



avons évalué la probabilité de cette possibilité: les chances que la corrélation observée se produise de façon fortuite sont de 1 sur 3,5 millions, c'est-à-dire extrêmement faibles. D'où l'hypothèse suivante: lorsque le volcan est dans un état critique, c'est-à-dire dans un état prééruptif, les forces de marée influenceraient ses tremblements. Si cette hypothèse est correcte, alors il sera en principe possible de déduire du trémor qu'un volcan s'approche du seuil critique.

Pour tester cette idée, nous avons modélisé la mécanique du volcan en état critique afin de tenter de reproduire le phénomène en question et d'étudier les facteurs qui l'influencent.

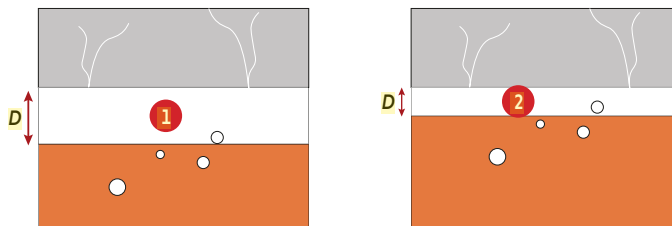
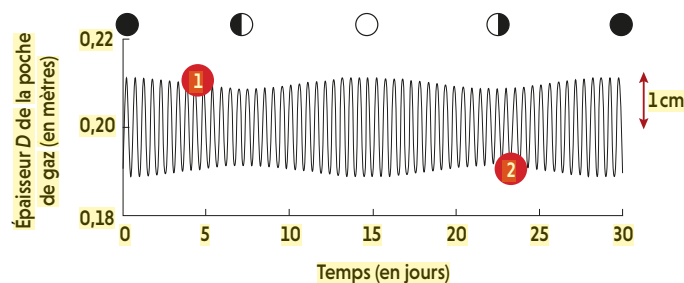
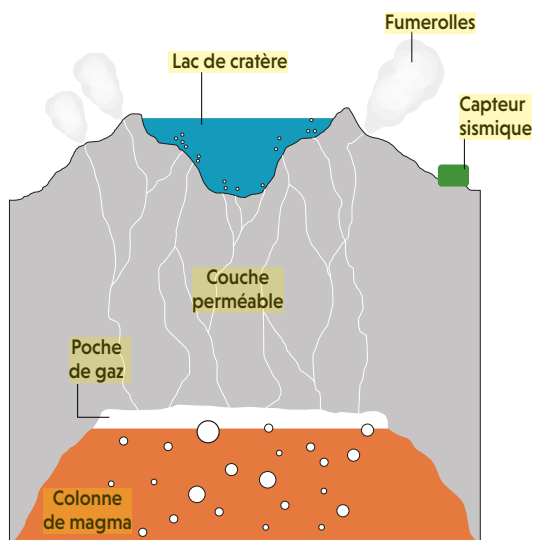
Les chances que la corrélation observée se produise de façon fortuite sont de 1 sur 3,5 millions

Le volcan renferme un conduit vertical où la lave monte et descend, tandis qu'un bouchon solide poreux lié aux particules transportées par les flux de gaz est supposé s'être accumulé juste au-dessus de cette colonne magmatique. Il retient les volatiles libérés par le magma, de sorte qu'une poche de gaz se forme à quelques centaines de mètres de profondeur. Le volume de gaz sous pression qu'elle contient résulte de deux processus en concurrence: d'une part l'arrivée de fluides magmatiques, dont des gaz, depuis les niveaux plus profonds; d'autre part le flux de gaz qui percole à travers les portions superficielles poreuses du volcan. C'est cette poche de gaz sous forte pression qui est la source de l'essentiel de la microactivité sismique: elle répercute à la partie supérieure de l'édifice volcanique les vibrations qui se produisent en son sein lors de l'arrivée ou du départ de quantité de gaz.

Or, même faibles, les forces de marée compriment régulièrement le réservoir magmatique. Si l'on suppose par exemple que le passage de la Lune se traduit (avec un certain retard) par une hausse du niveau du magma, de l'ordre de 1 centimètre, alors l'accroissement de pression dans la poche de gaz se traduira par une augmentation de l'amplitude des vibrations de l'édifice volcanique supérieur, en raison de sa mise sous tension. À l'inverse, une baisse comparable du niveau de magma due à l'éloignement de la Lune se traduira par une diminution de l'amplitude des vibrations de l'édifice volcanique supérieur. Finalement, ces phénomènes se traduiront par une modulation périodique du trémor, corrélée au passage de la Lune.

Comment la poche de gaz peut-elle être si sensible à ces effets *a priori* extrêmement petits? Pour nous en persuader, nous avons essayé de reproduire numériquement la situation au Ruapehu. D'environ 20 centimètres de haut, la poche de gaz sous pression se trouve à quelque 10 mètres sous le fond du lac de cratère, profond de 200 mètres, au-dessus d'une colonne magmatique d'une dizaine de mètres de largeur. Nous avons supposé que l'arrivée permanente d'environ 50 kilogrammes de gaz par seconde met en vibration la poche de gaz sous pression et tenu compte du fait que la station sismologique du mont est distante de quelque 700 mètres. Nous avons alors calculé des sismogrammes s'étendant sur plusieurs cycles lunaires, et constaté que dans les conditions fixées dans notre modèle, l'influence des forces de marée se lit bien dans le trémor.

Une analogie allant dans le sens d'une possible influence de la Lune sur certaines cocottes-minute volcaniques surgit de la comparaison avec le comportement des lacs quand le sol est secoué. À cause de leur caractère fluide et de leur grande surface de contact avec le sol, les lacs répercutent en effet les mouvements telluriques instantanément. >



➤ Dans une autre étude, nous avons montré qu'en fonction de leur morphologie, les lacs peuvent entrer en résonance (vibrer amplement à certaines fréquences). Ce fort couplage s'observe facilement quand de brusques mouvements des masses d'eau du lac font trembler le sol. Ainsi, on a maintes fois observé que le remplissage brusque des lacs-réservoirs de barrage déclenche de petits tremblements de terre. Par exemple, le 29 septembre 1971, le remplissage du lac-réservoir de l'Alesani, en Corse, a produit un séisme de magnitude 4 dans une zone jusqu'à complètement asismique centrée sur le lac.

Ainsi, c'est l'importance de la poche de gaz du volcan – des dizaines à des centaines de mètres cubes – qui explique le bon couplage entre la vapeur sous pression et la partie supérieure de l'édifice volcanique et, partant, la modulation que la Lune se révèle capable d'imprimer aux vibrations.

UN EFFET QUE LA MODÉLISATION CONFIRME

C'est du moins ce que notre modèle prédit, puisqu'il reproduit une influence des forces lunaires sur le signal sismique lorsque la perméabilité de l'édifice volcanique passe sous une valeur critique, c'est-à-dire lorsque le bouchon retenant le gaz est assez étanche. Nous pensons donc qu'en 2006-2007, le volcan Ruapehu a été sensible aux cycles lunaires parce qu'il était fortement scellé, suite à l'accumulation de particules. D'après nos observations sur le volcan Ruapehu, c'est selon un rythme bimensuel que les forces lunaires de marée agissent sur un édifice volcanique scellé.

Il devient donc envisageable de mettre en évidence l'état des portions superficielles d'un volcan – son scellement essentiellement – en

étudiant la réponse sismique aux excitations lunaires. Différents prérequis sont cependant nécessaires : la présence d'une poche de gaz, l'existence de stations sismiques à proximité directe de celle-ci et la disponibilité de plusieurs années de données sismiques. Nous nous demandons par ailleurs si des volcans très distants des lieux sur la planète où les effets de marée de la Lune sont maximaux seront sensibles aux pressions développées sur le système. Nous explorons donc d'autres jeux de données volcaniques, notamment ceux des volcans Turrialba et Poás, au Costa Rica. À ce stade, la plus grande difficulté consiste à trouver des séries de données longues et continues.

Si d'autres cas corroborent nos observations au Ruapehu, nous aimerions créer un outil de surveillance en temps réel. Mais nous voudrions éviter de fournir un paramètre difficile à interpréter à des observatoires volcanologiques devant prendre des décisions en urgence. Nous collaborons activement avec nos collègues néozélandais responsables de la surveillance volcanique, dont celle du volcan Ruapehu, dans le cadre d'autres projets. Bien qu'ils apprécient notre étude, ils attendent que l'on ait mis en évidence d'autre cas de modulation du trémor sur le même volcan ou sur d'autres avant d'envisager d'implémenter un outil de surveillance en temps réel.

Signalons pour terminer que nous voulons aussi explorer d'autres objets géologiques tels les zones de plaques tectoniques sujettes à des stress intenses, qui pourraient peut-être résonner avec la Lune dans certaines conditions. Aurons-nous une chance d'observer une incidence lunaire sur les signaux sismiques observés dans ces zones ? Cela semble peu probable, mais la recherche avance souvent à l'occasion de tests d'hypothèses *a priori* farfelues. ■

La structure de la cocotte-minute volcanique que représente le Ruapehu est schématisée gauche. Un sismogramme obtenu par modélisation de cet édifice volcanique reproduit les modulations du trémor en fonction des phases de la Lune, avec en (1) une poche de gaz et un trémor augmentés et en (2) une poche de gaz et un trémor diminués.

BIBLIOGRAPHIE

T. Girona, C. Huber et C. Caudron, **Sensitivity to lunar cycles prior to the 2007 eruption of Ruapehu volcano**, *Scientific Reports*, vol. 8, article 1476, 2018.

M. Detay, **Traité de volcanologie physique**, Lavoisier, 2017.