

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,

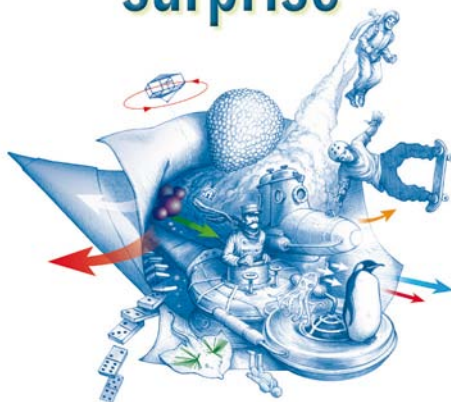
chaque robot tentait de déduire à quel objet ou attribut son compagnon faisait référence. De temps à autre, un accord surgissait et les deux machines commençaient à employer le même terme. À la fin, les robots utilisaient un grand nombre de mots pour indiquer l'orientation spatiale (en haut, en bas, 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

Sciences de la Terre

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 Grand/Syma 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.

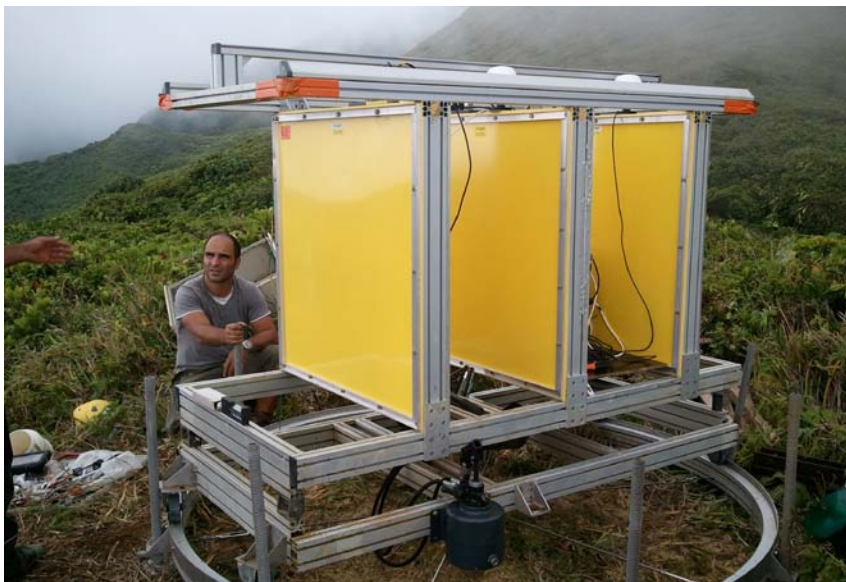
(sa durée de vie est égale à 2,2 microsecondes) et que sa masse est environ 200 fois supérieure (206,8 fois précisément). Les muons sont parfois surnommés électrons lourds. Ce sont ces muons, sur lesquels nous reviendrons, qu'utilisa l'équipe d'Alvarez pour « voir » à travers les épaisses parois de la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