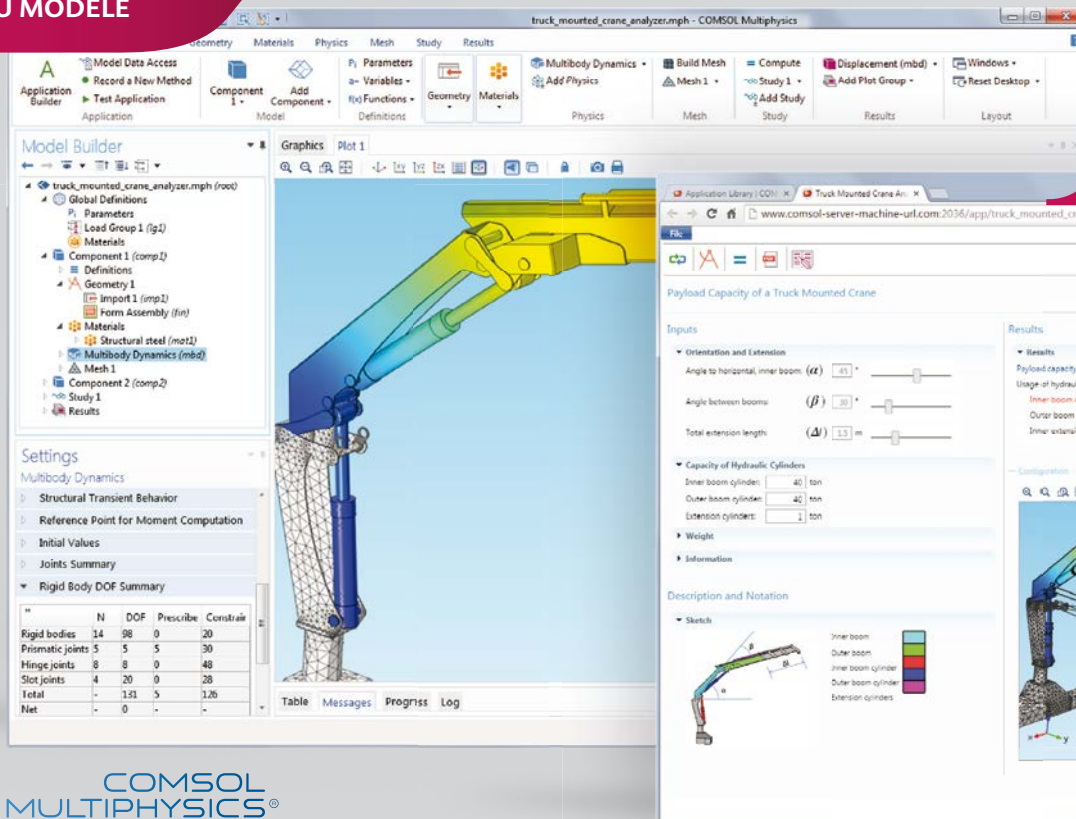




Comment créer le meilleur design et partager votre expertise en simulation ?

**GRÂCE À DE PUISSANTS OUTILS DE CALCULS.
AVEC DES APPLICATIONS FACILEMENT PARTAGEABLES.**

comsol.fr/5.1

PRODUCT SUITE

- › COMSOL Multiphysics®
- › COMSOL Server™

ELECTRICAL

- › AC/DC Module
- › RF Module
- › Wave Optics Module
- › Ray Optics Module
- › MEMS Module
- › Plasma Module
- › Semiconductor Module

MECHANICAL

- › Heat Transfer Module
- › Structural Mechanics Module
- › Nonlinear Structural Materials Module
- › Geomechanics Module
- › Fatigue Module
- › Multibody Dynamics Module
- › Acoustics Module

FLUID

- › CFD Module
- › Mixer Module
- › Microfluidics Module
- › Subsurface Flow Module
- › Pipe Flow Module
- › Molecular Flow Module

CHEMICAL

- › Chemical Reaction Engineering Module
- › Batteries & Fuel Cells Module
- › Electrodeposition Module
- › Corrosion Module
- › Electrochemistry Module

MULTIPURPOSE

- › Optimization Module
- › Material Library
- › Particle Tracing Module

INTERFACING

- › LiveLink™ for MATLAB®
- › LiveLink™ for Excel®
- › CAD Import Module
- › Design Module
- › ECAD Import Module
- › LiveLink™ for SOLIDWORKS®
- › LiveLink™ for Inventor®
- › LiveLink™ for AutoCAD®
- › LiveLink™ for Revit®
- › LiveLink™ for PTC® Creo® Parametric™
- › LiveLink™ for PTC® Pro/ENGINEER®
- › LiveLink™ for Solid Edge®
- › File Import for CATIA® V5

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, Ingrid Leroy,

Nathalie Ravier (stagiaire)

Correction et assistance administrative : Maud Bruguère

Marketing : Élise Abib et Ophélie Maillet,

assistées de Héloïse Clément (stagiaire)

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 :

Aurélien Crida, Gérard Eberl, Vincent Enouf, Sophie Gallé-Soas,

Nicolas Georgieff, Évelyne Host-Platret, Jean Le Loeuff,

Christophe Pichon, Loïc Villain, Jean-Baptiste Yon

PUBLICITÉ France

Directeur de la publicité : Jean-François Guillotin

[j.f.guillotin@pourlascience.fr]

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

SERVICE ABONNEMENTS

Nada Mellouk-Raja. Tél. : 01 55 42 84 04

Abonnement en ligne : <http://www.pourlascience.fr>

Courriel : 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 :

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-Dies - 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 adressés 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 partiel-

lement 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 couteau suisse de la génétique

Un nouveau sigle qui semble imprononçable envahit depuis quelque temps le monde de la biologie moléculaire et de la génétique : CRISPR-Cas9. Impronomçable ? On peut dire en français « crispère-casse-neuf ». Ce problème de lecture étant réglé, de quoi s'agit-il ? D'une technique développée grâce à la découverte, en 2007, d'un système de défense des bactéries contre les virus, reposant sur une séquence particulière de leur ADN nommée CRISPR. En 2012, l'équipe de la microbiologiste française Emmanuelle Charpentier et, à Berkeley, celle de Jennifer Doudna se sont inspirées de ce système et ont montré que l'enzyme bactérienne Cas9 permet de couper aisément, avec précision et à l'endroit souhaité, l'ADN de n'importe quelle cellule.

CRISPR-Cas9 : une technique qui, comme d'autres, peut être utilisée à mauvais escient.

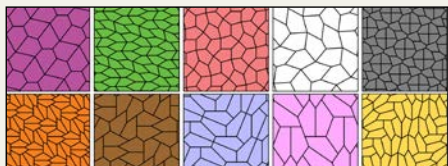
Ainsi, comme Emmanuelle Charpentier et le journaliste Pierre Kaldy nous l'expliquent (voir pages 24 à 32), les chercheurs disposent depuis d'un outil puissant et universel grâce auquel ils peuvent modifier à volonté l'ADN, donc les gènes, d'un organisme, et cela en des temps records – quelques semaines là où, avec les méthodes précédentes, plus complexes et moins fiables, il fallait des mois ou plus.

L'enjeu est d'abord scientifique : CRISPR-Cas9, par sa polyvalence et sa facilité, va considérablement accélérer le progrès des connaissances en biologie et en génétique. La technique ouvre aussi de vastes horizons en médecine, en agriculture, en chimie... Mais elle peut être utilisée à mauvais escient (armes biologiques, modifications inconsidérées du vivant, eugénisme, etc.), ce qui appelle, à tout le moins, à des réflexions et débats éthiques (voir pages 34-35). C'est la sempiternelle dualité inhérente à toute innovation technique. ■

3 **Édito**

Actualités

- 6 Pourquoi ne devenons-nous pas tous dépendants ?
- 7 Des bactéries contre le diabète de type 1
- 8 Un nouveau pentagone pave le plan



- 9 La plus ancienne des plantes à fleurs
- 12 Une piste pour freiner les maladies neurodégénératives

Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

Réflexions & débats

- 14 **Point de vue**
La compensation écologique, un dispositif encore mal appliqué
Céline Jacob et Fabien Quétier
- 16 **Entretien**
Sciences économiques : « Il faut passer à des modèles de troisième génération »
Jean-Philippe Bouchaud
- 20 **Homo sapiens informaticus**
La technique, sans les mains
Gilles Dowek
- 22 **Cabinet de curiosités sociologiques**
Une rentrée apocalyptique ?
Gérald Bronner

- 51 **Cahier spécial**
CEA, 70 ans de recherche et d'innovation
En partenariat avec



Ce numéro comporte un encart d'abonnement *Pour la Science*, jeté en cahier intérieur de toute la diffusion kiosque et posé sur toute la diffusion abonné. 16 500 encarts *Rue des étudiants* sont également posés en 4^{ème} de couverture de la diffusion abonnés France métropolitaine.
En couverture : © Brothers Good/shutterstock.com ; Pour la Science

À LA UNE

24 GÉNÉTIQUE CRISPR-Cas9, l'outil qui révolutionne la génétique

Emmanuelle Charpentier et Pierre Kaldy

Un système de défense immunitaire bactérien, CRISPR-Cas9, est devenu un outil précis, simple et universel pour modifier les gènes de n'importe quelle cellule à volonté. Un frein majeur de la génétique est levé.

34 « Une réflexion éthique s'impose »

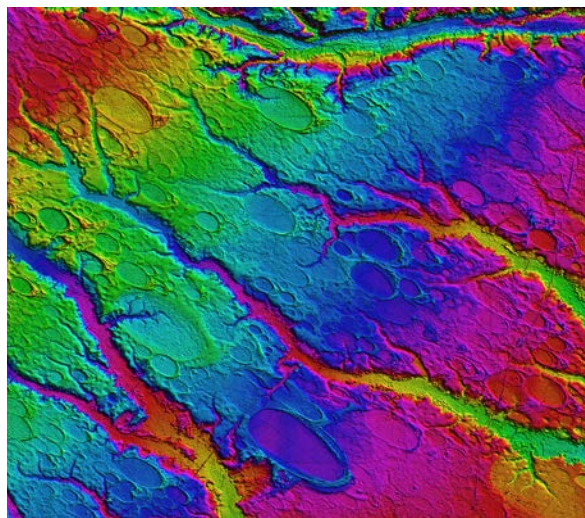
Entretien avec Pierre Gaudray

Depuis sa mise au point en 2012, l'outil de génétique CRISPR-Cas9 se répand à une telle vitesse et dans des domaines si variés qu'il soulève de nombreuses inquiétudes.

36 GÉOSCIENCES De l'hydrogène naturel sous nos pieds

Alain Prinzhofer et Éric Deville

Les géologues ont découvert en plusieurs sites continentaux de par le monde des émissions d'hydrogène en quantités importantes. Une prochaine révolution énergétique se profile-t-elle ?



44 **NEUROSCIENCES** **L'étonnante plasticité du cerveau adolescent**

Jay Giedd

À l'adolescence, le cerveau humain se reconfigure très vite. Ces transformations sont une source de risques, mais aussi d'avancées fulgurantes en matière de cognition et d'adaptabilité.

76 **PALÉONTOLOGIE** **L'ascension des tyrannosaures**

Stephen Brusatte

De nouveaux fossiles révèlent que les tyrannosaures sont passés, en 100 millions d'années, d'un groupe d'animaux de petite taille à la famille de prédateurs géants qui a dominé la fin du Crétacé.



84 **ASTROPHYSIQUE** **L'horizon des trous noirs brûle-t-il ?**

Pour concilier la relativité générale et la physique quantique des trous noirs, certains physiciens ont conclu que l'horizon des événements entourant un tel astre est un « mur de feu » rempli de particules de haute énergie.

Joseph Polchinski

94 **HISTOIRE DES SCIENCES** **Le daguerréotype qui mesurait la lumière**

Jérôme Fatet

Au XIX^e siècle, un jeune physicien, Edmond Becquerel, détourne le tout nouveau procédé photographique de Louis Daguerre en un appareil pour analyser la lumière. Il prouve ainsi l'existence des ultraviolets.

Rendez-vous

102 **Logique & calcul**

Déléguer un calcul sans divulguer ses données

Jean-Paul Delahaye

Vous confiez des calculs à un tiers, il les effectue et vous transmet les résultats, mais sans avoir pu connaître ni les données du calcul ni ses résultats : un miracle cryptographique !

108 **Science & fiction**

La Force des Jedi, une question de puissance

Roland Lehoucq et J. Sébastien Steyer

110 **Art & science**

Le mystère de la pastèque blanche

Loïc Mangin

113 **Idées de physique**

L'escalier chantant de Maoshan

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik



116 **Question aux experts**

Peut-on contrôler ses rêves ?

Daniel Erlacher

118 **Science & gastronomie**

Dater du vin sans ouvrir la bouteille

Hervé This

120 **À lire**

122 **Bloc-notes**

Les chroniques de Didier Nordon

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

Neurobiologie

Pourquoi ne devenons-nous pas tous dépendants ?

Des neurobiologistes ont identifié un mécanisme moléculaire qui freine l'installation d'une addiction – ou la favorise quand il est défectueux.



Certaines substances activent un circuit cérébral qui nous pousse à désirer en consommer à nouveau. Un processus plus ou moins susceptible de s'emballer selon les personnes.

Tout le monde n'est pas égal face à l'addiction : certains parviennent à garder un usage récréatif de la cigarette ou de la drogue, tandis que d'autres ont vite besoin d'enchaîner les prises, même quand cela ne leur procure plus aucun plaisir. La proportion de personnes qui deviennent dépendantes varie selon les « drogues ». Elle est par exemple estimée à 17 % pour la cocaïne et à 32 % pour le tabac, produit le plus addictif. L'équipe de Salah El Mestikawy, du CNRS, a découvert un mécanisme moléculaire qui freine l'installation de la dépendance – et qui peut se dérégler chez certains.

Toutes les drogues ont un point commun : elles augmentent l'action de la dopamine, un neuromodulateur (une substance qui module la communication

entre neurones) essentiel pour ressentir un désir. La dopamine est produite par des neurones situés à la base du cerveau et qui la libèrent à de nombreux autres endroits de l'encéphale *via* de longues connexions. Elle vient notamment stimuler l'activité du noyau accumbens, une structure clef du « circuit de la récompense ». Quand il est activé, ce circuit crée une sensation de plaisir et de motivation. Le sujet est ainsi conduit à exécuter à nouveau l'action ayant conduit à cette « récompense ».

Chez les personnes dépendantes, le circuit de la récompense s'emballer et pousse à une consommation compulsive. Or, dans le noyau accumbens, la libération de dopamine est modulée par plusieurs types de neurones. Certains, nommés interneurons cholinergiques, sécrètent deux

neurotransmetteurs (molécules qui assurent la communication entre neurones), l'acétylcholine et le glutamate. Le premier augmente la libération de dopamine, tandis que le second l'inhibe. Ce « bilinguisme neuronal » a été découvert par l'équipe de Salah El Mestikawy en 2002.

Les chercheurs soupçonnaient ainsi le glutamate de freiner le développement d'une addiction, en limitant la réactivité du circuit de la récompense. Pour le vérifier, ils ont modifié génétiquement des souris afin d'empêcher le glutamate d'agir. Ils ont rendu dysfonctionnelle une protéine nommée VGLUT3, qui est un transporteur vésiculaire du glutamate – elle permet au neurotransmetteur de s'accumuler dans de petits « sacs » à l'intérieur des neurones, lesquels sont ensuite

déversés dans la synapse (jonction entre deux neurones).

Les chercheurs ont ensuite donné aux souris la possibilité de s'injecter de la cocaïne, grâce à un cathéter relié à une seringue qu'elles activaient en donnant un coup de museau dans un endroit particulier de leur cage. La cocaïne augmente l'action de la dopamine en empêchant son évacuation des synapses. Comme attendu, les souris génétiquement modifiées se sont révélées plus vulnérables à l'addiction que des souris normales : elles s'administraient bien plus de drogue et rechutaient plus souvent après un sevrage. En outre, les neurones de leur noyau accumbens ont subi des évolutions morphologiques qui les ont rendus plus sensibles à l'action de la dopamine. Même si l'addiction a d'autres composantes,

Biomédecine

Des bactéries contre le diabète de type 1

Des bactéries de la flore intestinale stimulent la production, dans le pancréas, de molécules qui réfrènt son inflammation, responsable du diabète de type 1. Julien Diana, de l'institut Necker-Enfants Malades (INEM, Unité 1151, Inserm/CNRS/Université Paris-Descartes), qui a dirigé l'étude, nous explique ces résultats et leurs implications.

elle est caractérisée de façon assez fiable par ce type d'observations et d'expériences sur un modèle animal.

Restait à montrer que le mécanisme existe aussi chez l'homme. Les chercheurs ont alors analysé le gène qui code VGLUT3 chez des toxicomanes ayant développé de nombreuses addictions. Par rapport à des personnes non droguées, ce gène présentait 10 fois plus souvent des mutations. Les personnes ayant un transporteur VGLUT3 dysfonctionnel risqueraient donc davantage de développer une addiction.

C'est toutefois loin d'être le seul facteur de risque : seuls 5 % des patients polytoxicomanes présentaient une telle mutation. La dépendance peut donc avoir de multiples autres causes. En outre, précise Salah El Mestikawy, « ces mutations ne sont pas forcément une mauvaise chose. Si votre circuit de la récompense, qui assure votre motivation, est particulièrement actif et que vous décidez de faire du sport, de la musique ou des maths, c'est très bien. Cela ne devient néfaste que si vous basculez dans la drogue, la cigarette, les jeux d'argent, etc. ».

Quoi qu'il en soit, ces résultats fournissent une nouvelle piste pour développer des médicaments qui freineraient l'entrée dans l'addiction, en empêchant l'emballement du circuit de la récompense. Et même sans substance pharmacologique, insiste Salah El Mestikawy, « il pourrait être d'une grande aide de sensibiliser les jeunes qui ont cette vulnérabilité, en leur expliquant que ce talon d'Achille – une propension supérieure à tomber dans la dépendance – est aussi une force, à savoir une plus grande aptitude à la motivation ».

Guillaume Jacquemont

D. Y. Sakae et al., *Molecular Psychiatry*, en ligne le 4 août 2015

Quel a été le point de départ de vos travaux ?

Julien Diana : Nous avons montré qu'un peptide antimicrobien nommé CRAMP joue un rôle dans le déclenchement du diabète de type 1. Nous avons voulu savoir si ce peptide avait d'autres rôles dans cette maladie.

Que sont les peptides antimicrobiens ?

J. D. : Ces petites molécules sont produites dans divers organes par des cellules immunitaires, tels les neutrophiles, mais aussi des cellules non immunitaires, telles les cellules épithéliales. Elles permettent de détruire rapidement les micro-organismes pathogènes. Mais il a été montré qu'elles participent aussi à la régulation de la réponse immunitaire dans des maladies auto-immunes telles que le lupus et le psoriasis. Cela nous a fait penser qu'elles pouvaient influencer sur le développement du diabète auto-immun de type 1.

Quelle a été votre démarche ?

J. D. : Nous voulions savoir si des cellules du pancréas, les cellules β , pouvaient produire le peptide CRAMP et ainsi se défendre contre une attaque immunitaire. Nous avons montré, chez la souris et chez l'homme, qu'elles produisent bien le peptide. Et que CRAMP peut inhiber l'activité inflammatoire des cellules immunitaires qui infiltrèrent le pancréas au

cours du diabète. On a bien affaire ici à un mécanisme de protection des cellules β .

Alors que CRAMP participe au déclenchement de la maladie ?

J. D. : Oui. Le peptide a deux rôles ambivalents, on essaye de comprendre pourquoi. Mais ces deux rôles ont lieu à des phases très différentes de la maladie. Le rôle déclencheur a été montré chez des souris très jeunes. Des neutrophiles alors présents dans le pancréas produisent le peptide CRAMP, ce qui amorce la maladie. Chez les



Julien Diana, INEM, Inserm U1151, Paris

souris adultes, ce sont des cellules β qui produisent le peptide, lequel devient protecteur.

Quel est le rapport avec la flore intestinale ?

J. D. : Les peptides antimicrobiens sont très étudiés. Les bactériologistes essayent de s'en servir comme alternative aux antibiotiques. Ils ont ainsi trouvé que les principaux inducteurs de leur production sont des acides gras à chaîne courte produits par des bactéries de la flore intestinale. Nous avons étudié cette possibilité

dans notre cas. Chez des souris modifiées qui développent spontanément le diabète de type 1 en vieillissant, nous avons montré un défaut de ces acides gras et du peptide CRAMP, dû à une sous-représentation des bactéries de la flore qui les produisent. Des patients atteints de la maladie ont aussi ce défaut.

Est-ce la première fois qu'on montre un effet de la flore sur l'environnement immunitaire du pancréas ?

J. D. : C'est la première fois que l'on montre un mécanisme complet et direct de composés produits par la flore et qui préviennent l'auto-immunité dans le pancréas. Ce pourrait être un mécanisme général de maintien de la tolérance dans les organes périphériques. Nous allons lancer des études sur d'autres maladies auto-immunes, telle la sclérose en plaques, et sur d'autres peptides antimicrobiens, pour voir s'il peut être généralisé.

Ces travaux ouvrent-ils des pistes thérapeutiques contre le diabète de type 1 ?

J. D. : On pourrait imaginer une thérapie par transfert de la flore intestinale d'individus sains. Une alimentation riche en fibres pourrait aussi être bénéfique, car les acides gras à chaîne courte sont le produit de leur fermentation.

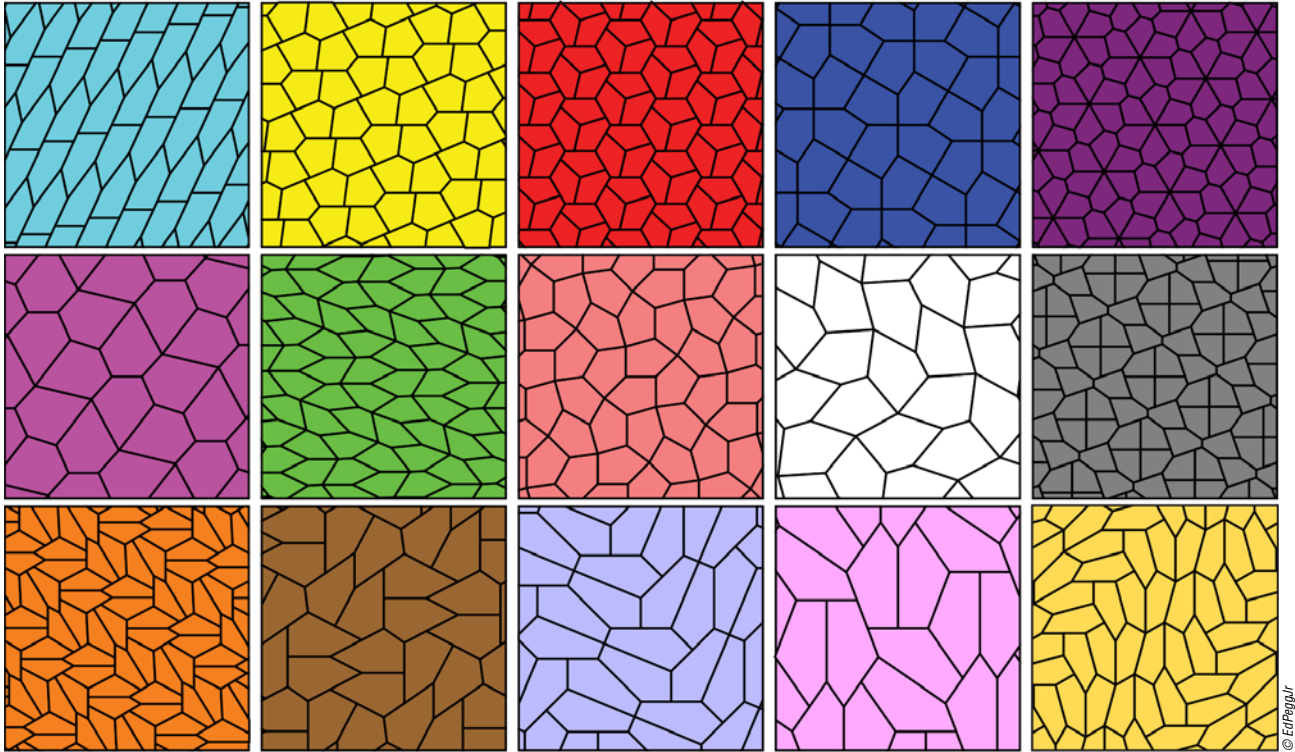
Marie-Neige Cordonnier

J. Sun et al., *Immunity*, vol. 43, 2015

Mathématiques

Un nouveau pentagone pave le plan

Recouvrir une surface plane avec un motif unique est un problème mathématique ancien et abondamment traité. Mais surprise : une nouvelle solution a été découverte !



Le dernier en date des 15 pavages pentagonaux (en bas à droite) a été identifié grâce à un programme informatique.

15
classes de
pentagones convexes
irréguliers peuvent
paver le plan.

Vous voulez carrelé le sol de votre salle de bains avec des carreaux tous identiques ? Rien de plus simple. Vous pouvez utiliser des carreaux rectangulaires ou encore des tomettes hexagonales. Mais bien d'autres formes sont possibles ! Les mathématiciens cherchent depuis longtemps à recenser tous les motifs qui pavent le plan (infini) sans se chevaucher ni laisser de trous. On sait que n'importe quel triangle ou quadrilatère convient. Trois types d'hexagones convexes fonctionnent également (un polygone est convexe lorsque n'importe quel couple de ses points intérieurs peut être relié par un segment qui reste à l'intérieur). Et tous les polygones convexes ayant plus de six côtés échouent à carrelé le sol.

Qu'en est-il des pentagones convexes ? Les chercheurs en connaissaient jusqu'ici 14 types qui pavent le plan, sans parvenir

à prouver que cette liste était exhaustive. Et pour cause : une quinzième forme vient d'être découverte par Casey Mann, de l'université de Washington à Bothell, et ses collègues.

Jean-Paul Delahaye avait exposé en 2013, dans sa chronique (*Pour la Science* n° 432), une classification des pavages pentagonaux. Le pentagone régulier, aux cinq côtés de même longueur et aux cinq angles égaux, est rapidement écarté. En effet, comme chacun de ses angles mesure 108° , il est impossible d'obtenir 360° en accolant ces pentagones autour d'un sommet.

Cependant, il existe une infinité de pentagones irréguliers susceptibles de paver le plan. En 1918, le mathématicien allemand Karl Reinhardt en découvrit cinq classes. Chacune est définie par des relations entre certains angles ou entre les longueurs de certaines arêtes. Trois

nouvelles classes sont trouvées en 1968, puis une autre en 1975. Les quatre motifs suivants sont identifiés par une amatrice de mathématiques, Marjorie Rice. Enfin, une quatorzième forme est mise au jour en 1985.

Mais depuis trente ans, aucun autre type de pentagone convexe pavant le plan n'avait été découvert. La liste était-elle complète ? Pour le savoir, l'équipe de Casey Mann a utilisé un programme informatique qui teste de façon exhaustive un ensemble très vaste de configurations pentagonales. Et c'est avec un peu de surprise qu'elle a trouvé cette nouvelle classe de pentagones qui pave le plan (le dernier en bas à droite ci-dessus). Il est encore trop tôt pour dire si d'autres solutions seront débusquées grâce à cette approche informatique, mais la traque aux pentagones est relancée.

Sean Baillly

Paléobotanique

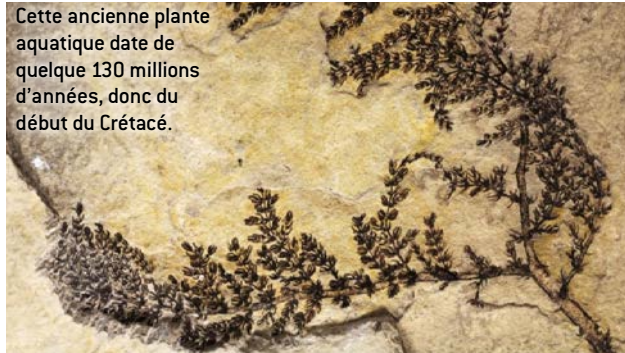
La plus ancienne des plantes à fleurs

Le pommier descend-il d'une plante aquatique ? On peut se poser la question : la découverte de la plus ancienne plante à fleurs par une équipe internationale conduite par Bernard Gomez, de l'université de Lyon, conforte l'hypothèse d'une adaptation précoce des plantes à fleurs à la vie aquatique.

Ce chercheur travaille depuis longtemps sur *Montsechia vidalii*, une plante aquatique déconcertante, car on l'avait d'abord classée comme mousse, comme prêle, comme conifère... On l'a découverte au sein de formations calcaires espagnoles datant de 125 à 130 millions d'années, des sédiments de lacs d'eau douce. Pour l'étudier, Bernard Gomez a inventé une technique afin de dégager avec précaution, à l'acide, la plante fossile de sa gangue calcaire. Cela a permis à son équipe d'examiner de près son architecture, sur les fossiles trouvés sur le site de Las Hoyas dans le sud de l'Espagne.

Les chercheurs ont ainsi établi que *Montsechia* existait sous deux

Cette ancienne plante aquatique date de quelque 130 millions d'années, donc du début du Crétacé.



© Bernard Gomez

formes distinctes, l'une avec des paires de grandes feuilles opposées, disposées à angle droit des autres paires, et l'autre avec des feuilles disposées en spirale, si petites qu'elles sont indécélables à l'œil nu.

C'est sur la seconde forme de *Montsechia* que les chercheurs ont trouvé de nombreux fruits. Ils ont aussi identifié les appareils stomatiques de la plante, c'est-à-dire les dispositifs par lesquels elle réalisait ses échanges gazeux. Or les stomates des plantes à fleurs ne se confondent pas avec

ceux des plantes d'autres groupes tels que les gymnospermes (conifères), les fougères, etc. Ainsi, la présence sur *Montsechia* de fruits et de stomates ne laisse plus de doute : il s'agit bien d'une plante angiosperme, la plus ancienne identifiée.

Le fait qu'elle soit aquatique, comme les autres angiospermes légèrement postérieures connues, intrigue. Les plantes à fleurs auraient-elles évolué dans l'eau avant de conquérir les terres ?

François Savatier

PNAS, en ligne le 17 août 2015

Aurore sur une naine brune

Une aurore polaire se produit lorsque des particules de haute énergie du vent solaire excitent les molécules de l'atmosphère. L'équipe de Gregg Hallinan, de l'Institut de technologie de Californie, a découvert ce phénomène dans l'atmosphère des naines brunes, des objets astrophysiques à la frontière entre planètes et étoiles. Les chercheurs ont étudié une naine brune située à 20 années-lumière. Cet astre a émis de façon périodique – correspondant à sa période de rotation sur lui-même de 2,8 heures – un signal radio polarisé circulairement, comparable aux émissions des aurores dans l'atmosphère des planètes géantes gazeuses. Il reste à préciser l'origine des particules qui ont déclenché le phénomène, la naine brune n'étant pas proche d'une étoile.



© Chuck Carter and Gregg Hallinan/Caltech

Archéologie

Deux temples de Palmyre détruits à l'explosif

Courant août, Palmyre a perdu une grande figure et deux monuments. Khaled al-Asaad, le directeur des antiquités de Palmyre qui avait passé sa vie à étudier l'oasis caravanière antique, a été exécuté par le groupe Daesh. Par ailleurs, le temple de Baalshamin a été détruit à l'explosif, et celui de Bêl en partie. Quel patrimoine l'humanité vient-elle de perdre ?

L'oasis de Palmyre est déjà évoquée dans les archives de la ville mésopotamienne de Mari au début du II^e millénaire avant notre ère, car elle représente une étape parfaite à mi-chemin entre Méditerranée et Mésopotamie.

C'est quand elle est intégrée à l'Empire romain, au début de notre ère, que sa population se sédentarise et construit une ville et des temples de pierre. En araméen, dont un dialecte était parlé à Palmyre, les dieux sont souvent dénommés par le vocable *Ba'al* (Seigneur, Maître) complété par un qualificatif.

Ainsi, *Baalshamin* est le « maître du ciel », en d'autres termes le Dieu des dieux dans le panthéon local de l'époque. Son temple donnait avant tout l'impression d'être un temple romain, c'est-à-dire une colonnade rectangulaire de style corinthien, coiffée d'un toit abritant une *cella*

rectangulaire, où demeurait le dieu. Il en est de même pour le temple de Bêl (Bêl est la version mésopotamienne de *Ba'al*). Que dire encore de ce joyau de Palmyre dont la destruction partielle vient d'être confirmée par satellite, sinon la même chose que l'Unesco :

« Le grand temple de Bêl est considéré comme l'un des plus importants monuments religieux du I^{er} siècle en Orient par sa conception unique. Le traitement de la sculpture et de la gravure de l'arc monumental par lequel on pénètre dans la cité depuis le grand temple est un exemple exceptionnel d'art palmyrénien. »

F. S.



© Bernard Gagnon

Le temple de Bêl était le plus grand de Palmyre. Il était très bien conservé, parce que les conquérants arabes y avaient érigé une mosquée après avoir investi l'oasis en 1132.

Record supraconducteur

Certains matériaux, dits supraconducteurs, opposent une résistance nulle à un courant électrique. L'obtention de cet état nécessite un refroidissement à des températures proches du zéro absolu. Divers progrès ont permis la conception de matériaux restant supraconducteurs jusqu'à -110°C . L'équipe d'Alexander Drozdov, de l'institut Max-Planck de Mayence, en Allemagne, vient de battre un record avec du sulfure d'hydrogène (H_3S) supraconducteur à -70°C ... mais sous une pression 2 millions de fois supérieure à celle de l'atmosphère !

Induire un état totipotent

L'état totipotent est celui des cellules dans les tout premiers stades embryonnaires. De telles cellules sont capables de produire un embryon entier avec le placenta et le cordon ombilical, contrairement aux cellules souches qui peuvent seulement se différencier en divers tissus de l'organisme. Elena Torres-Padilla, de l'université de Strasbourg, et ses collègues ont découvert qu'en inhibant l'expression du complexe protéique CAF1, impliqué dans la structuration de la chromatine, ils induisent un état totipotent dans des cellules souches.

Sentir et cogiter du bulbe

Plutôt fraise-kiwi ou plutôt kiwi-banane, cette odeur ? La distinction de deux fragrances mixtes et proches est compliquée par le fait que les signaux transmis par les neurones sensoriels, dont les terminaisons tapissent la muqueuse nasale, se recoupent partiellement. Olivier Gschwend, de l'université de Genève, et ses collègues ont montré chez la souris que le bulbe olfactif reformate ces signaux pour les rendre plus distincts. Ils ont en outre amélioré les performances des rongeurs à un test de discrimination des odeurs en stimulant artificiellement certains neurones de cette région cérébrale.

Astrophysique

La naissance d'un anneau de Saturne simulée

L'anneau F de Saturne est remarquable par sa structure : large d'à peine une centaine de kilomètres, il est encadré de deux satellites dits bergers, Prométhée et Pandore. Il a été découvert en 1979 par la sonde *Pioneer 11*. Sa formation restait mal comprise. Ryuki Hyodo et Keiji Ohtsuki, de l'université de Kobe, au Japon, ont modélisé numériquement la naissance de cet anneau particulier.

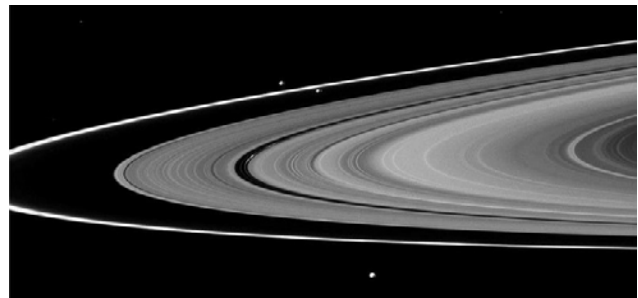
Les chercheurs ont supposé que l'anneau est le résultat de la collision de deux petits satellites. Ces lunes se seraient formées juste au-delà de la limite de Roche, qui marque la frontière où les forces de marée de Saturne ne sont plus assez puissantes pour empêcher l'agglomération de débris en de nouvelles lunes. En supposant que

les deux petits satellites étaient composés de 98% de glace d'eau et de 2% de roche, comme les constituants des anneaux internes, les chercheurs ont montré que leur collision, si elle était non frontale, a produit des débris ainsi que deux lunes bergères de masse comparable – comme c'est le cas pour Prométhée et Pandore. Dans la

simulation numérique, les débris se répartissent selon une bande étroite comprise entre les orbites des deux lunes et deux bandes à l'extérieur qui se dispersent, laissant une structure comparable à l'anneau F.

S. B.

R. Hyodo et K. Ohtsuki, *Nature Geoscience*, en ligne, 17 août 2015



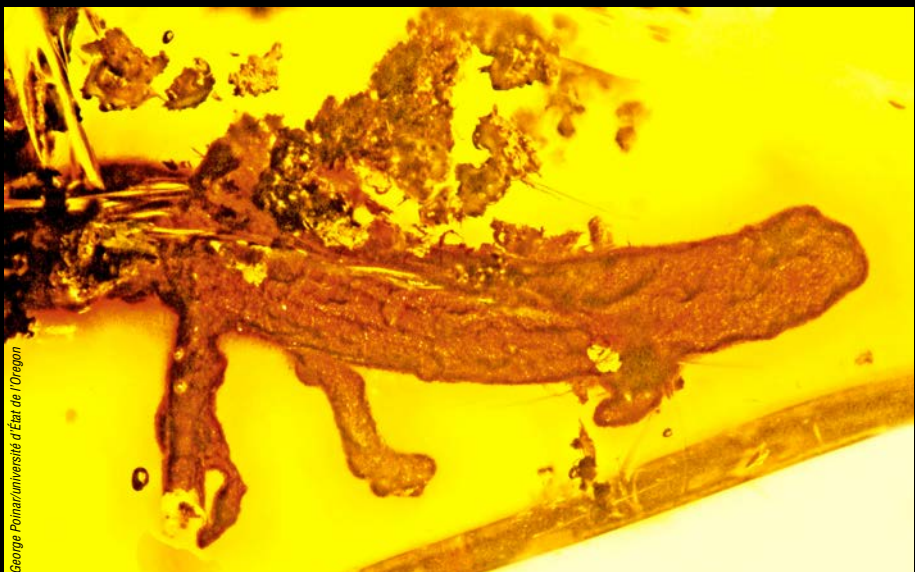
L'anneau F, très fin, est encadré par deux satellites bergers, Prométhée, à l'intérieur de l'orbite, et Pandore, à l'extérieur.

© Nasa/université de Kobe

Insolite

Une salamandre figée dans l'ambre

Il y a 20 millions d'années, attaquée par un prédateur, cette salamandre est tombée dans un dépôt résineux, s'y est noyée puis a été fossilisée. George Poinar, de l'université d'État de l'Oregon, est le premier à découvrir un tel animal dans l'ambre. Sa trouvaille étonne aussi par le lieu où elle a été faite, la République dominicaine : on ne connaît aucune espèce de salamandre, actuelle ou fossile, sur l'île, ni même dans toute la région des Caraïbes.



George Poinar/université d'État de l'Oregon

LE MEILLEUR CHEMIN VERS LES ÉTOILES PASSE FORCÉMENT PAR
LA MAISON DE L'ASTRONOMIE

Nouvelle gamme Carbon-Design
de 98 € à 379 €, seulement !



IL N'Y A PAS DE PLUS GRAND ÉCRAN QUE LE CIEL !

INSTRUMENTS ASTRONOMIQUES - JUMELLES - LONGUES-VUES - MICROSCOPES
LOUPES - BASSE-VISION - MÉTÉO - LIBRAIRIE - GLOBES - GADGETS - POSTERS



la maison de
l'Astronomie
<http://maison-astronomie.com> *Paris*

33 et 35, rue de Rivoli, 75004 Paris
Tel. : 01 42 77 99 55
info@maison-astronomie.com
horaires d'ouverture :
du mardi au samedi de 10h15 à 18h30

Médecine

Une piste pour freiner les maladies neurodégénératives

Lutter contre l'agrégation anormale des protéines dans le cerveau est aujourd'hui un enjeu de santé publique. Un tel phénomène serait en cause dans plusieurs maladies, notamment celles d'Alzheimer ou de Creutzfeldt-Jakob. Dans cette dernière pathologie, les protéines incriminées sont des prions, c'est-à-dire des agents infectieux susceptibles de causer la maladie chez d'autres individus – les protéines anormales d'Alzheimer «contaminent» aussi les autres protéines du cerveau, qui s'agrègent à leur tour, mais, à l'inverse, ne se propagent pas à d'autres personnes. Une collaboration internationale a réussi à ralentir l'agrégation de prions chez des souris, dont la durée de vie après l'infection a presque été doublée.

Les biologistes ont cherché des molécules qui se lient aux agrégats et les stabilisent, de façon à freiner l'agrégation. Après avoir inoculé des prions dans le cerveau des rongeurs, où ces protéines ont commencé à s'agréger, les chercheurs ont testé toute une variété de composés de la famille des polythiophènes. Certains se sont révélés efficaces et les chercheurs en ont déduit les caractéristiques structurales permettant une liaison optimale aux agrégats de protéines, caractéristiques précisées ensuite par des simulations et des analyses spectrométriques par résonance magnétique nucléaire.

Ces résultats ont guidé la fabrication de nouveaux polythiophènes, de configuration idéale pour maximiser la force de la liaison. Les molécules synthétisées ont été particulièrement efficaces pour empêcher l'extension et la propagation des agrégats. La durée de vie des souris après l'infection a été prolongée de près de 90 %. En outre, une analyse *post mortem* a révélé que le cerveau des animaux était moins endommagé.

Les polythiophènes sont donc de bons candidats pour traiter les maladies à prions, mais aussi d'autres où les protéines s'agrègent. «Nous pourrions en principe réaliser une étude similaire pour la maladie d'Alzheimer, précise Anja Böckmann, de l'Institut de biologie et de chimie des protéines (CNRS et université de Lyon), qui a participé à l'étude. Et ce d'autant plus que nous avons publié cette année une description de la structure tridimensionnelle des agrégats protéiques impliqués dans cette maladie et que cette structure présente certaines ressemblances avec celle des agrégats formés par les prions.»

G. J.

U. Herrmann et al., *Science Translational Medicine*, en ligne le 5 août 2015

Virologie

Vers un vaccin universel de la grippe ?

Chaque année, il faut concevoir un nouveau vaccin contre la grippe, car le virus existe sous différentes formes qui sont susceptibles de muter rapidement et de ne plus être reconnues par le système immunitaire. Pour concevoir un vaccin, on utilise les souches du virus des années précédentes en espérant que le virus de celle qui vient ne sera pas trop différent. Dès lors, le vaccin est plus ou moins efficace selon les années. Pour remédier à ce problème, Barney Graham, du Centre de recherche de vaccination, à Bethesda aux États-Unis, et son équipe ont étudié la possibilité d'un vaccin universel qui fonctionnerait malgré les mutations.

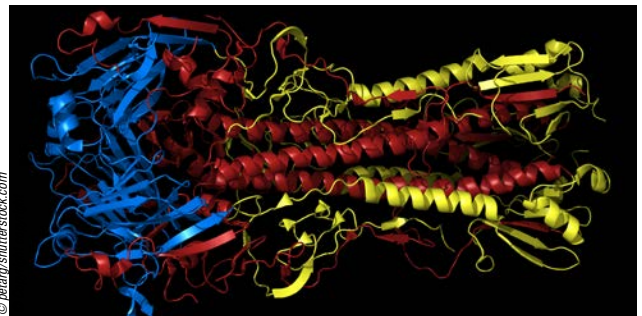
Le vaccin contre la grippe est conçu à partir de souches désactivées du virus afin de déclencher la production par l'organisme d'anticorps. Ces derniers ciblent

l'hémagglutinine, une protéine située sur l'enveloppe du virus. Le vaccin de l'équipe de Barney Graham est, lui, constitué de nanoparticules sur lesquelles est fixée de l'hémagglutinine du virus H1N1, mais seulement la « tige » de la protéine, moins sujette aux variations que sa « tête ».

L'équipe a montré que des souris ainsi vaccinées survivaient aussi à des doses létales de la souche virale H5N1. Une autre étude, utilisant une approche voisine, a donné des signes encourageants. Mais si les chercheurs ont montré que le principe de vaccin universel antigrippal est possible, il reste à adapter cette technique au système immunitaire de l'homme.

S. B.

H. M. Yassine et al., *Nature Medicine*, en ligne, 24 août 2015;
A. Impagliazzo et al., *Science express*, en ligne, 24 août 2015



L'hémagglutinine (ici de la souche H5N1 du virus de la grippe) mute fréquemment, ce qui rend difficile la mise au point d'un vaccin. De nouvelles approches ciblent sa partie la plus stable, la tige (en jaune).

À l'abri sous l'œil de l'épervier

Les œufs du colibri à gorge noire sont souvent au menu du geai mexicain. Harold Greeney, de l'université de l'Arizona, et ses collègues se sont intéressés au choix du lieu de nidification du colibri, qui réduit parfois cette menace. Sur 342 nids observés dans l'Arizona, 80 % sont installés à proximité du repaire d'un épervier de Cooper. La présence de ce prédateur du geai dissuade ce dernier de s'approcher des nids des colibris, ce qui améliore le succès reproductif de l'oiseau-mouche.

Obésité et cancer du sein

Des facteurs hormonaux sont souvent évoqués pour expliquer que l'obésité augmente les risques de cancer du sein chez la femme. Bo Ri Seo, de l'université Cornell, et ses collègues ont étudié une piste alternative : une modification des propriétés physiques du milieu extracellulaire déclencherait

des signaux chimiques menant à la formation de tumeurs. Cette hypothèse pourrait être pertinente chez les souris obèses, car les chercheurs ont montré que leurs tissus adipeux sont plus rigides, en raison d'une concentration plus importante de certaines cellules de structure dans les tissus adipeux, des myofibroblastes.

Suivez les dernières actualités de Pour la Science sur les réseaux sociaux



Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

SIGMAPLOT® 13

Exact Graphs and Data Analysis

Le chemin le plus simple de l'analyse à la création de graphes

Principal Components Analysis

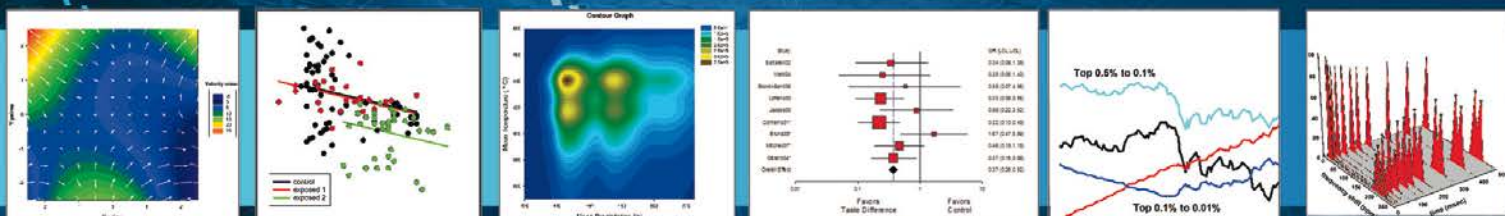
Appliquez un large choix de modèles graphique

Analysez vos données en toute simplicité

Ajustez facilement vos données

Publiez vos graphiques où vous voulez

Utilisez SigmaPlot depuis Excel



www.ritme.com

RITME - 34, bd Haussmann
75009 Paris - France
Tél. : +33 (0) 1 42 46 00 42


SCIENTIFIC SOLUTIONS

Distributeur officiel en France, Suisse, Belgique et au Luxembourg

POINT DE VUE

La compensation écologique, un dispositif encore mal appliqué

Préserver la biodiversité en imposant aux projets d'aménagement de compenser en nature leurs impacts environnementaux négatifs : un bon principe, mais difficile à mettre en œuvre.

Céline JACOB et Fabien QUÉTIER

En résumant de façon lapidaire, la compensation écologique est la démarche consistant à créer, protéger ou restaurer un habitat naturel pour compenser la destruction d'un autre milieu naturel. En théorie, c'est un outil intéressant pour réduire, voire éviter, la dégradation de l'environnement et réparer les dommages qu'il peut subir. C'est une illustration du principe « pollueur-payeur ». Cependant, sa mise en œuvre se heurte à de nombreuses difficultés, voire à des détournements (comme celui consistant à protéger un milieu dont la préservation était déjà programmée dans un cadre plus vaste, national ou international). Pour remplir correctement sa fonction, la compensation écologique nécessite des solutions techniques efficaces et un appareil réglementaire et organisationnel adéquat. Il reste des progrès à faire...

En France, la compensation écologique est l'un des sujets clefs du projet de loi sur la biodiversité actuellement en discussion au Parlement. La loi compléterait la réglementation française en matière d'atténuation et de compensation des impacts environnementaux des projets d'aménagement – laquelle repose sur la loi de 1976 sur la protection de la nature et ses évolutions ultérieures, dont les apports du Grenelle de l'environnement (2007).

Le Code de l'environnement a défini la compensation comme des mesures ayant pour objet d'apporter « une contrepartie aux

effets négatifs notables, directs ou indirects d'un projet qui n'ont pu être évités ou suffisamment réduits ». On parle de séquence « éviter-réduire-compenser », ERC en abrégé. En principe, la compensation en est l'étape ultime : elle porte uniquement sur les impacts résiduels significatifs et ne doit pas constituer un droit à détruire.

Les mesures compensatoires ont pour objectif de « conserver globalement et, si possible, améliorer la qualité environnementale des milieux ». Il s'agit d'interven-

En France, les exigences de compensation écologique restent hétérogènes, peu lisibles et mal appliquées.

tions écologiques telles que la restauration, la réhabilitation ou la re-création de milieux, leur préservation ou leur mise en valeur. Ces mesures peuvent viser les milieux eux-mêmes, certaines de leurs fonctionnalités, ou des espèces animales ou végétales liées à ces milieux, selon les impacts à compenser.

On peut rapprocher cette définition de celle proposée par le BBOP (*Business and Biodiversity Offsets Programme*), une plateforme internationale créée en 2004 et regroupant notamment des industriels, des banques et des ONG de conservation de la nature. Pour le BBOP, la compensation écologique doit conduire à l'absence de perte nette de biodiversité,

voire à un gain net. Cette exigence est aussi celle de banques comme la Société financière internationale (filiale de la Banque mondiale) et des banques privées ayant souscrit aux principes dits « de l'Équateur ».

Par exemple, des projets miniers à Madagascar ont compensé leurs impacts sur des forêts naturelles essentielles pour certaines espèces menacées (notamment des lémuriens ou des batraciens) en finançant des actions de restauration de forêts dégradées et en protégeant des forêts contre l'expansion des cultures sur abattis-brûlis.

Cependant, la biodiversité ne se limite pas à des listes d'espèces : pour être efficace, la compensation doit prendre en compte l'ensemble des interactions et des fonctions qui constituent les écosystèmes. Par exemple, il faut que le choix des forêts à protéger tienne aussi compte des corridors de déplacement de la faune entre massifs forestiers.

Le principe d'absence de perte nette impose que les mesures prises soient suffisantes pour compenser intégralement les impacts résiduels des projets. Mais pour évaluer les « pertes » à compenser et les « gains » apportés par la compensation, on doit disposer d'indicateurs précis, fiables et objectifs, à coût raisonnable. C'est une équation parfois difficile à résoudre. Par ailleurs, pour démontrer l'« additionnalité » des mesures (leur gain écologique), ces évaluations doivent aussi se faire en comparaison avec le scénario hypothétique