

Un gros cerveau
grâce à la
monogamie ?

L'origine du bond
technologique
d'il y a 50 000 ans

Un rameau humain
taillé par les aléas
du **climat**

■ POUR LA

SCIENCE

Numéro
spécial

Novembre 2014

128 pages

n° 445

www.pourlascience.fr

Édition française de Scientific American

L'odyssée humaine

Les moteurs cachés
de notre évolution

Reconstitution de *Homo georgicus* (1,8 million d'années) par la sculptrice Élisabeth Daynès.

Allemagne : 10,20 € - Belgique : 7,8 € - Canada /S : 11,95 CAD - Guadeloupe/St Martin /S : 7,90 € - Guyane /S : 7,90 € - Italie : 7,90 € - Luxembourg : 7,90 € - Maroc : 69 MAD - Martinique /S : 7,9 € - Nlle Calédonie Wallis /S : 1100 XPF - Polynésie Française /S : 1100 XPF - Portugal : 7,90 € - Réunion /A : 9,90 € - Suisse : 12 CHF.

M 02687 - 445S - F: 6,80 € - 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

Cerveau & Psycho - L'Essentiel Cerveau & Psycho

Rédactrice en chef : Françoise Pétry

Rédactrice en chef adjointe : Bénédicte Salthun-Lassalle

Rédacteur : Sébastien Bohler

Développement numérique : Philippe Ribeau-Gésippe

Directrice artistique : Céline Lapet

Secrétariat de rédaction/Maquette : Sylvie Sobelman,

Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy, Caroline Vanhoove

Marketing : Élise Abib et Ophélie Maillet

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 :

Slimane Bekki, Emmanuel Desclaux, Sophie Gallé,

Eva-Maria Geigl, Eitan Haddok, Évelyne Host-Platret,

Anne Masé, Christophe Pichon, Alain Riazuelo,

Daniel Tacquenot, Bernard Thierry, Jean-Luc Voisin

PUBLICITÉ France

Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin

(jf.guillotin@pourlascience.fr), assisté de Nada Mellouk-Raja

Tél. : 01 55 42 84 28 ou 01 55 42 84 97 • Fax : 01 43 25 18 29

SERVICE ABONNEMENTS

Ginette Bouffaré. Tél. : 01 55 42 84 04

Espace abonnements :

<http://tinyurl.com/abonnements-pourlascience>

Adresse e-mail : abonnements@pourlascience.fr

Service des abonnements - 8 rue Férou - 75278 Paris Cedex 06

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 :

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-oies - 1130 Bruxelles.

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

SCIENTIFIC AMERICAN

Editor in chief : Mariette DiChristina.

Editors : Fred Guterl, Ricky Rusting, Philip Yam, Mark Fischetti,

Christine Gorman, Anna Kuchment, Michael Moyer, Gary Stix,

Kate Wong. President : Steven Inchcoombe. 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 traduction, 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 interdit de

reproduire intégralement ou partiellement la présente

revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français

de l'exploitation du droit de copie (20, rue des

Grands-Augustins - 75006 Paris).



Maurice Mashaal
rédacteur en chef

Moteurs d'évolution

Les questions portant sur les origines nous fascinent. L'origine de l'Univers, l'origine de la Terre, l'origine de la vie, l'origine de l'humanité... Les mythologies et les religions ont leurs réponses. La science a les siennes, sans prétendre qu'elles soient complètes ou définitives. De fait, ces réponses évoluent et se précisent au fil des découvertes réalisées par les chercheurs, sur le terrain et dans les laboratoires.

L'origine de l'humanité ? On sait depuis longtemps, sauf à nier l'évidence paléontologique, archéologique et biologique, que l'homme anatomiquement moderne, *Homo sapiens*, est le fruit de l'évolution d'une des branches de l'arbre de la vie, qu'il a des liens de parenté avec les grands singes et que le rameau humain porte plusieurs espèces aujourd'hui disparues, telles que l'homme de Néandertal ou les australopithèques.

Reconstituer le passé, mais aussi le comprendre

Or depuis une quinzaine d'années, la paléontologie humaine s'est enrichie de découvertes nombreuses qui ont fortement modifiée la vision de notre lointaine histoire. Le tableau de l'évolution de nos ancêtres et de leurs proches parents apparaît ainsi de plus en plus détaillé.

Cependant, reconstituer l'odyssée évolutive des humains ne suffit pas. Il est bien plus intéressant de comprendre aussi pourquoi l'évolution a pris telle ou telle direction. Quels ont été les rôles du climat, des outils, de la culture, de l'organisation sociale ? Sur ces questions relatives aux moteurs de l'évolution humaine, les scientifiques ont aujourd'hui suffisamment d'éléments pour étayer de passionnantes, et parfois surprenantes, hypothèses. C'est cette science renouvelée des origines de l'homme que *Pour la Science* a voulu présenter dans ce numéro spécial. ■

1 **Édito**

Actualités

- 4 **Une soupe primordiale numérique**
- 5 **Des anxiolytiques corrélés à Alzheimer**
- 6 **Coup de vieux pour la mousson asiatique**



- 9 **Un petit ver montre la voie... antibactérienne**

Retrouvez plus d'actualités sur
www.pourlascience.fr

Réflexions & débats

- 12 **Point de vue**
L'Europe et les vols habités dans l'espace
Thierry Courvoisier
- 14 **Entretien**
Médecine personnalisée et cancer : quel avenir ?
Fabrice André
- 18 **Homo sapiens informaticus**
Détecter un informaticien dans un dîner en ville
Gilles Dowek
- 20 **Cabinet de curiosités sociologiques**
Une justice sous influence
Gérald Bronner
- 22 **Lu sur SciLogs.fr**
Pourquoi une médaille d'or du CNRS à un informaticien ?
Thierry Viéville

En couverture : Reconstitution de *Homo georgicus* (1,8 million d'années) par la sculptrice Elisabeth Daynès, Paris.
© S. Entressangle, É. Daynès/LookatSciences

Ce numéro comporte trois encarts d'abonnement *Pour la Science* : deux encarts brochés sur la diffusion abonné et un encart jeté en pages intérieures de la totalité du tirage.



L'odyssée humaine

Les moteurs cachés de notre évolution

24 **La saga humaine réécrite**

Kate Wong

Les 15 dernières années ont été riches en découvertes. À leur lumière, les scientifiques ont dû revoir presque tous les chapitres de l'histoire de l'humanité.

28 **Le buissonnant rameau humain**

Bernard Wood

Les découvertes ont compliqué la vision que l'on se faisait de l'évolution de l'homme.

38 **Quand l'homme est devenu prédateur**

Kate Wong

Quand et comment nos ancêtres sont-ils devenus de redoutables chasseurs ? Des découvertes récentes éclairent cette question débattue depuis des décennies.

44 **Le climat, moteur d'évolution**

Peter deMenocal

Avec les changements climatiques, la végétation s'est modifiée et, dans la lignée humaine, seules ont survécu les espèces ayant une certaine capacité d'adaptation.

Rendez-vous

52 **L'émergence de la coopération***Frans de Waal*

Notre capacité à coopérer au sein de grands groupes sociaux a des racines évolutives anciennes.

56 **Aux origines de la division du travail***Sophie A. de Beaune*

Les tâches au sein des premières sociétés humaines se sont d'abord réparties entre hommes et femmes. Une division du travail liée à l'apparition des outils ?

64 **La monogamie, un atout pour notre espèce***Blake Edgar*

Le mode de vie en couple durable a peut-être facilité le développement d'un gros cerveau.

72 **Quand est apparue la richesse ?***Valérie Lécivain et Geoffroy de Saulieu*

Pour l'anthropologue Alain Testart, la richesse n'a pas toujours existé. Elle serait apparue afin d'éviter de payer de sa personne, et non pour échanger des biens.

78 **La richesse, question de définition***Francesco d'Errico et Marian Vanhaeren*

Si l'on conçoit la richesse comme tout objet ou moyen dotant un individu d'un avantage social, alors elle existait au Paléolithique supérieur, voire avant.

80 **L'outil a-t-il forgé l'homme ?***Ian Tattersall*

Le passage de nos ancêtres arboricoles à *Homo sapiens* a été rapide grâce à la combinaison d'innovations culturelles et d'aléas climatiques.

86 **Le bond technologique décisif de nos ancêtres***Maxime Derex*

Il y a 50 000 ans, les moyens techniques dont les humains disposaient pour vivre se sont soudain complexifiés. Pourquoi ? Des scénarios se dessinent...

94 **L'homme : une évolution en marche***John Hawks*

Au cours des 30 000 dernières années, les sociétés humaines ont connu de profonds changements, qui ont accéléré l'évolution génétique de l'homme.

102 **Histoire des sciences****La genèse de la police scientifique***Nicolas Quinche*

L'analyse des traces laissées par les criminels s'est développée à la fin du XIX^e siècle. Mais elle s'ancre dans des pratiques remontant au Moyen Âge.

108 **Logique & calcul****Les graphes-allumettes***Jean-Paul Delahaye*

Les graphes d'un seul tenant et dont toutes les arêtes sont de même longueur sont loin d'avoir livré tous leurs secrets.

114 **Science & fiction****Visions d'un autre monde***Roland Lehoucq et J. Sébastien Steyer*116 **Art & science****Le réveil de la matière fatiguée***Loïc Mangin*118 **Idées de physique****Mettez un turbo dans votre moteur***Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik*121 **Question aux experts****À quelles profondeurs trouve-t-on du pétrole ?***Jacques Pironon et Raymond Michels*122 **Science & gastronomie****Épinards, salade et aubergine***Hervé This*124 **À lire**128 **Bloc-notes**

Les chroniques de Didier Nordon

Aussi en numérique !

POUR LA
SCIENCE.frArchives
depuis 1996Application
Smartphone et Tablette

Suivez-nous sur les réseaux sociaux

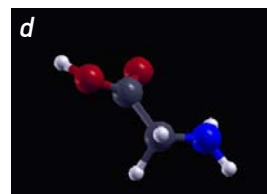
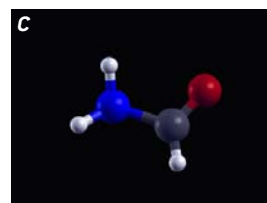
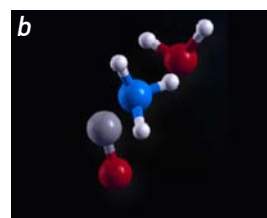
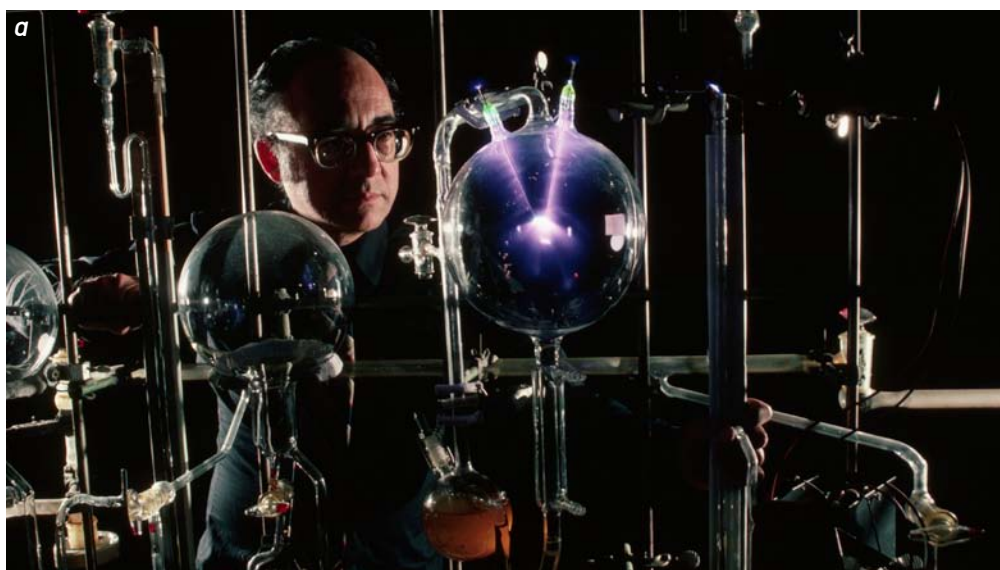


Actualités

Physico-chimie

Une soupe primordiale numérique

Deux physiciens ont simulé, à l'échelle atomique, les célèbres expériences de Miller où les composants simples de l'atmosphère terrestre primitive réagissent et produisent des acides aminés – des ingrédients du vivant.



Pour identifier les réactions chimiques dans l'expérience de Stanley Miller [a], A. Marco Saitta et Franz Saija ont modélisé le processus. Ils montrent que les molécules d'eau, d'ammoniac et de monoxyde de carbone [b] interagissent et forment du formamide [c] puis de la glycine [d], l'acide aminé le plus simple.

En 1953, le biologiste américain Stanley Miller montrait qu'il était possible d'obtenir des molécules complexes, tels des acides aminés, en soumettant des molécules simples à un champ électrique intense. C'était le début de la chimie prébiotique et de la recherche de l'origine du vivant.

Cependant, il est difficile de suivre toutes les étapes des réactions chimiques qui conduisent à la formation de molécules complexes dans de telles expériences. A. Marco Saitta, de l'Institut de minéralogie, de physique des matériaux et de cosmochimie du CNRS et de l'Université Pierre et Marie Curie à Paris, et Franz Saija, de l'Institut pour les processus physico-chimiques, à Messine en Italie, ont simulé à

l'échelle atomique les réactions de l'expérience de Miller.

Pour son expérience, Miller avait rassemblé dans une enceinte ce qu'on pensait à l'époque être les composants de l'atmosphère de la Terre primitive, un mélange gazeux de méthane, d'ammoniac, d'eau et de dihydrogène. Les diverses réactions en chaîne entre ces composants ont conduit à la formation, entre autres, de glycine.

Ce type de réactions nécessite un apport d'énergie: une décharge électrique simulant un éclair atmosphérique dans l'expérience de Miller, un rayonnement ultraviolet sur Terre ou dans l'espace, une source hydrothermale comme on en trouve au fond des océans ou encore des collisions de météorites...

Dans tous les cas, retracer précisément les réactions qui ont lieu est une tâche complexe. Les conditions sont difficiles à contrôler et de nombreuses molécules sont produites, sans qu'on ait toujours le temps d'observer les intermédiaires de réaction. A. M. Saitta et F. Saija ont modélisé l'ensemble du processus en simulant les réactions à l'échelle atomique pour suivre en détail les différentes étapes et évaluer le rôle du champ électrique.

Ces simulations numériques reposent sur la résolution des équations de la physique quantique qui régissent la structure électronique des atomes du système. En modélisant aussi le mouvement des atomes, on détermine alors les forces s'exerçant entre eux, les liaisons formées, celles

qui sont rompues et les nouveaux composés produits. Pour optimiser le temps de calcul, les deux physiciens se sont intéressés à un petit nombre de molécules en solution. Ils ont aussi découpé le processus en étapes élémentaires, ce qui leur permet de suivre la formation d'intermédiaires réactionnels. Enfin, ils ont augmenté progressivement la valeur du champ électrique afin de déterminer les conditions nécessaires pour former des acides aminés.

Ils ont ainsi mis en évidence qu'il faut un champ de 50 mégavolts par centimètre pour que les réactions s'amorcent. Si cette valeur est importante à l'échelle macroscopique, de tels champs existent à l'échelle microscopique, en particulier à la surface de minéraux.

© Roger Ressmeyer/CORBIS (a); A. Marco Saitta (MIPAC/UPMC) et Franz Saija (PPC/IMR) (b, c et d)

Grâce à leur méthode, F. Saija et A. M. Saitta ont confirmé qu'il est possible de produire de la glycine à partir de composés simples tels que l'oxygène, l'ammoniac et le monoxyde de carbone. En revanche, ils montrent que le processus est plus complexe que celui reposant sur la synthèse dite de Strecker, invoquée jusqu'à présent par les chimistes. Dans cette dernière, les molécules de l'atmosphère produisent, dans un premier temps, du formaldéhyde et du cyanure d'hydrogène. Puis ces deux molécules interagissent avec l'ammoniac pour donner un aminonitrile qui va se transformer en glycine.

Dans le modèle numérique de A. M. Saitta et F. Saija, les premiers intermédiaires de réaction sont le formamide et l'acide formique. En partant d'un mélange d'eau, d'ammoniac, de méthane, de monoxyde de carbone et de diazote, ce sont ces molécules qui sont synthétisées en présence d'un champ électrique externe. Ensuite, le formamide et l'acide formique interagissent et forment de l'hydroxyglycine qui, après plusieurs transformations, devient une molécule de glycine.

Le champ électrique externe joue plusieurs rôles : il augmente la probabilité de collision des molécules et diminue certaines barrières d'énergie d'activation des réactions.

D'autres expériences de synthèse de molécules complexes, par impacts de projectiles par exemple, présentent des traces de formamide et d'acide formique. Le scénario chimique décrit par A. M. Saitta et F. Saija pourrait ainsi concerner différents contextes astrophysiques, tel le bombardement de planètes glacées par des météorites. Enfin, l'approche de ces physiciens ouvre des perspectives intéressantes pour l'étude de processus électrochimiques par des simulations numériques.

Sean Bailly

A. M. Saitta et F. Saija, *PNAS*, vol. 11(38), pp. 13768-13773, 2014

Épidémiologie

Des anxiolytiques corrélés à Alzheimer

Une équipe franco-canadienne a détecté une corrélation importante entre la survenue de la maladie d'Alzheimer et la prise de benzodiazépines – des somnifères et anxiolytiques régulièrement consommés par une personne âgée sur trois en France. Que signifie cette corrélation ? Le point avec Bernard Bégaud, qui a dirigé l'étude.

Que sont les benzodiazépines et comment agissent-elles ?

Bernard Bégaud : C'est une famille de molécules prescrites surtout contre l'anxiété et les troubles du sommeil. Elle compte une trentaine de composés, tel le diazépam (présent dans le Valium). Ces molécules se fixent sur des récepteurs à la surface des neurones, ce qui provoque l'ouverture de canaux ioniques et rend ces cellules plus difficiles à exciter. Il en résulte un effet de sédation, qui calme le patient et facilite son sommeil.

Quelle est l'importance de leur consommation ?

B. B. : En France, près d'une personne âgée (plus de 65 ans) sur trois en consomme, souvent de façon prolongée – pendant plus d'une année consécutive.

Que conclut votre étude ?

B. B. : Nous avons étudié 1 796 patients victimes de la maladie d'Alzheimer et 7 184 personnes non touchées, grâce aux données de la Régie d'assurance maladie du Québec (RAMQ). Nous avons trouvé que les patients atteints avaient consommé bien plus de benzodiazépines que les autres. La prise de ce médicament pendant trois mois en durée cumulée augmenterait d'environ 40 % le risque de dévelop-

per la maladie. L'accroissement serait de plus de 80 % pour une consommation supérieure à six mois.

Peut-on en déduire que ces médicaments entraînent la maladie ?

B. B. : La difficulté est que la maladie d'Alzheimer est associée à des symptômes, tels que l'anxiété et l'insomnie, contre lesquels on prescrit souvent des



B. Bégaud est directeur de recherche à l'Inserm.

benzodiazépines. La prise de ces médicaments pourrait alors être une conséquence et non une cause de la maladie. Pour trancher, nous n'avons pris en compte que les consommations de benzodiazépines remontant à plus de cinq ans avant le diagnostic de la maladie d'Alzheimer – ces consommations ayant alors peu de chance d'être la conséquence des premiers symptômes. Il y a sans doute un faible biais, mais nos résultats suggèrent que la prise de benzodiazépines favorise ou accélère la survenue de la maladie.

A-t-on des hypothèses sur les mécanismes en jeu ?

B. B. : Quelques-unes. Les benzodiazépines pourraient perturber la mobilisation de la « réserve neuronale » lors du vieillissement : il y aurait une capacité cérébrale de réserve (à travers des neurones peu exploités ou la possibilité de nouvelles connexions), dont les benzodiazépines perturberaient l'exploitation *via* leur effet sédatif. Pour vérifier les hypothèses, des tests sur des modèles animaux seraient nécessaires.

Faut-il arrêter de prescrire des benzodiazépines ?

B. B. : Non, mais il faut mieux prendre en compte le rapport bénéfice sur risque. Ces médicaments sont prescrits de façon trop systématique, souvent sans vérifier le rôle de facteurs tels que la consommation de café dans l'insomnie. Les organismes de santé conseillent déjà de limiter leur utilisation à deux semaines consécutives, afin d'éviter une accoutumance (susceptible de provoquer de graves crises de sevrage en cas d'arrêt) et une perte d'efficacité. Nous avons montré que si ces recommandations sont respectées, le risque d'Alzheimer n'augmente pas.

Guillaume Jacquemont

S. Billioti de Gage et al., *B. M. J.*, en ligne le 10 septembre 2014

Climatologie

Coup de vieux pour la mousson asiatique

On pensait que la mousson asiatique était apparue avec la formation du massif himalayen, il y a 25 millions d'années. De nouveaux travaux montrent qu'elle se manifestait déjà il y a 40 millions d'années.



Les coquilles de gastéropodes fossilisés (a) du Sud de l'Himalaya (b) et les sédiments du plateau de Loess en Chine (c) contiennent des traces d'une mousson ancienne.



© A. Licht (a), Shutterstock.com/shailashanai (b), G. Dupont-Nivet (c)

En Asie, la chaîne de l'Himalaya et le plateau tibétain favorisent le système de mousson en forçant les vents à s'élever et à se vider de leur humidité, provoquant ainsi de fortes précipitations durant l'été. L'émergence de ces reliefs, il y a entre 22 et 25 millions d'années, aurait marqué le début de l'activité de la mousson asiatique. Cependant, Alexis Licht, à l'Université de Poitiers, et ses collègues ont rassemblé diverses observations qui suggèrent que la mousson était déjà active il y a 40 millions d'années.

La période géologique de l'Éocène – il y a entre 55 et 34 millions d'années – a été marquée par une atmosphère riche en dioxyde de carbone, avec des concentrations quatre fois supérieures à celles de l'époque pré-industrielle. Selon certains climatologues, la forte concentration de dioxyde de carbone aurait favorisé un système de mousson : l'effet de serre, plus important, a augmenté la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère, ce qui a conduit à un cycle hydrologique intense.

Pour vérifier cette hypothèse, A. Licht et ses collègues ont me-

suré, dans un bassin indien, le rapport isotopique d'oxygène 18 et 16 dans les coquilles fossilisées de gastéropodes et l'émail des dents fossiles de mammifères. En effet, en se formant, ces tissus incorporent l'oxygène de l'eau et enregistrent les variations du rapport isotopique – la concentration d'oxygène 18 dans l'eau douce diminue pendant la saison des pluies et augmente en saison sèche. C'est ainsi que les chercheurs ont déduit l'existence d'une alternance de saisons de type mousson il y a 40 millions d'années.

D'autres études mettent au jour les traces d'une mousson ancienne. Le plateau sédimentaire de Loess, en Chine, présente une alternance de couches de loess et de gypse qui suivent des cycles de 41 000 ans compatibles avec la variation périodique de l'obliquité de la Terre. L'éclairement solaire de la région varie durant ce cycle et conduit à des périodes de mousson d'été plus marquées (bancs de gypse, formés par l'eau) ou moins intenses (bancs de loess, déposés par le vent).

Enfin, les chercheurs du Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement, à Gif-sur-

Yvette, ont étudié des modèles de circulation atmosphérique en reconstruisant le relief qui était celui de la région il y a 40 millions d'années. Ils confirment que la concentration de dioxyde de carbone a été un facteur important dans la dynamique de la mousson, comparable à l'influence actuelle de la chaîne himalayenne. En outre, la baisse de la concentration de dioxyde de carbone il y a 34 millions d'années s'est accompagnée d'une diminution de l'intensité de la mousson. Cela expliquerait d'ailleurs la disparition, à partir de 34 millions d'années, des couches sédimentaires du plateau de Loess correspondant aux saisons humides.

Ce résultat renvoie au débat actuel sur l'évolution du climat. En effet, dans son dernier rapport, le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) a souligné que l'augmentation du dioxyde de carbone dans l'atmosphère pourrait intensifier la mousson en Asie, scénario qui s'accorde avec les observations d'A. Licht et de ses collègues.

S. B.

A. Licht et al., *Nature*, en ligne, 14 septembre 2014

16%

C'est la hausse prévue des précipitations annuelles dans les zones de mousson d'ici 100 ans, selon les modèles les plus pessimistes du GIEC.*

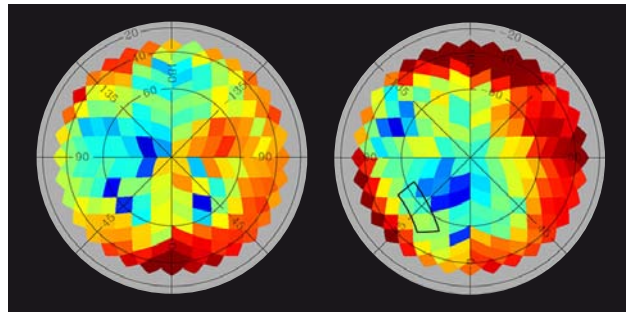
Cosmologie

Ondes gravitationnelles primordiales : BICEP2 mord la poussière

En mars 2014, les chercheurs de BICEP2, un télescope situé en Antarctique, ont annoncé avoir observé un mode de polarisation particulier dans le rayonnement du fond diffus cosmologique : le mode *B* d'origine primordiale. Ce résultat était très attendu, car il constituerait un indice observationnel fort à l'appui d'un élément clé du modèle du Big Bang, l'inflation. Or l'équipe de *Planck*, satellite mesurant aussi le rayonnement du fond diffus cosmologique, livre des résultats qui refroidissent l'enthousiasme.

Le mode *B* primordial est supposé avoir été engendré par des ondes gravitationnelles qui se sont propagées dans l'Univers alors qu'il n'était âgé que d'une fraction de seconde. Ces ondes apparaissent naturellement dans des scénarios d'inflation, où l'Univers connaît une brève période de croissance exponentielle.

Le résultat de BICEP2 avait rapidement soulevé un débat



Le signal de la poussière dans les hémisphères nord et sud, mesuré par *Planck* [intensité croissante du bleu au rouge]. Le cadre noir (à droite) indique la zone observée par BICEP2.

autour d'une source d'erreur possible : les poussières interstellaires émettent un rayonnement polarisé aux caractéristiques similaires à celles du fond diffus cosmologique marqué par des ondes gravitationnelles primordiales. En bref, le signal de BICEP2 était peut-être contaminé par celui de la poussière galactique. L'équipe de *Planck* vient de renforcer cette crainte : les poussières pourraient expliquer l'intégralité du signal de BICEP2!

Les incertitudes concernant la contribution des poussières restent néanmoins élevées dans l'estimation de *Planck*. À présent, les deux équipes comptent s'associer et profiter des atouts de chaque instrument pour améliorer la mesure du mode *B* dans la zone étudiée par BICEP2. Des résultats sont attendus pour la fin de l'année. Affaire à suivre...

S. B.

Collaboration *Planck*,
<http://arxiv.org/abs/arXiv:1409.5738>

Taillés pour l'obscurité

Les poissons cavernicoles *Astyanax mexicanus* sont bien adaptés à la vie dans l'obscurité, car ils ont par exemple une olfaction performante. Damian Morian, de l'Université de Lund, en Suède, et ses collègues ont mis en évidence une nouvelle adaptation : l'absence de rythme circadien (variation d'activité métabolique selon des cycles jour-nuit). Leur métabolisme moins fluctuant leur permettrait d'économiser de l'énergie, dans un milieu où la nourriture est rare.

Un dino de 60 tonnes

Les restes relativement complets d'un dinosaure géant ont été mis au jour dès 2005 en Argentine, dans le Sud de la Patagonie. Herbivore du groupe des titanosaurès, cet animal vient d'être décrit par l'équipe américano-argentine de Kenneth Lacovara, de l'Université Drexel. Nommé *Dreadnoughtus schrani*, il mesurait plus de 26 mètres et pesait plus de 59 tonnes. L'analyse des tissus osseux montre qu'il grandissait encore au moment où il est mort...

Neurobiologie

Les prouesses du cerveau endormi

On savait que le cerveau ne se déconnecte pas complètement de son environnement pendant le sommeil. Il reste même capable d'un certain traitement sémantique : on se réveille ainsi plus facilement en entendant son nom, les cris de son bébé ou une alarme à incendie qu'avec des sons quelconques d'intensité comparable. Mais les réponses cérébrales mises en évidence jusqu'à présent, telle la reconnaissance automatique d'un stimulus, étaient stéréotypées. Sid Kouider, du Laboratoire de sciences cognitives et psycholinguistiques (CNRS/ENS/EHESS), à Paris, et ses collègues

sont allés plus loin : ils ont montré que durant le sommeil, le cerveau peut traiter l'information de façon flexible et préparer une réaction adéquate.

Les chercheurs ont entraîné des sujets à catégoriser des mots. Les participants écoutaient des mots et devaient choisir à chaque fois s'ils désignaient un animal ou un objet. Ils indiquaient leur choix en pressant un bouton avec une main déterminée à l'avance, par exemple la droite pour un animal et la gauche pour un objet. Parallèlement, les chercheurs mesuraient l'activité cérébrale des sujets par électroencéphalographie, c'est-à-dire à l'aide d'élec-

trodes posées sur leur crâne. Ils ont constaté que lorsque le sujet choisit s'il doit utiliser sa main droite ou sa main gauche, un pic caractéristique se produit dans le tracé électroencéphalographique au niveau du cortex moteur. En présentant des mots nouveaux aux participants pendant leur sommeil, ils ont montré que le pic associé au mouvement correct était toujours présent. C'est le signe que le cerveau continuait à catégoriser les mots et à s'approprier à déclencher la réponse motrice appropriée.

G. J.

S. Kouider et al., *Current Biology*, en ligne le 11 septembre 2014



Avec un entraînement adéquat, le cerveau peut catégoriser des mots au cours du sommeil.

Lire en inhibant son cerveau

Un tigre vu par le côté droit ou par le côté gauche reste un tigre, et nous le comprenons grâce à un mécanisme cérébral automatique dit de généralisation en miroir. En revanche, si l'on renverse symétriquement la lettre « b », elle se transforme en « d ». Pourquoi la généralisation en miroir ne nous fait-elle pas confondre ces deux lettres ? Parce que nous l'inhibons de façon dynamique lors de la lecture, selon une étude menée par Grégoire Borst, de l'Université Paris Descartes, et ses collègues.

Une longue tombe d'archer

Il y a 6 500 ans, à Fleury-sur-Orne dans le Calvados, un archer s'est fait enterrer dans une tombe de 372 mètres de long. Ce tertre, le plus long monument funéraire d'Europe, est l'un des marqueurs de la culture de Passy. Dans cette culture néolithique de la région parisienne, une élite, dont les membres masculins étaient des archers, était donc capable de faire travailler la communauté à l'érection de grands monuments destinés uniquement à mettre en scène leur mort.

Les débuts du sida

La pandémie de sida aurait commencé dans les années 1920 à Kinshasa, aujourd'hui capitale de la République démocratique du Congo. C'est ce qu'ont montré Nuno Faria, de l'Université d'Oxford, et ses collègues en reconstituant la dynamique d'évolution et d'expansion du virus à partir de l'analyse phylogénétique de séquences virales répertoriées en Afrique centrale. Jusque dans les années 1950, l'épidémie se serait répandue dans le centre-ouest de l'Afrique au même rythme qu'une autre forme du virus non pandémique, le long des voies commerciales. Puis elle aurait explosé, favorisée par le développement du commerce sexuel et des injections médicales non stériles.

Géosciences

Pierres mouvantes : le mystère élucidé



Les roches du lac Racetrack Playa se déplacent parfois, poussées par des plaques de glace.

Racetrack Playa est un lac asséché une grande partie de l'année et situé dans le parc américain de la Vallée de la Mort, en Californie. Des pierres pesant parfois plus de dix kilogrammes s'y déplacent en laissant derrière elles une trace dans la boue. Quel processus explique ce mouvement ? Richard Norris, de l'Institut d'océanographie Scripps, et ses collègues ont suivi ces pierres avec divers instruments de localisation. Ils ont ainsi identifié le rôle combiné du vent et de la glace.

En décembre 2013, les chercheurs ont fait une observation cruciale. Un mois plus tôt, des précipitations, rares dans cette région, ont rempli le lac asséché de quelques centimètres d'eau. Avec la basse température am-

biante, l'eau a gelé. Cependant, à plusieurs reprises, en fin de matinée, les chercheurs ont constaté que la glace en surface se brisait en plaques de trois à six millimètres d'épaisseur flottant sur l'eau liquide. Un vent léger poussait les plaques, longues de plusieurs dizaines de mètres, qui poussaient à leur tour les rochers et les mettaient en mouvement.

Le déplacement peut atteindre deux à cinq mètres par minute. Le vent dominant détermine sa direction, ce qui explique pourquoi de nombreuses traces sont parallèles. Le phénomène des pierres mouvantes semble enfin éclairci !

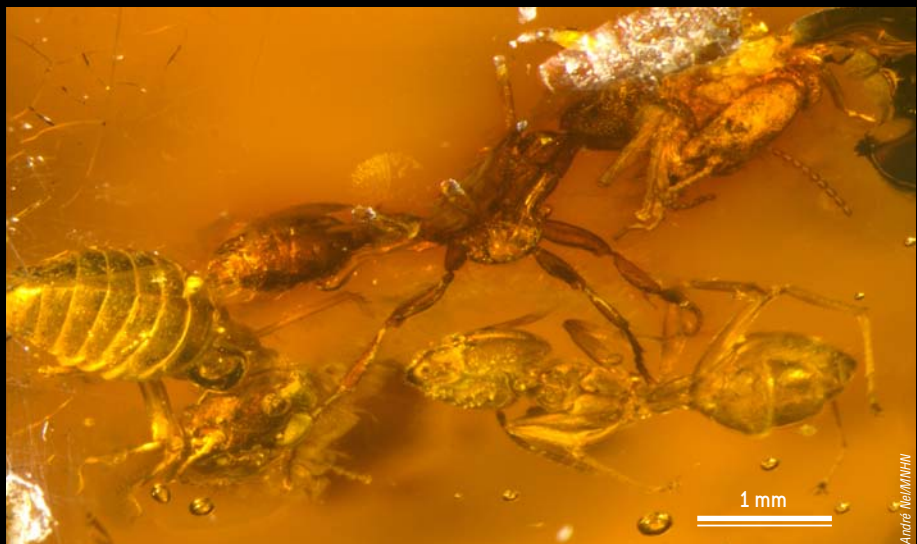
S. B.

R. Norris et al., *PLoS One*, vol. 9(8), e105948, 2014

Insolite

Un raid de fourmis immortalisé dans l'ambre

Un morceau d'ambre contenant trois fourmis du genre *Azteca*, trois termites *Nasutitermes* et une fourmi légionnaire *Neivamyrmex* a été découvert au Chiapas (Mexique) par David Coty, du Muséum à Paris, et ses collègues. Alors que les *Azteca* cohabitent avec les termites, les fourmis légionnaires sont prédatrices. Ici, la légionnaire tient dans ses mandibules un termite *Nasutitermes*, tandis que le corps d'un autre termite est lacéré. Une attaque était en cours lorsque la résine à l'origine de l'ambre a coulé, il y a plus de 10 millions d'années !



Immunologie

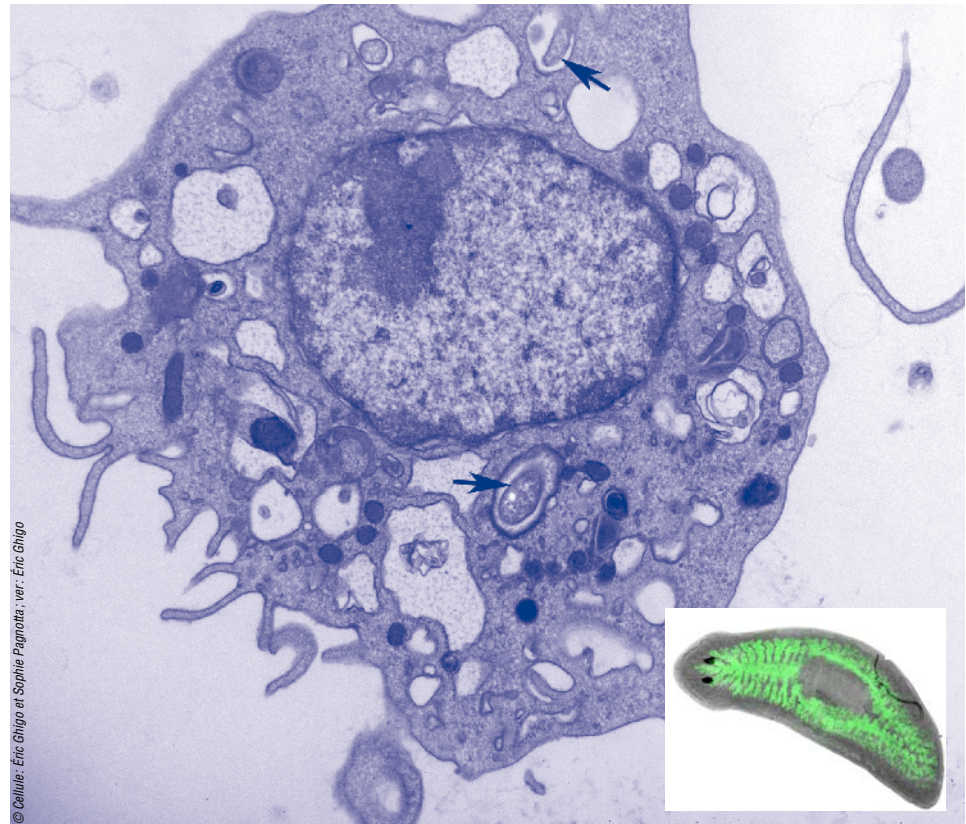
Un petit ver montre la voie... antibactérienne

L'étude d'un ver plat d'eau douce particulièrement résistant aux bactéries a permis d'identifier un mécanisme de défense similaire présent à l'état latent chez l'homme.

Tout semble séparer l'homme du planaire *Dugesia japonica*, un ver plat d'eau douce réputé pour ses capacités de régénération. Pourtant, Éric Ghigo, de l'Unité de recherche sur les maladies infectieuses et tropicales émergentes (CNRS/IRD/Inserm/Université Aix-Marseille), à Marseille, et ses collègues ont mis en évidence un point commun inattendu entre les deux espèces : une voie de défense inédite contre les bactéries.

Les vers plats *D. japonica* se nourrissent de tout ce qui passe à leur portée : chair animale, mais aussi détrit, champignons et bactéries – et survivent fort bien à cette exposition aux microbes. Les biologistes se sont demandé quels mécanismes leur confèrent une telle résistance. Pour le savoir, ils ont étudié les gènes exprimés par le planaire lorsqu'il est exposé à des bactéries pathogènes pour l'homme – le staphylocoque doré (*Staphylococcus aureus*) et la bactérie de la légionellose (*Legionella pneumophila*). Ils ont ainsi identifié 18 gènes exprimés dans l'intestin du planaire et impliqués dans l'élimination de ces bactéries.

L'un d'eux est particulièrement intéressant, car son champ d'action s'est révélé inclure 16 bactéries pathogènes pour l'homme. Or le génome humain contient une séquence très similaire – un gène nommé *MORN2* dont on ignorait la fonction. Ce gène est-il capable de protéger l'homme contre les bactéries, comme son équivalent chez le planaire ? Oui, ont montré les biologistes : surexprimé dans des macrophages humains – des cellules qui éliminent les agents pathogènes en les « avalant » et en les « digérant », il les rend capables de détruire les bactéries *S. aureus*, *L. pneumophila* ainsi que celle



© Cellule: Éric Ghigo et Sophie Pagnotte; ver: Éric Ghigo

responsable de la tuberculose, *Mycobacterium tuberculosis*.

Par quel mécanisme ? La bactérie *M. tuberculosis* survit aux macrophages en les empêchant de digérer ce qu'ils ont avalé – en l'occurrence les bactéries elles-mêmes –, ce qui leur permet de proliférer. Plus précisément, la bactérie bloque la maturation du compartiment dans lequel elle se retrouve une fois avalée – un phagosome – et empêche ce compartiment d'acquies les enzymes qui détruiront son contenu. É. Ghigo et ses collègues ont montré que la protéine *MORN2* rétablit cette maturation du phagosome, permettant ainsi aux enzymes d'atteindre leur cible.

Ce mécanisme serait apparu chez un ancêtre commun du planaire et de l'homme et se serait

conservé au fil de l'évolution. Toutefois, chez l'homme, le gène *MORN2* ne semble plus avoir l'activité de son ancêtre. Les biologistes espèrent mettre au point un traitement qui permettra de le réactiver pour combattre les bactéries qui, telle *M. tuberculosis*, multiplient les résistances aux antibiotiques.

Ce mécanisme n'existe pas chez les organismes modèles classiques utilisés pour étudier le système immunitaire, telle la mouche drosophile. Il a probablement été perdu au cours de l'évolution. Sans l'étude des défenses de ce petit ver aquatique, il serait encore longtemps resté dans l'ombre...

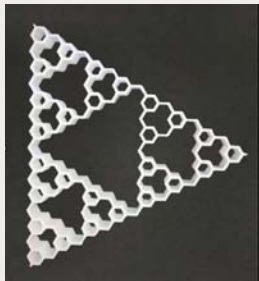
Marie-Neige Cordonnier

P. Abnave et al., *Cell Host & Microbe*, vol. 16, pp. 338-350, 2014

Un macrophage humain infecté par des bactéries *Mycobacterium tuberculosis* (flèches). Contrairement à l'homme, le planaire *Dugesia japonica*, ver plat long d'une dizaine de millimètres (voir le cartouche, le ver étant ici infecté par des bactéries *Legionella pneumophila*, en vert dans les intestins), résiste aux attaques de ces bactéries et de nombreuses autres.

Nid d'abeilles fractal

Les matériaux structurés en nid d'abeilles allient légèreté et solidité. Comment améliorer encore ces qualités ? Une équipe de cinq chercheurs de Boston, d'Oxford et de Lyon a montré qu'il est possible de le faire en répétant le motif en nid d'abeilles à différentes échelles (*ci-dessous*), à l'image d'une structure fractale.



Ashkan Vaziri (*Northeastern University*) et ses collègues ont déterminé comment varient les propriétés mécaniques du nid d'abeilles hiérarchique en fonction des paramètres caractérisant le système (nombre de niveaux hiérarchiques, densité moyenne du réseau, etc.). Par exemple, avec cinq niveaux de hiérarchie, on peut multiplier par sept la résistance du matériau à la déformation !

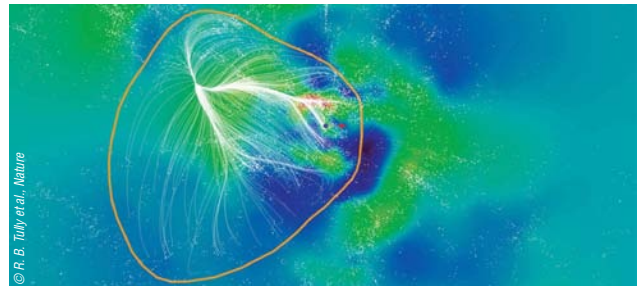
R. Othman et al., *Phys. Rev. Lett.*, 113, 104301, 2014

Astrophysique

Laniakea : aux confins de notre superamas

Galaxies, amas de galaxies, superamas de galaxies... Aux plus grandes échelles, l'Univers donne l'image d'un réseau bien structuré où la matière se concentre dans certaines régions. Cependant, les superamas sont très mal définis. Quelles sont leurs frontières ? Brent Tully, de l'Université d'Hawaï, Hélène Courtois, de l'Université Claude Bernard à Lyon, et leurs collègues ont mis au point une nouvelle méthode pour trouver les contours du superamas de galaxies auquel appartient la Voie lactée. Ils s'inspirent de concepts utilisés en hydrologie.

Un bassin-versant est défini comme une région où toutes les eaux de pluie convergent vers une seule voie de sortie. Il est délimité par des lignes de partage naturelles – telles des lignes de crête –, qui ne peuvent être franchies par l'eau. Ce concept a été repris par les astronomes



Cette figure montre une coupe du superamas Laniakea (et son contour en orange) et des superamas voisins. Les lignes blanches sont les trajectoires des galaxies.

pour définir les superamas. Ils ont utilisé un catalogue de 8000 galaxies dont on connaît la position et la vitesse propre (c'est-à-dire en soustrayant l'effet de l'expansion de l'Univers). En cartographiant ces objets et en extrapolant leurs trajectoires, ils ont regroupé toutes les galaxies qui convergent vers la même région suivant les lois de la gravité.

B. Tully et ses collègues ont ainsi établi les contours de notre

superamas. La Voie lactée se retrouve en périphérie de cette structure de 500 millions d'années-lumière de diamètre et contenant une masse d'environ 10^{17} masses solaires. Le nouveau superamas a été nommé Laniakea par les chercheurs, en s'inspirant des mots hawaïens *lani*, qui signifie ciel, et *akea*, qui veut dire immense.

S.B.

R. B. Tully et al., *Nature*, vol. 513, pp. 71-73, 2014

Santé

Édulcorants et intolérance au glucose

Et si, au lieu de combattre l'épidémie d'obésité et de diabète, les édulcorants y contribuaient ? C'est ce que suggèrent les travaux de Jotham Suez, de l'Institut Weizmann, en Israël, et ses collègues. Ils ont montré chez la souris que la consommation régulière de substituts non caloriques du sucre tels que l'aspartame ou la saccharine perturbe le métabolisme en modifiant la composition du microbiote intestinal – les bactéries de l'intestin.

Depuis quelques années, on s'interroge sur l'innocuité de ces molécules, sans parvenir à conclure. La plupart des édulcorants arrivant dans l'intestin sans

être digérés, les biologistes se sont intéressés à leurs effets sur son microbiote. Celui-ci participe en effet à la régulation de nombreux processus physiologiques, dont le métabolisme du sucre.

Les biologistes ont donné à des souris de l'eau contenant du glucose ou un mélange de glucose et d'édulcorant imitant des produits commerciaux (utilisant environ 95 % de glucose et 5 % d'édulcorant) : les souris qui consommaient de l'édulcorant ont développé une intolérance au glucose. Deux expériences les ont alors convaincus que cette intolérance était due à une perturbation de la flore intestinale.

D'une part, lorsqu'ils donnaient aux souris des antibiotiques tuant les bactéries intestinales, les souris ne devenaient pas intolérantes. D'autre part, lorsque l'on transplantait le microbiote de souris devenues intolérantes dans l'intestin de souris sans microbiote, ces dernières devenaient intolérantes.

L'édulcorant changerait la composition du microbiote, ce qui modifierait ses fonctions métaboliques. Or des modifications similaires ont été observées chez des souris et des humains atteints de diabète ou d'obésité...

M.-N. C.

J. Suez et al., *Nature*, en ligne le 17 septembre 2014

Environnement

Où en est la couche d'ozone ?

Dans les années 1980, on découvrait au-dessus de l'Antarctique un « trou » dans la couche d'ozone – en réalité une zone très appauvrie en ozone. La couche d'ozone est dégradée par des gaz regroupés sous le terme SAO (substances appauvrissant l'ozone). Le protocole de Montréal a été adopté en 1987 pour limiter leurs émissions. Sous l'égide de l'Organisation météorologique mondiale et du Programme pour l'environnement de l'ONU, quelque 300 chercheurs viennent d'évaluer son efficacité. Ils ont conclu que la couche d'ozone va mieux et devrait se reconstituer d'ici le milieu du siècle sur la plus grande part de la planète. Toutefois, certains remplaçants des SAO risquent d'exercer un effet de serre important.

G. J.

www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/ozone_2014/ozone_asst_report.html

Géosciences

Titan : des dunes à l'envers

Des dunes dépassant parfois 100 kilomètres de long et parallèles à l'équateur s'étendent aux tropiques de Titan, le plus gros satellite de Saturne. Elles semblent s'étirer d'Ouest en Est, alors que dans cette région, le vent dominant au niveau du sol souffle dans le sens opposé. Antoine Lucas, du CEA à Saclay et associé au pôle de recherche en sciences planétaires de l'Université Paris-Diderot à Paris, et ses collègues ont modélisé la dynamique des vents pour résoudre cette contradiction apparente. Les dunes se seraient formées sous l'action des rafales violentes qui soufflent vers l'Est pendant les équinoxes. Les géologues ont aussi montré que l'orientation des dunes n'est compatible avec la dynamique des vents que si le sol ne s'érode pas. Il reste donc à identifier la source des sédiments transportés par le vent et dont ces dunes sont constituées.

S. B.

A. Lucas et al., *Geophys. Res. Lett.*, en ligne le 10 septembre 2014

Archéologie

L'aile cavalière du Mont Castel

Des archéologues ont découvert qu'après la guerre des Gaules, une unité de cavalerie fut stationnée sur le Mont Castel qui domine Port-en-Bessin-Huppain, en Normandie.

Quand ils ont abordé ce plateau, Anthony Lefort et Cyril Marcigny, de l'Inrap, ont pris sur le fait un « détectoriste », qui leur a montré sa collection. Ils ont été étonnés d'y voir des monnaies de toute la Gaule du I^{er} siècle avant notre ère... Pensant avoir affaire à un affabulateur, ils ont sondé le mont en deux endroits. Ils ont alors eu la surprise de trouver le même genre d'échantillon varié de monnaies ; elles se trouvaient dans les limites de ce qui s'est révélé être un casernement militaire. Reconnaisables aux trous

des poteaux de fondation, les bâtiments rectangulaires sont disposés les uns par rapport aux autres suivant un plan très géométrique... qui trahit son ingénieur romain.

La découverte de restes d'armement romain, de clous de semelles de *caligae* et d'éperons suggère un cantonnement d'une *ala* gauloise, c'est-à-dire d'une « aile de cavalerie ». Après Alésia, les Romains ont en effet employé des troupes auxiliaires pour maintenir la paix, et les cavaliers gaulois avaient l'avantage de pouvoir intervenir vite, tout en connaissant bien le terrain. Manifestement, ils étaient payés avec des monnaies collectées (pillées ?) dans toute la Gaule.

François Savatier



Deux des pièces en argent trouvées au Mont Castel.

Océan des Tempêtes... magmatiques

Sur la Lune, l'Océan des Tempêtes est une vaste région presque plane de près de 3 200 kilomètres de diamètre. On a longtemps pensé qu'il s'agissait d'un bassin d'impact. Les mesures gravimétriques des deux sondes GRAIL écartent cette hypothèse. Des structures linéaires délimitant une forme quasi rectangulaire se cachent sous la lave refroidie. Il s'agit probablement d'anciens rifts, vestiges de l'activité magmatique de la Lune. L'impact d'un astéroïde aurait, lui, produit un bassin de forme circulaire.

Les Néandertaliens, disparus plus tôt ?

Les derniers Néandertaliens auraient disparu il y a quelque 35 000 ans, mais l'équipe de Thomas Higham, de l'Université d'Oxford, avance que cela s'est produit plus tôt. Les chercheurs ont raffiné les méthodes de datation au carbone, puis ont estimé les âges de 196 échantillons fossiles

humains provenant de 40 sites néandertaliens en Europe. Les résultats suggèrent que les derniers Néandertaliens auraient disparu il y a 41 000 à 39 000 ans. Selon ces nouvelles datations, les Néandertaliens et les hommes modernes, qui ont commencé à pénétrer en Europe il y a 45 000 ans, n'ont pu se côtoyer que brièvement.

Suivez les dernières actualités

de Pour la Science

sur les réseaux sociaux



Retrouvez

plus d'actualités sur

www.pourlascience.fr

POINT DE VUE

L'Europe et les vols habités dans l'espace

En dehors de sa contribution à la Station spatiale internationale, l'Europe ne devrait pas s'engager maintenant dans d'inutiles et très coûteuses missions habitées vers la Lune ou vers Mars.

Thierry COURVOISIER

Doit-on envoyer des hommes ou des femmes dans l'espace ? Cette question occupe souvent les discussions, tant parmi le public que chez les professionnels de l'espace. L'EASAC (*European Academies Science Advisory Council*), qui rassemble les académies des pays membres de l'Union européenne, de la Norvège et de la Suisse afin d'apporter des connaissances scientifiques dans les processus de décision politique en Europe, a souhaité contribuer à la réflexion stratégique européenne en matière d'exploration spatiale. Un rapport écrit par un groupe d'experts dans différents domaines d'activités spatiales vient ainsi de paraître (disponible sur www.easac.eu). Voici quelques-uns des points discutés.

L'exploration spatiale est l'un des éléments centraux de notre découverte du monde. Elle se situe entre la connaissance détaillée de notre planète acquise au fil de siècles de voyages et l'observation de l'Univers lointain avec nos télescopes et satellites. Poursuivre cette exploration, c'est approfondir ce chaînon de notre connaissance entre l'espace accessible à tous, sur Terre, et celui qui n'est accessible à personne. C'est aussi poursuivre des défis technologiques passionnants, par exemple construire des instruments de mesure légers et fonctionnant avec un minimum d'énergie. C'est encore mettre en œuvre d'importantes collaborations industrielles pour développer

et déployer dans l'espace, milieu hostile, des systèmes complexes répondant à des exigences très strictes.

Pour toutes ces raisons, la nécessité de poursuivre et développer un programme d'exploration spatiale vigoureux est une évidence. Ce programme doit inclure une composante européenne autonome importante. Il est en effet essentiel pour l'Europe de maîtriser les technologies spatiales afin de diminuer sa dépendance vis-à-vis des États-Unis et ainsi asseoir son indépendance sur la scène mon-

DES MISSIONS HABITÉES VERS MARS ne sont pas nécessaires sur le plan scientifique et poseraient de nombreux problèmes non encore résolus.

diale. Ce qui n'est pas en contradiction avec une étroite collaboration intercontinentale, tant dans le cadre de projets à la pointe de la science que pour des raisons qui peuvent être plus politiques ou sociétales. Une concertation accrue entre tous les acteurs de l'exploration spatiale permettrait déjà d'harmoniser les différents programmes et éviterait des compétitions stériles.

En matière de vols habités, le seul élément européen est la contribution à la Station spatiale internationale, ou ISS. Ce programme s'est développé à l'origine pour des raisons dont la science n'était qu'un élément mineur. Aujourd'hui, cependant, l'ISS est devenue un

laboratoire fiable qui livre des résultats de premier plan en biologie, en médecine fondamentale ou en science des matériaux et des fluides. L'Europe devrait donc participer pleinement dans les années à venir à l'exploitation scientifique de ce laboratoire unique.

Faut-il prévoir des missions habitées pour explorer nos plus proches voisins, la Lune et Mars ? L'analyse des potentialités et des difficultés d'une telle mission indique que, dans l'avenir proche, seule une exploration robotique doit être considérée.

D'une part, la présence humaine dans l'exploration martienne ou lunaire n'est pas nécessaire sur le plan scientifique. D'autre part, un vol – de longue durée – vers Mars poserait de nombreux problèmes non encore résolus, par exemple la protection de l'équipage contre les effets des rayons cosmiques ou le développement de moyens pour assurer nourriture et survie.

Il s'ensuit notamment que le coût d'une mission habitée vers Mars ne peut être évalué. De tels projets ne doivent ni ne peuvent faire partie des efforts de planification actuels ! Quant à d'éventuels vols habités en direction de la Lune, ils devront aussi venir après une exploration systématique automatisée et non la précéder.

Se pencher sur le programme d'exploration européen et sur l'éventualité de vols habités mène naturellement à des considérations plus générales sur certains aspects de la politique spatiale européenne.