

BIOLOGIE

LA PROTÉINE QUI N'EXISTAIT PAS

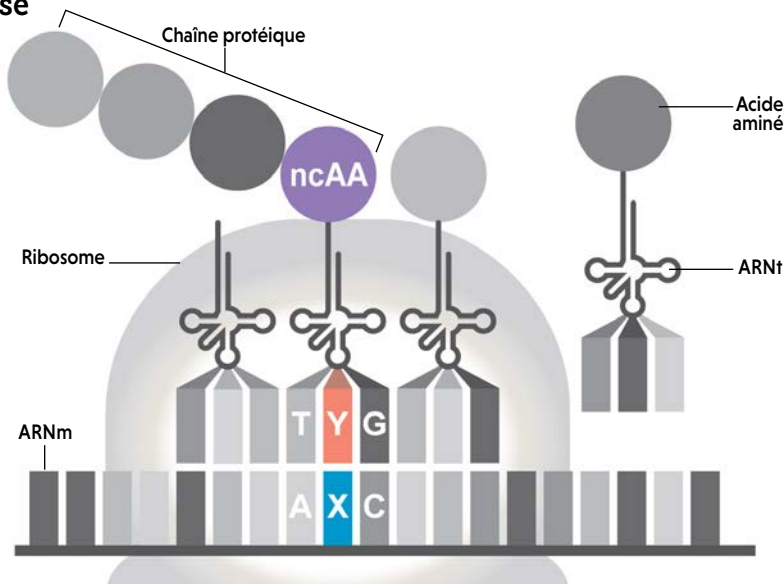
Une bactérie a été modifiée de façon à ce qu'elle intègre une information génétique de synthèse et qu'elle la restitue sous la forme d'une protéine artificielle.

Comment fabriquer une protéine inédite? L'idée n'est pas seulement de modifier une bactérie pour qu'elle ajoute ou supprime des constituants des protéines, les acides aminés dits naturels, dans une chaîne protéique existante. Les biologistes savent le faire depuis longtemps. Non, les chercheurs en biologie de synthèse visent un objectif bien plus ambitieux: modifier une cellule de façon qu'elle insère dans ses protéines, aux endroits souhaités, de nouveaux acides aminés non naturels. C'est ce que viennent de réussir Yorke Zhang, de l'institut de recherche Scripps, en Californie, et ses collègues avec une bactérie *Escherichia coli*.

Depuis plus de trente ans, diverses pistes sont explorées pour y parvenir. Toutes consistent à agir sur le code génétique. Les organismes vivants codent leurs informations héréditaires à l'aide de quatre nucléotides ou bases notés A, T, C et G, qui forment des paires agencées en une longue molécule en double hélice, l'ADN. Les cellules lisent cette séquence et, à chaque triplet de bases ou codon, associent un acide aminé. Avec quatre bases différentes, il existe 64 combinaisons possibles de trois bases. Mais seuls 20 acides aminés interviennent habituellement dans la fabrication des protéines, car certains codons correspondent au même acide aminé (et trois codons ont d'autres fonctions).

Des biologistes ont pu assigner des codons existants à de nouveaux acides aminés. Par exemple, en 2013, l'équipe de George Church, à la faculté de médecine de l'université Harvard, a associé le codon TAG, qui habituellement stoppe la lecture de l'ADN, à un acide aminé non standard. D'autres chercheurs imaginent de nouveaux codons. En 2010, Jason Chin, au Medical Research Council, à Cambridge, au Royaume-Uni, et ses collègues ont produit par mutagenèse une machinerie cellulaire capable de décoder non pas des triplets de bases, mais des quadruplets, et de les traduire en acides aminés non naturels. Ils ont ainsi construit une protéine avec deux acides aminés non naturels.

Yorke Zhang et ses collègues, eux, ont choisi d'introduire directement dans l'ADN une nouvelle paire de bases synthétisées. Dans un premier temps, ils ont montré que la bacté-



Dans la bactérie modifiée, les ribosomes incorporent un nouvel acide aminé (en violet) dans la chaîne protéique lorsqu'ils rencontrent un codon portant la nouvelle base X.

30

C'EST, À TOUT LE MOINS, LE NOMBRE D'ACIDES AMINÉS DE SYNTHÈSE QUI ONT ÉTÉ INCORPORÉS DANS DES PROTÉINES DURANT LEUR FABRICATION PAR DES ORGANISMES VIVANTS VIA LA TECHNIQUE DE RÉASSIGNATION DE CODONS. ON CONNAÎT PLUS DE 1 000 ACIDES AMINÉS, DONT SEULEMENT 20 INTERVIENNENT DANS LES PROTÉINES NATURELLES.

rie semi-synthétique ainsi produite vivait bien et que l'incorporation était stable. Il fallait ensuite que l'information ajoutée soit transmise correctement dans la chaîne de production des protéines: la nouvelle paire de bases doit être transcrite au sein de l'ARN messager (ARNm), l'intermédiaire entre l'ADN et la machinerie de lecture (les ribosomes). Dans les ribosomes, des ARN de transfert (ARNt) spécifiques doivent alors être recrutés, capables de reconnaître les nouveaux codons de l'ARNm et de leur associer des acides aminés non naturels; pour cela, une enzyme spécifique doit reconnaître le bon ARNt et y fixer le bon acide aminé. Pas à pas, les biologistes ont levé ces obstacles. Grâce à leurs bactéries, ils ont ainsi réussi à incorporer dans une protéine connue – une protéine fluorescente verte – un acide aminé non naturel.

Pourquoi introduire de nouveaux acides aminés dans les protéines? Pour les doter de nouvelles fonctions. Les biologistes du domaine imaginent déjà de multiples applications dans la recherche de médicaments, la fabrication de matériaux ou l'agriculture. Certes, la production de protéines artificielles n'en est qu'à ses balbutiements, mais il est à parier qu'elle aboutira un jour. Serons-nous alors prêts à encadrer ces nouvelles pratiques en connaissance de cause? ■

M.-N. C.

Y. Zhang et al., *Nature*, vol. 551, pp. 644-647, 2017

EN BREF

LES JEUNES ANNEAUX DE SATURNE

On pensait que les anneaux s'étaient formés très tôt autour de Saturne, il y a près de 4,5 milliards d'années, lors de la destruction d'une lune saturnienne. Selon cette hypothèse, l'anneau B, le plus grand, aurait une masse totale comparable à celle de la lune Mimas. Or Luciano Iess, de l'université de Rome-Sapienza, a montré grâce aux données de la sonde Cassini que l'anneau est plus léger. D'après les modèles, les anneaux n'auraient donc que quelques centaines de millions d'années. Résultat que confortent d'autres observations de Cassini.

50^e NOMBRE PREMIER DE MERSENNE

Les nombres premiers sont les entiers divisibles uniquement par 1 et par eux-mêmes. Certains de ces nombres sont de la forme $2^p - 1$, où p est lui-même un nombre premier. Ce sont les « nombres premiers de Mersenne ». Un projet informatique collaboratif, *Gimps*, les traque depuis 1996. Le 50^e nombre premier de Mersenne, $2^{77\ 232\ 917} - 1$, a été découvert en décembre 2017 par un ingénieur américain, Jonathan Pace. Ce nombre s'écrit avec 23 249 425 chiffres !

TEST URINAIRE POUR LA TUBERCULOSE

Avec près de 10 millions de nouveaux cas annuels dans le monde, la tuberculose est un grave problème de santé publique. Sa gestion efficace exige un bon dépistage, qui pourrait être considérablement facilité grâce aux travaux de l'équipe d'Alessandra Luchini, à l'université George Mason, aux États-Unis : ces chercheurs ont développé un test urinaire qui détecte en moins de 12 heures un antigène spécifique de la maladie. Qui plus est, ce test simple à mettre en œuvre détermine aussi la gravité de l'infection.

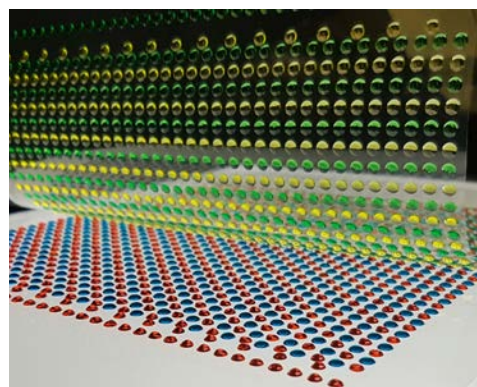
TECHNOLOGIE

ÉLECTRICITÉ BIO-INSPIRÉE

L'anguille *Eletrophorus electricus* peut générer une tension de 600 volts et un courant de 1 ampère. Thomas Schroeder, de l'université du Michigan, aux États-Unis, et ses collègues se sont inspirés des cellules de cet animal pour mettre au point un assemblage d'hydrogels générateur d'électricité.

Dans les cellules de l'anguille nommées électrocytes, la production d'électricité est assurée par la circulation asymétrique d'ions entre les milieux intra et extracellulaires. Pour créer une décharge, un stimulus nerveux commande l'ouverture de canaux membranaires spécifiques : des ions Na^+ pénètrent d'un côté des cellules pendant que des ions K^+ sont relargués dans le milieu extracellulaire. Il se constitue une distribution hétérogène de charges qui se traduit par une différence de potentiel électrique entre les deux membranes opposées de chaque électrocyte. Mis en réseau par milliers, les électrocytes génèrent globalement un choc électrique capable d'étourdir des prédateurs ou des proies.

Afin d'imiter ce mécanisme, Thomas Schroeder et ses collègues ont utilisé quatre types d'hydrogels : un premier est très concentré en ions Na^+ et Cl^- , un deuxième ne l'est que très faiblement, le troisième ne laisse circuler que les cations (ions chargés positivement), et



Inspirés des cellules de l'anguille électrique, des hydrogels placés sur des films transparents génèrent de l'électricité.

le quatrième, à l'inverse, ne laisse passer que les anions (chargés négativement).

En mettant en contact ces hydrogels d'une façon appropriée, les chercheurs ont reproduit la structure et le comportement des électrocytes. Et en accolant leurs électrocytes artificiels, ils ont généré une tension globale de 110 volts. Ils espèrent utiliser cette source d'énergie souple et biocompatible pour des implants médicaux. Quelques difficultés restent néanmoins à surmonter : la recharge du dispositif, comme pour une batterie, et la densité énergétique, qui est 10 000 fois plus faible que chez l'anguille. ■

MARTIN TIANO

T. B. H. Schroeder et al., *Nature*, vol. 552, pp. 214-218, 2017

ARCHÉOLOGIE

UN RÉSEAU DE FORTS EN SYRIE

La mission géoarchéologique franco-syrienne des « Marges arides de Syrie du Nord » a prospecté entre 1995 et 2002, ainsi qu'en 2010, une zone d'environ 7000 kilomètres carrés à l'est de Hama, bordée à l'ouest des régions très peuplées du Croissant fertile, et à l'est des steppes arides où vivent des nomades. En exploitant ses résultats et des photographies aériennes ou satellitaires prises depuis 1960, Marie-Odile Roussel, du laboratoire Archéorient (CNRS-université Lyon 2), et trois collègues viennent de décrire un réseau défensif d'une étendue exceptionnelle et datant du II^e millénaire avant notre ère (de 2000 à 1550).

Ce réseau est constitué de près d'une soixantaine de forteresses, fortins et tours qui longent en arc la steppe de Syrie centrale sur une distance nord-sud d'environ 150 kilomètres. Ces



La muraille nord d'une des forteresses du réseau, le site de Qal'at al-Rahiyya, vue vers l'est.

places fortes étaient composées de gros blocs de basalte non taillés, avec parfois des murs de plusieurs mètres d'épaisseur et de hauteur. Souvent édifiés sur des reliefs, ces forts étaient espacés de moins d'une vingtaine de kilomètres, pour assurer la continuité du contact visuel. ■

MAURICE MASHAAL

M.-O. Roussel et al., *Paléorient*, vol. 43(2), pp. 115-163, 2017

EN IMAGES



LA MOUCHE QUI NE CRAINT PAS L'EAU HYPERSAÉE

Non, cette mouche n'est pas recouverte d'une couche métallique. Ses reflets argentés sont dus à l'air piégé à sa surface lorsqu'elle s'immerge dans l'eau hypersalée de certains lacs nord-américains, dont le lac Mono, en Californie. Les biologistes Floris van Breugel et Michael Dickinson, de l'institut de technologie de Californie (Caltech) viennent d'étudier ce qui confère à ces mouches mesurant 4 à 7 millimètres, de l'espèce *Ephydra hians*, leurs extraordinaires facultés d'immersion.

Ces facultés sont en effet remarquables: l'insecte peut descendre, en rampant le long des concrétions calcaires dont le lac est parsemé, jusqu'à des profondeurs de quelques mètres et y rester une quinzaine de minutes pour se nourrir d'algues ou pondre ses œufs. Puis la mouche lâche prise pour remonter rapidement, sous l'effet de la poussée d'Archimède, et s'envole comme si de rien n'était, aussi sèche qu'avant sa plongée.

L'eau du lac Mono, trois fois plus salée que l'océan Pacifique, est très riche en carbonate de sodium (Na_2CO_3) et son pH est égal à 10. Sa composition la rend beaucoup plus mouillante que l'eau douce. Comment les mouches *Ephydra hians* restent-elles alors au sec? Les observations et expériences de Floris van Breugel et Michael Dickinson ont mis en évidence deux traits grâce auxquels ces diptères ne se mouillent pas et piègent l'air nécessaire à leur respiration: leur cuticule est recouverte de soies en grande densité et elle contient des hydrocarbures à petites chaînes carbonées qui contribuent à l'hydrophobie. Une adaptation remarquable aux lacs hypersalés qui, sans les nuées d'*Ephydra hians* dont profitent les oiseaux, seraient des milieux de vie très pauvres. ■

M. M.

F. van Breugel et M. H. Dickinson, *PNAS*, vol. 114(51), pp. 13483-13488, 2017





PHYSIQUE

UNE GOUTTE EN LÉVITATION

Lâchez une goutte d'eau à la surface d'un verre d'eau à la même température: la goutte se mélange aussitôt. Mais réalisez la même opération avec une goutte de lait froid dans du café chaud et vous verrez parfois la goutte léviter à la surface un certain temps. La goutte ne se mélange pas avec le fluide tant qu'un coussin d'air reste intercalé entre les deux. Michela Geri, de l'institut de technologie du Massachusetts, aux États-Unis, et ses collègues ont expliqué le rôle de la température dans ce retard à la coalescence de la goutte.

Ces physiciens ont mesuré le temps entre le dépôt de la goutte à la surface et sa coalescence en fonction de la différence de température. Ils ont observé que la coalescence est immédiate en dessous d'un seuil critique. Puis le retard croît avec cette différence de température. Avec des particules insérées dans la goutte et éclairées au laser, les chercheurs ont aussi observé des mouvements de convection dans la goutte et dans le fluide. Ils ont alors modélisé la dynamique du système pour expliquer le phénomène.

La goutte chauffe à proximité du fluide, mais pas de façon uniforme: on observe une variation graduelle de température à sa surface. Or la tension de surface dépend de la température. Le fait que la tension de surface ne soit pas identique partout à la surface de la goutte entraîne un déplacement de matière: c'est



Des particules éclairées par un laser vert mettent en évidence des mouvements de convection dans la goutte.

l'effet Marangoni, qui dans la goutte prend la forme de mouvements de convection.

Ces mouvements de convection entraînent aussi une circulation dans la couche d'air piégée sous la goutte et dans son voisinage. Ce phénomène augmente la pression de l'air sous la goutte et ralentit son échappement. Comme la goutte se réchauffe peu à peu, la différence de température finit par passer sous le seuil critique où la circulation de l'air devient faible, et la coalescence a lieu. ■

S. B.

M. Geri et al., *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 833, R3, 2017

GÉNÉTIQUE

À L'ORIGINE DES AMÉRINDIENS

Dix-sept. C'est le nombre de séquençages du génome du fossile USR1 accumulés par l'équipe d'Eske Willerslev, de l'université de Copenhague, afin de lire le plus fidèlement possible l'ADN. Ce fossile de nourrisson mort il y a 11 500 ans a été découvert dans la haute vallée de la Sun River, en Alaska. Il appartient à une relique de la population béringienne, qui peuplait le pont terrestre reliant l'Asie à l'Alaska entre 25 000 et 14 000 ans avant notre ère, puis a persisté en Asie et en Alaska. Or tout le monde s'accorde à dire que les Amérindiens descendent des Béringiens, mais aucun indice concret ne le prouvait. Jusqu'à USR1.

Les chercheurs ont en effet déterminé que le génome d'USR1 est davantage apparenté à ceux des populations amérindiennes qu'à ceux de toute autre population et qu'il est le plus

proche de celui de l'ancêtre commun de tous les Amérindiens. Cette constatation suggère que les Amérindiens descendent des Béringiens.

Après avoir élaboré un modèle démographique, Eske Willerslev et ses collègues avancent que la population béringienne s'est séparée d'une population de l'extrême nord de l'Eurasie orientale il y a quelque 36 000 ans, même si des échanges de gènes ont persisté encore 10 000 ans. Ces paléo-Béringiens se seraient séparés à leur tour en deux branches il y a entre 22 000 et 18 000 ans, avant qu'une partie des Béringiens alaskais ne parviennent à franchir (par la côte ou le long des Rocheuses) les calottes glaciaires couvrant le nord de l'Amérique du Nord, puis évoluent pour donner les Amérindiens. ■

FRANÇOIS SAVATIER

J. V. Moreno-Mayor et al., *Nature*, en ligne le 3 janvier 2018

EN BREF

L'ÉTOILE DE TABBY ET LA POUSSIÈRE

Cet astre a un comportement étrange: il présente des baisses sporadiques et inexplicables de luminosité. Plusieurs hypothèses ont été avancées, mais aucune n'était totalement satisfaisante. Tabet Boyajian, de l'université d'État de Louisiane, et ses collègues ont regardé si les baisses de luminosité étaient identiques à toutes les longueurs d'onde, ce qui indiquerait que l'objet occultant est opaque. Ils ont montré que ce n'était pas le cas. Le coupable le plus probable serait donc de la poussière.

ANTISEPSIE CHEZ LES FOURMIS

Dans les colonies de fourmis, les maladies peuvent se propager très vite. Christopher Pull, de l'Institut de science et technologie d'Autriche, et ses collègues ont observé un comportement de « désinfection destructive » chez la fourmi *Lasius neglectus*. Lorsqu'une puppe est infectée par un champignon, elle émet un signal reconnu par les fourmis qui lui injectent alors un antiseptique. Celui-ci bloque la propagation du pathogène; mais il tue aussi la larve!

UNE PISTE POUR TRAITER LA RÉTINITE PIGMENTAIRE

Cette pathologie touche 30 000 personnes en France. Elle se traduit par une dégénérescence progressive des cellules de la rétine. Pour remplacer les cellules déficientes, l'équipe de Christelle Monville, du laboratoire I-Stem créé par l'Inserm et l'AFM-Téléthon, a mis au point une nouvelle approche. Des cellules souches embryonnaires ont été différenciées en cellules épithéliales afin de réaliser un « patch cellulaire ». Les rats malades ayant subi une greffe de ce patch ont de meilleures performances visuelles que ceux traités par d'autres méthodes.

NÉOLITHIQUES BIEN MUSCLÉES

Au Néolithique, l'invention de l'agriculture aurait été associée, au moins parmi certaines populations d'Europe centrale, à un renforcement des membres supérieurs chez les femmes, qui s'expliquerait par un travail manuel important.

En comparant les tibias et les humérus de femmes de diverses époques, Alison Macintosh, de l'université de Cambridge, et ses collègues ont constaté que les femmes du Néolithique étaient plus musclées que les athlètes modernes. D'après ces chercheurs, la mouture des céréales, qui exige un effort considérable, était peut-être une activité féminine. Aline Thomas, du Muséum national d'histoire naturelle, note l'importance de cette nouvelle approche méthodologique, mais souligne que, faute de données supplémentaires, on ne peut préciser quelles activités physiques pratiquaient les femmes. ■

NOËLLE GUILLON

A. Macintosh et al., *Science Advances*, vol. 3, article 11, 2017

MÉDECINE

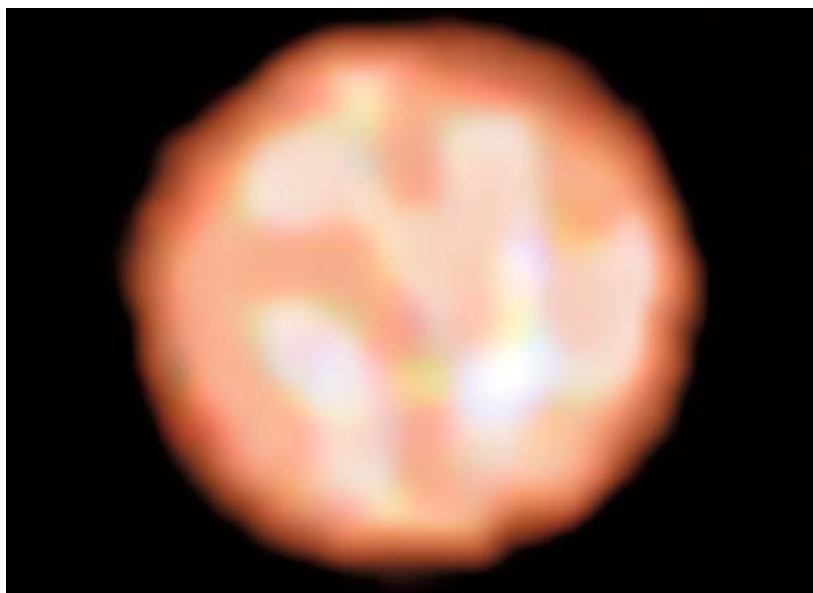
L'IBUPROFÈNE, UN PROBLÈME ?

L'ibuprofène est un antalgique, un antipyrétique et un anti-inflammatoire d'usage courant. Or une étude franco-danoise coordonnée par Bernard Jégou, de l'Inserm et de l'EHESP, vient de montrer qu'il perturbe les hormones testiculaires. Les chercheurs ont administré 1200 milligrammes d'ibuprofène par jour à 14 hommes pendant 6 semaines, puis comparé leur taux hormonal à celui d'un second groupe sous placebo. Au bout de 14 jours, les hommes sous ibuprofène présentaient un taux sanguin de testostérone normal et un taux d'hormone lutéinisante (l'hormone stimulant la production de testostérone) très élevé. Connus sous le nom d'hypogonadisme compensé, ce phénomène ne se rencontre normalement que chez environ 10% des hommes âgés, chez qui il doit être suivi médicalement afin d'éviter des complications. Suite à cette étude, l'Inserm vient d'avertir sur les conséquences potentiellement délétères de la «prise soutenue» d'ibuprofène par des hommes sans raison médicale (notamment athlètes de haut niveau, sportifs, etc.). ■

F. S.

D. Møbjerg Kristensen et al., *PNAS* en ligne le 8 janvier 2018

LA SURFACE D'UNE ÉTOILE GÉANTE ROUGE DÉVOILÉE



Les cellules de convection de l'étoile géante rouge π^1 Gruis sont d'une taille comparable à la distance qui sépare le Soleil de Vénus.

Dans près de 5 milliards d'années, le Soleil gonflera et ressemblera probablement à l'étoile nommée π^1 Gruis, une étoile géante rouge. Cette dernière, distante de 530 années-lumière, a une masse de seulement 1,5 fois celle du Soleil, mais son diamètre est 700 fois plus grand. Claudia Paladini, de l'université libre de Bruxelles, et ses collègues ont utilisé l'instrument Pionier du VLT (*Very Large Telescope*), au Chili, pour observer la surface de π^1 Gruis. Ils ont ainsi mis en évidence certaines structures en accord avec les modèles théoriques.

Qu'ont montré les images de π^1 Gruis ? La surface n'est pas uniforme et présente des cellules de convection. Ces structures d'écoulement se forment du fait du flux de gaz chaud qui monte de l'intérieur de l'astre vers la surface. On n'en avait jamais observé dans une étoile géante rouge jusqu'à présent. Les cellules de convection de π^1 Gruis sont immenses : leur taille est d'environ 120 millions de kilomètres, soit près de 30% du diamètre de l'étoile.

Par comparaison, la photosphère du Soleil présente environ 2 millions de cellules convectives dont le diamètre est de l'ordre de 2000 kilomètres. Andrea Chiavassa, de l'observatoire de la Côte d'Azur et membre de l'équipe qui a étudié π^1 Gruis, explique cette différence : «La taille des cellules convectives est principalement contrôlée par l'intensité de la gravité à la surface de l'étoile. Avec une masse sensiblement équivalente à celle du Soleil, mais un diamètre 700 fois plus élevé, la gravité à la surface de π^1 Gruis est beaucoup plus faible. On s'attendait donc à voir des cellules convectives bien plus étendues que pour le Soleil.» Cela a bien été confirmé par les observations du VLT, validant ainsi les modèles qui décrivent la dynamique des couches supérieures de ce type d'étoiles dans une des phases ultimes de leur vie. ■

S. B.

C. Paladini et al., *Nature*, en ligne le 20 décembre 2017

PHYSIQUE

UN PAS DE PLUS VERS L'ORDINATEUR QUANTIQUE

Une équipe de chercheurs propose de réaliser un ordinateur quantique en utilisant une architecture fondée sur des technologies actuelles.

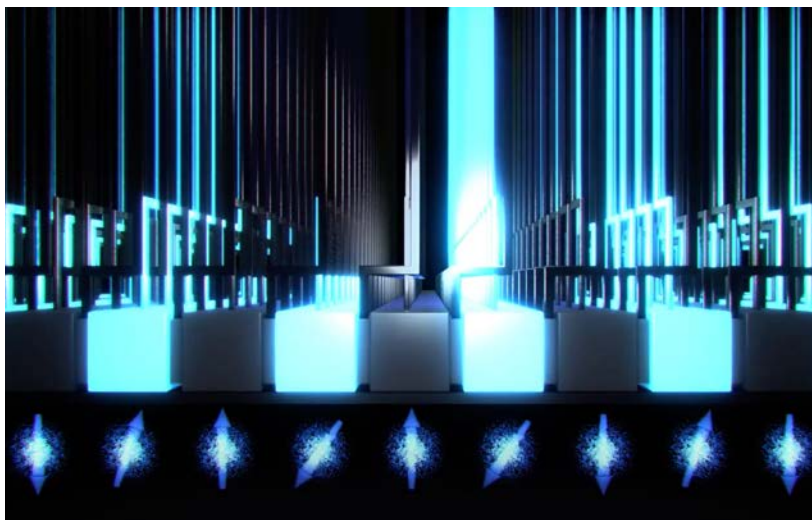
L'ordinateur quantique est peut-être pour demain. De nombreux chercheurs travaillent sur cette idée consistant à exploiter les principes de la physique quantique pour obtenir des capacités de calcul qui dépasseraient de loin celles des ordinateurs classiques actuels. Dans ce sens, une petite équipe menée par Andrew Dzurak, de l'université de la Nouvelle-Galles du Sud, à Sydney, propose une architecture théorique d'ordinateur quantique utilisant les technologies déjà existantes dans les machines classiques.

Dans un ordinateur classique, les bits, les unités d'information, prennent la valeur 0 ou 1. Faire un calcul revient à réaliser une série d'opérations sur ces bits. Dans les calculateurs quantiques, il n'est plus question de bits, mais de qubits (ou bits quantiques). Le qubit exploite les propriétés quantiques de la matière et notamment le principe de superposition. Ainsi, de la même façon que le célèbre chat de Schrödinger est à la fois mort et vivant tant que l'on n'a pas ouvert la boîte où il est enfermé, un qubit peut être dans une superposition des deux états 0 et 1. Grâce à de telles superpositions, les chercheurs ont conçu des algorithmes quantiques bien plus performants que leurs équivalents classiques.

Mais les qubits sont très fragiles: la moindre perturbation du système détruit les états de superposition. C'est le problème de la «décohérence». Pour surmonter cette difficulté, l'une des approches est d'utiliser un grand nombre de qubits et de corriger, parmi eux, les erreurs dues à la décohérence. L'ensemble de ces qubits, nommés qubits physiques, forme alors un qubit logique utilisable pour le calcul quantique.

Le principe d'architecture proposé et détaillé par l'équipe d'Andrew Dzurak correspond exactement à cela. Dans une couche de silicium, 480 électrons font office, grâce à leur spin (une propriété purement quantique), de 480 qubits physiques, cet ensemble formant un qubit logique. Cette couche quantique est soumise à un champ magnétique qui agit sur le spin des électrons.

Un système de transistors placés dans une couche supérieure, permet de lire et exploiter la valeur des qubits physiques. Cette couche est



Vue d'artiste du dispositif proposé. La couche inférieure est constituée d'électrons dont on utilise le spin pour définir les qubits. La couche supérieure est composée de transistors classiques.

10

L'ÉQUIPE
D'ANDREW DZURAK
A OBTENU
UN FINANCEMENT
DE 43 MILLIONS
D'EUROS POUR
DÉVELOPPER,
D'ICI À 2022,
UN PROTOTYPE
D'ORDINATEUR
QUANTIQUE
COMPOSÉ
DE 10 QUBITS
LOGIQUES.

semblable à celle présente dans les ordinateurs classiques pour accéder aux différents bits. Elle utilise ainsi des techniques déjà existantes.

Entre ces deux couches, classique et quantique, une couche intermédiaire contient des électrodes placées au-dessus de chaque qubit physique, mais aussi au-dessus de l'espace séparant deux tels qubits. L'application de tensions particulières à ces électrodes permet alors de réaliser des opérations entre les qubits physiques. Et pour contrôler en permanence l'état de ces 480 éléments quantiques, un algorithme de correction d'erreurs est appliqué régulièrement, ce qui assure la stabilité du qubit logique ainsi formé.

Afin de réaliser un ordinateur quantique complet, ce dispositif devra être répliqué des milliers de fois sur une puce électronique, pour former un calculateur contenant autant de qubits logiques. Cette architecture théorique, fondée sur des technologies déjà existantes, est prometteuse et montre que l'on s'approche petit à petit des ordinateurs quantiques. Reste à la réaliser, ce qui nécessitera encore de grands efforts, notamment dans la miniaturisation des composants électroniques. ■

DONOVAN THIEBAUD

M. Veldhorst *et al.*, *Nature Communications*, vol. 8, article 1766, 2017