

inaperçu, car il recoupe la valeur spectaculairement précise obtenue en 2010 à l'institut Paul Scherrer, en Suisse, par la collaboration internationale Crema: $0,84087 \pm 0,00039$ femtomètre. Menée par Randolph Pohl, de l'institut Max-Planck de Garching, en Allemagne, avec notamment la participation de l'équipe de François Nez, du laboratoire Kastler-Brossel, à Paris, cette vaste collaboration avait mesuré la transition 2S-2P en utilisant des atomes d'hydrogène où l'électron avait été remplacé par un muon, une particule similaire mais 207 fois plus lourde. Cette substitution a pour effet d'augmenter l'influence de la taille du proton dans l'énergie mesurée, d'où l'extrême précision atteinte. Ainsi, le résultat canadien montre que le «petit rayon» obtenu en 2010 se confirme lorsqu'on applique les techniques d'aujourd'hui à la mesure de la transition 2S-2P dans l'atome d'hydrogène ordinaire.

Cependant, une série d'autres mesures conduisent à un «grand rayon» du proton. Ce fut le cas en 2018 du rayon déduit de la mesure, par le laboratoire Kastler-Brossel, de la transition notée 1S-3S: $0,877 \pm 0,01$ femtomètre. Ce résultat était en accord avec ceux déjà obtenus ailleurs en mesurant les transitions 2S-4S et 2S-8S. À toutes ces mesures s'ajoute une mesure non spectroscopique effectuée par l'équipe de Jan Bernauer, de l'université de Mayence, en Allemagne, qui a étudié la diffusion d'électrons sur des protons: $0,875 \pm 0,06$ femtomètre. Étant donné la confusion due à la multiplication des mesures, le Comité de données pour la science et la technologie a résumé par une moyenne l'ensemble des mesures aboutissant à un «grand rayon»: sa valeur est de $0,879 \pm 0,005$ femtomètre.

En résumé, deux groupes de résultats s'opposent, l'un autour de 0,84 femtomètre et l'autre autour de 0,88 femtomètre. Étant donné l'extrême précision de la mesure portant sur l'hydrogène muonique, peut-on conclure que le petit rayon est le bon? En 2017, la mesure à Garching de la transition 2S-4P a produit un petit rayon et l'on attend du même institut les résultats de mesures portant sur les transitions 2S-6P et 1S-3S. Le bruit court qu'une mesure non spectroscopique (par diffusion d'électrons) non encore publiée a donné un petit rayon. L'énigme reste entière, et l'affaire est à suivre. ■

FRANÇOIS SAVATIER

N. Bezginov et al., *Science*, vol. 365, n° 6457, pp. 1007-1012, 2019

Maladie d'Alzheimer : un diagnostic plus précoce ?

Aujourd'hui, le diagnostic précoce de la maladie d'Alzheimer n'est pas fiable à 100 %. Récemment, cependant, l'équipe de Maxime Bertoux, de l'université de Lille, a proposé une nouvelle méthode fondée sur l'analyse des sillons du cerveau. Qu'en attendre ? Le point avec Bruno Dubois, directeur de l'IM2A, à l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière, à Paris.



Propos recueillis par MARIE-NEIGE CORDONNIER

BRUNO DUBOIS
directeur de l'Institut
de la mémoire et de
la maladie d'Alzheimer
(IM2A), à Paris

Comment fonctionne cette nouvelle méthode de diagnostic ?

Ces travaux sont de grande qualité. Chez 51 patients atteints de la maladie, les chercheurs ont analysé l'anatomie des sillons du cerveau – les circonvolutions du cortex – à l'aide d'un logiciel développé au CEA, qui permet de générer une sorte de moule numérique du cerveau à partir d'une imagerie par résonance magnétique (IRM). En étudiant la largeur des sillons et l'épaisseur du cortex alentour, ils ont ainsi remarqué un lien entre la largeur d'un groupe de sillons et la maladie. Ils ont ainsi pu retrouver l'état de santé des participants dans 91 % des cas et, d'un point de vue fondamental, montrer qu'il existe une relation entre le siège de l'atrophie cérébrale et les symptômes, ce qui est très intéressant en soi. Toutefois, la vraie question est : comment se situe cet outil dans les problématiques cliniques et de recherche actuelles ?

L'approche est alors moins concluante ?

Les chercheurs le disent eux-mêmes : la sensibilité de leur outil est d'autant plus grande que les patients sont à un stade avancé de la maladie. Et ce n'est pas surprenant : la largeur des sillons et l'épaisseur du cortex sont directement liées à la mort des neurones. Leur outil fournit donc une mesure indirecte de l'atrophie. Ainsi, plus le stade est précoce et plus le diagnostic est incertain. Or on cherche aujourd'hui à développer des outils sensibles à des stades très précoces. Et pour cela, on ne peut s'appuyer uniquement sur des marqueurs morphologiques, car ils ne sont plus assez spécifiques. Ce n'est pas parce que l'on détecte une atrophie que l'on est certain qu'elle est liée à la maladie d'Alzheimer. Elle pourrait être due à un accident vasculaire cérébral, par exemple.

De quels autres marqueurs dispose-t-on ?

On a recours à des marqueurs dits « physiopathologiques » : les concentrations de peptide bêta-amyloïde et de protéine tau. Durant la maladie, ces deux protéines s'accumulent et s'agrègent dans les neurones jusqu'à les détruire. Elles constituent des signatures formelles de la maladie – les seules à ma connaissance, malgré tout ce qu'on peut lire dans les médias. Leur détection reste un enjeu. On sait très bien les repérer par ponction lombaire, mais la méthode est invasive. Et dans le sang, leur détection reste d'une efficacité relative. Toutefois, même si l'on parvenait à des tests sanguins fiables à 100 %, ils ne suffiraient pas non plus à diagnostiquer la maladie.

Le fait d'avoir une signature biologique de la présence des lésions, même chez des sujets qui n'ont pas de troubles cognitifs, ne signifie pas qu'ils vont développer la maladie. C'est ce que suggère l'étude Insight, que nous menons depuis 5 ans. Sur les 318 personnes suivies, toutes normales, sans troubles cognitifs, âgées de 77 ans en moyenne au début de l'étude, 88 se sont révélées porteuses de lésions amyloïdes dans le cerveau. Mais aujourd'hui, 5 ans plus tard, seulement 10 d'entre elles ont développé la maladie. Cela signifie que 78 personnes âgées de 82 ans en moyenne n'ont pas développé la maladie malgré leurs lésions. Tout le monde s'excite sur la recherche de biomarqueurs sanguins, mais je pense qu'il ne s'agit que de la première marche d'un escalier et qu'il en existe d'autres à découvrir pour le gravir.

Avez-vous des pistes ?

D'autres caractéristiques semblent se dégager chez les personnes de l'étude Insight qui ont développé la maladie, mais il est encore trop tôt pour en parler. Dix personnes, ce n'est pas assez pour confirmer nos hypothèses. Nous devons élargir notre étude et espérons que les institutions d'État entendront notre appel à l'aide pour la financer. Cette question est fondamentale pour l'avenir.

M. Bertoux et al., *Neurobiology of Aging*, vol. 84, pp. 41-49, 2019

MICROBIOLOGIE

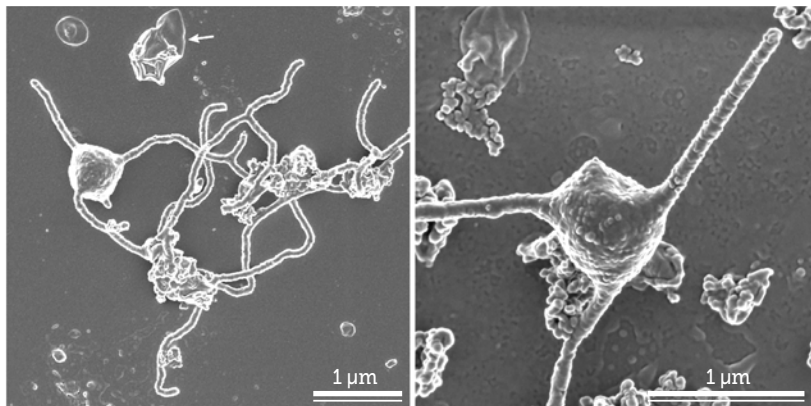
DES ARCHÉES D'ASGÅRD ENFIN EN CULTURE

Mises au jour en 2015, les archées d'Asgård n'étaient connues que par des fragments de génome. Des biologistes ont réussi à cultiver et observer ces microorganismes.

Il a fallu douze ans à Hiroyuki Imachi, de l'Agence japonaise de sciences et technologies terrestres marines, et ses collègues pour obtenir une culture d'un organisme très attendu des biologistes de l'évolution : une archée d'Asgård. Les archées – l'un des trois grands domaines du vivant, aux côtés des bactéries et des eucaryotes (dont nous faisons partie) – sont connues depuis plus de quarante ans. Mais celles d'Asgård n'ont été mises au jour que récemment, en 2015, et doivent leur nom au lieu de leur découverte : le château de Loki, des sources hydrothermales au large du Groenland. Toutefois, personne n'avait encore observé ces microorganismes. Leur description ne reposait que sur l'analyse de fragments de génomes récoltés dans les sédiments.

Cela n'avait pas empêché les biologistes de l'évolution de s'emparer de cette nouvelle branche du vivant, très intrigante. En effet, d'après l'analyse génomique, les archées d'Asgård s'étaient révélées les plus proches parents des eucaryotes : si elles n'avaient *a priori* ni noyau ni mitochondries (usines à énergie des cellules), elles arboraient des protéines que l'on pensait spécifiques des eucaryotes, impliquées dans la formation de vésicules ou d'un cytosquelette. Le dernier ancêtre commun de tous les eucaryotes leur ressemblait donc peut-être...

Mais sans preuve concrète, tout cela restait très hypothétique. C'est ce que l'équipe japonaise a fourni. Fin 2006, bien avant la découverte des archées d'Asgård, elle avait mis en culture des échantillons de sédiments prélevés en mer profonde au sud du Japon, dans des zones d'émission de méthane. Son objectif était d'étudier les microorganismes de ces régions extrêmes. Ses conditions de culture imitaient donc celles du lieu de prélèvement. Au bout de cinq années, une communauté de microorganismes avait enfin assez prospéré pour qu'elle en cultive des échantillons dans des tubes en verre, sous diverses conditions. Il fallut attendre une année pour que l'un de ces tubes se trouble, signe que des microorganismes s'y étaient multipliés. Alors, patiemment, par cultures successives, l'équipe a abouti à une culture contenant trois microorganismes : une bactérie *Halodesulfobivrio* capable de réduire le sulfate, une archée *Methanogenium* productrice de méthane



Au microscope électronique, l'archée d'Asgård cultivée ressemble à une très petite bactérie arrondie de 550 nanomètres de diamètre en moyenne. Elle présente parfois de curieux prolongements.

14 à 25 JOURS

EN CULTURE, L'ARCHÉE D'ASGÅRD DE HIROYUKI IMACHI ET SES COLLÈGUES DOUBLE SA POPULATION EN APPROXIMATIVEMENT 14 À 25 JOURS, CONTRE QUELQUES DIZAINES DE MINUTES À QUELQUES HEURES POUR D'AUTRES ARCHÉES.

(méthanogène) et... une archée d'Asgård. Puis les biologistes ont réussi à cultiver les deux archées ensemble, sans la bactérie.

Les deux archées vivent en syntrophie, une symbiose où l'une nourrit l'autre. L'archée d'Asgård est, de plus, aussi capable de vivre en syntrophie avec la bactérie *Halodesulfobivrio*. En s'appuyant sur ces observations, les biologistes ont proposé un nouveau modèle d'apparition des eucaryotes : avant l'oxygénation massive de l'atmosphère, il y a environ 2,4 milliards d'années, les archées d'Asgård vivaient en syntrophie avec des archées méthanogènes. Puis, quand les océans se sont oxygénés, une symbiose plus avantageuse s'est mise en place entre des archées d'Asgård et des bactéries réductrices de sulfate. Certaines archées ont aussi commencé des échanges avec des bactéries utilisant l'oxygène, jusqu'à les envelopper de prolongements (tels ceux observés en culture, voir ci-dessus) et former un microorganisme comportant une sorte de noyau – le matériel génétique de l'archée encerclé d'une membrane – et une bactérie endosymbiotique – l'ancêtre des mitochondries.

L'équipe japonaise n'en est pas au premier microorganisme découvert grâce à sa méthode. Peut-être isolera-t-elle d'autres membres du groupe d'Asgård ? Car il en faudra encore beaucoup pour confirmer son scénario. ■

M.-N. C.

H. Imachi et al., *Biorxiv*, 6 août 2019
<https://doi.org/10.1101/726976>

EN BREF

UNE FORÊT NOIRE DE CARBONE

En cherchant à améliorer la conductivité thermique et électrique d'une surface d'aluminium, Brian Wardle et Kehang Cui, du MIT (l'institut de technologie du Massachusetts), ont fortuitement créé un matériau qui bat le record de noirceur. Absorbant environ 99,995 % de la lumière, contre 99,965 % pour le Vantablack, il est constitué d'une « forêt » de nanotubes de carbone. Le mécanisme sous-jacent n'est pas totalement compris, mais des applications optiques contre la lumière parasite en astronomie sont déjà envisagées.

PLUIE D'OBJETS INTERSTELLAIRES

Après 'Oumuamua en 2017, un second objet d'origine interstellaire, 2I/Borisov, a été observé dans le Système solaire en août 2019. Comment ces corps sont-ils arrivés ici ? Pour Gregory Laughlin et Malena Rice, de l'université Yale, des protoplanètes massives et éloignées de leur étoile éjecteraient ces corps hors de leur système planétaire. Ces objets venus de loin seraient même plus nombreux qu'on ne le pense et seraient une source d'information précieuse sur les milieux où ils sont nés.

DES MOUSTIQUES GRANDS VOYAGEURS

On pensait que les moustiques voyageaient près du sol et parcouraient au plus quelques kilomètres au cours de leur vie. L'équipe de Tovi Lehmann, de l'Institut américain pour les allergies et les maladies infectieuses, aux États-Unis, a montré que certaines espèces africaines parcouraient jusqu'à 295 kilomètres en une nuit, en se laissant porter par des courants aériens jusqu'à 290 mètres de hauteur. Cette découverte surprenante expliquerait leur retour rapide au Sahel après la saison sèche et permettrait de mieux comprendre la propagation de certaines maladies.

GÉOSCIENCES

UN SUIVI DU POINT CHAUD DES AÇORES

Hawaii, la Réunion, l'Islande... Autant d'îles volcaniques engendrées par un point chaud, c'est-à-dire par la remontée d'un panache de roches chaudes d'origine très profonde. Quand le panache arrive près de la surface, la pression diminue et les roches fondent partiellement en un magma, ce qui peut donner des volcans. Les géologues ont longtemps pensé que ces points chauds étaient fixes, et ils les ont donc utilisés pour étudier le mouvement absolu des plaques tectoniques. Mais depuis plusieurs années, de nombreux indices ont remis en cause cette hypothèse. Maëlis Arnould, de l'École normale supérieure, à Paris, et ses collègues ont ainsi voulu suivre le point chaud de l'archipel portugais des Açores, dans l'Atlantique.

Les chercheurs ont d'abord étudié la zone anormalement chaude autour de ces îles. Elle s'étend de façon asymétrique et s'étale sur 2000 kilomètres au sud des Açores et sur 600 kilomètres au nord. Cette distribution témoigne d'un déplacement du point chaud, mais il restait à le distinguer du mouvement de la plaque tectonique et à le quantifier.

Les chercheurs ont alors développé un modèle numérique en trois dimensions des mouvements de roches dans le manteau terrestre, qui prend en compte les déplacements éventuels des



Les Açores sont des îles volcaniques nées de l'activité d'un point chaud au large du Portugal.

plaques tectoniques et des points chauds. Sachant, grâce à d'autres observations, que la plaque tectonique se déplace vers le nord, les chercheurs ont déduit que la seule configuration qui rende compte des observations est celle où le point chaud se déplacerait aussi vers le nord, mais plus rapidement que la plaque, à une vitesse estimée de 1 à 2 centimètres par an. L'étude des anomalies thermiques fournit ainsi de précieux renseignements sur les mouvements des points chauds. Mais la cause de ces mouvements, qui s'ancrent très profondément dans le manteau terrestre, reste pour l'instant une énigme. ■

NICOLAS BUTOR

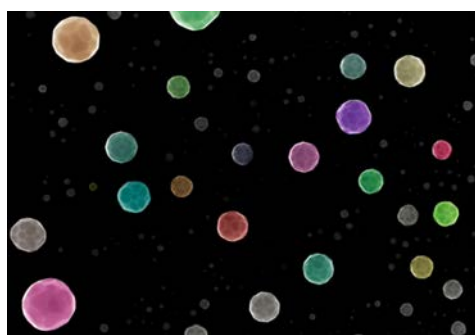
M. Arnould et al., *Nature Communications*, vol. 10, article 3235, 2019

CHIMIE

DES « GEMMES » POUR LA CATALYSE

Les piles à combustible dépendent de façon cruciale de processus qui sont catalysés grâce à des nanoparticules. Or les modes de production actuels des nanoparticules métalliques (par thermolyse, c'est-à-dire par chauffage à environ 1000 °C) produisent des catalyseurs aux performances moyennes.

En principe, la forme des nanoparticules peut avoir une influence sur leurs propriétés. Liliang Huang et ses collègues, de l'université Northwestern, aux États-Unis, ont mis au point une nouvelle méthode pour produire des composés qui prennent la forme de cristaux tétrakihexaédriques, des solides réguliers à 24 faces. Les chercheurs ont modifié les stratégies classiques de thermolyse. Ils ont ajouté un élément annexe (plomb, bismuth, antimoine ou tellure) qui se mélange au métal principal pour produire



Ces nanoparticules métalliques (en fausses couleurs) à 24 faces sont des catalyseurs efficaces.

des tétrakihexaèdres. En poursuivant le chauffage, l'élément annexe se vaporise et laisse des nanoparticules pures. Les tests montrent que ce nouveau matériau est 20 fois plus efficace que les catalyseurs commerciaux classiques des piles à combustible. ■

MARTIN TIANO

L. Huang et al., *Science*, vol. 365, pp. 1159-1163, 2019