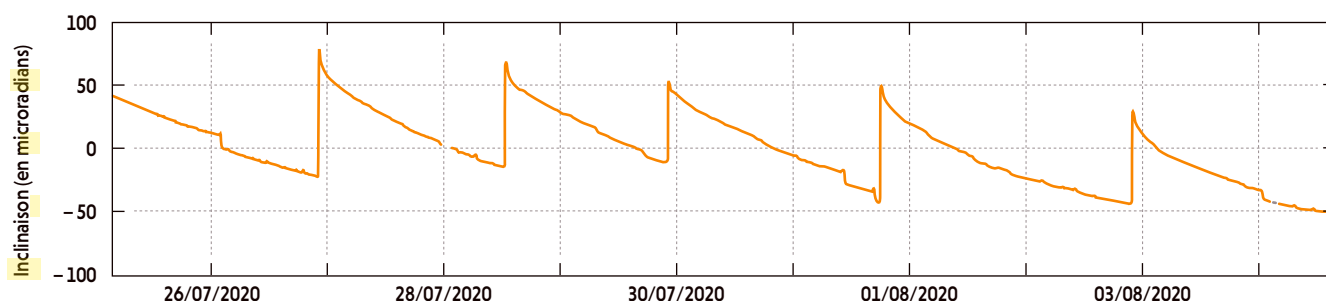
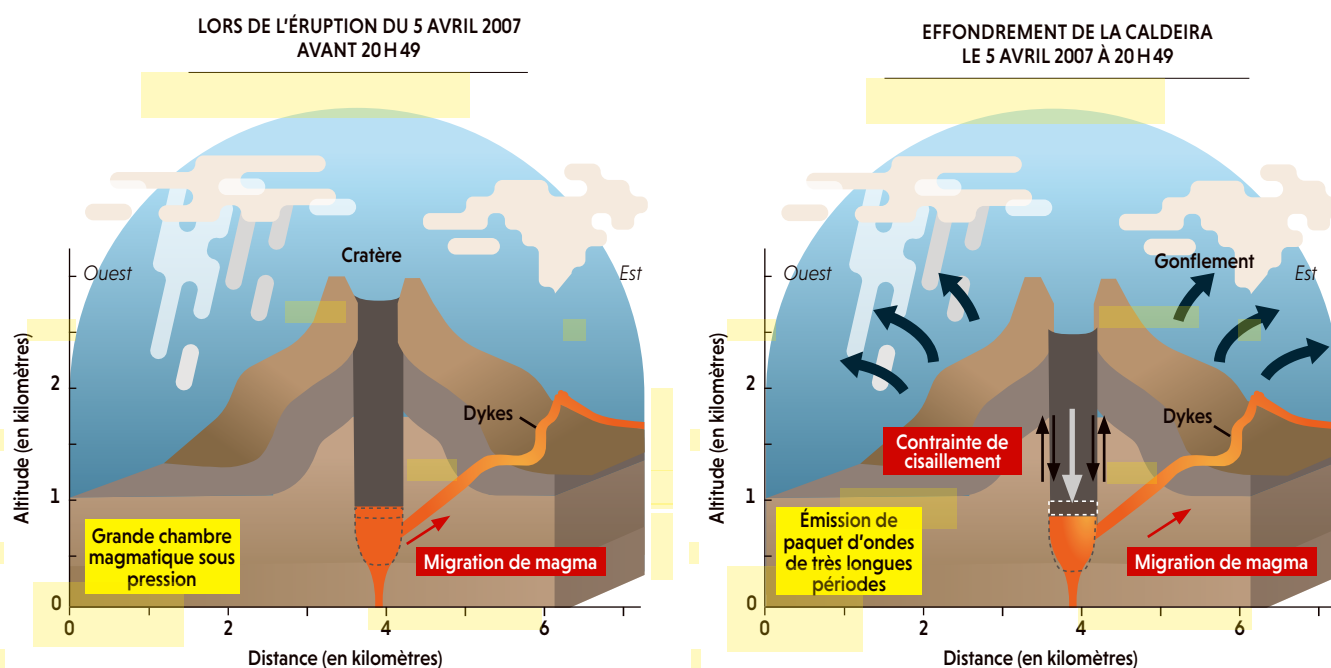


La similitude de ces bouffées d'ondes suggère que chaque effondrement souterrain de la série qui a produit l'abaissement du sol de la caldeira s'est accompagné d'un processus mécanique répétitif (de type collé-glissé), à l'origine de ces émissions sismiques particulières. Si cette hypothèse tient, alors le premier effondrement en profondeur s'est produit approximativement vingt heures avant la rupture en surface. La mesure des variations cycliques de l'inclinaison du sol et des paquets d'ondes de très longues périodes qui les accompagnent nous offre donc la possibilité de détecter le premier effondrement en profondeur des heures avant celui, final, de la surface d'une caldeira.

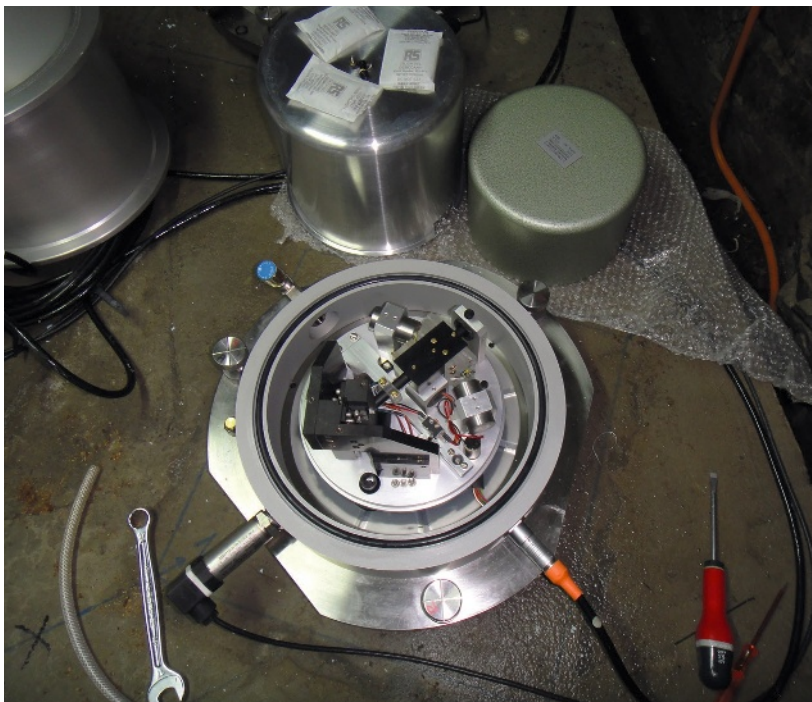
Ces signaux d'alertes pourraient être complétés par d'autres indices. Nous avons

constaté que les effondrements qui se sont produits entre le 5 et le 14 avril 2007 (*voir la figure ci-dessous*) ont commencé après le début de l'éruption historique d'avril 2007, d'une façon suggérant qu'il existe un lien entre l'activité magmatique et les effondrements. Dès le 5 avril vers 10 heures, les chercheurs de l'observatoire volcanologique du piton de la Fournaise avaient noté une rapide augmentation du débit de magma qui, le 6 avril vers 12 heures, s'était traduite par un passage du débit de 75 mètres cubes par seconde à plus de 200 mètres cubes par seconde, et par l'apparition de fontaines de lave de plus de 200 mètres de hauteur. Ensuite, du 8 avril au 1^{er} mai, l'éruption s'était poursuivie à faible intensité.

>



La formation d'une caldeira correspond à un phénomène connu en physique sous le nom de « collé-glissé » (ou *stick-slip*), mais à l'échelle d'un volcan. Une colonne de roche n'est plus assez soutenue par une chambre magmatique parce que celle-ci se vidange par une fissure; elle chute donc, mais par à-coups, car sa descente s'accompagne de l'intensification d'une résistance frictionnelle jusqu'à un point de rupture; puis le cycle descente-résistance-rupture recommence. Ces cycles s'accompagnent d'allers-retours très lents de l'inclinaison du sol à la surface du volcan, comme ce fut le cas par exemple à Hawaï du 25 juillet à 12 heures au 6 août 2018 (*graphique ci-dessus*).



L'un des capteurs STS-1 du sismomètre horizontal de la station sismique RER, installée au pied du volcan, à l'origine de l'observation des cycles de l'inclinaison du sol.

> Or parallèlement à ces variations du débit magmatique, des variations des écarts temporels entre cycles successifs d'inclinaison du sol à la station RER se produisaient. Ainsi, entre le 6 avril à 0 heure 48 et le même jour à 16 heures, les écarts temporels entre deux cycles d'inclinaison successifs (les intervalles de temps entre deux effondrements) ont diminué tandis que le débit magmatique augmentait; puis, jusqu'au 8 avril à 4 heures 9, ces écarts ont augmenté tandis que le débit diminuait.

UN LIEN ENTRE DÉBIT DE LAVE ET VARIATIONS DE L'INCLINAISON

Ce tableau d'ensemble confirme le lien entre l'activité éruptive (donc de vidange de la chambre magmatique) et l'occurrence des signaux d'inclinaison associés aux effondrements, lien suggéré par le mécanisme d'effondrement que nous avons décrit. L'intervalle de temps entre deux cycles semble inversement proportionnel au débit du magma à travers une fissure éruptive latérale dans la chambre magmatique. Nous avons traduit cette idée en modélisant le système de chambre magmatique en vidange/colonne de roche descendante, et constaté aussi de cette façon la pertinence de l'idée que le débit magmatique à travers la fissure éruptive latérale contrôle la descente de la colonne de roche.

La modélisation analogique (par des formules décrivant le système) et numérique (par la description numérique du système) suggère que des effondrements se produisent en profondeur des heures avant tout effondrement en surface dans les cas où le

«rapport de forme» du toit de la chambre magmatique est compris entre 2 et 4,5. Cette grandeur, définie par le quotient entre la profondeur et le diamètre, peut être estimée par une méthode d'imagerie sismique telle que la tomographie sismique.

Dans les cas de la caldeira du Vésuve en 79 de notre ère, de celle du Pinatubo, aux Philippines, en 1991, de celle de l'île volcanique de Miyake-jima, au Japon, en 2000, et de celle du Dolomieu en 2007, le rapport de forme était élevé. Il aurait par exemple été compris entre 1,9 et 3,8 pour Miyake-jima et se situait vers 4,25 dans le cas du cratère du Dolomieu.

Or, en 2012, des chercheurs japonais avaient décrit des effondrements précurseurs en profondeur à Miyake-jima à partir de l'observation de paquets d'ondes de très basses fréquences. Les observations effectuées au Dolomieu permettent désormais de conclure plus fermement que ces effondrements sont à associer à l'existence d'une chambre magmatique ayant un rapport de forme élevé à Miyake-jima.

En revanche, quand le rapport de forme est faible (inférieur à 1 typiquement), la modélisation suggère que l'effondrement d'une unique colonne de roche se produit en une fois et est accompagné d'un affaissement immédiat du fond de la caldeira. Ce fut probablement le cas lors de la formation de la caldeira de Fernandina, dans l'archipel des Galápagos, en 1968, où le rapport de forme de la chambre magmatique était d'environ 0,3.

SURVEILLER LE VOLCAN ?

Tous ces résultats suggèrent que la surveillance des cratères susceptibles de former des caldeiras implique de surveiller l'évolution du rapport de forme, puisque celui-ci peut évoluer si un nouveau réservoir magmatique apparaît. Dans les cas de chambres magmatiques ayant un rapport de forme assez élevé pour suggérer la possibilité d'effondrements profonds, l'identification de deux types de signaux – les cycles de variations de l'inclinaison et les paquets d'ondes de très longues périodes – permettra peut-être d'anticiper de quelques heures l'effondrement en surface.

Une telle avance de quelques heures serait-elle appréciable? Oui, puisqu'en 1991, l'effondrement du cratère du Pinatubo, aux Philippines, a tué des centaines de personnes (voir la photographie dans l'encadré page 58). Le phénomène, qui accompagnait la deuxième plus importante éruption du xx^e siècle, est aussi associé à une chambre magmatique à rapport de forme élevé. Malheureusement, aucun sismomètre à large bande spectrale n'existait alors sur ce volcan, ni d'ailleurs la notion de ce qu'il aurait servi à surveiller. ■

BIBLIOGRAPHIE

F. R. Fontaine et al., **Very- and ultra-long-period seismic signals prior to and during caldera formation on La Réunion Island**, *Scientific Reports*, vol. 9, article 8068, 2019.

F. Marra, **Le volcan aux portes de Rome**, *Pour la Science*, n° 479, pp. 40-47, août 2017.