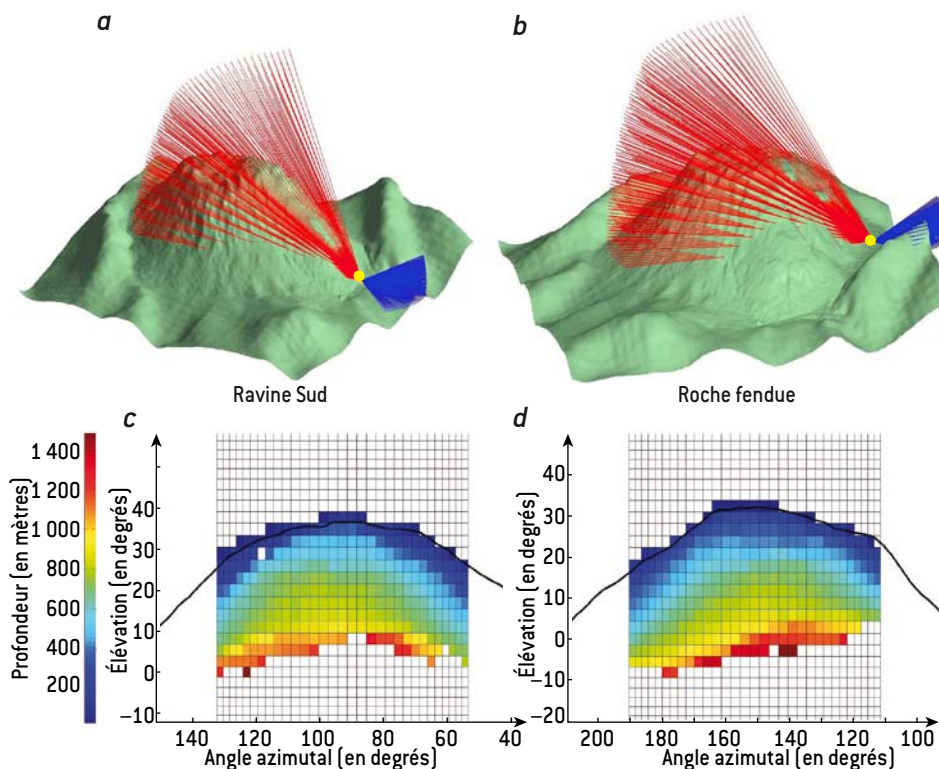




3. LE TÉLESCOPE (position repérée par le point jaune) a été placé à deux endroits différents du volcan pour acquérir des données. Le premier site est celui de Ravine Sud (a), le second celui de Roche fendue (b). Tous les faisceaux de muons (en rouge) que le télescope est capable de détecter ont été calculés. 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 recombinant 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).

permet de tomographier à distance des volcans dangereux, par exemple la Soufrière Hills de Montserrat. Toutefois, la tomographie par muons présente un inconvénient : elle n'est pas applicable partout.

Elle est bien adaptée au dôme de la Soufrière, qui a un diamètre de l'ordre du kilomètre et dont les pentes sont abruptes. Le flux de muons est suffisant pour obtenir en un mois une série de données exploitables. En revanche, un volcan de type bouclier comme le Piton de la Fournaise, à la Réunion, est moins adapté, car sa base est large de plusieurs kilomètres et ses pentes sont plus douces.

Dès lors, le flux de muons est fortement atténué par l'épaisseur de la roche, et il faudrait recueillir les données durant plusieurs mois, voire quelques années, pour commencer à distinguer les structures internes. Lors de l'expérience que nous avons réalisée sur l'Etna, volcan culminant à 3 300 mètres d'altitude, nous avons dû limiter notre étude à l'un des cratères sommitaux, le cratère Sud-Est, dont les dimensions sont comparables à celles de la Soufrière de Guadeloupe.

La tomographie par muons serait-elle applicable à d'autres objets que les volcans ? Oui, à condition de pouvoir aligner le flux de muons cosmiques, l'objet et le détecteur. D'autres applications sont envisageables, et un télescope a récemment été installé dans le laboratoire souterrain de l'Institut de radioprotection et sûreté nucléaire, IRSN, à Tournemire, pour caractériser les roches présentes au-dessus des galeries.

De la Soufrière au suivi des nappes phréatiques

La méthode pourrait servir à caractériser le milieu recouvrant des sites de stockage géologique ou à évaluer des ressources minières. Les mesures effectuées en continu sur la Soufrière ont également montré la possibilité d'observer des variations de densité. La méthode permettrait aussi d'évaluer les dimensions de nappes phréatiques et de suivre leurs fluctuations, ou encore de surveiller les sites de stockage de dioxyde de carbone. Cette toute jeune méthode devrait trouver de nombreuses applications ! ■

BIBLIOGRAPHIE

N. Lesparre *et al.*, Density muon radiography of La Soufrière of Guadeloupe : First results and comparison with other tomography methods, *Geophys. J. Int.*, vol. 190, pp. 1008-1019, 2012.

J. Marteau *et al.*, Muons tomography applied to geosciences and volcanology, *Nucl. Instrum. Methods A*, vol. 695, pp. 23-28, 2011.

N. Lesparre *et al.*, Geophysical muon imaging : feasibility and limits, *Geophys. J. Int.*, vol. 183, pp. 1348-1361, 2010.

J. Paul et J.-L. Robert-Ésil, *Le roman des rayons cosmiques*, Ellipses, 2009.

P. De Wever *et al.*, *Le volcanisme cause de mort et source de vie*, Vuibert, 2003.



À LA DÉCOUVERTE DES JOIES ET DES EXIGENCES DU BEAU MÉTIER DE CHERCHEUR !

Le prix *Le Monde* de la recherche universitaire a distingué 5 lauréats, qui nous racontent les raisons de leur engagement, le déroulement de leur travail et leurs résultats. Cinq « aînés » resituent ces travaux dans le tissu scientifique actuel, composant ainsi un véritable paysage de la science contemporaine.

PRÉFACE DE PIERRE LÉNA

Partenaires du prix



Fondation Charles Léopold Mayer
pour le Progrès de l'Homme

FONDATION
CREDIT COOPERATIF
FONDATION D'ENTREPRISE

Le Monde

SCIENCE

5 JEUNES CHERCHEURS D'AVENIR

en immunologie, cosmologie, sciences de la Terre,
mécanique quantique et sciences cognitives
PRÉFACE DE PIERRE LÉNA

PRIX Le Monde DE LA RECHERCHE

JULIE SCHULTHESS, JESSICA FLAHAUT,
NOLWENN LESPARRE, SIMON PIGEON
ET LAURENT CLERET DE LANGAVANT

Présentés par leurs aînés :
Jean-François Bach, Francis Rocard,
Claude Jaupart, Jean-Michel Raimond
et Olivier Houdé



[PRÉFACE DE LA RECHERCHE LE POMMIER !]

Éditions Le Pommier 2013 - 198 pages - 20 €

Rendez-vous sur notre site internet !



De nombreux oiseaux migrateurs parcourent plusieurs milliers de kilomètres en voyageant la nuit. Comment surmontent-ils une telle épreuve ?

La migration nocturne une épreuve extrême

Paul Bartell et Ashli Moore

Imaginez-vous sur un long vol de nuit. Les turbulences et le manque de confort vous empêchent de dormir. Lorsque vous arrivez à l'aéroport au petit matin, vous êtes déshydraté et de mauvaise humeur, mais une journée de réunions importantes vous attend. Le soir, vous ne souhaitez rien d'autre qu'une douche chaude et un long sommeil. Malheureusement, vous devez retourner à l'aéroport pour un autre vol de nuit.

Vous supporterez un tel programme de temps en temps, mais imaginez que ce soit votre rythme quotidien : travail de jour et vol de nuit, pendant plusieurs semaines d'affilée. Imaginez aussi qu'il n'y ait ni boissons ni nourriture à bord de l'avion. Et dernier détail : c'est vous qui fournissez l'énergie nécessaire au vol en pédalant sur un vélo fixe.

C'est bien sûr impossible. Pourtant, des milliards d'oiseaux accomplissent

une performance similaire deux fois par an, lorsqu'ils migrent entre leurs sites de reproduction d'été et leurs zones d'hivernage. Parmi les 700 espèces d'oiseaux au moins qui nichent en Amérique du Nord, plus de 400 migrent (contre environ 200 en France). Dans le monde entier, les oiseaux migrateurs déclinent plus vite que les autres. Comprendre les défis auxquels ils sont confrontés est capital pour leur protection.

La migration requiert de spectaculaires changements saisonniers de comportement et de physiologie. À la fin de l'été, après l'envol des oisillons, les oiseaux muent et remplacent leurs plumes, anciennes et abîmées, par de nouvelles. En outre, ils se nourrissent abondamment – on parle d'hyperphagie. Cette quête de nourriture se traduit par une activité frénétique à cette époque de l'année. L'hyperphagie

des oiseaux s'accompagne d'importants changements de la masse et de la composition de leur corps, qui devient très gras.

Les oiseaux partent ensuite pour un voyage de plusieurs semaines. Ils passent l'hiver dans des régions plus chaudes, qui leur offrent des ressources suffisantes. Puis ils muent à nouveau, avant une autre période d'hyperphagie de plusieurs semaines. Quand la durée des jours et la température ont assez augmenté, ils repartent en migration vers des sites de reproduction. À leur arrivée, les mâles délimitent des territoires. Des couples se forment, construisent des nids et pondent des œufs. Bientôt, ceux-ci éclosent, et les parents consacrent presque toute leur énergie à nourrir les poussins. Si le temps le permet, ils peuvent s'accoupler de nouveau et avoir une seconde couvée. Puis le cycle recommence (voir la figure 1).



des oiseaux

L'ESSENTIEL

■ **Manque de sommeil, dépense d'énergie considérable, orientation : les défis d'une migration nocturne sont multiples.**

■ **Ils nécessitent diverses adaptations physiologiques et comportementales (engraissement prémigratoire, décalage des cycles hormonaux...).**

■ **Ces adaptations seraient en partie contrôlées par des horloges biologiques internes.**

■ **Leur étude pourrait aider à lutter contre certains troubles métaboliques humains et contre les effets du manque de sommeil.**

À l'évocation du mot migration, on pense souvent à une formation d'oiseaux en V. Cependant, dans de nombreux cas, les migrations d'oiseaux sont difficiles à observer. Ainsi, la plupart des passereaux (des oiseaux chanteurs et d'autres espèces apparentées) migrent de nuit. Quels sont les avantages de telles migrations nocturnes ? Comment les oiseaux en supportent-ils les contraintes physiologiques et de quelle façon s'orientent-ils ? Quand dorment-ils ? Des études récentes ont apporté quelques réponses, mettant notamment en évidence le rôle des horloges biologiques internes.

Les humains prennent des vols de nuit pour les divers avantages qu'ils offrent, tels des billets moins chers ou la possibilité de passer la journée sur le lieu de destination. Dans une étude publiée en 2011, Guy Beauchamp, de l'Université de Montréal, a analysé les migrations diurnes ou nocturnes de multiples oiseaux d'Amérique du Nord. Ses résultats suggèrent qu'un voyage de jour est bénéfique pour les espèces sociales, qui migrent en grands ensembles et restent groupées parce que les oiseaux voient leurs congénères. Les migrations nocturnes, quant à elles, permettraient d'éviter les prédateurs, de minimiser le stress thermique et les pertes d'eau par évaporation, et de réduire les dépenses énergétiques (en raison d'une plus faible turbulence de l'air). Ce serait particulièrement avantageux pour les petits oiseaux ; et, de fait, la plupart d'entre eux migrent de nuit. En outre, voler la nuit libère une partie de la journée pour la quête de nourriture.

Des ombres devant la Lune

Comment sait-on que des oiseaux migrent la nuit ? On a d'abord remarqué que des groupes d'oiseaux changent d'endroit entre le soir et le lendemain matin. Depuis les années 1880, des ornithologues étudient les vols nocturnes en observant la Lune et en attendant que des oiseaux passent devant elle. On répertorie aussi les cris d'oiseaux en vol entendus la nuit : une liste a été publiée en 1899, mais cette technique n'a pris son essor que dans les années 1950, grâce à des avancées en matière d'enregistrement des sons. Lors du développement des radars, dans les années 1940, des « signaux fantômes » se sont révélés être des oiseaux migrants ; depuis, le radar est très utilisé pour l'étude des migrations. Nombre de

© John Churchman/Corbis