

ÉNERGIE

Photovoltaïque :
vive les pérovskites !

PHYSIQUE

La solidité de
la mousse liquide

CLIMATOLOGIE

Les révélations
de l'Antarctique

■ POUR LA

SCIENCE

Décembre 2015 - n° 458

www.la-science.fr

Édition française de Scientific American

Comment
l'Homme a
conquis toute
la planète

Le rôle clé de
la coopération

M 02687 - 458 - F : 6,50 € - RD



POUR LA SCIENCE

www.pourlascience.fr

8 rue Férou - 75278 Paris Cedex 06

Groupe POUR LA SCIENCE

Directrice des rédactions : Cécile Lestienne

Pour la Science

Rédacteur en chef : Maurice Mashaal

Rédactrice en chef adjointe : Marie-Neige Cordonnier

Rédacteurs : François Savatier, Philippe Ribeau-Gésippe,

Guillaume Jacquemont, Sean Bailly

Dossier Pour la Science

Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin

Développement numérique : Philippe Ribeau-Gésippe

Directrice artistique : Céline Lapert

Maquette : Pauline Bilbault, Raphael Queruel, Ingrid Leroy

Correction et assistance administrative : Maud Bruguère

et Anne-Rozenn Joubert

Marketing : Ophélie Maillet et Laurence Hay

Direction financière et direction du personnel : Marc Laumet

Fabrication : Marianne Sigogne et Olivier Lacam

Presse et communication : Susan Mackie

Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé

Anciens directeurs de la rédaction : Françoise Pétry

et Philippe Boulanger

Conseiller scientifique : Hervé This

Ont également participé à ce numéro :

Pierre Audebert, Antoine Chambert-Loir, Silvana Condemi, Anaïs Dréau, Sophie Gallé-Soas, Fernand Gobet, Laurent Jorda, Anne-Lise Lamy, Véronique Lazarus, Christophe Pichon, Daniel Tacquenot

PUBLICITÉ France

Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin

(jfguillotin@pourlascience.fr)

Tél. : 01 55 42 84 28 • Fax : 01 43 25 18 29

SERVICE ABONNEMENTS

Courriel : pourlascience@abopress.fr

Téléphone : 03 67 07 98 17

Adresse postale : Service des abonnements Pour la Science

19 rue de l'Industrie - BP 90053 - 67402 Illkirch Cedex

Commande de livres ou de magazines :

Pour la Science - 628 avenue du Grain d'Or 41350 Vineuil

DIFFUSION DE POUR LA SCIENCE

Contact kiosques : À Juste Titres ; Benjamin Boutonnet

Tel : 04 88 15 12 41

Information/modification de service/réassort :

Magazine disponible sur www.direct-editeurs.fr

Canada : Edipresse : 945 avenue Beaumont, Montréal,

Québec, H3N 1W3 Canada.

Suisse : Servidis : Chemin des châlets, 1979 Chavannes - 2 - Bogis

Belgique : La Caravelle : 303 rue du Pré-aux-Orties - 1130 Bruxelles.

Autres pays : Éditions Belin : 8 rue Férou - 75278 Paris Cedex 06.

SCIENTIFIC AMERICAN

Editor in chief : Mariette DiChristina.

Executive editor : Fred Guterl. Design director : Michael Mrak. Editors :

Ricky Rusting, Philip Yam, Robin Lloyd, Mark Fischetti, Seth Fletcher,

Christine Gorman, Michael Moyer, Gary Stix, Kate Wong.

President : Keith McAllister. Executive Vice President : Michael Florek.

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public

français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou

les documents contenus dans la revue « Pour la Science », dans

la revue « Scientific American », dans les livres édités par

« Pour la Science » doivent être adressées par écrit à « Pour la

Science S.A.R.L. », 8 rue Férou, 75278 Paris Cedex 06.

© Pour la Science S.A.R.L. Tous droits de reproduction, de tra-

duction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous

les pays. La marque et le nom commercial

« Scientific American » sont la propriété de

Scientific American, Inc. Licence accordée à

« Pour la Science S.A.R.L. ».

En application de la loi du 11 mars 1957, il est inter-

dit de reproduire intégralement ou partiellement

la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du

Centre français de l'exploitation du droit de co-

pie [20 rue des Grands-Augustins - 75006 Paris].



Maurice Mashaal
rédacteur en chef

Migrations préhistoriques

Que nous rencontrions des membres de notre espèce dans tous les continents et la plupart des îles est un fait qui ne nous étonne guère aujourd'hui. Mais quand on apprend des paléanthropologues qu'il y a environ 70 000 ans, des populations *Homo sapiens* ont quitté le berceau africain et essaimé très rapidement, on peut être saisi d'un vertige : comment, à des stades si reculés de notre histoire, des humains alors très peu nombreux ont-ils pu investir si vite d'aussi grands territoires et s'adapter à des milieux et climats si différents ? Pourquoi aucune autre espèce humaine, les Néandertaliens par exemple, n'a-t-elle réalisé un tel exploit ?

Les paléanthropologues se posent depuis longtemps ces questions. Ils ont échafaudé diverses explications plus ou moins

La coopération même avec des individus non apparentés, un atout majeur

convaincantes, faisant intervenir la taille du cerveau, le climat ou des innovations techniques. Dans ce numéro, Curtis Marean nous expose sa théorie, qui attribue un rôle crucial à la coopération [voir pages 26-35]. Selon ce paléanthropologue américain, est inscrite dans les gènes d'*Homo sapiens* une forte capacité à coopérer avec ses semblables, apparentés ou non. Et ce serait cet exceptionnel penchant à la coopération qui aurait permis à l'homme d'innover, notamment pour fabriquer des armes de jet efficaces, et ainsi de s'installer partout ou presque.

Des armes de jet... Pour chasser ? Bien sûr. Pour éliminer les autres espèces humaines présentes sur le chemin d'*Homo sapiens* ? Curtis Marean pense que oui. À en juger par l'histoire et au vu des mesquineries xénophobes face à l'afflux actuel de réfugiés du Proche-Orient, on est tenté de lui donner raison. Mais d'autres spécialistes ont des arguments pour une vision moins sombre des migrations préhistoriques [voir page 34]. Le pire n'est jamais sûr...

3 Édito

Actualités

- 6 La conjecture de la disrépance de Paul Erdős est désormais prouvée
- 7 Il y a de l'or partout !
- 8 Les prix Nobel 2015
- 11 Une expérience de Bell sans faille



- 12 Palper virtuellement le cerveau

Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

Réflexions & débats

- 14 **Éclairage**
Human Brain Project : les raisons d'un échec
Stefan Theil



- 20 **Homo sapiens informaticus**
L'isolement, plus démocratique que le vote électronique
Gilles Dowek
- 22 **Cabinet de curiosités sociologiques**
La guerre des intellectuels
Gérald Bronner
- 24 **Lu sur SciLogs.fr**
Teilhard de Chardin : la bombe apostolique
Alexandre Moatti

À LA UNE

26

PALÉOANTHROPOLOGIE

Comment *Homo sapiens* a conquis la planète

Curtis Marean

La coopération et les armes de jet expliqueraient pourquoi, de toutes les espèces humaines ayant vécu sur Terre, la nôtre est la seule à avoir investi la planète entière.



36

PSYCHOLOGIE

Pourquoi les bonnes idées tuent les meilleures

Merim Bilalić et Peter McLeod

Lorsque nous devons résoudre un problème, nous tendons à le faire par les moyens qui nous sont familiers. Cette attitude mentale nous empêche de voir les nouvelles solutions possibles qui, parfois, sont bien meilleures.

42

CLIMATOLOGIE

Mille ans de variations climatiques en Antarctique

Anaïs Orsi

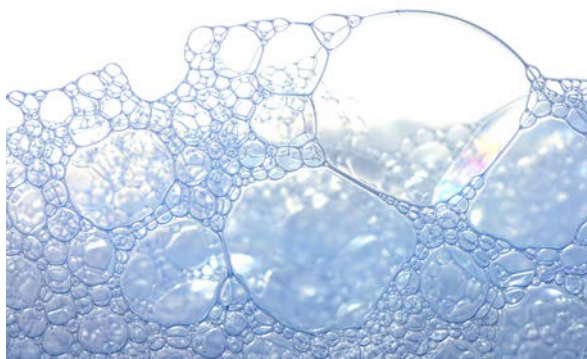
En lisant dans la neige ancienne l'histoire du climat en Antarctique sur le dernier millénaire, les climatologues ont montré qu'il a subi plusieurs réchauffements, et que le dernier est de nature différente des précédents.



52 **PHYSIQUE** **La solidité de la mousse liquide**

Ibrahim Cheddadi, Pierre Saramito et François Graner

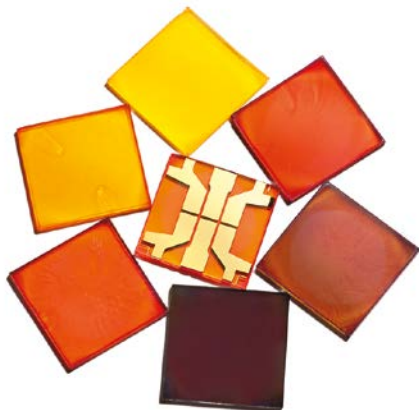
À la fois liquides et solides, les mousses s'écoulent de façon bien mystérieuse pour les physiciens. Récemment, la compréhension de leur comportement a ouvert des horizons dans divers autres domaines.



60 **ÉNERGIE** **Photovoltaïque : le silicium éclipsé ?**

Varun Sivaram, Samuel Stranks et Henry Snaith

Des matériaux récemment entrés en lice, les pérovskites, pourraient enfin mener à des cellules photovoltaïques moins coûteuses et de meilleur rendement que les cellules au silicium d'aujourd'hui.



70 **HISTOIRE DES SCIENCES** **Les Vilmorin, des botanistes d'exception**

Christine Laurent

Pendant près de 200 ans, la famille Vilmorin a révolutionné le commerce scientifique des graines. Elle a aussi constitué un précieux herbier. Le fondateur de cette lignée de marchands botanistes était Philippe-Victoire de Vilmorin.

Rendez-vous

78 **Logique & calcul**

Faut-il interdire les robots tueurs autonomes ?

Jean-Paul Delahaye

Est-il possible de programmer un robot pour qu'il respecte des principes éthiques ? Les lois de la robotique qu'envisageait l'écrivain Isaac Asimov dès 1942 sont brûlantes d'actualité.

84 **Science & fiction**

Archéologues et paléontologues à la sauce Hollywood

J.-Sébastien Steyer et Roland Lehoucq

86 **Art & science**

Les Pieds nickelés et le mammoth

Loïc Mangin

89 **Idées de physique**

Tourbillonnantes tornades

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

92 **Question aux experts**

Pourquoi repère-t-on son prénom au milieu des conversations ?

François Maquestiaux

94 **Science & gastronomie**

Généraliser le coulant au chocolat et le bâton royal

Hervé This

96 **À lire**

98 **Bloc-notes**

Les chroniques de Didier Nordon

Ce numéro comporte un encart d'abonnement *Pour la Science* jeté en cahier intérieur de toute la diffusion kiosque et un encart *Philosophie Magazine* sur la diffusion abonné.

Des offres d'abonnement *Pour la Science* sont proposées en pages 76 et 93.

En couverture : © Pour la Science ; KieferPix/shutterstock.com

Toutes les archives

- Pour la Science
- Dossier Pour la Science

depuis
1996



Disponibles sur www.pourlascience.fr*

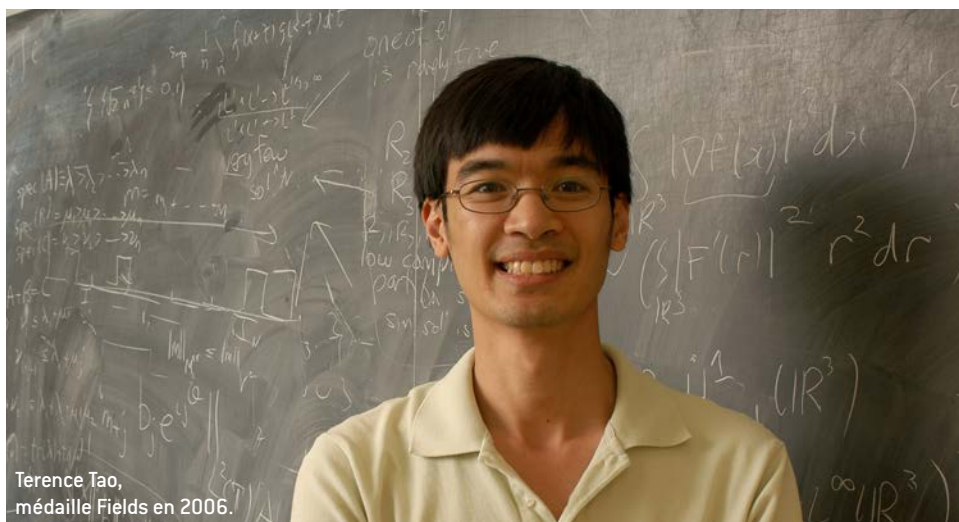
* Numéros à lire en ligne ou à télécharger au format PDF

Actualités

Mathématiques

La conjecture de la discrédance de Paul Erdős est désormais prouvée

Cette conjecture résistait depuis plus de quatre-vingts ans. En s'appuyant sur les résultats d'un travail collaboratif et sur des découvertes récentes, l'Australien Terence Tao l'a confirmée.



En 1985, Terence Tao, jeune prodige des mathématiques âgé de 10 ans, rencontrait pour la première fois le célèbre mathématicien hongrois Paul Erdős, 72 ans. Ce dernier ne s'était pas trompé sur les qualités du garçon. Trente ans plus tard, Terence Tao, lauréat de la médaille Fields en 2006, a résolu l'une des conjectures énoncées par Erdős, la conjecture de la discrédance.

Le mathématicien et vulgarisateur James Grime illustre la conjecture ainsi : imaginez-vous sur une crête, avec un ravin à deux pas sur votre gauche et un autre à deux pas sur votre droite. Quels enchaînements de pas font que vous ne tombez pas dans un ravin ? Vous pouvez par exemple faire un pas à gauche, un à droite, un autre à gauche, encore un à droite, etc. Ou aussi un pas à droite, deux à gauche, un à droite, un à gauche, deux à droite, etc. Maintenant, pouvez-vous trouver un enchaînement de

pas à gauche et à droite dont tous les sous-enchaînements – définis en prenant un pas sur deux, un pas sur trois, un pas sur quatre, etc. – vous évitent de tomber dans le ravin ? On voit bien que si l'on prend un pas sur deux du premier enchaînement précédent, on tombe très vite dans le ravin. En fait, on peut montrer qu'il est possible de construire un enchaînement de 11 pas sans qu'aucun des sous-enchaînements vous condamne à la chute. Mais avec 12 pas, la chute est inévitable. Et si les ravins sont plus éloignés, de quelle longueur sont les enchaînements de pas que l'on peut construire en respectant la règle énoncée ci-dessus ?

En langage mathématique, si l'on remplace les pas à gauche et à droite par 1 et -1, la question revient à construire une suite dont la valeur absolue de la somme des premiers termes soit toujours inférieure à un entier K fixé. Considérons maintenant des sous-suites

en prenant des termes régulièrement espacés à partir de 0. On a d'abord la sous-suite des termes de rang pair, puis la sous-suite des termes de rang multiple de 3, puis multiple de 4, etc. Pour chacune de ces sous-suites, la valeur absolue de la somme des premiers termes peut-elle rester inférieure à K ? La conjecture d'Erdős énonce que c'est impossible pour K supérieur ou égal à 2. Pour toute suite, il existe toujours un nombre n et une sous-suite telle que la valeur absolue de la somme des n premiers termes excède K . L'énoncé de cette conjecture, dite de la discrédance, est relativement simple ; pourtant, les mathématiciens s'évertuent à la démontrer depuis quatre-vingts ans.

La situation $K = 2$ est illustrée plus haut par James Grime, avec les ravins situés à deux pas de chaque côté ; on a vu qu'on ne pouvait pas faire plus de 11 pas. Et pour $K = 3$? Boris Konev et Alexei Lisitsa, de l'université de

Liverpool, en Grande-Bretagne, ont trouvé la solution en 2014. Grâce à un programme informatique, ils ont testé toutes les configurations possibles pour des enchaînements de plus en plus longs. La preuve occupe un volume de 13 gigaoctets, ce qui en fait la plus longue démonstration jamais proposée. Le résultat est qu'il est possible de construire des enchaînements de 1 160 pas et d'échapper à la chute, mais qu'il n'est pas possible de s'en sortir avec 1 161 pas.

Plus K est grand, plus la contrainte sur les enchaînements se relâche, et plus il est possible de trouver une longue suite. Il est assez clair que chaque valeur de K peut être étudiée selon la technique de Boris Konev et Alexei Lisitsa, mais cela ne suffit pas pour démontrer le cas général qui fait l'objet de l'énigme d'Erdős : pour toute suite, il existera toujours une sous-suite qui vous fera tomber dans le ravin situé à une distance arbitraire de K pas.

En 2009, Timothy Gowers, de l'université de Cambridge, en Grande-Bretagne, et lauréat de la médaille Fields en 1998, a intégré la conjecture de la discrédance d'Erdős au projet *Polymath*. Ce projet collaboratif rassemble de nombreux mathématiciens, dont Terence Tao, qui s'attaquent à certains problèmes bien définis.

En 2012, l'équipe a concédé qu'elle ne faisait plus de progrès. Néanmoins, un résultat important a émergé lors de cette collaboration mondiale qui a duré trois ans. Il a été montré qu'il suffisait de vérifier le cas d'un type particulier de suites de 1 et de -1 pour démontrer la conjecture de

Géologie

Il y a de l'or partout !

Saviez-vous que nous avons partout de l'or sous les pieds ? Le problème est que les roches n'en renferment qu'un milligramme par tonne en moyenne. Sauf dans les gisements, où le métal est jusqu'à mille fois plus concentré. Une équipe dirigée par Gleb Pokrovski, directeur de recherche CNRS au laboratoire Géosciences environnement Toulouse, a reconstitué leur formation et déduit qu'ils sont bien plus fréquents qu'on ne le croyait !

façon générale : celles où le terme de rang $(n + m)$ est égal au produit des termes de rang n et de rang m , où n et m sont sans diviseurs communs. Ces suites sont intéressantes, car il existe des relations entre la suite principale et toutes les sous-suites. Ainsi, si la suite principale vous empêche de tomber dans le ravin (de dépasser le nombre K), il existe toute une liste de sous-suites qui vous empêchent de tomber dans le ravin.

Ces suites « multiplicatives » sont fréquentes en théorie des nombres. Elles apparaissent par exemple dans la fonction de Liouville qui est reliée aux nombres premiers. Elles ont été intensivement étudiées, mais certaines propriétés fondamentales restaient à éclaircir. En janvier 2015, un pas important a été franchi. Kaisa Matomäki, de l'université de Turku, en Finlande, et Maksym Radziwiłł, de l'université Rutgers, aux États-Unis, ont prouvé l'existence de relations surprenantes entre des moyennes à petite et grande échelle dans une suite multiplicative. Terence Tao a compris que ce résultat pouvait servir à prouver la conjecture d'Erdős, et l'a utilisé pour ce faire.

Ce résultat est extraordinaire à plus d'un titre. Il met en lumière le rôle des travaux collaboratifs tels que le projet *Polymath* dans de nombreux problèmes mathématiques. Il souligne aussi la performance d'un individu qui a pu trouver une démonstration générale alors que les ordinateurs, même les plus puissants, ne pouvaient vérifier que des cas particuliers.

Sean Baillly

T. Tao, soumis à *Discrete Analysis*, en ligne sur *arXiv*, 25 septembre 2015
<http://arxiv.org/abs/1509.05363>

Où se trouvent les gisements d'or connus ?

Gleb Pokrovski : Un peu partout dans le monde, mais surtout dans les montagnes. Les gisements se forment en effet grâce à des fluides hydrothermaux, qui extraient l'or des roches de la croûte terrestre et le transportent jusqu'à un lieu où il précipite. Or ces fluides ne circulent que dans les zones géologiques assez actives, en général là où les plaques tectoniques se rencontrent, formant des montagnes et des volcans.

Pourquoi considérerait-on la formation des gisements comme difficile ?

G. P. : L'or est un métal très inerte, qui se lie à peu d'espèces chimiques. De ce fait, il est difficile à extraire des roches. On ne connaissait que quelques éléments des fluides hydrothermaux capables de le dissoudre, tel l'ion chlorure Cl^- , et encore en faible quantité. Il fallait alors évoquer des hypothèses improbables pour expliquer les gisements : un volume de fluides hydrothermaux équivalent à celui des océans ou la présence de magmas ou de roches préconcentrés en or dans les profondeurs terrestres. Nous avons montré qu'un autre composé des fluides hydrothermaux, l'ion trisulfure S_3^- , est capable de transporter beaucoup

plus d'or, ce qui rend ces hypothèses superflues.

Pourquoi cet ion était-il passé inaperçu jusqu'à présent ?

G. P. : Car dans les fluides hydrothermaux trouvés en surface, il se transforme en d'autres composés, en raison des plus faibles pressions et températures. Nous n'avons découvert sa présence dans les fluides profonds qu'en 2010, en reproduisant les conditions thermodynamiques des profon-



Gleb Pokrovski, directeur de recherche au CNRS.

deurs (plusieurs centaines d'atmosphères et de degrés celsius) dans des récipients de quelques dixièmes de millimètre de diamètre.

Et comment avez-vous montré que cet ion se lie à l'or ?

G. P. : Grâce à la spectroscopie par rayons X, nous avons d'abord montré que des ions trisulfure entourent l'or dans des fluides modèles comprimés et chauffés. Nous avons ensuite simulé sur ordinateur les mouvements et les interactions d'une centaine de molécules dans les fluides hydrothermaux.

Ces simulations ont confirmé que l'or se lie à l'ion trisulfure. Enfin, nous avons montré, par des mesures de solubilité et des calculs thermodynamiques, qu'un fluide hydrothermal riche en S_3^- est capable de dissoudre assez d'or pour former un gisement.

Vos travaux permettent-ils de localiser les gisements d'or ?

G. P. : Pas encore, car la formation de gisements dépend de nombreux autres paramètres : la roche doit être assez perméable pour que les fluides hydrothermaux s'y écoulent, l'or doit pouvoir précipiter, etc. On ne sait donc pas dire où exactement ces conditions se produisent. Mais la bonne nouvelle est que les gisements sont bien plus fréquents qu'on ne le pensait. Avec le processus que nous avons découvert, nul besoin d'invoquer des conditions ultraparticulières pour leur formation. Les ions trisulfure devraient dissoudre l'or un peu partout, même si les gisements qui affleurent sont concentrés dans les montagnes. On estimait auparavant que les gisements exploitables ne contenaient qu'un millionième de tout l'or de la croûte terrestre. Une estimation à revoir à la hausse.

Guillaume Jacquemont

G. S. Pokrovski et al., *PNAS*, en ligne le 12 octobre 2015

Chimie

Trois pionniers de la réparation de l'ADN

Tomas Lindahl, Paul Modrich et Aziz Sancar ont été récompensés pour la description de trois mécanismes moléculaires clés mis en œuvre dans la cellule pour réparer l'ADN.

L'ADN, qui porte une bonne part du code génétique d'une cellule, n'est pas aussi stable qu'on pourrait le penser. Que ce soit de façon spontanée, sous l'effet d'une perturbation (rayonnement ultraviolet, radicaux libres...) ou durant la réplication de l'ADN lors de la division cellulaire, il s'y produit des mutations en permanence. En général, la cellule corrige ces erreurs et elles passent inaperçues. Les trois lauréats – Tomas Lindahl, de l'institut Francis Crick et du laboratoire Clare Hall, au Royaume-Uni, Paul Modrich, de l'institut médical Howard Hughes et de l'école de médecine de l'université Duke, aux États-Unis, et

visible la relançait. Il existait donc un mécanisme qui, activé par la lumière, réparait les cellules endommagées.

Les biologistes ont peu à peu compris que tout se passait au niveau de l'ADN – les dégâts dus aux ultraviolets et les réparations photo-activées – et que la lumière réparatrice devait modifier l'ADN en activant une réaction enzymatique. Dans les années 1960, notamment, on perçoit que les réparations se font par suppression des constituants endommagés de l'ADN – on les nommera plus tard réparations par excision de nucléotides.

En 1966, chez la bactérie, trois gènes sont identifiés qui,

Entre-temps, au début des années 1970, Tomas Lindahl a ajouté une pierre à l'édifice. Il a montré que même sans ultraviolets, même sans agression extérieure, l'ADN n'est pas stable et se modifie. Spontanément, diverses réactions peuvent s'y produire : oxydation, méthylation, désamination... Ces réactions perturbent les constituants de l'ADN – les nucléotides et, plus spécifiquement, les bases A, T, G, C qui en forment le noyau dur et les distinguent les uns des autres –, ce qui augmente le risque de mutation. Tomas Lindahl a même identifié un mécanisme fréquent dans les cellules, qui conduit d'une de ces réactions à

le mécanisme chez la bactérie, puis dans les cellules humaines. Celui-ci ressemble à une chaîne de production : une enzyme détecte une base endommagée et désentortille l'ADN à cet endroit, ce qui éjecte la base. Une autre enzyme coupe l'ADN à l'endroit mutilé, et une troisième vient nettoyer le trou et le combler. Une quatrième signale l'assemblage et aide la troisième à quitter les lieux.

Parallèlement, au cours des années 1970, les biologistes comprennent aussi que même pendant la réplication de l'ADN, lors de la division cellulaire, des erreurs de copie se produisent et sont corrigées, par un mécanisme que l'on nomme réparation de mésappariements. Paul Modrich explicite le mécanisme dans les années 1980 grâce à un test *in vitro*, hors des cellules, qu'il a mis au point.

La machinerie comporte elle aussi plusieurs enzymes : l'une d'elles repère l'erreur sur l'ADN et s'y lie, une autre lui indique sur quel brin d'ADN se trouve le problème (lorsqu'il se réplique, l'ADN forme deux brins enlacés – le brin répliqué et sa réplique –, et seule la réplique porte l'erreur), d'autres encore coupent le brin, l'écartent et le « réécrivent » correctement...

Toutes ces découvertes faites chez les bactéries ont depuis eu leurs pendantes dans les cellules de mammifères. Elles ont mis en évidence la multiplicité des mécanismes en œuvre dans les cellules pour réparer l'ADN et ont notamment permis de mieux comprendre le lien entre plusieurs maladies, telles que certaines formes héréditaires de cancer colorectal, et des mutations sur des enzymes clés pour ces mécanismes.

Marie-Neige Cordonnier

http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/2015/



La cellule corrige en permanence les erreurs apparaissant sur l'ADN, tel ce nucléotide anormal.

Aziz Sancar, de l'université de Caroline du Nord – ont chacun explicité un des mécanismes moléculaires qui permettent à la cellule d'effectuer ces corrections.

L'histoire a probablement commencé à la fin des années 1940, quand on s'est aperçu que les cellules étaient capables de se réparer. Albert Kelner, aux États-Unis, étudiait comment les bactéries réagissaient à une exposition aux ultraviolets (on savait déjà que les ultraviolets peuvent tuer les cellules). Il observa que les ultraviolets interrompaient leur croissance, mais que la lumière

lorsqu'ils sont défectueux, empêchent les cellules de se réparer après une exposition aux ultraviolets. Reste à savoir comment ils fonctionnent. Dans les années 1970, Aziz Sancar met au point une technique qui lui permet d'identifier les protéines codées par ces trois gènes et leurs fonctions. Le mécanisme qu'il explicite en 1983 est bien une histoire d'excision : les enzymes repèrent la région endommagée, la coupent et l'éliminent, tandis qu'une autre enzyme vient réécrire la partie manquante de l'ADN.

une mutation de l'ADN. Or cette mutation n'est pas quelconque : une base C se transforme en une base... U, pourtant absente du code de l'ADN. Cela signifie donc que la cellule corrige cette erreur. Tomas Lindahl se convainc lui aussi que le mécanisme en jeu dans ce type de réparation est une réaction enzymatique.

Les découvertes s'enchaînent alors. En 1974, il découvre une première enzyme chez les bactéries, puis toute une famille qui orchestre ce qui devient le mécanisme de réparation par excision de base. Il reconstitue