

Mais le calcul du flux de muons traversant une montagne nécessite de connaître approximativement la répartition des densités dans cet objet. Pour ce faire, on utilise les connaissances accumulées au fil du temps par les géologues. Bien sûr, on ignore les détails de l'anatomie du volcan, mais l'activité de la Soufrière est suivie depuis longtemps, ses failles et sa cheminée ont été explorées par divers moyens, de sorte que l'on a une idée de la répartition des masses en son sein.

Partant de ces données obtenues par d'autres méthodes, on estime le flux en fonction de la position du télescope par rapport à l'objet, de son orientation et de sa configuration. On peut alors évaluer les épaisseurs de roche traversées par les muons pour chacun des angles de vue du télescope. Ces épaisseurs sont ensuite converties en opacité, caractéristique qui détermine le seuil d'énergie minimale nécessaire aux muons pour traverser l'objet sans être

absorbés. Le flux de muons détectables correspond alors au flux de muons arrivant à la surface du volcan et dont l'énergie est suffisante pour qu'ils puissent en ressortir.

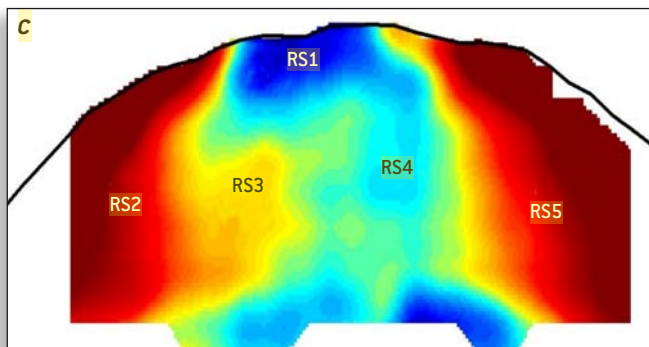
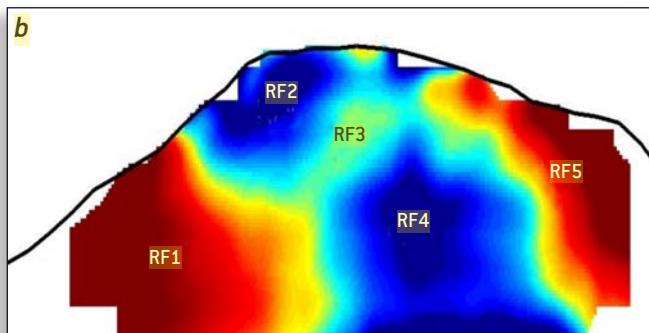
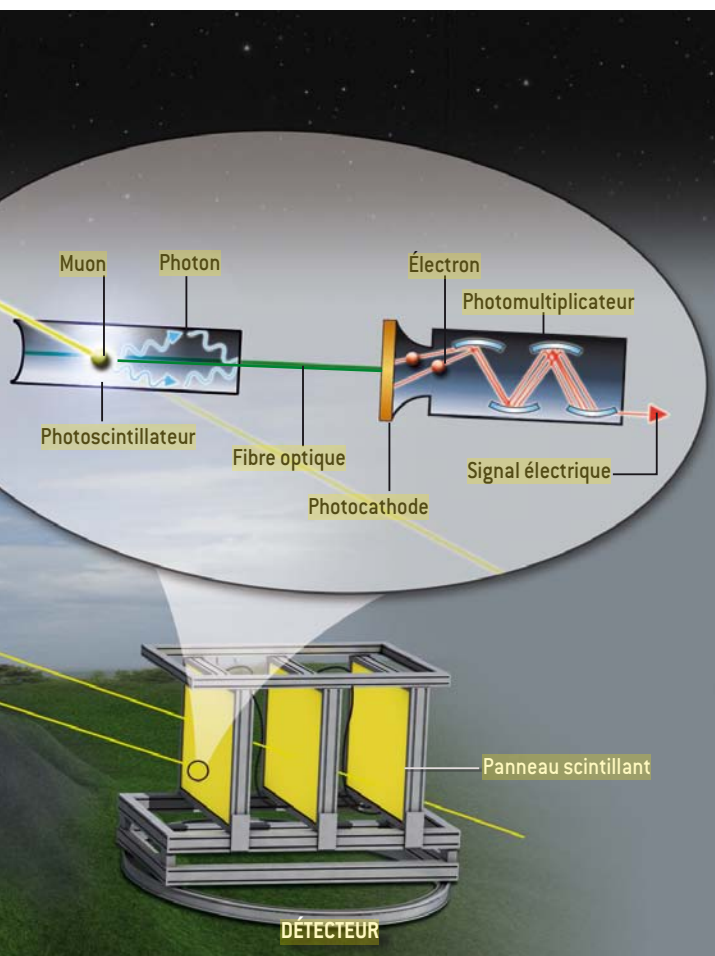
Les radiographies de la Soufrière

Qu'avons-nous observé ? De nombreux signes témoignent de l'activité actuelle du volcan : des fractures, des fumerolles, le lac d'acide du gouffre Tarissan et des zones altérées par le système hydrothermal. Nous avons installé notre télescope successivement en trois endroits à l'Est, au Sud et à l'Ouest du volcan. Le fait d'avoir plusieurs points de vue permet de valider l'analyse des données.

Les radiographies montrent des zones de très faible densité dans la partie supérieure du volcan ; elles sont associées à la zone active du cratère Sud (nommées RF2 et RS4) et indiquent la présence d'un réseau

de cavités (voir l'encadré ci-dessous). Elles révèlent aussi une région peu dense (RF4) à la base du dôme, pouvant correspondre à la présence de roches altérées par les fluides hydrothermaux. Les régions de densité plus élevées (par exemple RF1 et RF5) révèlent l'existence de roches non altérées, en particulier de l'andésite mise en place lors de la formation du dôme. Des régions de densités intermédiaires (RF3) correspondraient à des barrières rocheuses localisées entre les réservoirs hydrothermaux.

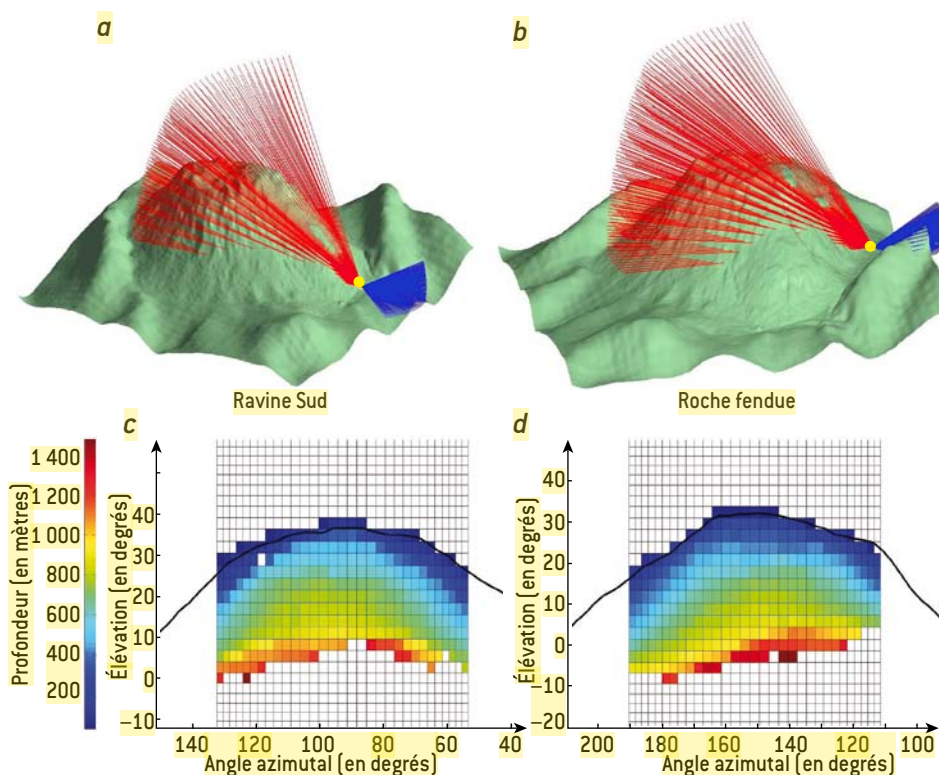
Nos radiographies présentent une bonne résolution spatiale. Elles ont été comparées à des images obtenues à l'aide d'autres méthodes géophysiques : les différentes images révèlent des structures similaires à l'intérieur du volcan. Par exemple, une tomographie électrique avait été effectuée à travers le dôme, apportant des informations sur les structures superficielles. Ce type d'images est sensible à la présence de



Le détecteur de la Soufrière de Guadeloupe a été placé à deux endroits : à l'Est sur le site de Roche Fendue, et au Sud sur le site de Ravine Sud.

Dans chaque cas, les géophysiciens ont obtenu des coupes Est-Ouest (b) et Nord-Sud (c) de la densité moyenne de la Soufrière. Cette densité moyenne est élevée dans certaines zones (en rouge), plus faible dans d'autres (en bleu). Pour réaliser une modélisation tridimensionnelle de la Soufrière, plusieurs relevés pratiqués tout autour du volcan sont nécessaires.

© Modélisations : N. Lesparre et al.



3. LE TÉLESCOPE (position repérée par le point jaune) a été placé à deux endroits différents du volcan pour acquérir des données. Le premier site est celui de Ravine Sud (a), le second celui de Roche fendue (b). Tous les faisceaux de muons (en rouge) que le télescope est capable de détecter ont été calculés. Les auteurs ont également déterminé l'épaisseur de roche que les muons traversent à Ravine Sud (c) et à Roche fendue (d). On constate que les muons permettent de radiographier des épaisseurs de roche supérieures à 1 000 mètres.

fluides conducteurs et révèle les passages où les fluides du système hydrothermal circulent. Cependant, la résolution spatiale de la méthode n'atteint pas celle de la tomographie par analyse du flux de muons.

Après la réalisation de ces deux radiographies, le télescope est resté installé pendant plusieurs mois sur le même site. Durant ce suivi, nous avons enregistré une augmentation du flux de muons à travers certaines zones du volcan, où l'écran rocheux est tel que seuls les muons de haute énergie le traversent. Or, quand on fait la moyenne du flux de ces muons sur quelques jours, on constate qu'il est constant. Si l'on observe une augmentation du flux, c'est nécessairement que la densité du milieu a diminué.

En effet, la région concernée correspond à un site où des fumerolles présentent un regain d'activité. Par conséquent, il est possible qu'à la suite d'une réorganisation de la circulation des fluides à l'intérieur de l'édifice, les roches de la région étudiée se soient appauvries en eau. Cette observation, qui doit être confirmée par des mesures indépendantes, montre l'intérêt de la tomographie par muons pour la surveillance des volcans en continu.

Une surveillance en continu

Ainsi, l'installation d'un télescope sur les flancs de la Soufrière de Guadeloupe a permis de montrer qu'un détecteur adapté au milieu tropical fournit des radiographies intéressantes des entrailles du volcan. La méthode permet de distinguer les hétérogénéités à l'intérieur de l'édifice. Les nouvelles données accumulées devraient permettre de concevoir des modèles plus précis de l'évolution du volcan. Un suivi régulier de cette évolution devrait révéler les changements internes d'opacité. Géophysiciens et volcanologues pourront-ils alors prévoir d'éventuelles éruptions ? C'est bien sûr ce que nous espérons.

Cette expérience a été réalisée sur un volcan de type explosif, mais elle est aussi applicable à des volcans de type effusif, tel l'Etna. Quel que soit le type éruptif d'un volcan, il présente des structures internes plus ou moins denses liées à la présence de cavités, d'une colonne éruptive, de roches massives ou de cendres et de ponces... Nous l'avons souligné, le télescope utilisé à la Soufrière offre de nombreux avantages (résistant, manipulable, précis, etc.), et la méthode

La résolution d'un problème inverse

Les problèmes inverses se posent quand il s'agit de retrouver les propriétés physiques d'un système à partir des résultats des mesures : connaissant les effets, on cherche à déterminer les causes qui les ont produites. Prenons l'exemple de la Soufrière de Guadeloupe.

Si l'on connaissait la configuration des densités à l'intérieur du volcan, on pourrait résoudre un problème direct (relativement simple), c'est-à-dire évaluer l'atténuation des muons pour cette configuration donnée. Dans le cas de la radiographie par les muons, on cherche à retrouver la distribution des densités à l'intérieur du volcan à partir des données dont on dispose : les mesures de l'atténuation du flux de muons. Pour résoudre ce problème dit inverse, on détermine les distributions des densi-

tés qui expliquent le mieux possible les données mesurées.

Mais de nombreux cas de figure sont envisageables. On réunit les possibilités en utilisant l'ensemble des connaissances géologiques acquises sur le volcan. On trouve ainsi une solution plus réaliste. Plusieurs techniques peuvent alors être choisies pour obtenir le meilleur compromis entre la solution la plus réaliste, celle qui explique le mieux les données et celle qui optimise le temps de calcul.

Les problèmes inverses interviennent dans d'autres disciplines, par exemple la médecine lors de la réalisation d'échographies ou de scanners : en recombinaison toutes les images obtenues, et connaissant la densité moyenne normale des tissus traversés, on reconstruit le cerveau

étudié en trois dimensions et on localise de façon précise la présence éventuelle d'une anomalie (tumeur, présence d'un caillot sanguin, etc.).

En médecine, la résolution en imagerie cérébrale, par exemple, est excellente, parce que l'on peut disposer tout autour du crâne du sujet une couronne de détecteurs captant les signaux.

Dans le cas de la Soufrière, nous ne disposons que d'un détecteur que nous avons déplacé dans deux positions orthogonales. La combinaison de ces données ne fournit pas une modélisation tridimensionnelle de l'intérieur du volcan, mais la répartition des masses dans la direction Est-Ouest (Ravine Sud, b, dans l'encadré page 49) et dans la direction Nord-Sud (Roche fendue, c, dans l'encadré page 49).