

La surveillance des volcans

Lors de la remontée de magma vers la surface, un volcan est secoué de petits séismes, nommés trémors volcaniques. La mesure de la sismicité est donc une méthode privilégiée pour surveiller les volcans et anticiper une éruption. Elle permet notamment de localiser la région où le fluide qui remonte fracture la roche pour se frayer un chemin. Il est alors important de disposer d'une imagerie sismique de la région, permettant d'évaluer la répartition des vitesses de propagation des ondes sismiques à l'intérieur du volcan. La résolution de l'imagerie sismique est liée à la précision avec laquelle on localise les événements détectés.

Les mouvements de fluide à l'intérieur de l'édifice peuvent également entraîner une déformation du sol qui peut être mesurée par GPS ou même par interférométrie radar à l'aide de satellites. Cependant, les satellites survolent un même endroit environ

tous les 20 jours. On obtient ainsi une information globale sur les déformations du volcan, mais il est difficile de détecter des variations rapides.

Le suivi de la composition et du flux de gaz apporte aussi des renseignements sur l'arrivée de magma frais en profondeur et sur les interactions de fluides liées à la présence d'un système hydrothermal. Pour assurer cette surveillance, il faut effectuer des prélèvements dans les sources hydrothermales ou les fumerolles, ce qui n'est pas sans danger. Mais, grâce à la mise en place récente de spectromètres de terrain automatiques, les mesures peuvent aujourd'hui être faites à distance et plus régulièrement.

Tout comme l'imagerie sismique, les imageries magnétiques, électriques et gravimétriques permettent d'identifier les structures internes d'un volcan et de révéler notamment les régions de passage préférentiel des

fluides (magma et eau). Elles peuvent aussi indiquer les zones altérées par l'érosion hydrothermale et susceptibles d'être emportées lors d'une déstabilisation de l'édifice.

Toutefois, ces techniques exigent une présence humaine sur le vol-

can, ce qui peut être risqué. Il arrive en effet que des éruptions se produisent sans qu'aucun signal précurseur n'ait été détecté, comme ce fut le cas pour le volcan Mayon aux Philippines en mai 2013, qui est pourtant bien surveillé.



Les fumerolles reflètent l'activité d'un volcan, mais leur surveillance nécessite de s'en approcher, ce qui n'est pas dénué de risques.

© Nohem Lesparre

hydrothermaux très acides qui attaquent la roche et réduisent sa tenue mécanique.

Qui plus est, le sommet (1 467 mètres) est entouré d'une forêt tropicale dense jusqu'à 1 100 mètres d'altitude et le relief le rend difficile d'accès. Les pluies abondantes sont accompagnées de fortes rafales, toutes conditions qui rendent la surveillance difficile. Dès lors, la tomographie par rayons cosmiques présente l'intérêt théorique de suivre les entrailles du volcan sans avoir à l'escalader. Restait à démontrer la faisabilité de la méthode et sa fiabilité.

Les muons, que nous avons déjà mentionnés, sont produits à une quinzaine de kilomètres d'altitude lors des collisions entre les rayons cosmiques primaires et les atomes de l'atmosphère. Les particules primaires résultent de phénomènes astrophysiques violents, telles les explosions d'étoiles en supernovae, au cours desquelles elles sont accélérées. Les plus énergétiques détectées à ce jour ont une énergie d'environ $3,2 \times 10^{20}$ électronvolts, c'est-à-dire plus que les plombs d'une carabine à air comprimé!

Lorsqu'elles pénètrent dans l'atmosphère, ces particules heurtent les molécules d'air. Sous le choc, de nouvelles particules sont libérées et se désintègrent à leur tour. Une cascade de désintégrations conduit à

une averse de particules, nommée gerbe atmosphérique. Certains observatoires – HESS2, en Namibie, ou l'Observatoire Pierre Auger, en Argentine – sont consacrés à l'étude de ces phénomènes.

Les muons représentent cinq pour cent des milliards de particules qui constituent une gerbe atmosphérique. Leur énergie est comprise entre quelques dizaines et quelques milliers de gigaélectronvolts. Ils se déplacent à une vitesse proche de celle de la lumière dans le vide, ce qui allonge considérablement leur durée de vie apparente grâce à des effets relativistes. Cela leur permet de traverser l'atmosphère et d'atteindre le sol. Aux énergies considérées, les muons interagissent essentiellement par ionisation des atomes de la matière qu'ils traversent.

Les muons que... presque rien n'arrête

La perte d'énergie est approximativement constante et d'environ deux mégaélectronvolts par centimètre d'eau traversée. L'atmosphère ayant une épaisseur équivalant à dix mètres d'eau, les muons perdent deux gigaélectronvolts pour parvenir jusqu'au sol.

Les muons ne s'arrêtent pas en touchant le sol. Ils traversent la matière, où ils perdent de l'énergie plus rapidement que dans l'air. Si leur énergie est suffisamment grande et l'obstacle pas trop dense, ils peuvent le traverser de part en part. Si la densité de l'obstacle est trop élevée, ils sont arrêtés. On retrouve ici le principe de la radiographie aux rayons X, et on peut l'appliquer à la radiographie (ou tomographie) de l'intérieur d'un volcan. On mesure l'atténuation du flux de muons cosmiques produite par le volcan. L'atténuation augmente avec la quantité de matière traversée ou plus précisément l'opacité, c'est-à-dire le produit de la densité moyenne par la longueur du trajet dans le volcan.

Le principe décrit, comment procède-t-on en pratique? On dispose d'un détecteur de particules – également nommé télescope, car on observe des rayons cosmiques – placé au pied du volcan et qui enregistre un flux de muons (voir l'encadré pages 48 et 49). Le télescope utilisé à la Soufrière est robuste, résistant aux variations de température, insensible aux pluies tropicales et aux ouragans. Il est également léger et maniable, transportable par hélicoptère et déposé sur des pentes escarpées. Deux ou trois personnes peuvent l'installer. Un

vélin hydraulique et une base rotative permettent de modifier l'orientation du télescope et de l'ajuster avec précision. Il est alimenté par des panneaux solaires, une éolienne ou une pile à combustion.

Le télescope est équipé de barreaux scintillants arrangés en deux séries perpendiculaires, de façon à former un damier constituant une matrice. Un télescope comporte au minimum trois matrices de 256 pixels de 25 centimètres carrés permettant de détecter les muons provenant de 961 directions différentes. La résolution angulaire est adaptée en ajustant la distance entre les matrices.

Lorsqu'une particule chargée traverse un barreau, la matière est ionisée et émet des photons avant de revenir à son état initial. L'énergie perdue par l'ionisation d'un muon produit entre 15000 et 20000 photons ultraviolets. Une fibre optique, collée au cœur du scintillateur, capture une partie de ces photons et les guide vers un photo-

multiplicateur qui produit une impulsion électrique. Ainsi, les muons produisent des photons que le photomultiplicateur convertit en électrons, signal électrique amplifié et mis en forme par un système électronique adapté de l'expérience OPERA (dédiée à l'étude des particules élémentaires nommées neutrinos). Les horloges utilisées pour repérer le passage de chaque muon ont une précision de quelques dizaines de picosecondes. Un ordinateur central collecte les informations provenant des différentes matrices et, dans le cas de la Soufrière, les transmet à l'observatoire volcanologique situé à une dizaine de kilomètres du volcan. Cela permet de mesurer un flux de muons en temps réel et de détecter d'éventuelles variations dues à des changements de conditions à l'intérieur du massif.

Le flux de muons décroît quand l'opacité augmente, et la mesure de son atténuation reflète les variations de densité à

l'intérieur de l'objet sondé. Pour modéliser les variations de densité dans le volcan, nous résolvons ce que l'on nomme un problème inverse, méthode qui nous permet de déduire l'opacité du volcan du flux de muons l'ayant traversé. La tomographie par analyse du flux de muons nous donne des images de densité avec une résolution d'une vingtaine de mètres.

Comment calibrer le détecteur

Toutefois, restent encore plusieurs difficultés à résoudre : comment calibrer le détecteur pour obtenir une image de résolution optimale ? Comment évaluer la durée minimale d'enregistrement des données ? Et comment déduire du flux de muons enregistré les variations d'opacité du volcan ? D'abord, il est important d'estimer le flux de muons observables, afin d'ajuster la configuration du détecteur.

LE PRINCIPE DE LA RADIOGRAPHIE DES MONTAGNES PAR LES MUONS

