

habituellement nécessaire au déclenchement des réactions chimiques.

Un avantage majeur du refroidissement à un seul photon est qu'il s'applique à l'hydrogène et ses isotopes, le deutérium (son noyau est composé d'un proton et d'un neutron) et le tritium (un proton et deux neutrons). Au prix de grands efforts, Dan Kleppner et Thomas Greytak, du MIT, ont réussi à la fin des années 1990 à piéger et refroidir l'hydrogène par des méthodes de cryogénie et de refroidissement par évaporation. Mais ils n'ont jamais pu en faire autant pour le deutérium ou le tritium. Le refroidissement à un seul photon, parce qu'il s'appuie sur un dispositif relativement simple, est adapté au piégeage et au refroidissement des trois isotopes de l'hydrogène.

Le piégeage et le refroidissement du tritium pourraient offrir une réponse à l'une des grandes questions actuelles de la physique des particules : quelle est la masse d'un neutrino ? Le tritium est un isotope radioactif : il se transforme en hélium 3 quand l'un de ses neutrons se désintègre par désintégration bêta pour former un proton, en émettant un électron et un antineutrino (l'homologue pour l'antimatière du neutrino). En mesurant avec précision l'énergie de l'électron émis, les physiciens pourraient déterminer l'énergie disparue, correspondant à l'antineutrino (qui peut traverser l'appareil sans être détecté), et donc sa masse, en principe identique à celle du neutrino.

Séparation d'isotopes, nanostructures...

Les mêmes méthodes pourront s'appliquer aux atomes d'antihydrogène, constitués d'un antiproton et d'un positron (l'antiparticule de l'électron), obtenus récemment au CERN, le laboratoire européen de physique des particules, près de Genève. Un tel antiatome est extrêmement délicat à manipuler, car l'antimatière disparaît très vite, en émettant un éclair d'énergie, dès qu'elle entre en contact avec la matière.

Ici, la méthode du jet supersonique ne peut pas être utilisée comme point de départ. Un faisceau d'antihydrogène pourrait être produit en lançant des antiprotons dans un nuage de positrons, puis arrêté et refroidi avec notre démon de Maxwell. Les expériences sur l'antihydrogène devraient répondre à une question sim-

ple : l'antimatière tombe-t-elle comme la matière ? En d'autres termes, la gravité agit-elle de la même façon sur tous les objets de même masse ?

D'autres applications importantes sont envisageables. Les isotopes de la plupart des éléments peuvent être séparés à l'aide d'un appareil appelé calutron, inventé par Ernest Lawrence dans le cadre du projet Manhattan. Les isotopes, de masses légèrement différentes, y sont séparés au moyen d'un champ électrique, comme

REFROIDIR DES GAZ DE TRITIUM permettrait de répondre à une question fondamentale : quelle est la masse du neutrino ?

dans un spectromètre de masse. Le seul calutron encore actif à l'heure actuelle se situe en Russie, cette méthode étant assez inefficace. On pourrait appliquer le concept du démon de Maxwell, semblable à celui qui fonctionne pour le refroidissement, à la séparation d'isotopes au sein d'un même faisceau : dans ce cas, la porte laser devrait trier les différents isotopes. Cette méthode, plus efficace que les calutrons, pourrait produire des isotopes comme du calcium 48 ou de l'ytterbium 168, utiles en médecine et en recherche fondamentale. Ne produisant que de faibles quantités d'un isotope donné, elle ne présenterait aucun risque de prolifération nucléaire.

Par ailleurs, la méthode des jets supersoniques permettrait de construire des structures nanométriques. Au lieu d'utiliser des champs magnétiques pour ralentir les atomes, on pourrait les utiliser pour focaliser les faisceaux d'atomes, de la même façon qu'une lentille focalise la lumière. Il serait possible d'atteindre une résolution de un nanomètre seulement, voire moins. De tels faisceaux pourraient déposer des atomes et former des structures plus fines qu'il n'est aujourd'hui possible avec la photolithographie, utilisée pour fabriquer les puces électroniques. La construction de structures nanométriques, atome par atome, par une approche ascendante plutôt que descendante (comme c'est généralement le cas en nanosciences), constitue un nouveau domaine que j'ai nommé « atomoscience ».

Le zéro absolu reste une température toujours inaccessible, mais le chemin qui nous en rapproche est pavé de nombreuses découvertes. ■

✓ BIBLIOGRAPHIE

M. Jerkins *et al.*, Efficient isotope separation by single-photon atomic sorting, *Physical Review A*, vol. 82, n° 3, 033414, 2010.

E. Narevicius *et al.*, Stopping supersonic beams with a series of pulsed electromagnetic coils : an atomic coilgun, *Physical Review Letters*, vol. 100, n° 9, 093003, 2008.

A. Ruschhaupt, J. G. Muga et M. G. Raizen, One-photon atomic cooling with an optical Maxwell demon valve, *Journal of Physics B*, vol. 39, pp. 3833-3838, 2006.

M. Raizen *et al.*, Compression of atomic phase space using an asymmetric one-way barrier, *Physical Review Letters*, vol. 94, n° 5, 053003, 2005.

Y. Castin, Les atomes ultrafroids, *Pour la Science*, n° 300, octobre 2002.

L. Szilárd, Über die Entropieverminderung in einem thermodynamischen System bei Eingriffen intelligenter Wesen, *Zeitschrift für Physik. A*, vol. 53, n° 11-12, pp. 840-856, 1929.

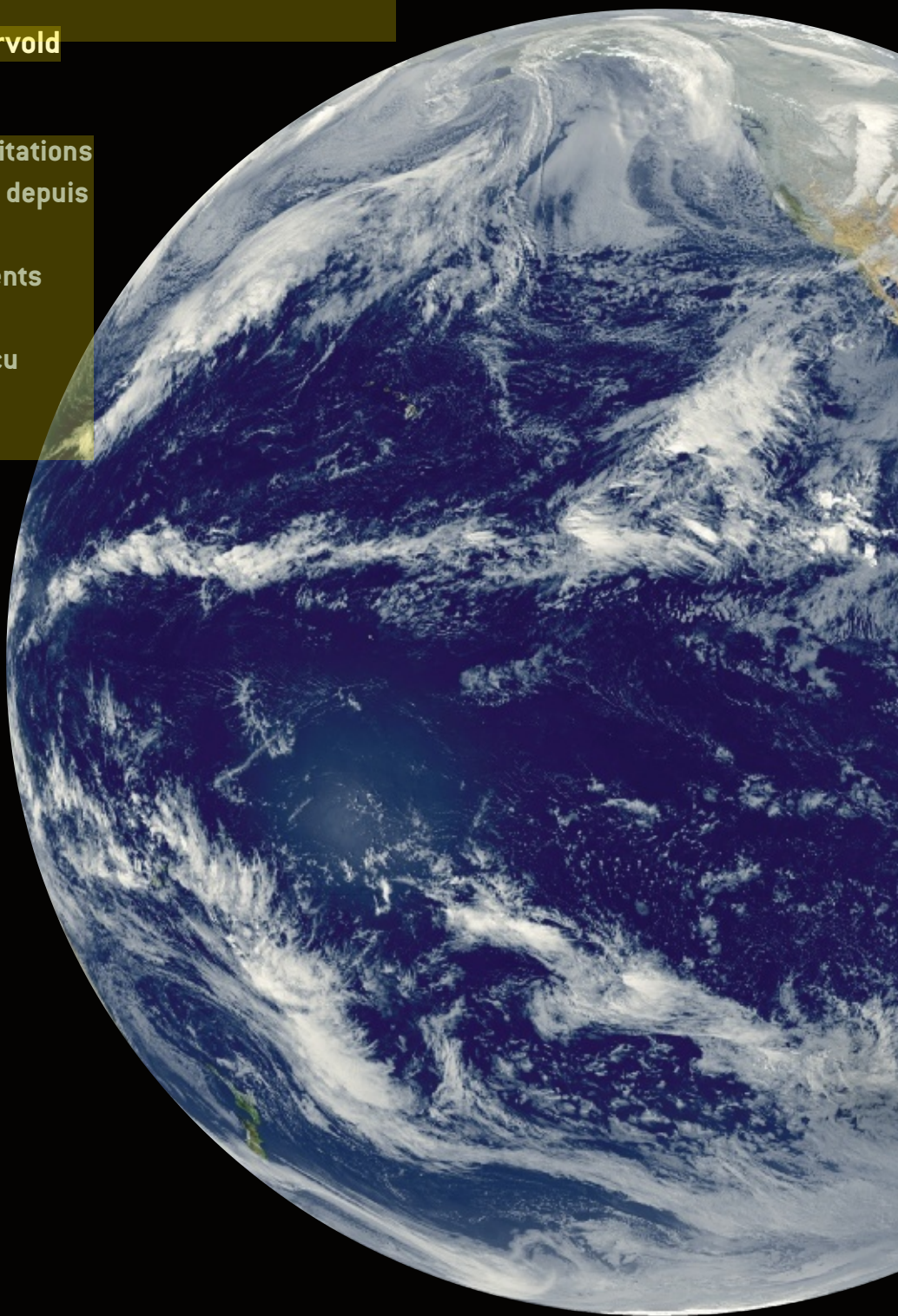
Une bande de précipitations **mouvante**

Julian Sachs et Conor Myhrvold

En cartographiant les précipitations équatoriales sur le Pacifique depuis l'an 800, les scientifiques reconstituent les déplacements de la ceinture pluviale. Ils obtiennent ainsi un aperçu de l'évolution du climat tropical d'ici 2100.

L'ESSENTIEL

- ✓ La bande de précipitations qui ceinture la Terre se décale au gré des changements de la température atmosphérique. Ce déplacement modifie les schémas de précipitations dans le monde entier.
- ✓ Les sédiments prélevés au fond des lacs des îles du Pacifique indiquent que cette bande se situe aujourd'hui à une latitude comprise entre trois et dix degrés de latitude Nord, position jamais atteinte depuis au moins 1 200 ans.
- ✓ Si le réchauffement climatique se poursuit au même rythme, ce décalage vers le Nord pourrait s'accroître de cinq degrés d'ici 2100, asséchant les terres de millions d'agriculteurs en Équateur, en Colombie et ailleurs.





Notre expédition ne se déroulait pas tout à fait comme prévu : le moteur de notre embarcation se mit à hoqueter puis s'arrêta brusquement, en pleine nuit. Le silence n'avait jamais été aussi menaçant. Traverser l'océan à bord d'un petit bateau de pêche en provenance des îles Marshall, au beau milieu du Pacifique Nord, sembla soudain une initiative bien imprudente.

Les deux climatologues que nous sommes revinrent néanmoins sains et saufs de cette traversée, et de bien d'autres encore. Leur objectif commun pouvait paraître à première vue irréalisable : reconstituer l'histoire des précipitations au niveau d'un océan. Car nous souhaitons comprendre comment l'accumulation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, l'élévation de la température de l'air et la modification des précipitations tropicales sont susceptibles de bouleverser les futurs schémas climatiques. C'est pourquoi nous avons navigué d'une île de l'océan Pacifique à l'autre.

Certains phénomènes climatiques actuels sont bien connus, tels El Niño et La Niña qui touchent tout l'océan Pacifique. Une autre structure climatique, moins bien étudiée mais tout aussi importante, consiste en une bande de fortes précipitations qui ceinture la Terre au niveau des tropiques ; elle migre vers le Nord ou le Sud au gré des saisons, en fonction de la déclinaison du Soleil (l'angle que font ses rayons avec le plan de l'équateur). L'espace où elle évolue porte le nom de zone de convergence intertropicale (ZCIT).

Tout changement de température sur la Terre, dû au rayonnement solaire incident ou à l'accumulation de gaz à effet de serre, peut influencer sur cette ceinture pluvieuse qui alimente les terres agricoles équatoriales. Elle joue un rôle primordial sur le cycle des moussons en Asie, en Afrique et en Inde, ainsi que sur le transport de la chaleur de l'équateur vers les pôles. La fréquence et la puissance d'El Niño et de La Niña, tout comme l'intensité et la durée de la saison des ouragans dans le Pacifique et l'Atlantique, peuvent être influencées par ses déplacements. Les variations pluviométriques qui découleraient d'un décalage définitif de la bande altéreraient profondément le milieu équatorial et auraient des effets à l'échelle planétaire. Or nous avons de bonnes raisons de penser que cette bande est en train de se déplacer.

Il y a peu de temps encore, les climatologues ignoraient si les fluctuations

annuelles de la ligne médiane de cette bande – entre trois et dix degrés de latitude Nord au-dessus de l'océan Pacifique – correspondaient à sa gamme historique. Désormais, grâce aux mesures de terrain effectuées aux mêmes latitudes que la zone de convergence intertropicale, nous avons pu évaluer sa position au cours des 1 200 dernières années. Durant les quatre derniers siècles, elle est remontée de cinq degrés vers le Nord, soit environ 550 kilomètres. Cette découverte nous a permis de prendre conscience qu'une faible augmentation de l'effet de serre peut considérablement modifier les précipitations tropicales.

Retracer l'histoire des précipitations

Dorénavant, il nous est possible d'anticiper le déplacement de la zone de convergence intertropicale, en réaction au réchauffement climatique, d'ici 2100 : les modifications des précipitations sur les zones équatoriales auront de probables répercussions sur les conditions météorologiques et la production agricole dans des régions de latitudes plus élevées (en Asie, en Amérique centrale et dans le Sud des États-Unis). Certains pays pourraient bénéficier de ces changements, mais beaucoup d'autres devront faire face à un climat plus aride.

Avant que nous ne commencions à reconstituer l'historique des précipitations, les chercheurs disposaient de très peu de données sur la localisation de la zone de convergence intertropicale pendant le dernier millénaire. Celle-ci évolue près de l'équateur et peut atteindre des dizaines ou des centaines de kilomètres de largeur, en fonction des conditions locales et de l'ensoleillement saisonnier. Comme elle est très active au-dessus du Pacifique, cette région paraît idéale pour traquer ses mouvements. La bande formant une ceinture autour de la Terre, la tendance au-dessus de l'océan constitue un bon indicateur des changements intervenant au niveau planétaire.

Afin d'estimer le niveau d'insolation passé, les scientifiques mesurent les concentrations en certains isotopes, tels le carbone 14 présent dans les cernes de croissance des arbres, ou le béryllium 10 relevé dans les échantillons de glace des régions polaires. On peut également retracer l'évolution des gaz à effet de serre à partir des bulles d'air piégées dans les carottes de glace extraites au niveau de ces mêmes régions polaires. En comparant l'insolation et le niveau

LES AUTEURS



Julian SACHS, océanographe, est maître de conférences à l'Université de Washington, à Seattle (États-Unis). Conor MYHRVOLD, étudiant en géosciences à l'Université de Princeton, a été l'assistant et le photographe de Julian Sachs lors de ses récentes expéditions.

des gaz à effet de serre avec la position de la zone de convergence intertropicale au cours des siècles, on pourrait en déduire l'impact probable au XXI^e siècle de l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre sur les précipitations tropicales.

De nombreux indices permettent d'évaluer la température globale au cours du dernier millénaire. Deux périodes se distinguent : vers l'an 800, les températures étaient globalement similaires à celles de la fin du XIX^e siècle, puis elles ont augmenté de 800 à 1200, atteignant des niveaux équivalents à ceux du XX^e siècle. Elles se sont progressivement stabilisées, puis ont chuté pendant le Petit Âge glaciaire (de 1400 à 1850). Ces deux dernières décennies, l'activité solaire est restée stable, alors que les températures et la concentration atmosphérique de dioxyde de carbone – le gaz à effet de serre le plus abondamment émis par l'homme – atteignaient tous deux des niveaux jamais égalés en 1 200 ans.

Quand nous avons commencé nos travaux, le climat tropical passé était peu connu. Si les sédiments marins fournissent de précieuses données climatiques couvrant plusieurs milliers d'années, ils s'accumulent trop lentement pour avoir enregistré assez d'informations sur le der-

nier millénaire. De même, de nombreux coraux fabriquent lors de leur croissance des bandes annuelles, à la manière des cernes d'arbres, mais leur vie dépasse rarement 300 ans. On manque donc de données allant de 300 à 1 000 ans dans le passé.

Cartographier les précipitations passées permettrait de combler les lacunes sur la position de la zone de convergence intertropicale au cours du dernier millénaire. Les lacs et les étangs fermés des petites îles parsemant le Pacifique sont à même de raconter cette histoire.

Le passé au fond des lacs

Lors des six dernières années, nous avons collecté des dizaines de carottes de sédiments au fond des lacs d'îles lointaines situées dans l'océan Pacifique, à des latitudes voisines de celle de la ceinture pluviale. Il est possible de définir la position de la zone de convergence intertropicale sur une durée donnée en localisant les zones ayant subi de fortes précipitations au cours de cette période : des variations pluviométriques simultanées aux mêmes latitudes, vers le Nord ou le Sud, signalent un déplacement général de la bande de précipitations au niveau de l'océan.

Prélever des échantillons sur le terrain est une aventure pleine de péripéties, de problèmes de matériel, où la barrière de la langue s'ajoute à la difficulté d'accéder à certains endroits. Par exemple, lorsque nous sommes arrivés à Majuro, capitale de l'archipel des îles Marshall, la compagnie aérienne locale, *Air Marshall Islands* – que les habitants appellent tendrement *Air Maybe* (« Air Peut-être ») – avait deux avions en panne sur une flotte composée de... deux appareils.

Pour prélever une carotte de sédiments, on enfonce, on pousse et on visse un long tube creux dans les dépôts accumulés au fond d'un lac. À peu près tous les sites sur lesquels nous avons effectué des carottages ont une séquence sédimentaire particulière. On peut tomber sur des couches rouge vif de plusieurs mètres d'épaisseur : de consistance gélatineuse, elles sont constituées de cyanobactéries, comme dans le lac de l'île Washington (îles de la Ligne). On trouve aussi des boues brunâtres, riches en sulfure d'hydrogène (qui sent mauvais!), contenant des fragments de feuilles de palétuvier, ou encore des couches de coquilles de mollusques bivalves, comme dans les îles Palaos.

Les algues, des pluviomètres biologiques

Les algues tirent tout leur hydrogène de l'eau dans laquelle elles vivent. La mesure de la concentration des deux isotopes stables de l'hydrogène – protium (H) et deutérium (D) – dans les lipides des algues présentes dans les sédiments lacustres renseigne sur leur environnement passé, et notamment sur la quantité de pluie tombée au cours de leur vie.

Chez de nombreuses algues, le rapport isotopique D/H est proportionnel au rapport D/H de l'eau, qui reflète l'importance des précipitations par rapport à l'évaporation du lac. Dans la zone d'influence de la bande de précipitations, où les pluies sont fréquentes et abondantes, le rapport D/H de l'eau des lacs ou de la mer est faible. Hors de cette zone, l'évaporation peut être supérieure aux précipitations, ce qui correspond à un rap-

port D/H élevé (H₂O, plus léger que D₂O, s'évapore plus facilement). Ainsi, en mesurant les rapports D/H des lipides des algues extraites des sédiments, on évalue les précipitations au cours des siècles passés.

Les algues ajustent également le rapport D/H dans leurs lipides en fonction de la salinité du milieu. Les conditions particulières de l'île Christmas ont fait office d'expérience naturelle. Cette île abrite un certain nombre de retenues d'eau dont la température, le niveau d'ensoleillement, les substances nutritives et le rapport D/H sont identiques ; seuls leurs niveaux de salinité diffèrent. La relation entre salinité et rapport isotopique a ainsi pu être étalonnée. Nous avons découvert que le rapport D/H des lipides produits par les cyanobactéries croît linéairement avec la salinité.

Étant donné que la salinité des retenues d'eau saumâtre diminue quand les précipitations sont abondantes et augmente quand il fait sec, l'effet de la salinité sur le rapport D/H des lipides agit dans le même sens que le volume des précipitations évoqué plus haut. Le rapport D/H des lipides des algues constitue donc un indicateur sensible des changements hydrologiques.

À eux seuls, ces résultats ne valent pas grand-chose s'ils ne sont pas accompagnés de dates. L'âge d'un sédiment est déterminé par deux isotopes radioactifs, le carbone 14 et le plomb 210, dont la demi-vie est, respectivement, de 5 730 et 22,3 ans. En comparant les rapports isotopiques de l'hydrogène à différentes dates, les auteurs ont pu reconstituer les variations pluviométriques sur les 1 200 dernières années.