

■ POUR LA

SCIENCE

Octobre 2014 - n° 444

www.pourlascience.fr

Édition française de Scientific American



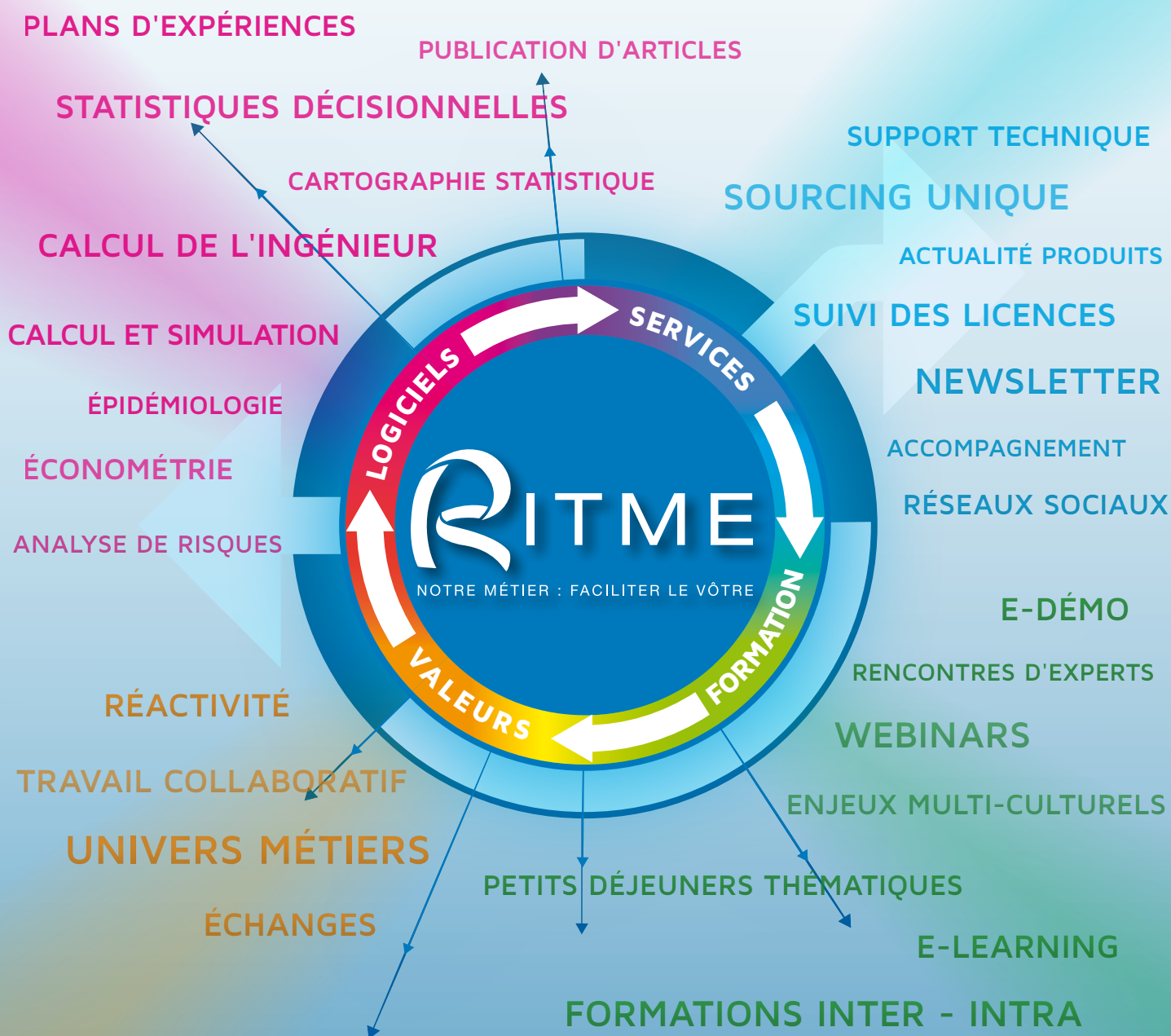
Décrypter le cerveau

Comment la science y parviendra

M 02687 - 444 - F - 6,20 € - RD



Notre métier facilite le vôtre



www.ritme.com

Votre partenaire pour tous vos logiciels scientifiques et techniques

RITME
NOTRE MÉTIER : FACILITER LE VÔTRE

POUR LA SCIENCE

www.pourlascience.fr

8 rue Férou - 75278 Paris Cedex 06

Groupe POUR LA SCIENCE

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 Lapert

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 : Marc Artzrouni,

Alain Bouquet, Silvana Condemi, Nicolas Fabas, Frédéric

Gambino, Eitan Haddok, Evelyne Host-Platret, Christophe Pichon

PUBLICITÉ France

Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin

[j.f.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 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

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

Le siècle du cerveau

Plus gros qu'une tête d'épingle, le système nerveux d'un moustique compte quelques dizaines de milliers de neurones au plus. De quoi forcer l'admiration, car l'insecte est capable de comportements étonnamment complexes : détecter à distance une source de nourriture, se reproduire, échapper aux prédateurs, se réfugier et patienter dans un coin obscur après une tentative ratée de nous piquer... Comment un nombre aussi modeste de neurones commande-t-il tout cela ?

En fait, malgré des décennies de recherches, nous l'ignorons, ou presque. Le mystère n'est pas moindre, bien au contraire, dans le cas de l'espèce humaine. Malgré les progrès des neurosciences, nous ne savons pas, ou si peu, comment le cerveau humain et ses quelque 86 milliards de neurones engendrent nos comportements, nos perceptions, nos émotions, nos souvenirs, nos pensées.

Suivre neurone par neurone l'activité de circuits cérébraux entiers

Pourtant, les scientifiques ont bon espoir de comprendre d'ici la fin du siècle le fonctionnement du cerveau. Plusieurs grands projets ont été récemment lancés, tels le *Human Brain Project* européen visant à simuler le fonctionnement d'un cerveau humain ou le projet *Human Connectome* axé sur la cartographie des connexions neuronales. Les avancées exigeront aussi de nouveaux outils d'étude. Comme le soutiennent Rafael Yuste et George Church, deux des promoteurs du projet américain BRAIN, la mise au point de techniques permettant de suivre ou de contrôler l'activité de réseaux cérébraux entiers, neurone par neurone, sera indispensable [voir pages 22 à 30].

Ces techniques, certaines en gestation, d'autres plus futuristes, aideront à décrypter le cerveau. Elles et les grands projets suffiront-ils pour élucider le phénomène de la conscience, grande énigme existentielle s'il en est ? Le pari est ici plus risqué, tant est grand le fossé épistémologique qui sépare la matière de l'esprit. ■

1 Édito

Actualités

- 4 La boucherie néandertalienne de Quincieux
- 5 Bisphénol A et intolérance alimentaire
- 6 Les médailles Fields 2014
- 9 Un amas de galaxies cartographié avec une précision inégalée



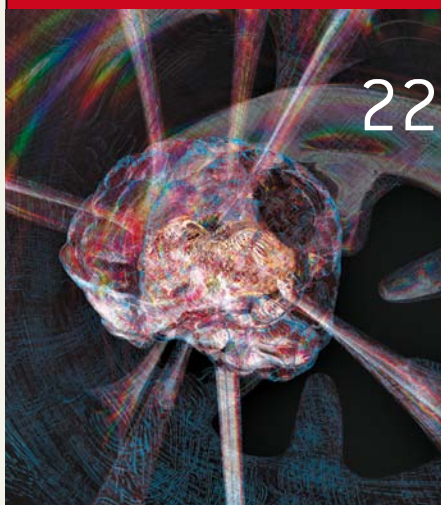
Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

Réflexions & débats

- 12 **Point de vue**
Fièvre d'Ebola : une épidémie déroutante
Jean-Claude Manuguerra
- 14 **Entretien**
Gaz de schiste : pourra-t-on les exploiter proprement ?
Gilles Pijaudier-Cabot
- 18 **Lu sur SciLogs.fr**
La gravité artificielle vue par le cinéma
Richard Taillet
- 19 **Homo sapiens informaticus**
Le vainqueur, un colosse aux pieds d'argile
Gilles Dowek
- 21 **Cabinet de curiosités sociologiques**
Qui marche sur la Lune ?
Gérald Bronner

Ce numéro comporte un encart d'abonnement *Pour la Science* jeté en pages intérieures sur la totalité du tirage.
En couverture : © Hobbit/shutterstock.com

À LA UNE



NEUROSCIENCES

22

Décrypter le cerveau

Les outils du XXI^e siècle

Rafael Yuste et George Church

Comment le cerveau produit-il nos pensées et nos émotions ? Pour le comprendre, les scientifiques devront disposer d'outils permettant de scruter l'activité des circuits cérébraux neurone par neurone.

32

PHYSICO-CHIMIE

La ruée vers le nano-or

Delphine Schaming, Olivier Pluchery et Hynd Remita

Quand l'or prend la forme de particules nanométriques, ses propriétés physico-chimiques et sa couleur changent. Ces nanoparticules sont promises à de nombreuses applications, notamment dans le traitement des cancers.

41

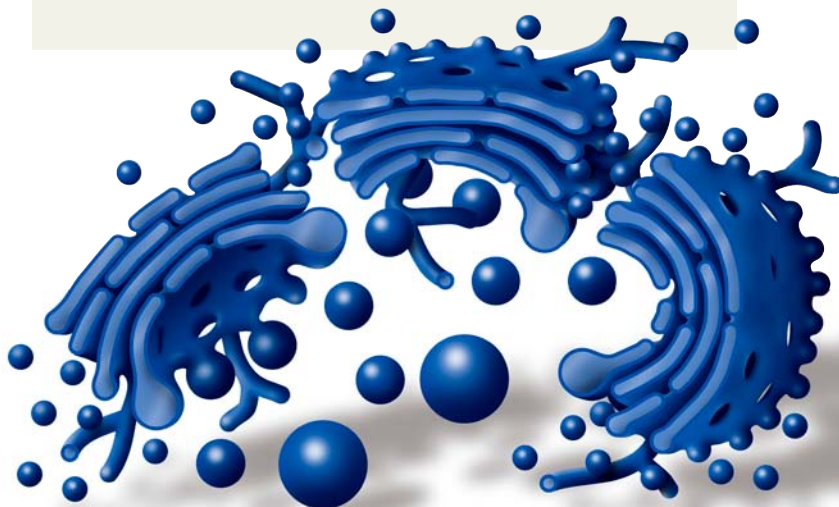
NOBEL 2013 Du trafic dans les cellules

Récit d'une découverte

En 2013, James Rothman, Randy Schekman et Thomas Südhof ont reçu le prix Nobel pour leurs travaux sur le transport des protéines et des lipides dans les cellules. Ils nous racontent leurs découvertes.

Et maintenant ?

Communication neuronale, sécrétion hormonale, réponse immunitaire... Les découvertes récompensées ont des implications dans de nombreux domaines.



48 **ASTROPHYSIQUE** Du gaz galactique aux étoiles

Clare Dobbs

Comment naissent les étoiles dans les nuages de gaz d'une galaxie spirale ? Des simulations numériques élucident le lien entre la dynamique de ces nuages et la formation des étoiles.



56 **ÉPIDÉMIOLOGIE** Détecter les épidémies plus vite et plus tôt

David Ecker

Des appareils capables d'identifier rapidement presque tout pathogène sont en cours de développement. En les installant dans des hôpitaux répartis sur tout le territoire et en les interconnectant, on pourrait détecter et maîtriser les épidémies de façon plus précoce.



62 **ÉCONOMIE** Des pyramides de Ponzi dans l'économie

Kaushik Basu

De nombreuses pratiques économiques ordinaires s'apparentent aux systèmes de Ponzi, montages financiers frauduleux où les premiers investisseurs sont rémunérés grâce aux fonds apportés par les suivants.

Rendez-vous

70 **Histoire des sciences**

Houtermans, physicien entre Hitler et Staline

Dieter Hoffmann

Ce pionnier de la physique nucléaire injustement oublié a réalisé ses remarquables travaux sous l'oppression nazie et stalinienne.

76 **Logique & calcul**

Cosmos : l'art de spéculer sérieusement

Jean-Paul Delahaye

Certains événements astrophysiques majeurs pourraient-ils être contrôlés par des intelligences supérieures ?

82 **Science & fiction**

Ces mondes glacés qui hébergeraient la vie

J. Sébastien Steyer et Roland Lehoucq

84 **Art & science**

Algorithmes psychédéliques

Loïc Mangin

86 **Idées de physique**

Des frites sous haute tension

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

89 **Questions aux experts**

Le vin blanc donne-t-il plus mal à la tête que les autres alcools ?

Henri-Jean Aubin

91 **Science & gastronomie**

Vers une cuisine plus qualitative

Hervé This

92 **À lire**

96 **Bloc-notes**

Les chroniques de Didier Nordon

Nouveautés numériques

POUR LA SCIENCE .fr

Le site de référence de l'actualité scientifique internationale

■ L'application *Pour la Science*

Retrouvez dès leurs sorties *Pour la Science* + son hors-série *Dossier Pour la Science* en version numérique optimisée.

■ Les Petits Thématiques

Des compilations numériques fiables et pratiques sur l'actualité scientifique.

■ www.SciLogs.fr

La nouvelle plateforme de blogs scientifiques francophones.



Actualités

Paléontologie humaine

La boucherie néandertalienne de Quincieux

Dans le département du Rhône, le chantier de construction de l'autoroute 466 a révélé un atelier de boucherie néandertalien d'il y a environ 40 000 ans.

Quelques-uns (a à e) des centaines de restes osseux mis au jour dans le site fouillé (f) à Quincieux, dans la région de Lyon.



a



b



c

a - e : © Henri Granjean collectif Item Inrap ; f : Christel Fraisse/Inrap

Pourquoi toujours chasser de gros animaux, souvent dangereux ? Le site de Quincieux, qu'une équipe d'archéologues de l'Inrap dirigée par Jean-François Pasty vient de fouiller en urgence, illustre ce trait étrange des Néandertaliens.

Le site est contenu dans une couche de limon surmonté de loess, non loin de l'ancien lit de la Saône. Épaisse de plus de deux mètres, cette strate limoneuse date d'entre 55 000 et 35 000 ans, c'est-à-dire de la première moitié du stade isotopique marin 3 (59 000 à 24 000 ans). Dans l'histoire climatique de l'Europe, cette période interglaciaire se signale par de nombreux allers et retours entre des phases très froides de quelques milliers d'années et des périodes tempérées. Ce yo-yo climatique a dû être difficile à vivre pour des Néandertaliens peu nombreux, mais qui étaient bien adaptés, comme l'illustre Quincieux.

Le clan qui y a séjourné a en effet réussi à abattre (mais on ignore en combien de temps) une impressionnante macrofaune caractéristique d'un climat froid. Dans le limon, les archéologues ont exhumé plusieurs centaines de restes osseux de mammoths (*ci-dessus*, *b*, une molaire), de rhinocéros laineux (*c*, un morceau de corne, *e*, une mandibule), de chevaux (*d*, une mandibule), de bisons ou encore de rennes. L'ours des cavernes est représenté par un crâne (*a*), et les carnivores le sont par quelques ossements de loup.

Ces accumulations résultent de l'action de l'homme : les os sont isolés et rarement en connexion anatomique ; certains ont manifestement été brisés ; les os longs tendent à manquer, ce qui suggère que les gigots, cuisseaux et autres quartiers riches en viande et en graisse ont été emportés. En outre, quelques nucléus et des éclats débités par la technique Levallois,

typiquement néandertalienne, gisent éparpillés parmi les os.

Ainsi, Quincieux semble être un atelier de boucherie néandertalien, comme on en a déjà trouvé de nombreux autres dans toute l'Europe, par exemple récemment en France à Hénin-sur-Cojeul (38 000 ans) et à Havrincourt (60 000 ans), dans la Somme.

Situés peut-être près des zones de chasse ou en un lieu favorable (bonne visibilité, sécurité, eau, gisement de matière première lithique, etc.), ces ateliers, distincts des sites d'abattage et des habitats, étaient les usines de l'industrie néandertalienne. L'implantation de celui de Quincieux s'inscrit bien dans cette typologie, puisqu'on y trouvait de l'eau et, dans le lit d'un ruisseau voisin, des galets de silex.

On peut imaginer qu'au cours des grandes chasses, le clan entier s'assemblait, d'abord pour aider à la chasse en rabattant et en signa-

lant le gibier, tandis que les chasseurs, sans doute assistés par les adolescents, s'activaient à piéger et à tuer de gros animaux. Ensuite, après avoir éventuellement prélevé la peau, on découpait les carcasses en quartiers transportables à l'atelier. Là, une équipe débitait d'abord les quartiers de viande à emporter dans les cuisines de l'habitat pas forcément proche, ce qui, à Quincieux, expliquerait l'absence d'os longs. Une autre, peut-on penser, s'occupait de prélever les tendons (pour servir de liens), les vessies et les estomacs (sacs naturels), etc. Une autre encore se consacrait au travail des peaux, qui doit commencer d'emblée et requiert de l'eau.

Une interprétation tentante de la présence sur le site de Quincieux de restes d'ours des cavernes et de loups est d'ailleurs que les chasseurs traquaient aussi ces animaux pour leur fourrure. Dans le cas de l'ours des cavernes,



c'était facile, car il suffisait de surprendre ce grand plantigrade dans la grotte ou l'abri où il hibernait, et de le tuer pendant qu'il était en léthargie.

Ainsi, le site de Quincieux illustre une fois de plus le mode de vie néandertalien, dans lequel le clan entier s'assemblait pour aider à la chasse, puis pour exploiter les carcasses des grandes proies. Dans un climat où la survie de l'individu isolé était impensable, nul doute que l'implication simultanée de tous les membres du clan dans la production commune créait beaucoup de liens sociaux, se traduisant par une grande cohésion sans doute essentielle à la survie du groupe. La préférence des chasseurs néandertaliens pour les grosses proies s'explique peut-être ainsi : elle aurait été nécessaire pour faire tourner les usines néandertaliennes.

François Savatier
www.inrap.fr

Immunologie

Bisphénol A et intolérance alimentaire

Une équipe de l'unité de toxicologie alimentaire [ToxAlim] de l'Inra à Toulouse a montré chez le rat qu'une exposition à de faibles doses de bisphénol A avant et juste après la naissance augmente le risque d'intolérance alimentaire à l'âge adulte. Éric Houdeau, qui a dirigé le projet, nous explique ses travaux et leurs implications.

Le bisphénol A est connu en tant que perturbateur endocrinien – une substance qui altère les fonctions hormonales. Pourquoi avoir pensé qu'il pourrait aussi agir sur la tolérance alimentaire ?

Éric Houdeau : Le bisphénol A est un composant de nombreux plastiques et résines alimentaires. Bien qu'il soit interdit dans les biberons en France depuis 2010 et amené à y disparaître de tout conditionnement alimentaire d'ici 2015, nous y avons été exposés pendant plus de 30 ans. Or chez l'animal, cette substance, en perturbant le fonctionnement des hormones, touche aussi d'autres fonctions telles que le métabolisme des lipides ou le système immunitaire. Et la tolérance alimentaire est directement liée au système immunitaire : constamment confronté à de nouvelles protéines, celui-ci met en place une tolérance. Une intolérance alimentaire apparaît lorsqu'il se met à « classer » des protéines habituellement acceptées comme indésirables. Il déclenche alors une réaction inflammatoire dans l'intestin.

Les études chez l'homme ont-elles aussi montré un effet du bisphénol A sur le système immunitaire ?

É. H. : Il n'existait aucun indice en faveur d'un tel effet jusqu'à ce qu'en 2011, une étude épidémiologique américaine révèle, sur la base de données récoltées entre 2003 et 2006 par le programme de surveillance NHANES, un

parallèle entre une contamination au bisphénol A et un système immunitaire devenant moins efficace avec le temps. Ces résultats suggéraient qu'une exposition chronique pouvait modifier durablement la programmation du système immunitaire.

Pourquoi s'intéresser à la période périnatale ?

É. H. : Durant la grossesse et l'allaitement, le système immunitaire est immature, car en développement, et les défenses de l'organisme se construisent au contact des aliments et de l'environnement.



Éric Houdeau est directeur de recherche à l'Inra.

ronnement. Il s'agit donc d'une période cruciale pour la mise en place de la tolérance alimentaire.

En quoi consistent vos expériences ?

É. H. : En 2010, nous avions observé que des rats exposés au bisphénol A durant la période périnatale présentaient une réaction inflammatoire exacerbée de l'intestin à l'âge adulte : quand on déclenchait une inflammation de l'intestin, leur réponse immunitaire était plus violente que chez des rats non exposés. Cela suggérait que les fonctions immunitaires étaient per-

turbées. Nous avons donc administré par voie orale à des rates gestantes diverses doses quotidiennes de bisphénol A, jusqu'au sevrage des petits. À l'âge adulte, la progéniture, nourrie à l'ovalbumine, une protéine du blanc d'œuf jamais consommée auparavant par ces animaux, développait plus souvent une réaction immunitaire contre elle que les rats nés de mères non exposées. Après plusieurs jours de nourriture à l'ovalbumine, les rats nés de mères exposées présentaient une inflammation du côlon : il y avait donc bien intolérance alimentaire.

De faibles doses de bisphénol A suffisaient à perturber les rats. Qu'en déduire pour nous ?

É. H. : Les perturbations les plus fortes ont en effet été obtenues avec une dose de bisphénol A considérée sans risque par l'Autorité européenne de sécurité des aliments, qui recommande qu'elle soit utilisée comme limite de consommation. Or seuls 4 % environ de la dose ingérée par la mère atteignent le fœtus. Notre étude montre que cette quantité est suffisante pour perturber la maturation du système immunitaire chez le rat. On voit ici toute la difficulté de fixer une dose journalière tolérable sûre de bisphénol A : ce n'est pas parce qu'on ne le détecte que très faiblement dans le sang qu'il ne perturbe pas le fonctionnement de l'organisme.

Marie-Neige Cordonnier

S. Menard et al., EASEB J., 2014



Les cris de la chauve-souris *Rhinolophus mehelyi* auraient évolué vers les hautes fréquences par sélection sexuelle.

© S. J. Puechmaillé

Éthologie

Des sex-symbols aux cris aigus

Chez les chauves-souris *Rhinolophus mehelyi*, les femelles s'accouplent davantage avec les mâles aux cris plus aigus. C'est ce qu'ont montré Sébastien Puechmaillé, de l'Institut Max Planck d'ornithologie, à Seewiesen, en Allemagne, et ses collègues.

La plupart des chauves-souris sont nocturnes et ont développé un système performant d'écholocation : elles émettent des cris et se fondent sur les échos renvoyés pour localiser leurs proies. Plus les cris sont aigus,

plus ils sont atténués par l'air, et donc moins ils portent loin. Or ceux des chauves-souris *R. mehelyi* sont anormalement aigus pour des animaux de cette taille, ce qui les désavantage. Les résultats des chercheurs suggèrent que cette anomalie est due à un phénomène de sélection sexuelle : les préférences des femelles auraient conduit, au fil de l'évolution, à des cris de plus en plus aigus.

Guillaume Jacquemont

S. J. Puechmaillé et al., *PLoS One*, en ligne le 30 juillet 2014

Mathématiques

Les médailles Fields 2014

Les noms des quatre lauréats de cette prestigieuse distinction ont été annoncés le 13 août dernier à Séoul, à l'ouverture du Congrès international des mathématiciens.

Comme tous les quatre ans, le Congrès international des mathématiciens, tenu cette fois à Séoul, en Corée du Sud, a dévoilé les noms des récipiendaires de la médaille Fields, attribuée à des mathématiciens âgés de moins de 40 ans. Il s'agit du Franco-Brésilien Artur Avila, du Canado-Américain Manjul Bhargava, de l'Autrichien Martin Hairer et de l'Iranienne Maryam Mirzakhani, qui est la première femme lauréate de cette médaille.

Artur Avila est chercheur à l'Institut de mathématiques de Jussieu-Paris Rive Gauche et à l'IMPA (Institut de mathématiques pures et appliquées), à Rio de Janeiro. Il travaille principalement sur l'analyse et sur la

théorie des systèmes dynamiques – l'étude mathématique des systèmes évoluant dans le temps selon des règles fixées. L'objectif est notamment de déterminer le comportement qualitatif, à long terme, du système sans avoir à calculer explicitement son évolution. Pour beaucoup de systèmes simples, l'évolution temporelle est soit régulière, soit chaotique, ce qui signifie qu'elle n'est pas prévisible à long terme, malgré le caractère déterministe des lois d'évolution (avec deux états initiaux même très similaires, la « trajectoire » suivie par le système finit par être très différente).

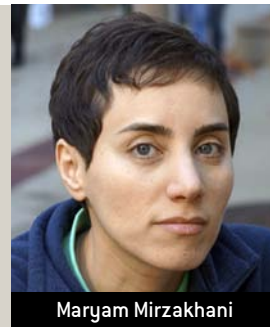
Entre autres, A. Avila a publié en 2003, avec deux autres mathématiciens, un résultat relatif à

une vaste classe de systèmes dynamiques, les « applications unimodales » : si l'on choisit une telle application au hasard, elle sera soit régulière, soit « stochastique ». Le terme signifie ici que l'évolution temporelle a de bonnes propriétés probabilistes, qui permettent de la modéliser malgré son caractère chaotique.

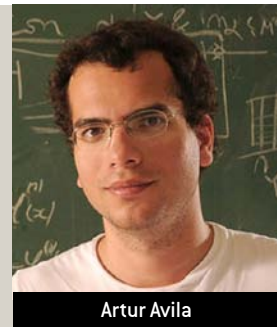
Manjul Bhargava, professeur à l'Université de Princeton, a pour spécialité la théorie algébrique des nombres, où il a obtenu des résultats liés à ceux de Carl Friedrich Gauss au XIX^e siècle. Il a notamment trouvé, en associant un nombre à chaque sommet d'un cube et en coupant le cube en deux de façon à obtenir deux ensembles de quatre nombres, une

façon simple et visuelle d'obtenir la loi qu'avait trouvée Gauss pour composer entre elles des formes quadratiques binaires (polynômes de la forme $ax^2 + bxy + cy^2$ où a, b et c sont des entiers). Il a étendu sa méthode à des polynômes de degré plus élevé et a découvert 13 nouvelles lois de composition. De telles lois fournissent des informations sur des structures nommées corps de nombres, qui jouent un rôle fondamental dans la théorie algébrique des nombres.

Martin Hairer, professeur à l'Université de Warwick, en Grande-Bretagne, étudie les équations aux dérivées partielles stochastiques. Une équation aux dérivées partielles est une équation différentielle (qui relie



Maryam Mirzakhani



Artur Avila