

gravitationnelle continue, elle est compatible avec les contraintes expérimentales actuelles. Cela s'explique par la faiblesse de la gravitation. Entre deux particules élémentaires, cette force est bien trop petite pour être détectable. Elle n'est observable qu'avec des objets macroscopiques, et même une balle de golf, constituée

variantes où, par exemple, chaque flash a une certaine extension spatiale, ou subsiste au-delà de l'instant de son apparition. Cela modifie les prédictions quantitatives, qu'il sera intéressant de confronter avec les expériences. Cette flexibilité pourrait cependant devenir une faiblesse: si tout résultat expérimental est explicable *a posteriori* en changeant le modèle à la marge, l'approche globale perdra son caractère prédictif. Ainsi, alors que le problème initial était l'impossibilité apparente de construire un seul modèle de gravité semi-classique cohérent, on risque de se retrouver au contraire avec trop de solutions.

Une tout autre façon d'aborder le problème de la gravité classique ou quantique est de rechercher des signatures expérimentales qui permettraient de tester la pertinence de la gravité semi-classique indépendamment du modèle. En 2017, une équipe d'expérimentateurs et de théoriciens, menés par Sougato Bose, à l'University College de Londres, ont répondu précisément à ce défi. Ils ont proposé une expérience permettant de conclure quant au caractère quantique ou non de la gravitation.

Pour ce faire, ils exploient une différence qualitative entre toutes les approches semi-classiques cohérentes et une hypothétique théorie quantique. L'idée est d'intriquer une fonction d'onde *via* la force gravitationnelle (voir la figure page 34). Cela n'est possible que si cette force est de nature quantique. Si la force gravitationnelle n'est pas quantique, on n'observera pas d'intrication.

UNE RÉPONSE D'ICI À QUELQUES ANNÉES ?

La difficulté de l'expérience de Bose est de trouver une configuration telle que toutes les autres forces, notamment la force de Casimir, liée aux fluctuations électromagnétiques du vide, sont bien négligeables devant la gravité. La surprise est que les avancées techniques requises sont assez raisonnables en termes de microfabrication, de contrôle quantique des systèmes... Des défis, certes, mais sans commune mesure avec celui d'un accélérateur de particules grand comme le Système solaire, qui semble indispensable pour détecter directement des gravitons.

Dans les années 1980, les physiciens pensaient que la nature quantique ou classique de la gravité était une question théorique. Elle sera peut-être expérimentale dans un futur proche. Le résultat le plus intéressant serait de découvrir que la gravité n'est pas quantique. Cela irait à contre-courant de ce que pensent la majorité des physiciens et des efforts consentis ces soixante dernières années. À l'inverse, si la gravité est quantique, une théorie de la gravité quantique n'en deviendra que plus indispensable. ■



Un objet du quotidien d'environ 10^{23} atomes subirait des milliards de flashes par milliseconde



pourtant de plus de 10^{23} atomes, produit une force gravitationnelle à peine détectable.

Dans cette balle ou dans tout objet macroscopique, les milliards de flashes et d'à-coups gravitationnels qui apparaissent chaque milliseconde donnent aux observateurs l'impression d'un champ gravitationnel évoluant de façon douce et continue. Le phénomène est analogue à la persistance rétinienne, grâce à laquelle une succession de 24 images statiques par seconde nous fait apparaître un mouvement fluide et non saccadé.

Un tel modèle, où les flashes sont la source de la force gravitationnelle, présente un certain nombre de signatures expérimentales potentiellement détectables. Par exemple, chaque flash ajoute de l'énergie cinétique aux particules. Cette petite augmentation d'énergie serait observable sous la forme d'un réchauffement mesurable, par exemple, dans des condensats d'atomes ultrafroids.

Faut-il croire à ce modèle ? Probablement pas : rappelons qu'il ne fonctionne que dans le régime non relativiste. Il sera intéressant de le réfuter par des expériences pour tester les limites de la physique quantique. Mais en développant ce modèle, notre objectif était surtout de fournir un contre-exemple à l'affirmation selon laquelle une théorie hybride, où la gravité serait classique, est impossible à construire. Disposer d'un modèle cohérent, même s'il est *in fine* réfuté, permet de prouver que la question de la quantification de la gravité est bien empirique et se tranchera par l'expérience.

Ce modèle peut aussi servir de point de départ pour construire de nombreuses

BIBLIOGRAPHIE

F. Laloë, **Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?**, EDP Sciences (2^e éd.), 2018.

A. Tilloy, **Ghirardi-Rimini-Weber model with massive flashes**, *Phys. Rev. D*, vol. 97(2), 021502, 2017.

S. Bose et al., **A spin entanglement witness for quantum gravity**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 119(24), article 240401, 2017.

G. Ghirardi, **Collapse theories**, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, Edward N. Zalta (ed.), 2016.

N. Gisin, **Stochastic quantum dynamics and relativity**, *Helv. Phys. Acta*, vol. 62, pp. 363-371, 1989.

Le Ruapehu, un volcan sensible à la Lune



On sait que la Lune ne fait pas pousser les cheveux ni ne déclenche les naissances. Mais l'astre de la nuit agit sur les marées... et peut-être sur les volcans.



Le mont Ruapehu, un puissant volcan de l'île nord de la Nouvelle-Zélande, semble sensible à la Lune pendant ses phases prééruptives.

© Junki Asano - thechatai/Shutterstock.com

L'ESSENTIEL

> Le suivi sismique du volcan néozélandais Ruapehu trahit une sensibilité aux cycles lunaires préalables aux éruptions phréatiques.

> La modélisation mécanique du volcan suggère que l'attraction gravitationnelle de la Lune suffit à moduler

les vibrations de la poche de gaz qui surmonte la colonne de magma.

> Si l'étude d'autres volcans – ceux pour lesquels il existe suffisamment de données sismiques – confirme cet effet, on aurait un moyen potentiel de surveiller les éruptions phréatiques.

L'AUTEUR



CORENTIN CAUDRON
volcanologue
à l'Institut des sciences
de la Terre, à Chambéry

Le 25 septembre 2007, le volcan néozélandais Ruapehu entre en éruption. Une colonne de vapeur et de cendres s'élève rapidement à plus de 4600 mètres au-dessus du lac de cratère. Des vibrations sismiques secouent les alentours pendant de longues minutes. Deux lahars – des coulées de boue formées par l'éjection du lac de cratère et l'interaction de son eau avec la neige – se forment et deux alpinistes, réfugiés à proximité du sommet, sont blessés par des blocs projetés par l'éruption.

L'événement, heureusement, s'est produit durant la nuit et n'a pas fait davantage de dégâts. Comme souvent lors des éruptions phréatiques, aucun signal précurseur n'a pu être mis en évidence. Le volcan était sismiquement silencieux et le lac de cratère bleu turquoise – un formidable outil de surveillance, puisqu'il intègre les flux de chaleur et condense les gaz volcaniques – était particulièrement froid. Les très compétents volcanologues néozélandais nomment poétiquement ces éruptions des *blue-sky events*, c'est-à-dire des « événements surgis d'un ciel bleu » ; en d'autres termes : complètement inattendus. De fait, après avoir soigneusement réétudié les données, ils n'ont décelé ni hausse de température, ni séisme inhabituel, ni première irruption en surface pouvant être vus comme des prémices. Bref, aucun signal géophysique n'a annoncé l'éruption.

Pour autant, avec le géophysicien Tártilo Girona, du Jet propulsion laboratory à la Nasa, en Californie, nous avons réexaminé la situation sous un autre angle et conçu l'espoir de déceler tout de même des signes précurseurs. Selon nous, c'est du côté du ciel que l'on pourrait trouver une solution... L'étude de l'influence gravitationnelle de la Lune sur les ondes sismiques précédant l'éruption

phréatique du Ruapehu suggère en effet une évolution vers une phase explosive.

Depuis la nuit des temps, l'humanité a conscience de l'influence importante de la Lune sur les animaux ou sur les marées ; et des chercheurs s'interrogent depuis des siècles sur son emprise sur des phénomènes géologiques tels que les éruptions volcaniques ou les tremblements de terre. S'il est évident que la Lune exerce une influence sur d'énormes masses d'eau (les marées), pourrait-elle avoir aussi un impact sur cette épaisse mousse visqueuse emplie de gaz qu'est le magma ?

LA LUNE PEUT-ELLE AGIR SUR UN VOLCAN ?

Lors des périodes de pleine lune et de nouvelle lune, les forces gravitationnelles exercées par la Lune et par le Soleil s'alignent, ce qui provoque à la surface océanique des gonflements tidaux plus importants qu'en moyenne, d'où les grandes marées. Au contraire, lors des premiers et derniers quartiers lunaires, ces gonflements sont plus faibles qu'en moyenne. Cette influence lunaire a des effets concrets observables non seulement sur les mers, mais aussi sur la croûte terrestre.

Les pressions d'origine lunaire sur la croûte terrestre sont de quelques kilopascals, c'est-à-dire quelques centièmes de kilogramme par centimètre carré. Elles sont à l'évidence trop faibles pour déclencher une éruption. Néanmoins, leurs effets sur les systèmes volcaniques demeurent mal connus.

Tous les volcans n'entrent pas en éruption en émettant du magma en surface. Certaines cocottes-minute volcaniques – des volcans renfermant d'importantes masses d'eau souterraine – produisent ce que l'on nomme les éruptions phréatiques, éruptions où l'eau souterraine joue un grand rôle. Souvent spectaculaires, elles s'accompagnent d'émissions de gaz, >

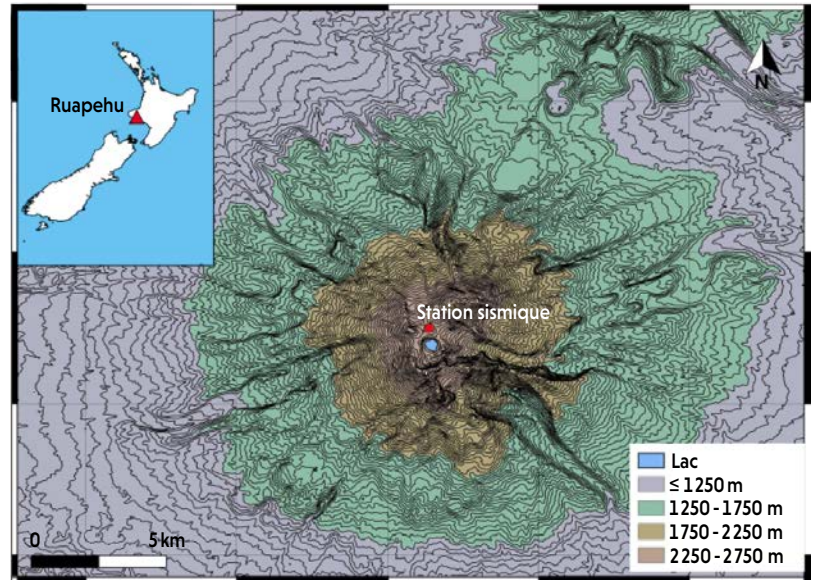
> de fragments de roche et de cendres. Même si elles restent sans commune mesure avec les impressionnantes éruptions magmatiques, comme celle du Kilauea à Hawaï en 2018, elles posent beaucoup de problèmes aux autorités : leur caractère brusque et explosif met les populations en danger, sans qu'on ait le temps de les évacuer. Il suffit de se replonger dans l'inextricable polémique mêlant science et politique qui est née au cours de l'année 1976 à propos de la Soufrière, en Guadeloupe, pour se rendre compte de l'enjeu sociétal de cette question.

Si le nombre de victimes dues aux éruptions magmatiques a fortement diminué au cours des dernières décennies, celui imputé aux éruptions phréatiques ne diminue pas de façon notable. L'absence de signaux précurseurs détectables par des instruments scientifiques explique ce nombre de décès relativement constant. En 2014, au Japon, le volcan Ontakesan a fait plus de 50 victimes dans un pays qui a beaucoup d'expérience et qui est le plus avancé du monde sur le plan technique en matière de surveillance volcanique. Les images de randonneurs tués par des nuées ardentes ont fait le tour du monde, comme celles, en janvier dernier, de skieurs fauchés par des bombes volcaniques sur les pistes d'une station installée sur le volcan Kusatsu-Shirane.

Plusieurs éléments expliquent la difficulté de mettre en évidence des précurseurs d'éruptions phréatiques. Les faibles variations de porosité et les modifications pétrophysiques de la roche, ainsi que les variations subtiles de température et de pression précédant ces éruptions sont ténues et difficiles à détecter. Certaines éruptions phréatiques pourraient en effet se produire parce qu'à proximité de la surface se produit un colmatage par le soufre et les argiles circulant avec les fluides volcaniques. Ces couches relativement imperméables bloqueraient les flux de chaleur et de gaz ascendants et créeraient ainsi les conditions nécessaires à un *blue-sky event*. Dans ce cas, si l'on ne dispose pas d'instruments proches de l'activité principale, située à l'intérieur du volcan, mettre en évidence des signaux précurseurs relève de l'impossible.

Certains volcans sont pourtant équipés d'une pléthore d'instruments allant de stations de mesures continues des flux de gaz ou de température jusqu'à des détecteurs de muons. Dans le cas du volcan Ruapehu, un sismomètre est même installé sur le sommet, à quelques centaines de mètres du lieu d'agitation sismique continue. Il peut donc enregistrer le trémor volcanique. Cette sorte de grondement sismique continu et de faible intensité est due au choc du magma, des roches et des bulles de gaz qu'il transporte contre les parois des cheminées du volcan. La station sismique détruite lors de l'éruption du Ruapehu a enregistré le trémor et tous les événements sismiques perceptibles en

Le mont Ruapehu est un volcan à trois sommets situé sur l'île nord de la Nouvelle-Zélande, dont il constitue le point culminant. Son lac de cratère se remplit d'eau entre les éruptions, ce qui en fait un instrument de surveillance très sensible dans la mesure où sa température et les gaz qui le traversent indiquent l'activité du volcan. Or dans les semaines qui ont précédé le 27 septembre 2007, aucun signe préalable à la violente explosion qui s'est produite n'a été perceptible sur le lac. Cela suggère que la cocotte-minute volcanique que représente le Ruapehu était scellée de façon si étanche qu'aucun gaz ne pouvait remonter au sommet du volcan.



son sommet depuis des décennies. Comme beaucoup de ces données sont directement accessibles aux chercheurs du monde entier, elles constituent une mine d'informations pour essayer d'interpréter le trémor volcanique.

TROIS MOIS AVANT L'ÉRUPTION, UNE SIGNATURE LUNAIRE

Pour ce faire, nous avons mis en œuvre une multitude de techniques d'analyse de données, dont certaines ont été développées dans d'autres domaines que la volcanologie, par exemple dans l'analyse financière. Après avoir étudié plus d'une douzaine d'années de données, nous avons fini par détecter une structure dans le trémor : une synchronisation entre le volcan et la Lune environ trois mois avant l'éruption.

Explicitons un peu notre observation. Les vibrations sismiques du sol du volcan – le trémor – semblent avoir été dans une certaine mesure modulées par les cycles lunaires ; hors période éruptive, le trémor n'est en revanche absolument pas synchronisé avec eux. C'est là, pour le moins, une observation surprenante ! Si la Lune est en effet capable de perturber de grandes masses reposant librement à la surface de la Terre, les forces qu'elle exerce à l'intérieur de la planète sont de trois ordres de grandeur trop faibles pour provoquer une fracture de la roche et, par là, une éruption.

Dès lors, comment expliquer notre observation ? Pourrait-il s'agir d'une structure erratique des données, qui ne se reproduira jamais ? Nous



avons évalué la probabilité de cette possibilité: les chances que la corrélation observée se produise de façon fortuite sont de 1 sur 3,5 millions, c'est-à-dire extrêmement faibles. D'où l'hypothèse suivante: lorsque le volcan est dans un état critique, c'est-à-dire dans un état prééruptif, les forces de marée influenceraient ses tremblements. Si cette hypothèse est correcte, alors il sera en principe possible de déduire du trémor qu'un volcan s'approche du seuil critique.

Pour tester cette idée, nous avons modélisé la mécanique du volcan en état critique afin de tenter de reproduire le phénomène en question et d'étudier les facteurs qui l'influencent.

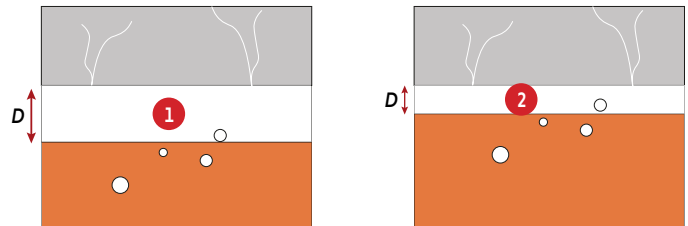
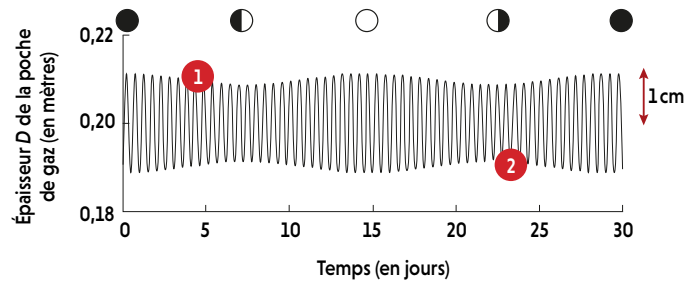
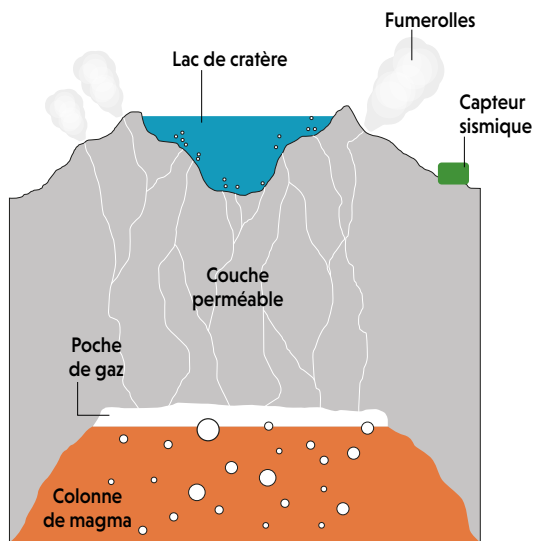
Les chances que la corrélation observée se produise de façon fortuite sont de 1 sur 3,5 millions

Le volcan renferme un conduit vertical où la lave monte et descend, tandis qu'un bouchon solide poreux lié aux particules transportées par les flux de gaz est supposé s'être accumulé juste au-dessus de cette colonne magmatique. Il retient les volatiles libérés par le magma, de sorte qu'une poche de gaz se forme à quelques centaines de mètres de profondeur. Le volume de gaz sous pression qu'elle contient résulte de deux processus en concurrence: d'une part l'arrivée de fluides magmatiques, dont des gaz, depuis les niveaux plus profonds; d'autre part le flux de gaz qui percole à travers les portions superficielles poreuses du volcan. C'est cette poche de gaz sous forte pression qui est la source de l'essentiel de la microactivité sismique: elle répercute à la partie supérieure de l'édifice volcanique les vibrations qui se produisent en son sein lors de l'arrivée ou du départ de quantité de gaz.

Or, même faibles, les forces de marée compriment régulièrement le réservoir magmatique. Si l'on suppose par exemple que le passage de la Lune se traduit (avec un certain retard) par une hausse du niveau du magma, de l'ordre de 1 centimètre, alors l'accroissement de pression dans la poche de gaz se traduira par une augmentation de l'amplitude des vibrations de l'édifice volcanique supérieur, en raison de sa mise sous tension. À l'inverse, une baisse comparable du niveau de magma due à l'éloignement de la Lune se traduira par une diminution de l'amplitude des vibrations de l'édifice volcanique supérieur. Finalement, ces phénomènes se traduiront par une modulation périodique du trémor, corrélée au passage de la Lune.

Comment la poche de gaz peut-elle être si sensible à ces effets *a priori* extrêmement petits? Pour nous en persuader, nous avons essayé de reproduire numériquement la situation au Ruapehu. D'environ 20 centimètres de haut, la poche de gaz sous pression se trouve à quelque 10 mètres sous le fond du lac de cratère, profond de 200 mètres, au-dessus d'une colonne magmatique d'une dizaine de mètres de largeur. Nous avons supposé que l'arrivée permanente d'environ 50 kilogrammes de gaz par seconde met en vibration la poche de gaz sous pression et tenu compte du fait que la station sismologique du mont est distante de quelque 700 mètres. Nous avons alors calculé des sismogrammes s'étendant sur plusieurs cycles lunaires, et constaté que dans les conditions fixées dans notre modèle, l'influence des forces de marée se lit bien dans le trémor.

Une analogie allant dans le sens d'une possible influence de la Lune sur certaines cocottes-minute volcaniques surgit de la comparaison avec le comportement des lacs quand le sol est secoué. À cause de leur caractère fluide et de leur grande surface de contact avec le sol, les lacs répercutent en effet les mouvements telluriques instantanément. >



> Dans une autre étude, nous avons montré qu'en fonction de leur morphologie, les lacs peuvent entrer en résonance (vibrer amplement à certaines fréquences). Ce fort couplage s'observe facilement quand de brusques mouvements des masses d'eau du lac font trembler le sol. Ainsi, on a maintes fois observé que le remplissage brusque des lacs-réservoirs de barrage déclenche de petits tremblements de terre. Par exemple, le 29 septembre 1971, le remplissage du lac-réservoir de l'Alesani, en Corse, a produit un séisme de magnitude 4 dans une zone jusqu'à complètement asismique centrée sur le lac.

Ainsi, c'est l'importance de la poche de gaz du volcan – des dizaines à des centaines de mètres cubes – qui explique le bon couplage entre la vapeur sous pression et la partie supérieure de l'édifice volcanique et, partant, la modulation que la Lune se révèle capable d'imprimer aux vibrations.

UN EFFET QUE LA MODÉLISATION CONFIRME

C'est du moins ce que notre modèle prédit, puisqu'il reproduit une influence des forces lunaires sur le signal sismique lorsque la perméabilité de l'édifice volcanique passe sous une valeur critique, c'est-à-dire lorsque le bouchon retenant le gaz est assez étanche. Nous pensons donc qu'en 2006-2007, le volcan Ruapehu a été sensible aux cycles lunaires parce qu'il était fortement scellé, suite à l'accumulation de particules. D'après nos observations sur le volcan Ruapehu, c'est selon un rythme bimensuel que les forces lunaires de marée agissent sur un édifice volcanique scellé.

Il devient donc envisageable de mettre en évidence l'état des portions superficielles d'un volcan – son scellement essentiellement – en

étudiant la réponse sismique aux excitations lunaires. Différents prérequis sont cependant nécessaires : la présence d'une poche de gaz, l'existence de stations sismiques à proximité directe de celle-ci et la disponibilité de plusieurs années de données sismiques. Nous nous demandons par ailleurs si des volcans très distants des lieux sur la planète où les effets de marée de la Lune sont maximaux seront sensibles aux pressions développées sur le système. Nous explorons donc d'autres jeux de données volcaniques, notamment ceux des volcans Turrialba et Poás, au Costa Rica. À ce stade, la plus grande difficulté consiste à trouver des séries de données longues et continues.

Si d'autres cas corroborent nos observations au Ruapehu, nous aimerions créer un outil de surveillance en temps réel. Mais nous voudrions éviter de fournir un paramètre difficile à interpréter à des observatoires volcanologiques devant prendre des décisions en urgence. Nous collaborons activement avec nos collègues néozélandais responsables de la surveillance volcanique, dont celle du volcan Ruapehu, dans le cadre d'autres projets. Bien qu'ils apprécient notre étude, ils attendent que l'on ait mis en évidence d'autre cas de modulation du trémor sur le même volcan ou sur d'autres avant d'envisager d'implémenter un outil de surveillance en temps réel.

Signalons pour terminer que nous voulons aussi explorer d'autres objets géologiques tels les zones de plaques tectoniques sujettes à des stress intenses, qui pourraient peut-être résonner avec la Lune dans certaines conditions. Aurons-nous une chance d'observer une incidence lunaire sur les signaux sismiques observés dans ces zones ? Cela semble peu probable, mais la recherche avance souvent à l'occasion de tests d'hypothèses *a priori* farfelues. ■

La structure de la cocotte-minute volcanique que représente le Ruapehu est schématisée gauche. Un sismogramme obtenu par modélisation de cet édifice volcanique reproduit les modulations du trémor en fonction des phases de la Lune, avec en (1) une poche de gaz et un trémor augmentés et en (2) une poche de gaz et un trémor diminués.

BIBLIOGRAPHIE

T. Girona, C. Huber et C. Caudron, **Sensitivity to lunar cycles prior to the 2007 eruption of Ruapehu volcano**, *Scientific Reports*, vol. 8, article 1476, 2018.

M. Detay, **Traité de volcanologie physique**, Lavoisier, 2017.

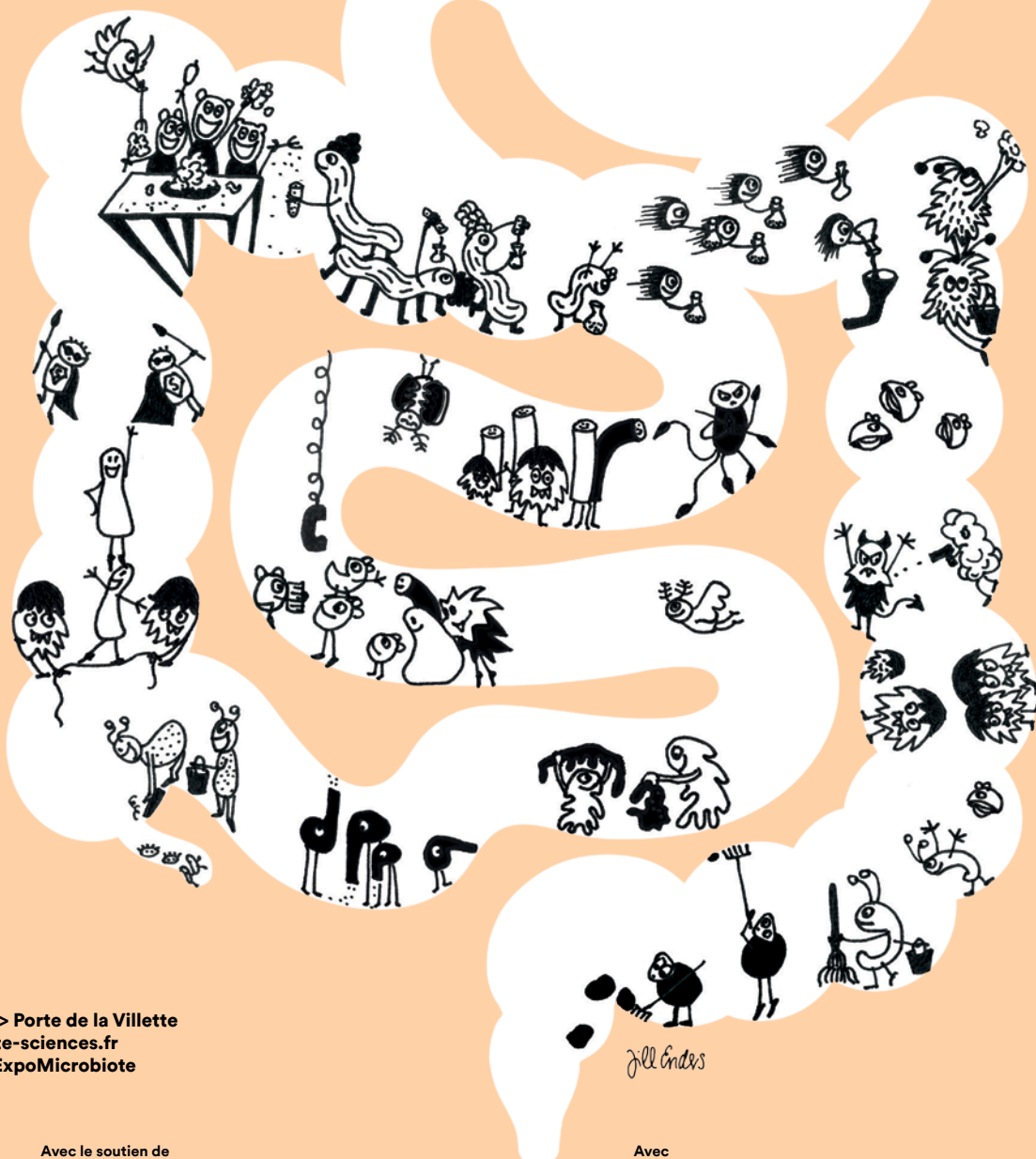
microbiote

d'après *le charme discret de l'intestin*

exposition
4 décembre 2018
— 4 août 2019

cité

sciences
et industrie



M > Porte de la Villette
cite-sciences.fr
#ExpoMicrobiote

En partenariat avec

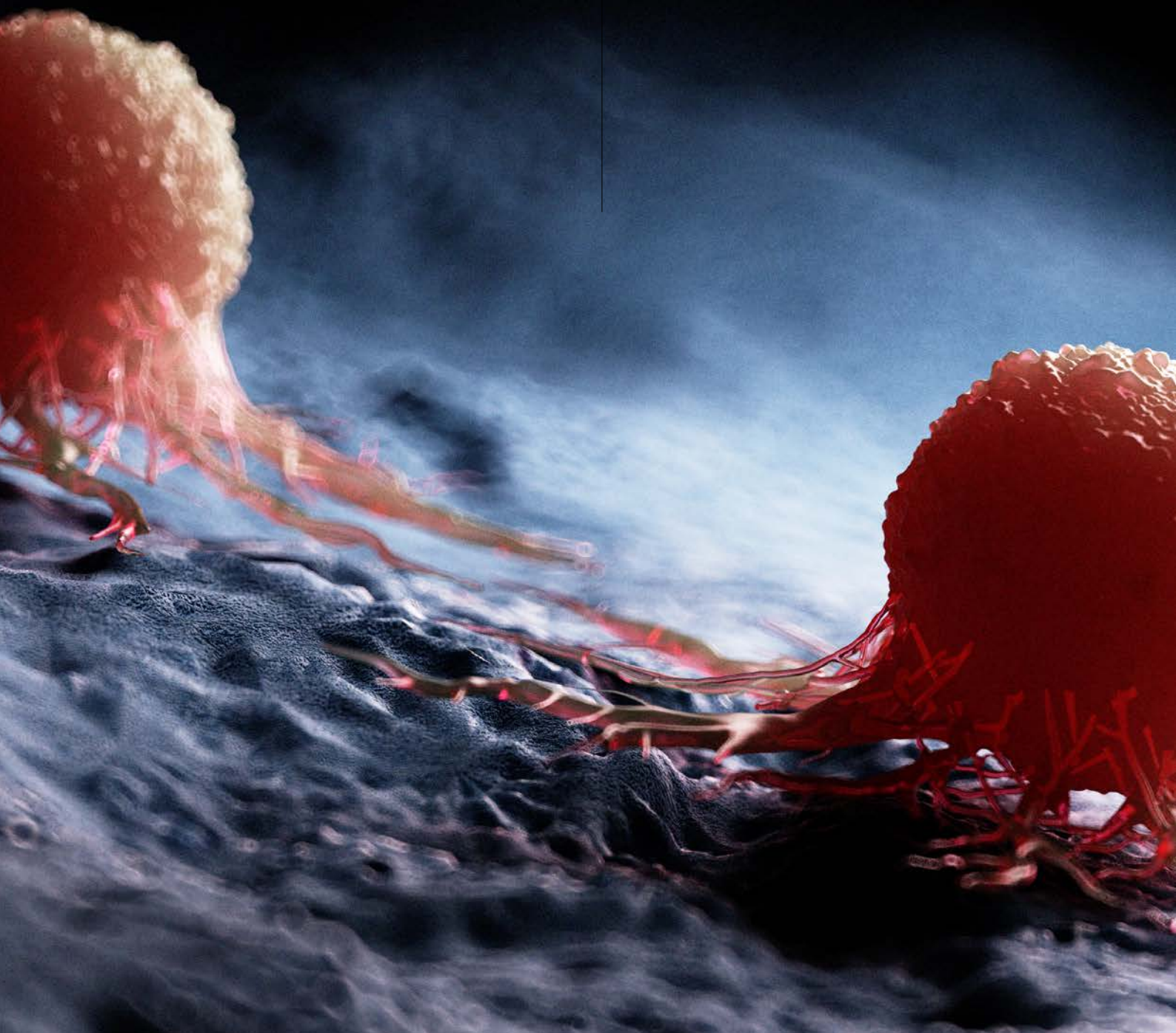


Avec le soutien de



Avec





L'ESSENTIEL

> Des arbres inspirés de la biologie évolutive retracent l'histoire du cancer d'un patient en révélant le degré de parenté qui relie les cellules cancéreuses des différents tissus.

> Des mutations précoces de certains gènes « pilotes » semblent responsables de la formation à la fois de la tumeur principale et de ses métastases.

> Les métastases pourraient être dues à d'autres facteurs que les mutations, comme des modifications épigénétiques ou simplement le microenvironnement biologique de la cellule.

> Dans le futur, tracer l'arbre des mutations chez un patient donné devrait aider les oncologues à traiter les cancers résistants.

L'AUTEUR



JEFFREY TOWNSEND
maître de conférence
à l'École de santé publique
de l'université Yale