

aurait évolué pour survivre dans un environnement défini par la nature du cerveau humain. Dans leurs modèles, le langage est considéré comme un virus qui infecte l'esprit de chaque individu et qui agit comme une entité symbiotique : les êtres humains en auraient besoin pour prospérer, voire pour survivre, tandis que le langage dépendrait d'eux pour se reproduire. Bien que cette hypothèse paraisse séduisante, elle renseigne peu sur les processus régissant l'évolution du langage.

Découvrons-nous un jour l'origine de ce dernier ? Le langage ne laissant pas de traces fossiles, nous ne retrouverons jamais la voie précise qu'il a empruntée. Néanmoins, nous pourrions peut-être reconstituer son développement, au moins à grands traits, en nous fondant sur l'existence de règles universelles qui semblent guider l'évolution vers la complexité. Bien que les langues du monde arborent des différences lexicales et grammaticales notables, la présence de modèles organisationnels généraux (tels que la loi de Zipf ou les réseaux de types petit monde et sans échelle)

suggère que le langage humain constitue la seule solution pour une communication à la fois sûre et flexible.

Une autre approche novatrice consiste à faire évoluer des formes de langage au sein de systèmes robotiques. Au lieu de construire des modèles de langage humain, on emploie des robots équipés de capteurs et d'un cerveau simplifié (une sorte de réseau neuronal). C'est l'approche adoptée par Luc Steels, du laboratoire de l'entreprise Sony (Sony CSL, pour *Computer Science Laboratory*), à Paris, et de l'Institut de biologie évolutive de Barcelone. Il a employé deux systèmes robotiques simples, dotés de vision et capables d'observer un ensemble d'objets et de les nommer. Ces systèmes pouvaient communiquer entre eux et échanger des informations sur les objets environnants.

L. Steels a ainsi tenté de recréer les premiers pas du langage. Ses robots devaient segmenter l'information relative à chaque objet, telles sa couleur ou sa localisation, et choisir un mot pour la nommer. Les termes employés étaient inventés, tels *bozopite* ou *malewina*. Durant la phase de communication,

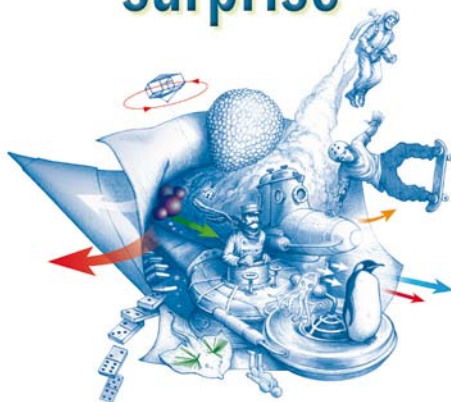
chaque robot tentait de déduire à quel objet ou attribut son compagnon faisait référence. De temps à autre, un accord surgissait et les deux machines commençaient à employer le même terme. À la fin, les robots utilisaient un grand nombre de mots pour indiquer l'orientation spatiale (en haut, en bas, etc.) et d'autres attributs tels que la couleur et la taille. D'autres études avec des robots plus évolués ont aussi montré l'émergence d'une grammaire rudimentaire.

De tels travaux renseignent sur l'importance de l'interaction physique du robot avec le milieu et de la perception qu'il a de lui-même et des autres dans l'espace. Ils permettent aussi d'étudier si la structure du langage humain constitue l'unique solution au problème de la communication complexe, ou seulement une parmi d'autres. Quels types de langages apparaîtront le jour où l'on utilisera des robots plus complexes ? Verra-t-on surgir un langage semblable au nôtre – ce qui confirmerait l'existence de lois universelles –, ou découvrira-t-on une forme de communication totalement nouvelle ? ■

La physique surprise

Jean-Michel Courty • Édouard Kierlik

La physique surprise



Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

Que nous réserve cette Physique surprise ?

Trente-neuf pièces à déguster sans modération, mitonnées par les auteurs. Le style et les croquis, l'actualité et la variété des thèmes vous séduiront, vous amuseront, vous surprendront. Oui, on peut franchir le mur du son en chute libre.

Non, les veines ne sont pas bleues. Oui, on peut séparer le chaud et le froid dans un courant d'air. Alors... Bon appétit !

Éditions Belin/Pour la Science 2013

184 pages – 24 euros – ISBN 978-2-8425-5121-9

Disponible en librairie et sur www.pourlascience.fr

Sonder les **Volcans** avec des rayons cosmiques

N. Lesparre, D. Gibert et J. Marteau



**Prévoir les éruptions volcaniques
reste un défi pour les scientifiques.
La solution viendra-t-elle des muons, issus
du rayonnement cosmique, qui permettent
de radiographier l'intérieur des volcans ?**



L'ESSENTIEL

- Prévoir le jour où aura lieu une éruption volcanique et la puissance de l'événement reste un enjeu essentiel.
- Une nouvelle méthode est à l'étude : la radiographie par les muons.
- Les muons sont issus des particules cosmiques et sont partiellement absorbés par la matière.
- L'analyse du flux des muons qui traversent un volcan permet de l'« ausculter ».
- En suivant l'évolution des entrailles du volcan, les volcanologues devraient être capables de prévoir la survenue d'une éruption.

© Philippe Graud/Syoma Corbis

La Soufrière, massif volcanique situé en Guadeloupe, s'est formée récemment (entre 100 000 et 200 000 ans). Il est toujours actif et dangereux. Il a connu une activité magmatique intense, en témoignent ses multiples dômes, diverses éruptions explosives et des effondrements partiels. Jean-Christophe Komorowski et Georges Boudon, à l'Institut de physique du Globe de Paris, ont montré que de tels événements se sont produits au moins huit fois au cours des 7 800 dernières années. Depuis la formation du dôme actuel, en 1530, la Soufrière a subi six éruptions phréatiques (avec libération d'un énorme panache de vapeur d'eau). Le dernier événement date de 1976-1977 : il s'agissait d'une éruption magmatique avortée, le magma étant remonté à quelques kilomètres sous le volcan. Face à la menace d'une violente éruption, 73 000 personnes avaient été évacuées et étaient restées éloignées de chez elles durant six mois. Depuis, le magma a relâché de façon sporadique des gaz acides dans le système hydrothermal du volcan. L'activité du volcan a progressivement diminué jusqu'en 1992, où elle a augmenté à nouveau, vraisemblablement à cause d'une réorganisation de la circulation des fluides.

Comment prévoir les éruptions ?

Parmi les différents scénarios d'éruptions envisageables, on peut craindre un effondrement du dôme, une éruption phréatique ou une remontée de magma. Risque-t-on une explosion du type de celle de 1980 au Mont Saint-Helens, comme cela s'est déjà produit il y a quelque 3 000 ans ? Prévoir ces événements de façon fiable et suffisamment à l'avance pour évacuer les populations concernées : tel est bien le Graal des volcanologues. Ils disposent de diverses méthodes pour ausculter le volcan et essayer de prévoir quand surviendra un tel événement et quelle en sera la violence. De surcroît, ils en conçoivent de nouvelles : parmi elles, la radiographie par les muons cosmiques.

1. LA SOUFRIÈRE DE GUADELOUPE est un volcan actif, qui est déjà entré en éruption à diverses reprises. En radiographiant ses entrailles à l'aide de muons, pourrait-on mieux prévoir les risques potentiels ?

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.

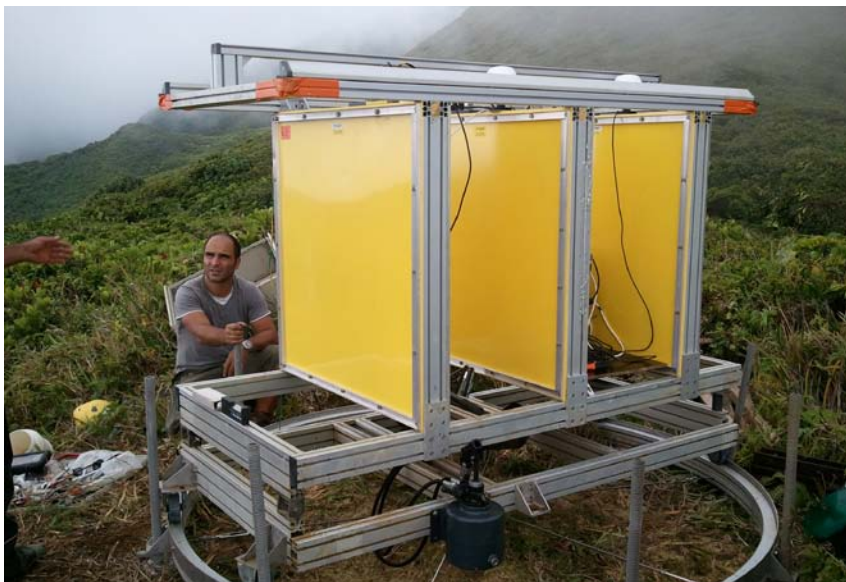
(sa durée de vie est égale à 2,2 microsecondes) et que sa masse est environ 200 fois supérieure (206,8 fois précisément). Les muons sont parfois surnommés électrons lourds. Ce sont ces muons, sur lesquels nous reviendrons, qu'utilisa l'équipe d'Alvarez pour « voir » à travers les épaisses parois de la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

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.

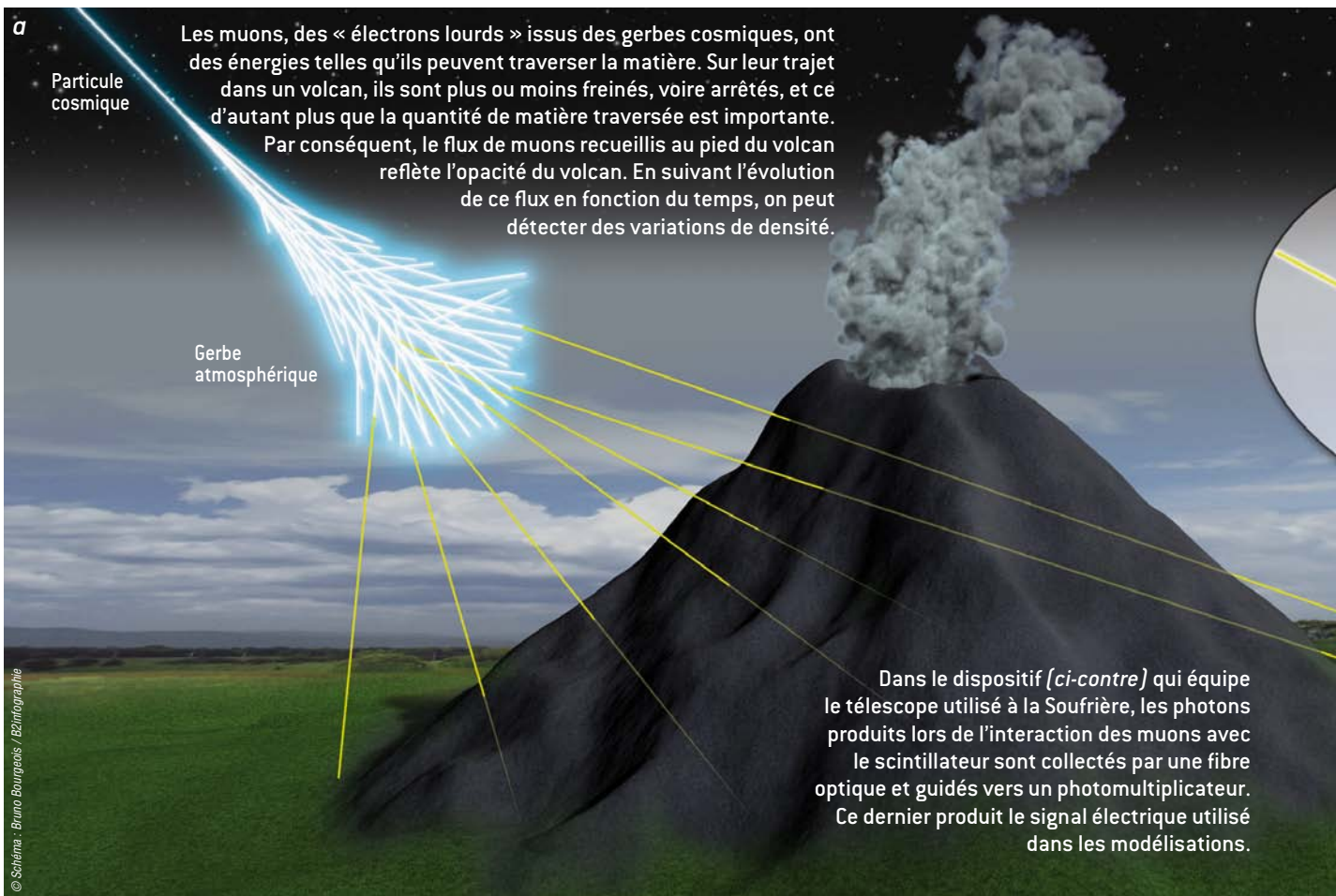
Le flux de muons décroît quand l'opacité augmente, et la mesure de son atténuation reflète les variations de densité à

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



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.

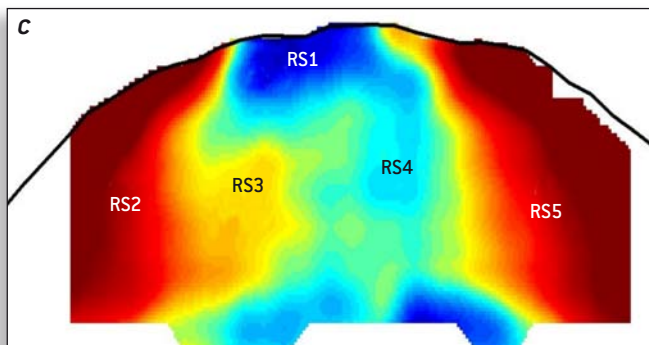
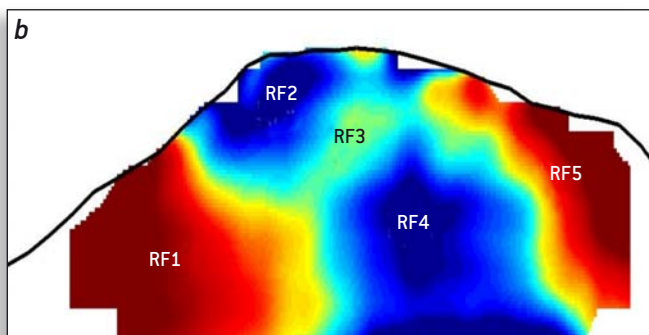
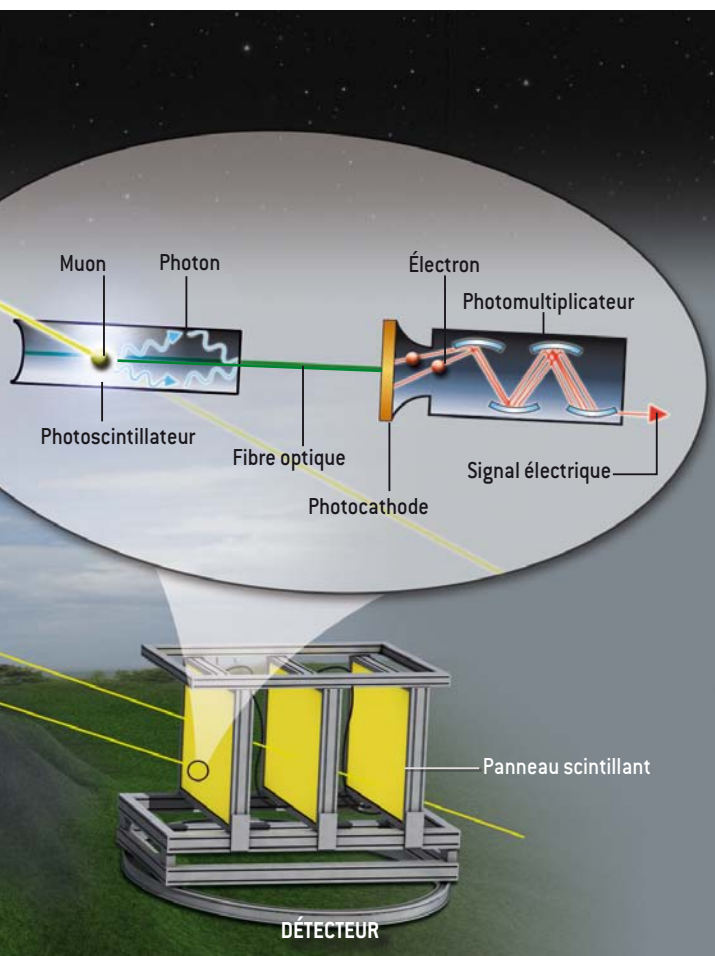
Les radiographies de la Soufrière

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.

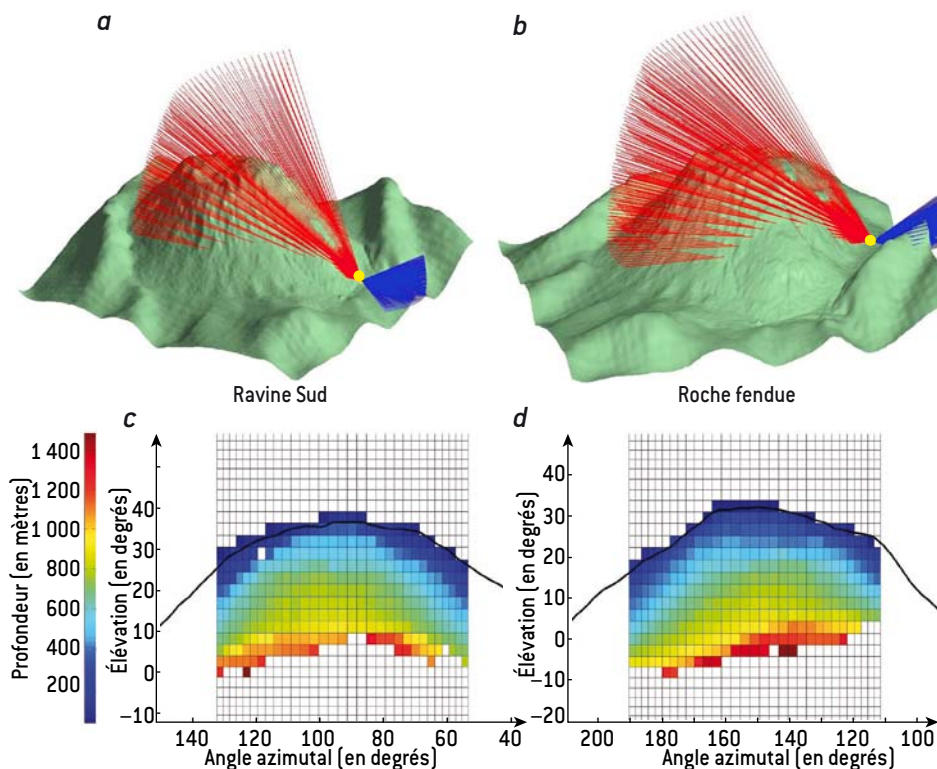
Nos radiographies présentent une bonne résolution spatiale. Elles ont été comparées à des images obtenues à l'aide d'autres méthodes géophysiques : les différentes images révèlent des structures similaires à l'intérieur du volcan. Par exemple, une tomographie électrique avait été effectuée à travers 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 pratiques 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 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

POUR LA
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 LESPARRÉ, 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 PIERRE LÉNA ET 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*).