

En quoi consiste la méthode ? Elle n'est pas sans rappeler la radiographie aux rayons X. Ces derniers traversent l'organisme, sont plus ou moins absorbés par les tissus et les os qu'ils rencontrent sur leur passage, et nous donnent des images de l'intérieur du corps humain, liées à cette absorption variable. De même, les rayons cosmiques traversent la matière. Serait-il possible d'observer les entrailles des volcans au moyen de ces rayons cosmiques, plus ou moins absorbés par la matière qu'ils traversent ? L'idée fut proposée au milieu des années 1960 par l'équipe de Luis Alvarez (1911-1988), lauréat du prix Nobel de physique en 1968 : il suggéra d'utiliser les rayons cosmiques pour ausculter la grande pyramide de Khéphren et y rechercher la chambre de la Reine.

Découverts en 1912 par le physicien américain d'origine autrichienne Victor Hess, les rayons cosmiques arrivant sur Terre sont constitués d'une « pluie » de particules produites par les rayons cosmiques primaires qui bombardent l'atmosphère terrestre. Les particules produites dans ces « cascades » sont de natures variées : électrons et photons, entre autres, mais aussi muons. Le muon est une particule élémentaire qui a les mêmes propriétés que l'électron, si ce n'est qu'il est instable

■ LES AUTEURS



Nolwenn LESPARRE est géophysicienne à l'Institut de radioprotection et de sûreté

nucléaire, à Fontenay aux Roses.

Elle a été lauréate du Prix *Le Monde* de la recherche universitaire 2012.



Dominique GIBERT est géophysicien à l'Institut de physique du Globe de Paris et professeur

à l'Université de Rennes 1.

Il coordonne le projet DIAPHANE.



Jacques MARTEAU est physicien des particules à l'Institut de Physique nucléaire de Lyon.

Il a travaillé sur les expériences neutrinos OPÉRA et T2K.

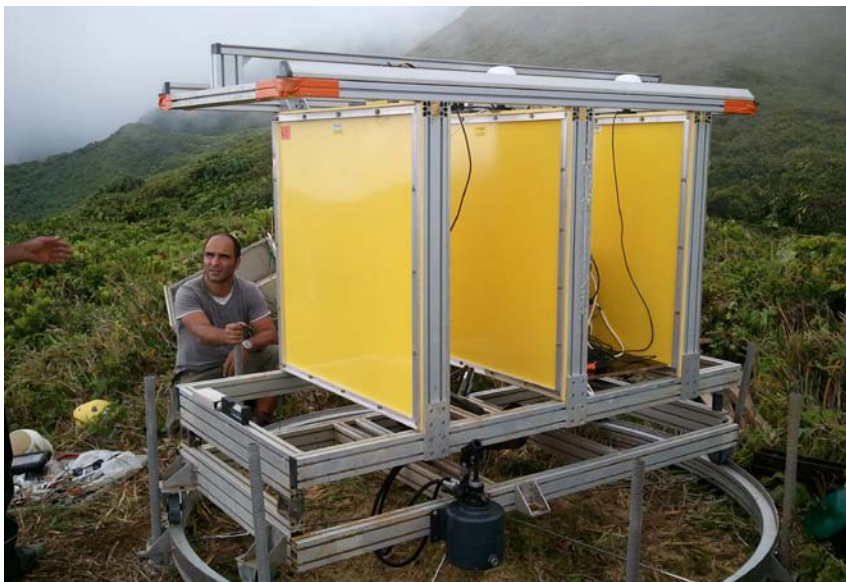
(sa durée de vie est égale à 2,2 microsecondes) et que sa masse est environ 200 fois supérieure (206,8 fois précisément). Les muons sont parfois surnommés électrons lourds. Ce sont ces muons, sur lesquels nous reviendrons, qu'utilisa l'équipe d'Alvarez pour « voir » à travers les épaisses parois de la pyramide.

C'est au milieu des années 1990 que l'équipe japonaise de Kanetada Nagamine eut l'idée d'utiliser les muons cosmiques pour ausculter les volcans. Depuis, les détecteurs de particules ont été notablement améliorés, ce qui a conduit plusieurs équipes à s'intéresser à la radiographie des volcans à l'aide des muons. Avoir accès à de telles images permettrait de suivre l'évolution des entrailles des volcans et, par exemple, de détecter une remontée de magma ou l'apparition de poches de vapeur avant toute manifestation visible.

Un volcan sous surveillance

Parmi ces équipes, le groupe DIAPHANE réunit des géophysiciens et des physiciens des particules de l'Institut de physique du Globe de Paris, de l'Institut de physique nucléaire de Lyon et du laboratoire Géosciences Rennes. Cette équipe mène des expériences sur plusieurs volcans aux Philippines, sur l'Etna et aux Antilles, où elle s'intéresse surtout à la Soufrière, surveillée en permanence par l'équipe de l'Observatoire volcanologique de Guadeloupe (voir l'encadré page ci-contre). Comme nous l'avons évoqué, ce volcan subit des éruptions phréatiques, c'est-à-dire l'expulsion violente de grands volumes d'eau sous forme de panaches de vapeur.

L'énergie thermique du volcan est emmagasinée dans les réservoirs hydrothermaux – des poches d'eau chaude. L'apport de chaleur en provenance de la chambre magmatique et l'accumulation d'énergie résultant de l'obstruction progressive des exutoires – fumerolles et sources – servant habituellement à son évacuation peuvent entraîner une surpression telle qu'elle déclenche une éruption. La quantité d'énergie stockée et la rapidité avec laquelle elle est évacuée déterminent la violence de l'éruption. Ces deux paramètres dépendent du volume des réservoirs d'énergie et de la structure du dôme volcanique. L'altération du dôme est accentuée par la circulation de fluides



© Dominique Gibert

2. LES DÉTECTEURS DU TÉLESCOPE de la Soufrière mis au point par les auteurs sont constitués de barreaux scintillants arrangés en séries perpendiculaires, constituant une matrice (*les carrés jaunes*). Ces barreaux captent les muons et un photomultiplicateur transforme le signal initial en un signal électrique. Un télescope comporte au moins trois matrices, chacune contenant 256 pixels de 25 centimètres carrés. L'espacement des trois matrices définit la résolution des mesures. Le détecteur résiste aux conditions météorologiques difficiles qui règnent à la Soufrière : pluies, ouragans, etc. De surcroît, il est transportable par hélicoptère dans des endroits difficiles d'accès.

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