de l'éruption du volcan White Island (Dempsey et al., 2020)).

Méthodes

Depuis plusieurs décennies, les capacités de stockage des données sismiques ont significativement augmenté, permettant de conserver des Térabytes de données. Cette situation, combinée à la performance accrue des outils de traitement informatiques, permet de traiter des jeux conséquents de données sismiques. Différentes techniques ont vu le jour. Parmi celles-ci, l'interférométrie sismique a permis des avancées considérables dans différents domaines des sciences de la Terre.

Les ondes sismiques générées par interaction de la houle avec la terre solide peuvent se propager à de grandes distances grâce à leur faible contenu fréquentiel (<1 Hz). L'avantage principal est qu'elles constituent une source d'excitation permanente permettant d'imager et surveiller la croûte terrestre en continu. L'interférométrie sismique consiste à calculer une Fonction de Corrélation Croisée (FCC), chaque jour après un pré-traitement des données continues (Lecocq et al., 2014). La FCC représente une approximation de l'image du milieu échantillonné par ces ondes aux abords de la station sismique ou des stations sismiques (Campillo, 2006). Les fonctions journalières sont ensuite comparées à une fonction de référence afin d'estimer des variations éventuelles entre elles. On s'intéresse en particulier aux parties de la FCC éloignées de zéro, communément appelées coda, par opposition aux ondes directes qui se propagent d'une station à une autre directement (Brenguier et al., 2011). Cette zone de la fonction de corrélation est particulièrement intéressante car elle contient des ondes qui ont donc 'passé' beaucoup de temps dans le milieu puisqu'elles ont été réfractées, diffractées ou réfléchies sur diverses interfaces ou hétérogénéités (Brenguier et al., 2011). Par cet échantillonnage spatial étendu, elles sont plus sensibles à des changements ténus que les ondes

directes qui n'ont, elles, parcouru que la distance séparant deux stations sismiques. L'estimation des variations de vitesse sismique (dv/v) est effectuée dans le domaine tempore ('stretching') ou fréquentiel ('doublets') (Duputel et al., 2009).

Dans la cadre de cette étude, je me suis particulièrement intéressé à une nouvelle approche basée sur une seule station sismique (De Plaen et al., 2016). Ne requérant qu'une seule station, elle présente l'avantage d'être applicable sur plus de volcans. La chaîne de traitement suit celle présentée par De Plaen et al. (2016) et les données sont filtrées entre 1 et 2 Hz. J'utilise dans cette étude des capteurs sismiques trois composantes qui enregistrent les mouvements du sol dans trois directions. Je ne présenterai les dv/v que pour les différentes combinaisons de composantes (EN, NZ, EZ (E : est-ouest / N : nord-sud / Z : composante verticale)) pour lesquelles le signal a pu être blanchi afin de minimiser les influences des sources (De Plaen et al., 2016) Les résultats finaux de dv/v sont moyennés entre les différentes combinaisons de composantes.

Dans le cadre de cette étude, j'ai également appliqué une méthode élaborée plus récemment. Appelée Displacement Seismic Amplitude Ratio (DSAR) (Caudron et al., 2019). Elle part du principe qu'il existe une source permanente d'énergie sismique dans le système hydrothermal, dans des portions relativement superficielles du volcan (~500 m sous la surface, Figure 1). L'hypothèse de base est que le tremor hydrothermal ne radie principalement de l'énergie qu'à des fréquences inférieures à 4 Hz. Compte tenu de cette hypothèse, en utilisant un rapport d'amplitude dans deux bandes à des fréquences plus élevées (4.5-8 Hz et 8-16 Hz ici), il est possible de surveiller les variations d'atténuation sismique sur le chemin séparant la source du signal, le tremor donc, et la station sismique.

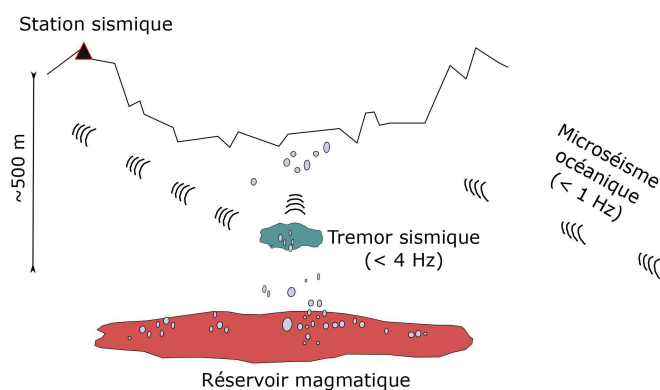


Figure 1 : modèle présentant les sources d'énergie sismique utilisées pour cette étude, ainsi que la structure typique des édifices volcaniques des volcans étudiés

Résultats

Depuis les études pionnières (Brenquier et al., 2008; Sens-Schönfelder and Wegler, 2006), différentes études ont exploré les variations de vitesse sismique (dv/v) sur différents volcans montrant leurs sensibilités aux changements de contraintes et d'apports de fluides dans la croûte terrestre, respectivement. La grande majorité ont montré que les résultats étaient complexes. Certaines études ont mis en évidence des variations de vitesse (généralement entre 0.1 et 1 %) avant des éruptions (Brenquier et al., 2008), mais souvent dépendant de la localisation des stations (Budi-Santoso and Lesage, 2016) ou pendant des éruptions selon la profondeur de la source de déformation (Donaldson et al., 2017). De nombreuses études ont montré des variations de vitesse déclenchées par des perturbations externes tels que des séismiques régionaux (Battaglia et al., 2012; Lesage et al., 2014). Dans le cadre des systèmes volcano-hydrothermaux, nous avons montré une sensibilité de cette technique aux variations de contenu en gaz liées à deux éruptions phréatiques (Kawah Ijen (Indonésie; Caudron et al., 2015a) et Ruapehu (Nouvelle-Zélande; Mordret et al., 2010). Mes résultats confirment une forte influence des séismes tectoniques et de fortes variations saisonnières.

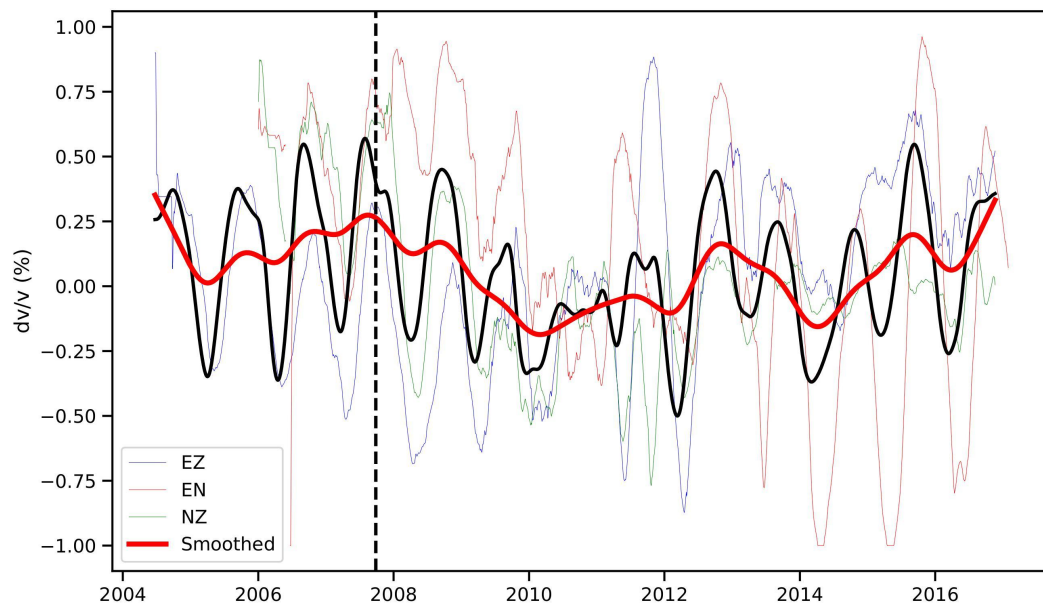


Figure 2 : variations de vitesse sismiques (dv/v) enregistrées sur le volcan Ruapehu entre 2004 et 2017 (Nouvelle-Zélande). Le trait tireté noir indique une éruption phréatique (25 septembre 2007, Christenson et al., 2010). Les résultats journaliers sont lissés avec un filtre Hodrick-Prescott (lignes noires et rouges, Hodrick and Prescott, 1997). Les différentes combinaisons de composantes (EN, EZ, NZ) correspondent aux différentes couleurs en lignes continues (rouge, bleu, vert).

En traitant a posteriori des jeux de données de différents volcans ayant connu des éruptions phréatiques, j'ai mis en évidence différents comportements à long-terme (mois ou années). Pour chaque volcan, les données ont été traitées de la même manière. De manière prédominante, les systèmes hydrothermaux montrent une tendance à l'augmentation des vitesses sismiques avant les éruptions, une observation déjà proposée par Yates et al. (2019) pour le volcan White Island en

Nouvelle-Zélande. En plus de ce volcan, les dv/v augmentent de quelques dixièmes de pourcent avant les éruptions phréatiques du volcan Ruapehu (en 2007, Nouvelle Zélande, Figure 2), du volcan Turrialba (2014-2015, Costa Rica), et de certaines éruptions phréatiques du volcan Poás (entre 2012 et 2017, Costa Rica) et Kawah Ijen (après 2013, Indonésie). Au contraire, je ne détecte aucune variation de vitesse avec l'éruption en 2014 du volcan Tongariro (Nouvelle Zélande, Figure 3). À court terme, les dv/v sont variables et difficiles à interpréter pour la majorité des volcans. Elles pourraient donner lieu à de fausses alarmes et je ne recommande donc pas leur utilisation à l'échelle du jour, au contraire des variations mensuelles.

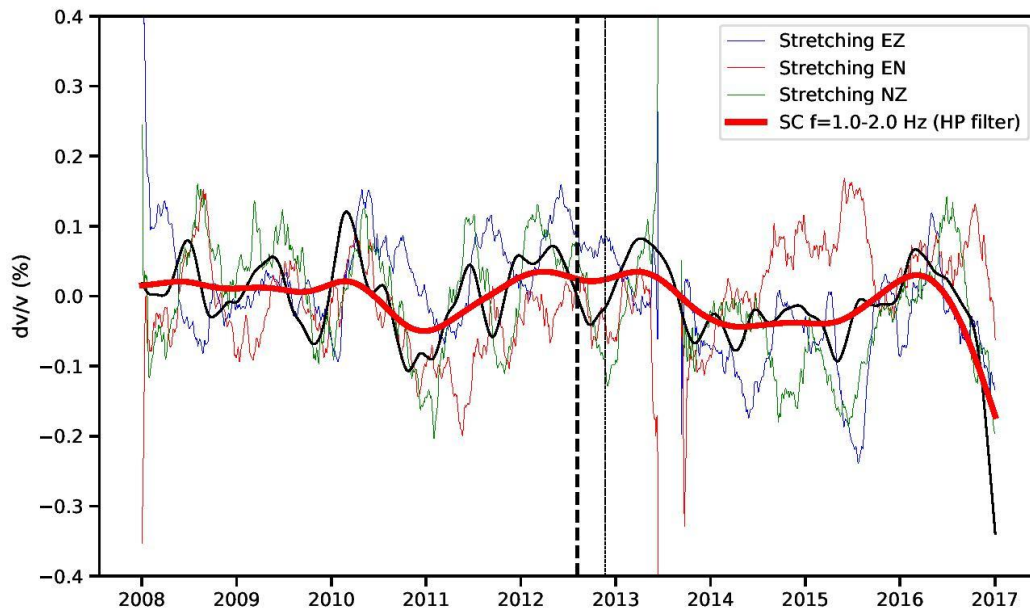


Figure 3 : variations de vitesse sismiques (dv/v) enregistrées au volcan Tongariro entre 2008 et 2017 (Nouvelle Zélande). Les résultats journaliers sont lissés avec un filtre Hodrick-Prescott (lignes noires et rouges, Hodrick and Prescott, 1997). Les différentes combinaisons de composantes (EN, EZ, NZ) correspondent aux différentes couleurs en lignes continues (rouge, bleu, vert). Le trait tireté noir indique une éruption phréatique (le 6 août 2012) suivies d'une éruption de plus faible intensité quelques mois plus tard, le 21 novembre 2012 (Jolly et al., 2014).

La méthode DSAR appliquée aux mêmes volcans montre généralement une tendance à l'augmentation à long-terme (mois ou années) avant les éruptions phréatiques, comme déjà indiqué dans Caudron et al. (2019). En complément de cette étude, j'ai noté un comportement similaire sur les volcans Poás et Turrialba (Costa Rica), et White Island (Caudron et al., 2021). Dans le cas de White Island (Whakaari), le rapport DSAR reste autour de 1-2 jusque quelques mois avant la séquence éruptive phréato-magmatique (Chardot et al., 2015). Après celle-ci, il reste anormalement élevé (3-4) jusqu'au début de l'éruption phréatique de 2016 (Kilgour et al., 2019). Il diminue dès la fin de cette éruption pour ré-augmenter à partir de 2017 jusqu'à l'éruption tragique de décembre 2019 (Dempsey et al., 2020).

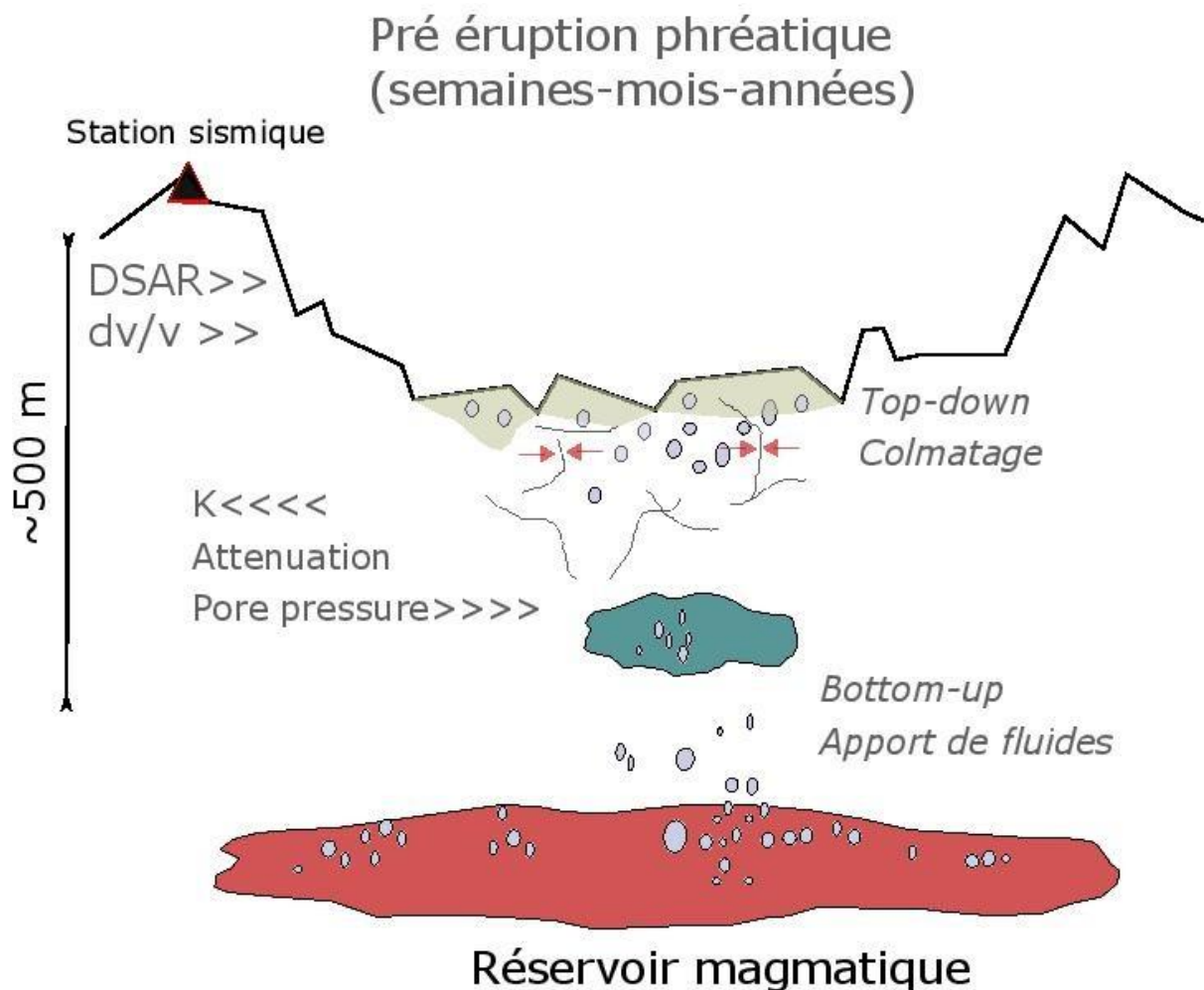


Figure 4 : évolution du DSAR en fonction du temps calculé pour la station WIZ à White Island/Whakaari entre 2007 et 2020 (Nouvelle Zélande). Les résultats journaliers sont lissés avec un filtre Hodrick-Prescott (ligne bleue, Hodrick and Prescott, 1997). La ligne verticale grise marque un essaim de séismes précurseurs (Jolly et al., 2017) à la séquence éruptive de 2012-13 (période en rouge, phréato-magmatique (Chardot et al., 2015) et extrusion d'un dôme (Jolly et al., 2020)). Les lignes bleues correspondent à des éruptions phréatiques (Kilgour et al., 2019; Dempsey et al., 2020; Caudron et al., 2021). Les dates d'éruptions sont mentionnées dans les différents articles.

Discussion

La Figure 3 illustre la difficulté de ces méthodes lorsqu'elles sont prises séparément, mais aussi lorsqu'il s'agit de faire de la surveillance à court-terme. Effectivement, les variations saisonnières sont prédominantes sur le volcan Ruapehu (Figure 2) et doivent être lissées pour que des tendances émergent. La majorité des volcans contient des systèmes volcano-hydrothermaux volumineux. Ceux-ci sont rechargés au cours de la saison des pluies, ce qui a pour effet de diminuer les vitesses sismiques et vice-versa pendant la saison sèche (Donaldson et al., 2019). Il serait utile de caractériser plus précisément l'influence des variations hydrologiques en fonction du volume du système hydrothermal, de la position de la station et de sa sensibilité en fonction de la fréquence d'échantillonnage. Toutefois, ceci nécessiterait une étude approfondie impliquant de la modélisation numérique.

Un des objectifs de cette étude était d'étudier les précurseurs, à long-terme, des éruptions phréatiques. Il semble qu'elles soient majoritairement précédées par des augmentations du paramètre DSAR et des variations relatives de vitesse. Toutefois, on note des diminutions relatives de vitesse dans les semaines précédant certaines éruptions phréatiques (Kawah Ijen (Caudron et al., 2015a); Ruapehu (Mordret et al., 2010)). À partir de ces observations, je postule que le déclenchement des éruptions phréatiques peut être sub-divisé en deux processus principaux (Figure 5): (1) par afflux soudain de gaz profonds (2) par colmatage des zones superficielles diminuant la perméabilité (K). Des variations soudaines du dégazage profond (cas 1) ont été observées avant certaines éruptions phréatiques, au Costa Rica notamment (de Moor et al., 2016; Stix and Moor, 2018). Dans le second cas (2), la précipitation de minéraux secondaires (soufre natif, sulfates, silice Christenson et al., 2010; Kennedy et al., 2020) peut colmater les parties superficielles d'un conduit et/ou minéraliser les pores, créant un zone scellée et plus étanche qu'auparavant. Dans ce cas, les vitesses sismiques augmenteront progressivement comme observé notamment pour le volcan White Island (Caudron et al., 2021; Yates et al., 2019).

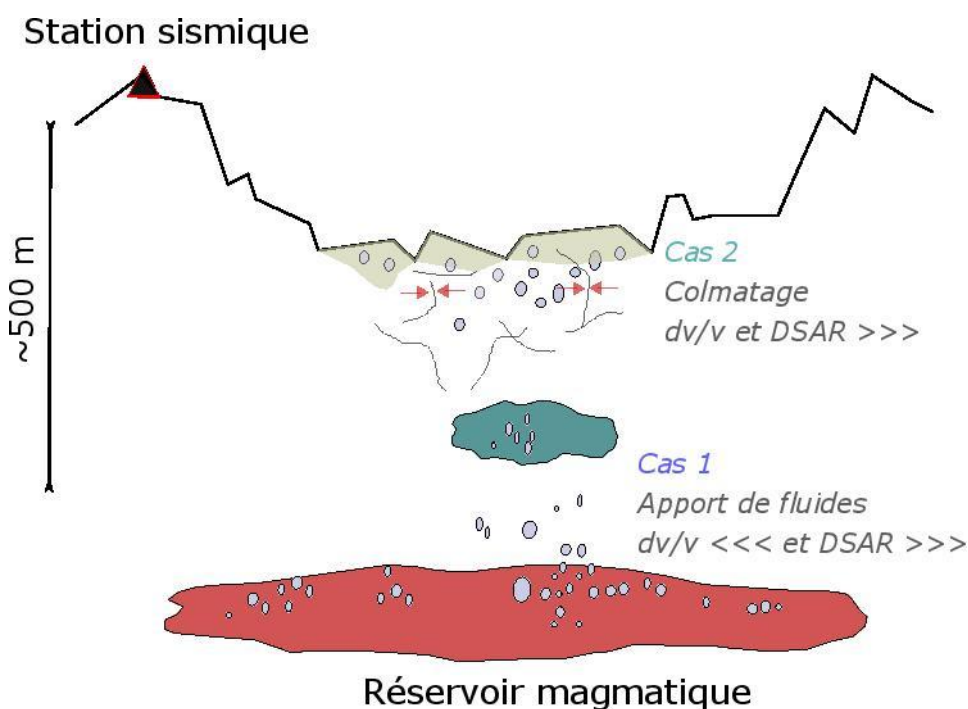


Figure 5 : modèle conceptuel permettant d'expliquer les observations basées sur la sismicité continue. Deux processus sont envisagés pour le déclenchement d'éruptions phréatiques (1) afflux de gaz par une intrusion magmatique (2) colmatage des zones superficielles diminuant la perméabilité (K). Dans les deux cas, cela générerait une augmentation du DSAR. Le cas (1) provoquerait une diminution des dv/v , le cas (2) une augmentation des dv/v . Dans les deux cas, le DSAR devrait augmenter.

Une des autres limites de ces méthodes est qu'elles ne fournissent des informations fiables qu'à long-terme. Pour les dv/v comme le DSAR, il est essentiel d'avoir plusieurs années de données afin de déterminer les conditions de 'background' du volcan pour éviter d'interpréter des tendances comme reflétant des variations volcaniques. Comme pointé précédemment (Caudron et al., 2019), il faut le plus souvent lisser les signaux en utilisant quelques semaines, voire des mois de données. Enfin, les stations sismiques doivent idéalement être placées sur le sommet des volcans. Lorsqu'elles sont trop loin d'un édifice, elles ne sont plus sensibles aux variations ténues.

Conclusions

L'objectif de ce travail était de tester des approches relativement nouvelles de traitement de données continues. J'ai appliqué la méthode d'interférométrie sismique qui permet de calculer des variations de vitesse (dv/v) à l'aide d'un seul capteur sismique, en utilisant des paires de composantes pour une seule station. J'ai également appliqué la méthode DSAR pour détecter des variations éventuelles d'atténuation.

Bien qu'elles ne parviennent pas à mettre en évidence des signaux précurseurs pour toutes les éruptions, ces méthodes ont globalement permis de montrer des augmentations à long-terme (mois/années) du rapport DSAR précédant la majorité des éruptions phréatiques. Le paramètre dv/v augmente généralement à long-terme avant la majorité des éruptions, mais peut aussi diminuer à court-terme (quelques semaines). À partir de ces observations, cette étude propose donc deux processus. Dans le premier cas, un déclenchement de ces éruptions par une incursion de progressivement plus de fluides (gaz/liquide) dans le système. Celui-ci aura pour effet d'augmenter les temps de parcours des ondes sismiques (dv/v diminue). Dans le second cas, un colmatage ou remplissage des pores qui aura lui pour effet d'augmenter relativement les vitesses sismiques et le rapport DSAR. Dans ce cas néanmoins, l'accumulation de gaz pourrait avoir pour effet de diminuer les vitesses sismiques. Il convient de considérer des paramètres complémentaires, notamment les paramètres sismiques ou les mesures de gaz (Caudron et al., 2021). Il serait utile de comprendre l'influence de ce processus sur ces paramètres, notamment au travers d'expériences en laboratoire (Clarke et al., 2020).

Ces méthodes ont donc un potentiel intéressant pour de la surveillance continue, si elles sont combinées à d'autres paramètres classiques (suivi des tremblements de terre, mesures de gaz, déformation). Sur la grande majorité des volcans, une seule station sismique est généralement installée à des fins de surveillance. Ces techniques pourraient donc se révéler particulièrement précieuses. De plus, toutes ces méthodes sont librement disponibles via le logiciel MSNoise (Lecocq et al., 2014). Le code DSAR devrait être lui aussi disponible via ce logiciel dans un futur proche et est déjà utilisé en temps réel pour la surveillance de différents volcans, notamment en Nouvelle-Zélande (Dempsey et al., 2020).

Légendes figures

Figure 1 : modèle présentant les sources d'énergie sismique utilisées pour cette étude, ainsi que la structure typique des édifices volcaniques des volcans étudiés

Figure 2 : variations de vitesse sismiques (dv/v) enregistrées sur le volcan Ruapehu entre 2004 et 2017 (Nouvelle-Zélande). Le trait tireté noir indique une éruption phréatique (25 septembre 2007, Christenson et al., 2010). Les résultats journaliers sont lissés avec un filtre Hodrick-Prescott (lignes noires et rouges, Hodrick and Prescott, 1997). Les différentes combinaisons de composantes (EN, EZ, NZ) correspondent aux différentes couleurs en lignes continues (rouge, bleu, vert).

Figure 3 : variations de vitesse sismiques (dv/v) enregistrées le volcan Tongariro entre 2008 et 2017 (Nouvelle Zélande). Les résultats journaliers sont lissés avec un filtre Hodrick-Prescott (lignes noires et rouges, Hodrick and Prescott, 1997). Les différentes combinaisons de composantes (EN, EZ, NZ) correspondent aux différentes couleurs en lignes continues (rouge, bleu, vert). Le trait tireté noir indique une éruption phréatique (le 6 août 2012) suivies d'une éruption de plus faible intensité quelques mois plus tard, le 21 novembre 2012 (Jolly et al., 2014).

Figure 4 : évolution du DSAR en fonction du temps calculé pour la station WIZ à White Island/Whakaari entre 2007 et 2020 (Nouvelle Zélande). Les résultats journaliers sont lissés avec un filtre Hodrick-Prescott (ligne bleue, Hodrick and Prescott, 1997). La ligne verticale grise marque un essaim de séismes précurseurs (Jolly et al., 2017) à la séquence éruptive de 2012-13 (période en rouge, phréato-magmatique (Chardot et al., 2015) et extrusion d'un dôme (Jolly et al., 2020)). Les lignes bleues correspondent à des éruptions phréatiques (Kilgour et al., 2019; Dempsey et al., 2020; Caudron et al., 2021). Les dates d'éruptions sont mentionnées dans les différents articles.

Figure 5 : modèle conceptuel permettant d'expliquer les observations basées sur la sismicité continue. Deux processus sont envisagés pour le déclenchement d'éruptions phréatiques (1) afflux de gaz par une intrusion magmatique (2) colmatage des zones superficielles diminuant la perméabilité (K). Dans les deux cas, cela générerait une augmentation du DSAR. Le cas (1) provoquerait une diminution des dv/v , le cas (2) une augmentation des dv/v . Dans les deux cas, le DSAR devrait augmenter.

Références

Articles de périodique

- Battaglia, J., Métaxian, J.-P., Garaebiti, E., 2012. Earthquake-volcano interaction imaged by coda wave interferometry. *Geophysical Research Letters* 39. <https://doi.org/10.1029/2012GL052003>
- Brenguier, F., Clarke, D., Aoki, Y., Shapiro, N.M., Campillo, M., Ferrazzini, V., 2011. Monitoring volcanoes using seismic noise correlations. *Comptes Rendus Geoscience*.
- Brenguier, F., Shapiro, N.M., Campillo, M., Ferrazzini, V., Duputel, Z., Coutant, O., Nercessian, A., 2008. Towards forecasting volcanic eruptions using seismic noise. *Nature Geoscience* 1, 126–130. <https://doi.org/10.1038/ngeo104>
- Budi-Santoso, A., Lesage, P., 2016. Velocity variations associated with the large 2010 eruption of Merapi volcano, Java, retrieved from seismic multiplets and ambient noise cross-correlation. *Geophys. J. Int.* 206, 221–240. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw145>
- Campillo, M., 2006. Phase and Correlation in 'Random' Seismic Fields and the Reconstruction of the Green Function. *Pure and Applied Geophysics* 163, 475–502. <https://doi.org/10.1007/s00024-005-0032-8>
- Caudron, C., Girona, T., Jolly, A., Christenson, B., Savage, M.K., Carniel, R., Lecocq, T., Kennedy, B., Lokmer, I., Yates, A., Hamling, I., Park, I., Kilgour, G., Mazot, A., 2021. A quest for unrest in multiparameter observations at Whakaari/White Island volcano, New Zealand 2007–2018. *Earth, Planets and Space* 73, 195. <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01506-0>
- Caudron, C., Girona, T., Taisne, B., Suparjan, Gunawan, H., Kristianto, Kasbani, 2019. Change in seismic attenuation as a long-term precursor of gas-driven eruptions. *Geology* 47, 632–636. <https://doi.org/10.1130/G46107.1>
- Caudron, C., Lecocq, T., Syahbana, D.K., McCausland, W., Watlet, A., Camelbeeck, T., Bernard, A., Surono, 2015a. Stress and mass changes at a “wet” volcano: Example during the 2011–2012 volcanic unrest at Kawah Ijen volcano (Indonesia). *J. Geophys. Res. Solid Earth* 2014JB011590. <https://doi.org/10.1002/2014JB011590>
- Caudron, C., Syahbana, D.K., Lecocq, T., Hinsberg, V.V., McCausland, W., Triantafyllou, A., Camelbeeck, T., Bernard, A., Surono, 2015b. Kawah Ijen volcanic activity: a review. *Bull Volcanol* 77, 1–39. <https://doi.org/10.1007/s00445-014-0885-8>
- Chardot, L., Jolly, A.D., M. Kennedy, B., Fournier, N., Sherburn, S., 2015. Using volcanic tremor for eruption forecasting at White Island volcano (Whakaari), New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 302, 11–23. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.06.001>
- Christenson, B.W., Reyes, A.G., Young, R., Moebis, A., Sherburn, S., Cole-Baker, J., Britten, K., 2010. Cyclic processes and factors leading to phreatic eruption events: Insights from the 25 September 2007 eruption through Ruapehu Crater Lake, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 191, 15–32. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.01.008>
- Clarke, J., Adam, L., van Wijk, K., Sarout, J., 2020. The influence of fluid type on elastic wave velocity and attenuation in volcanic rocks. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 403, 107004. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.107004>
- de Moor, J.M., Aiuppa, A., Pacheco, J., Avaró, G., Kern, C., Liuzzo, M., Martínez, M., Giudice, G., Fischer, T.P., 2016. Short-period volcanic gas precursors to phreatic eruptions: Insights from Poás Volcano, Costa Rica. *Earth and Planetary Science Letters* 442, 218–227. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.02.056>
- De Plaen, R.S.M., Lecocq, T., Caudron, C., Ferrazzini, V., Francis, O., 2016. Single-station monitoring of volcanoes using seismic ambient noise. *Geophys. Res. Lett.* 43, 2016GL070078. <https://doi.org/10.1002/2016GL070078>
- Delmelle, P., Bernard, A., 1994. Geochemistry, mineralogy, and chemical modeling of the acid crater lake of Kawah Ijen Volcano, Indonesia. *Geochimica et cosmochimica acta* 58, 2445–2460.

- Dempsey, D.E., Cronin, S.J., Mei, S., Kempa-Liehr, A.W., 2020. Automatic precursor recognition and real-time forecasting of sudden explosive volcanic eruptions at Whakaari, New Zealand. *Nature Communications* 11, 3562. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17375-2>
- Donaldson, C., Caudron, C., Green, R.G., Thelen, W.A., White, R.S., 2017. Relative seismic velocity variations correlate with deformation at Kīlauea volcano. *Science Advances* 3, e1700219. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700219>
- Donaldson, C., Winder, T., Caudron, C., White, R.S., 2019. Crustal seismic velocity responds to a magmatic intrusion and seasonal loading in Iceland's Northern Volcanic Zone. *Science Advances* 5, eaax6642. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax6642>
- Duputel, Z., Ferrazzini, V., Brenguier, F., Shapiro, N., Campillo, M., Nercessian, A., 2009. Real time monitoring of relative velocity changes using ambient seismic noise at the Piton de la Fournaise volcano (La Réunion) from January 2006 to June 2007. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 184, 164–173. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.11.024>
- Hodrick, R.J., Prescott, E.C., 1997. Postwar US business cycles: an empirical investigation. *Journal of Money, credit, and Banking* 1–16.
- Jolly, A., Caudron, C., Girona, T., Christenson, B., Carniel, R., 2020. 'Silent' Dome Emplacement into a Wet Volcano: Observations from an Effusive Eruption at White Island (Whakaari), New Zealand in Late 2012. *Geosciences* 10, 142. <https://doi.org/10.3390/geosciences10040142>
- Jolly, A.D., Jousset, P., Lyons, J.J., Carniel, R., Fournier, N., Fry, B., Miller, C., 2014. Seismo-acoustic evidence for an avalanche driven phreatic eruption through a beheaded hydrothermal system: An example from the 2012 Tongariro eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 286, 331–347. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.04.007>
- Jolly, A.D., Lokmer, I., Thun, J., Salichon, J., Fry, B., Chardot, L., 2017. Insights into fluid transport mechanisms at White Island from analysis of coupled very long-period (VLP), long-period (LP) and high-frequency (HF) earthquakes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 343, 75–94. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.06.006>
- Kato, A., Terakawa, T., Yamanaka, Y., Maeda, Y., Horikawa, S., Matsuhira, K., Okuda, T., 2015. Preparatory and precursory processes leading up to the 2014 phreatic eruption of Mount Ontake, Japan. *Earth Planet Sp* 67, 1–11. <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0288-x>
- Kennedy, B.M., Farquhar, A., Hilderman, R., Villeneuve, M.C., Heap, M.J., Mordensky, S., Kilgour, G., Jolly, A., Christenson, B., Reuschlé, T., 2020. Pressure Controlled Permeability in a Conduit Filled with Fractured Hydrothermal Breccia Reconstructed from Ballistics from Whakaari (White Island), New Zealand. *Geosciences* 10, 138. <https://doi.org/10.3390/geosciences10040138>
- Kilgour, G., Gates, S., Kennedy, B., Farquhar, A., McSparran, A., Asher, C., 2019. Phreatic eruption dynamics derived from deposit analysis: a case study from a small, phreatic eruption from Whakāri/White Island, New Zealand. *Earth Planets Space* 71, 36. <https://doi.org/10.1186/s40623-019-1008-8>
- Lecocq, T., Caudron, C., Brenguier, F., 2014. MSNoise, a Python Package for Monitoring Seismic Velocity Changes Using Ambient Seismic Noise. *Seismological Research Letters* 85, 715–726. <https://doi.org/10.1785/0220130073>
- Lesage, P., Reyes-Dávila, G., Arámbula-Mendoza, R., 2014. Large tectonic earthquakes induce sharp temporary decreases in seismic velocity in Volcán de Colima, Mexico. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 119, 2013JB010884. <https://doi.org/10.1002/2013JB010884>
- Mordret, A., Jolly, A.D., Duputel, Z., Fournier, N., 2010. Monitoring of phreatic eruptions using Interferometry on Retrieved Cross-Correlation Function from Ambient Seismic Noise: Results from Mt. Ruapehu, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 191, 46–59. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.01.010>
- Sens-Schönfelder, C., Wegler, U., 2006. Passive image interferometry and seasonal variations of seismic velocities at Merapi Volcano, Indonesia. *Geophysical Research Letters* 33. <https://doi.org/10.1029/2006GL027797>

Stix, J., Moor, J.M. de, 2018. Understanding and forecasting phreatic eruptions driven by magmatic degassing. *Earth Planets Space* 70, 83. <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0855-z>

Yates, A.S., Savage, M.K., Jolly, A.D., Caudron, C., Hamling, I.J., 2019. Volcanic, Coseismic, and Seasonal Changes Detected at White Island (Whakaari) Volcano, New Zealand, Using Seismic Ambient Noise. *Geophysical Research Letters* 46, 99–108. <https://doi.org/10.1029/2018GL080580>