



POUR LA

SCIENCE

Juillet 2015 - n° 453

www.pourlascience.fr

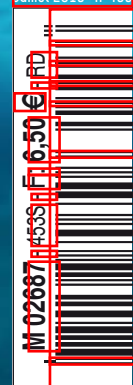
Édition française de Scientific American

ADAPTATION

L'ère des

méduses

Pourquoi elles vont conquérir les océans



MUSÉUM

NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE

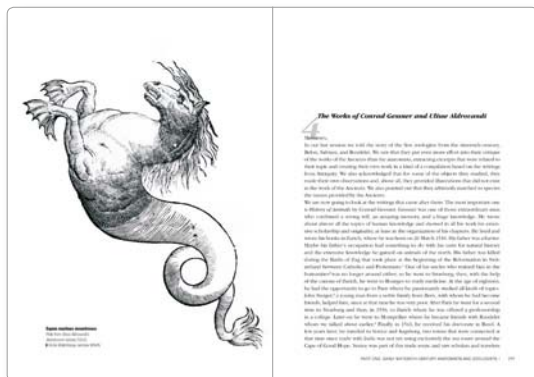
..... **histoire des sciences**



L'HISTOIRE DES SCIENCES NATURELLES DE CUVIER

DIX-NEUF LEÇONS SUR LES SEIZIÈME ET DIX-SEPTIÈME SIÈCLES

Nouvelle édition
de Theodore W. **Pietsch**
Traduction de Beatrice Marx
Préface de Jean-Pierre Gasc



« L'histoire des sciences naturelles depuis leur origine jusqu'à nos jours » est présentée ici pour la première fois en édition bilingue. Ce volume, amplement annoté et commenté, est le deuxième d'une série de cinq tomes regroupant les cours professés par Georges Cuvier de 1829 à 1832. Cette étude de grande envergure couvre de manière chronologique l'histoire des sciences naturelles sur une période qui s'étend du début du ^{xvi}^e à la fin du ^{xvii}^e siècle. Le lecteur a ainsi accès à l'atelier historique de Georges Cuvier. Loin d'être une activité lui paraissant annexe au regard de ses travaux d'anatomiste, Cuvier y consacra un temps important, consultant de très nombreux ouvrages en de multiples langues (anglais, allemand, espagnol, latin, français). Elle lui conféra aussi une grande notoriété. Prononcées au Collège de France, ces leçons s'adressaient à un public large et consacraient son magistère sur les sciences naturelles de l'époque. Cuvier y présentait l'histoire des sciences comme une marche continue dont il scandait le développement. Il considérait les siècles ici étudiés comme une période de profonds changements. Louant la lutte contre les « dogmatismes » religieux, il en faisait le vecteur d'une nouvelle liberté de pensée et d'écriture. Reléguant l'étude des anciens, les sciences naturelles seraient ainsi entrées dans un nouvel âge, celui de l'observation et de la classification.

Collection Archives, tome 20 | 170 x 240 mm broché | texte en anglais & français | 859 p., 42 figures N. & B. | ISBN 978-2-85653-766-4 | Prix 59€ TTC (55,92 HT) | Juin 2015

**plus de renseignements et de contenus
sur la librairie en ligne des Publications scientifiques**

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES DU MUSÉUM
ACCÈS PAR PUBLIC
MON COMPTE
MON PANIER
A+ A-
FR
L'UNIVERS MUSÉUM

ARCHIVES
L'histoire des sciences naturelles de Cuvier
dix-neuf leçons sur les seizième et dix-septième siècles
[LIRE LA SUITE](#)

ACTUALITÉS
PRÉSENTATION DU SERVICE
COLLECTIONS
PÉRIODIQUES
INFOS PRATIQUES
LIBRAIRIE
Rechercher

À LA UNE

Bienvenue sur le nouveau site internet des Publications scientifiques du Muséum national d'Histoire naturelle, Paris. Vous trouverez ici l'ensemble des collections et périodiques publiés par le Muséum. Les ouvrages et fascicules de périodiques sont maintenant disponibles à la vente, via la boutique en ligne, ou bien en venant directement **sur place** ; les articles de périodiques, dans leur version intégrale, sont de nouveau consultables en ligne.

ACTUALITÉS

L'histoire des sciences naturelles de Cuvier : dix-neuf leçons sur les seizième et dix-septième siècles



Commandez vos ouvrages depuis le **monde entier** sans intermédiaire. Navigation transversale par **Moteur de recherche**, **Thèmes** et **Géozones**.

Téléchargez gratuitement les articles des revues *Geodiversitas*, *Zoosystema* et *Adansonia* (publiés depuis 2000). D'autres revues sont consultables ou référencées...

Composez votre propre sélection en éditant un **catalogue** personnalisé au format PDF (A4).
SCIENCEPRESS.MNH.N.FR



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, assisté de Dylan Beiner (stagiaire)

Directrice artistique : Céline Lapert

Secrétariat de rédaction/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 :

Juan Aguilar, Sophie Gallé-Soas, Évelyne Host-Platret, Éric Lagadec, Christophe Pichon, Loïc Villain

PUBLICITÉ France

Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin
(jf.guillotin@pourlascience.fr)

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

SERVICE ABONNEMENTS

Ginette Bouffaré et 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-Oies - 1130 Bruxelles.

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

SCIENTIFIC AMERICAN

Editor in chief : Mariette DiChristina.

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

Editors : Ricky Rusting, Philip Yam, Robin Lloyd, Mark Fischetti, Seth

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

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

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public

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

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

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

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

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

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

duction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous

les pays. La marque et le nom commercial

« Scientific American » sont la propriété de

Scientific American, Inc. Licence accordée à

« Pour la Science S.A.R.L. ».

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

interdit de reproduire intégralement ou partielle-

ment 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

Gélification marine

Les adeptes des bains de mer le constatent : la présence de méduses est de plus en plus fréquente. Une constatation corroborée par les scientifiques dans presque toutes les régions du monde. Les pullulations d'animaux marins gélatineux, autrefois épisodiques, deviennent régulières, entraînant des nuisances que les baigneurs ne sont pas les seuls à subir.

Pourquoi, depuis plusieurs années, les méduses prolifèrent-elles ? Jacqueline Goy, la grande spécialiste française de ces animaux, et sa collègue Corinne Bussi-Copin nous en expliquent les ressorts (voir *L'ère annoncée des méduses*, pages 28-36). On peut les classer en deux catégories : d'une part, ceux liés à la grande faculté d'adaptation des méduses ; d'autre part, les bouleversements des écosystèmes dus aux actions humaines, la surpêche en particulier.

Le rôle de l'Homme

Une fois de plus, le rôle joué par les activités anthropiques est pointé du doigt. Les gouvernants agiront-ils de façon à endiguer la gélification des océans ? Persée avait réussi à décapiter Méduse, la seule des trois Gorgones qui n'était pas immortelle, en évitant grâce à un bouclier-miroir la vue pétrifiante de son visage. Les dirigeants des différents États, eux, feraient mieux de regarder les choses en face afin que le regard des lobbies ne les pétrifie pas dans l'inaction...

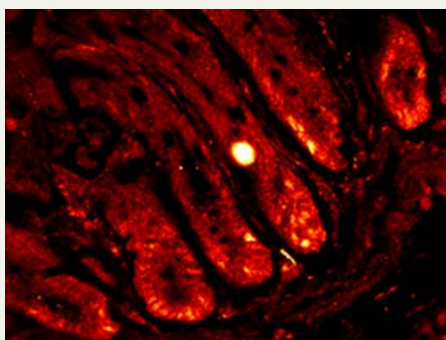
Tout cela ne doit pas nous faire oublier que les méduses sont des organismes fascinants, en raison de leur biologie mais aussi de leur beauté, dont nous offrons ici un petit aperçu (voir le portfolio pages 38-44). Bonne baignade !

À NOS LECTEURS. L'ensemble de la presse traverse une période économique difficile, en raison notamment de la fermeture de nombreux kiosques et des transformations liées à la révolution numérique. *Pour la Science* n'y échappe pas et s'est vu contraint d'augmenter à partir de juin 2015 ses prix. Le prix de vente au numéro passe à 6,50 euros (il était resté inchangé depuis sept ans). Les tarifs d'abonnement et de réabonnement progressent en moyenne de 3,90 % (voir les conditions générales de vente (CGV) sur notre site www.pourlascience.fr). Merci de votre soutien et de votre fidélité, qui nous aident à concevoir chaque mois le magazine que vous aimez.

3 **Edito**

Actualités

- 6 Des outils de pierre plus vieux que l'humanité
- 7 *Tara Oceans* à la conquête de la vie marine
- 8 Saveurs des neutrinos d'*IceCube* : un avant-goût
- 9 Bientôt des opiacés produits par des levures ?
- 11 Une tumeur déclenchée par pression mécanique



Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

Réflexions & débats

- 16 **Point de vue**
Renseignement : le traitement massif de données est aussi dangereux qu'inefficace
Claude Castelluccia et Daniel Le Métayer
- 18 **Entretien**
« Le problème du gluten est un symptôme de nos mauvaises pratiques alimentaires »
Christian Rémésy
- 22 **Lu sur SciLogs.fr**
Le paradoxe du petit échantillon
Nicolas Gauvrit
- 24 **Homo sapiens informaticus**
Écrire et se repentir
Gilles Dowek
- 26 **Cabinet de curiosités sociologiques**
Les bonnes nouvelles sont ennuyeuses
Gérald Bronner

À LA UNE

28

BIOLOGIE MARINE

L'ère annoncée des méduses

Corinne Bussi-Copin et Jacqueline Goy

Depuis quelques années, les méduses pullulent. Rien ne semble enrayer l'essor de ces animaux d'aspect pourtant si fragile et rudimentaire. Leur secret ? Une étonnante faculté d'adaptation... et le coup de pouce humain.

38

PORTFOLIO

Sous l'ombrelle des méduses

Jacqueline Goy

Si toutes les méduses arborent une ombrelle, celle-ci ne porte pas ombrage à leur diversité. Voici un aperçu des étonnantes variations que l'évolution a produites chez ces animaux.



46

SCIENCE ET SOCIÉTÉ

Transparence numérique : s'adapter ou disparaître

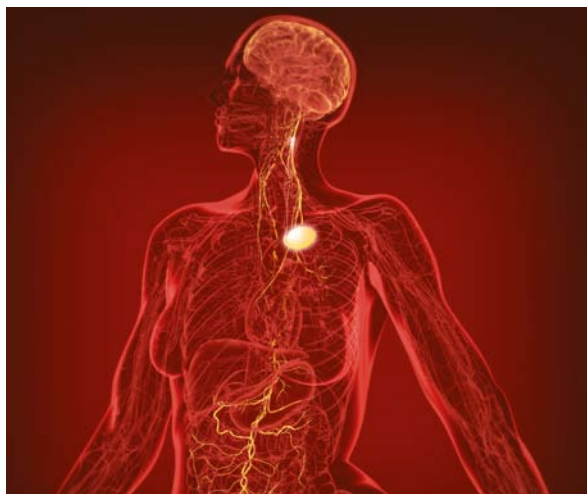
Daniel Dennett et Deb Roy

À l'ère du numérique, il est bien difficile de garder un secret. Si elles veulent survivre à cette transparence sans précédent, les institutions et les entreprises devront évoluer et s'adapter.

54 MÉDECINE

Soigner avec l'électricité*Kevin Tracey*

Comment lutter contre les maladies où l'organisme s'attaque lui-même ? La médecine bio-électronique propose de stimuler, grâce à des dispositifs implantés, les voies nerveuses qui régulent les réponses immunitaires.



62 ASTROPHYSIQUE

Les fossiles de la Voie lactée*Kathryn Johnston*

Pour comprendre comment la Voie lactée s'est formée, les astronomes traquent les vestiges de petites galaxies déchirées et avalées par notre galaxie il y a fort longtemps.



70 HISTOIRE DES SCIENCES

Le monde perdu de l'île Maurice*Eric Buffetaut et Delphine Angst*

Avant l'arrivée des humains au XVI^e siècle, l'île Maurice était peuplée d'une faune particulière qui avait évolué dans l'isolement. Depuis le XIX^e siècle, une ancienne mare révèle la richesse de ce monde perdu.

Rendez-vous

78 Logique & calcul

Comment jouer parfaitement au poker*Jean-Paul Delahaye*

Un jeu où intervient le hasard et où les joueurs ne disposent que d'une information incomplète, le poker Hold'em à deux joueurs, vient d'être résolu : la stratégie mise au point ne peut être battue par aucune autre.

84 Science & fiction

Le cochon, roi de la fiction*J. Sébastien Steyer et Roland Lehoucq*

86 Art & science

À la recherche du sens perdu*Loïc Mangin*

89 Idées de physique

La fontaine-boule : et pourtant elle tourne !*Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik*

93 Question aux experts

Est-on gros lorsqu'on a un indice de masse corporelle élevé ?*Martine Duclos*

95 Science & gastronomie

Les suspensions de microgels*Hervé This*

96 À lire

98 Bloc-notes

Les chroniques de Didier Nordon

Le 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. Une offre d'abonnement exceptionnelle est proposée également en page 76.
En couverture : © Anteromite/shutterstock.com

POUR LA SCIENCE.fr

LETTRE D'INFORMATION

Ne manquez pas la parution de votre magazine avec la NEWSLETTER ÉDITORIALE !

Découvrez la sélection d'articles de *Pour la Science*, des offres préférentielles et nos autres magazines en kiosque !



Recevez gratuitement la lettre d'information en inscrivant uniquement votre adresse email sur www.pourlascience.fr

Suivez-nous sur les réseaux sociaux

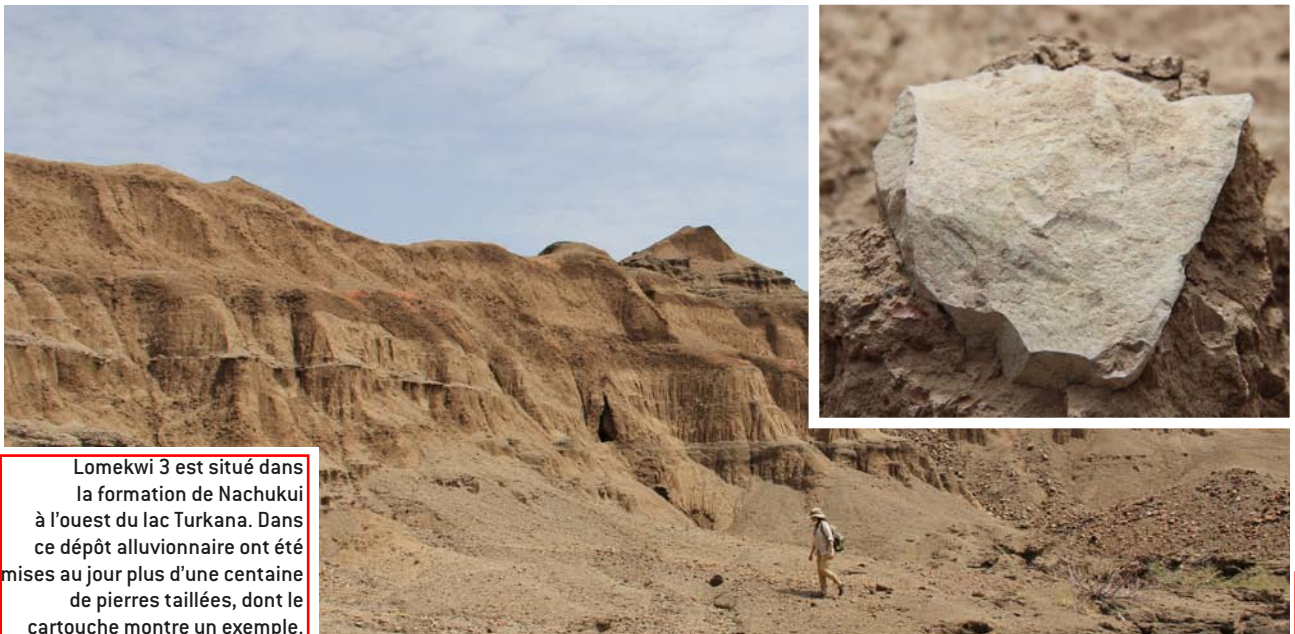


Actualités

Paléoanthropologie

Des outils de pierre plus vieux que l'humanité

Une équipe internationale a découvert au Kenya des pierres taillées qui précèdent d'un demi-million d'années les premiers fossiles du genre Homo.



Lomekwi 3 est situé dans la formation de Nachukui à l'ouest du lac Turkana. Dans ce dépôt alluvionnaire ont été mises au jour plus d'une centaine de pierres taillées, dont le cartouche montre un exemple.

Sur le site de Lomekwi 3 (photographie ci-dessus), dans la formation de Nachukui à l'ouest du lac Turkana, au Kenya, une équipe internationale a découvert plus d'une centaine d'objets en pierre façonnés à la main il y a quelque 3,3 millions d'années. «Le caractère technique de ces éclats et fragments d'éclats est clair, sans équivoque et répété, ce qui prouve qu'ils ont été débités intentionnellement à partir d'un nucléus [un bloc de pierre à débiter]», explique Sonia Harmand du CNRS, l'une des responsables de l'équipe.

En particulier, les chercheurs relèvent que l'écoulement lent qui a déposé les alluvions entourant les pierres taillées n'a pu les transporter, et qu'elles semblent n'avoir plus bougé après leur production; que les arêtes qu'elles portent

ne ressemblent en rien à celles que l'on observe dans la nature; qu'elles ne sont pas usées, ce qui serait le cas si elles avaient été produites naturellement; enfin, un éclat provient de l'un des blocs, et l'on voit mal quel processus naturel aurait pu en être à l'origine...

Cette découverte a amené l'équipe, composée de chercheurs français (du CNRS, de l'Inrap et de l'Université de Poitiers), américains et kényans à proposer l'existence du Lomekwien, une culture antérieure de 700 000 ans à la plus ancienne des industries lithiques connues: l'Oldowayen.

Tous les humains (les espèces du genre *Homo*) qui ont taillé la pierre au Paléolithique inférieur (la partie de l'histoire humaine vieille de plus de 300 000 ans) et après semblent avoir poursuivi au moins un objectif commun:

obtenir le plus possible de tranchant afin de découper des végétaux, de la viande, etc. On a longtemps pensé que les artisans de l'Oldowayen ancien (entre 2,6 et 2 millions d'années) produisaient des outils en modifiant des galets (en les appointant par des frappes). Puis l'idée que ces galets aient pu être des nucléus, qui auraient servi à produire des éclats, s'est introduite dans la discussion scientifique. Les plus anciens fossiles humains connus datant d'environ deux millions d'années, on soupçonnait aussi que ces Oldowayens étaient des préhumains. Mais depuis la description en janvier dernier d'un fragment de mandibule humaine selon toute vraisemblance – vieux de plus de 2,8 millions d'années, la situation s'est compliquée.

Quoi qu'il en soit, les éclats produits par les artisans oldowayens sont plus fins que ceux des occupants de Lomekwi 3 (voir un exemple ci-dessus à droite), ce qui suggère qu'ils résultent d'une technique plus évoluée. En particulier, dans la taille des artisans lomekwiens, il semble que des «enclumes», c'est-à-dire de gros blocs à surfaces planes, aient joué un rôle central.

En effet, selon l'équipe de Sonia Harmand, ces artisans avaient une compréhension de la mécanique de la fracturation d'une pierre et des possibilités techniques «clairement moins élaborées que celles mises en œuvre dans les plus anciens assemblages oldowayens, et ils n'utilisaient pas non plus de techniques de percussion à mains libres». Les longues expériences

Biologie marine

Tara Oceans à la conquête de la vie marine

Gros producteur d'oxygène et principal aliment de nombreux organismes marins, le plancton est une des clefs de la vie sur la planète. Après six années de collectes et d'analyses, l'expédition *Tara Oceans* livre ses premiers résultats. Éric Karsenti, codirecteur du projet, nous raconte ce gigantesque échantillonnage des océans.

de taille menées par les chercheurs ont en effet prouvé que, pour obtenir des éclats à partir de leurs nucléus volumineux, les tailleurs de Lomekwi 3 ont pu procéder soit en pratiquant des percussions sur enclume (technique nommée « percussion bipolaire sur enclume »), soit en choquant le nucléus contre un percuteur immobile (méthode de la « percussion sur percuteur passif »). La technique des artisans lomekwien semble pour cette raison plus proche du martelage sur enclume pratiqué par les chimpanzés casseurs de noix que du débitage à deux mains libres (l'une pour tenir le nucléus, l'autre pour frapper) pratiqué par les tailleurs de pierre humains et, commençant-on à penser, par les tailleurs de pierre oldowayens pendant tout le Paléolithique.

Bref, croit-on comprendre, l'art de déliter des éclats sur enclume serait une évolution lointaine de l'art simiesque de briser les noix ; une évolution technique, en libérant les mains, aurait favorisé le développement de leur habileté. Par une meilleure maîtrise des angles de percussion, elle aurait conduit à des résultats plus aboutis, notamment une plus grande longueur de tranchant et des éclats moins lourds.

Et qui est le tailleur des outils de Lomekwi 3 ? Le candidat le plus plausible est l'« homme à la face plate du Kenya », c'est-à-dire *Kenyanthropus platyops*, un pré-humain contemporain des australopithèques des Afars (Lucy). S'il en est ainsi, les débuts de l'industrie lithique sont antérieurs à l'apparition de l'humanité.

François Savatier

S. Harmand et al., *Nature*, vol. 521, pp. 310-315, 2015

Qu'est-ce que Tara Oceans ?

Éric Karsenti : Il s'agit d'une exploration des mers du globe en voilier, effectuée de 2009 à 2013. L'objectif était d'échantillonner le plancton à l'échelle planétaire. Ce terme désigne tous les organismes qui dérivent avec les courants : virus, bactéries, eucaryotes (organismes à cellules dotées d'un noyau) unicellulaires, petits animaux pluricellulaires... Le plancton a une importance capitale : il est à la base de la chaîne alimentaire, absorbe le dioxyde de carbone et produit près de la moitié de l'oxygène de la planète !

En quoi cette expédition diffère-t-elle des autres ?

É. K. : Les précédentes études s'intéressaient à quelques types d'organismes, mais jamais à l'ensemble de l'écosystème. Ici, nous avons répertorié tous les organismes par classes de taille et nous avons mesuré de nombreux paramètres environnementaux : température, acidité, concentration en nitrates, etc. La seconde originalité du projet est sa pluridisciplinarité. Nous avons regroupé des biologistes, des océanographes, des bio-informaticiens...

Comment se déroulait une séance de collecte ?

É. K. : Nous nous arrêtons en moyenne tous les trois jours. Nous restions 60 heures au même endroit,

où nous caractérisions la colonne d'eau avec plusieurs outils : filets dont la maille va de 5 à 690 micromètres, bouteilles truffées d'instruments qui descendaient jusqu'à 1000 mètres de profondeur en recueillant de l'eau, etc. L'eau remontée était ensuite passée à travers une série de filtres.

Quels principaux résultats avez-vous obtenus ?

É. K. : Nous avons établi un catalogue du plancton, que nous estimons quasi exhaustif dans les zones



Éric Karsenti (EMBL, CNRS), codirecteur de Tara Oceans.

parcourues. Chez les bactéries, nous avons répertorié environ 35 000 genres (le nombre d'espèces est donc bien supérieur) et 40 millions de gènes. Plus de la moitié de ces gènes étaient inconnus. Chez les eucaryotes, nous avons recensé 150 000 genres, bien plus que chez les bactéries. Quant aux virus, nous n'en savions presque rien avant cette expédition : plus de 90 % de ceux que nous avons découverts étaient inconnus. Ils sont globalement peu diversifiés. Le catalogue planctonique a

été mis en ligne (www.ebi.ac.uk/services/tara-oceans-data). Chaque échantillon est marqué par un code-barres qui permet de le connecter à l'ensemble des données physico-chimiques de son environnement.

Comment utiliser ce catalogue planctonique ?

É. K. : Les possibilités sont multiples ! Dans une étude, nous avons montré que 80 % des organismes planctoniques sont en interaction avec d'autres, dont ils sont les proies, les parasites, les compagnons symbiotiques, etc. Dans une autre, nous avons analysé les écosystèmes au cœur d'énormes tourbillons qui se forment à la pointe de l'Afrique du Sud et traversent l'Atlantique en deux ou trois ans. Nous avons montré que les facteurs environnementaux particuliers de ces zones y façonnent une communauté planctonique spécifique.

De telles analyses seront cruciales pour comprendre l'évolution des écosystèmes en fonction du changement climatique. De manière générale, cette expédition devrait révolutionner la façon de faire de l'écologie marine, car, pour la première fois, on a un catalogue assez complet. De plus, ce catalogue est à disposition de tous ! Chacun peut donc y puiser ce qui l'intéresse pour d'éventuelles applications...

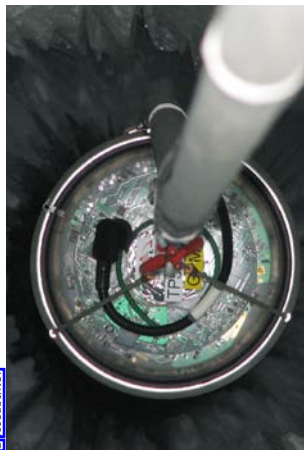
Guillaume Jacquemont

Science, section spéciale, 22 mai 2015

Physique des particules

Saveurs des neutrinos d'IceCube : un avant-goût

L'expérience IceCube détecte des neutrinos de très haute énergie qui traversent la glace de l'Antarctique. Deux équipes ont partiellement déterminé les « saveurs » de ces particules, un indice pour comprendre leur origine cosmique.



L'expérience IceCube (ci-contre) consiste en un ensemble de capteurs (ci-dessus) placés dans la glace pour détecter le passage de neutrinos.



Pour traquer certaines particules, des neutrinos de très haute énergie, les physiciens ont transformé un kilomètre cube de glace de l'Antarctique en un détecteur géant nommé IceCube. Ils ont ainsi observé des neutrinos à des énergies extrêmes (jusqu'à 10^{15} électronvolts, ou 1 000 téraélectronvolts) dont ils cherchent à déterminer les « saveurs ». Les neutrinos existent en effet en trois saveurs : électronique, muonique et tauique. Or, la part des neutrinos de chaque saveur parvenant au détecteur dépend des processus physiques qui les produisent. Déterminer la saveur des neutrinos d'IceCube aiderait donc à comprendre comment et où ces particules sont produites.

Cette analyse doit tenir compte d'un processus propre aux neutrinos : leur « oscillation ». Par des effets quantiques probabilistes, les neutrinos changent spontanément de saveur. Le Soleil, par exemple, ne produit que des neutrinos électroniques, mais seul un tiers de ce flux de particules est dans l'état de saveur électronique en arrivant

sur Terre. Les autres neutrinos ont changé de saveur en chemin.

Si la distance entre le site de production des neutrinos et la Terre correspond à des échelles cosmologiques, les physiciens s'attendent à observer une répartition homogène entre les trois saveurs de neutrinos. Cependant, en 2014, des chercheurs ont suggéré que les neutrinos de très haute énergie détectés par IceCube étaient tous de saveur électronique, ce qui impliquait des mécanismes de production exotiques. Deux nouvelles études, conduites par la collaboration IceCube et un groupe mené par Francesco Vissani de l'Université de L'Aquila en Italie, viennent d'infirmer ce résultat.

Ces deux équipes se sont focalisées sur les neutrinos de plus de 35 téraélectronvolts (et 60 téraélectronvolts pour Francesco Vissani). Le détecteur IceCube ne permet pas d'identifier formellement la saveur d'un neutrino, mais les caractéristiques du signal livrent un indice. En réalité, un neutrino n'est détecté que lors de son interaction avec

la glace dans la région sondée par le dispositif. On voit apparaître dans le détecteur une gerbe de particules, ou une fine trace lorsqu'un neutrino muonique produit un muon.

Les deux équipes ont alors comparé le nombre de signaux formés par une gerbe avec le nombre de ceux présentant une trace de muon. La collaboration IceCube a ainsi étudié 137 événements (129 gerbes et 8 traces de muons). L'analyse statistique exclut le résultat de 2014 et est compatible avec une répartition équilibrée des saveurs.

L'équipe de Francesco Vissani obtient un résultat similaire à la collaboration IceCube, ce qui confirmerait que ces neutrinos ont parcouru des distances cosmologiques. Les chercheurs espèrent améliorer leurs méthodes d'analyse pour identifier les neutrinos tauiques et ainsi préciser les mécanismes de production en jeu.

Sean Baillly

Collaboration IceCube, Phys. Rev. Lett., vol. 114, article 171102, 2015; A. Palladino et al., ibidem, article 171101

**2×10^{15}
électronvolts :**

c'est l'énergie du neutrino
le plus énergétique détecté
par IceCube. Les physiciens
l'ont surnommé Big Bird,
comme le personnage
d'une émission populaire
pour enfants.*

Biologie de synthèse

Bientôt des opiacés produits par des levures ?

Actuellement, la seule source d'opiacés est le pavot. Ces alcaloïdes complexes tels que la morphine et la codéine sont utilisés comme agents analgésiques et nombre d'entreprises pharmaceutiques rêvent de les synthétiser à bas coût en laboratoire. Toutefois, jusqu'à présent, des obstacles demeuraient. Une équipe américano-canadienne vient de donner les clés pour produire ces molécules chez la levure... à partir de sucre !

Faire synthétiser des opiacés par des bactéries ou des levures nécessite d'y transposer la chaîne de réactions qui se produisent dans la plante en y insérant les gènes des protéines impliquées. Toutefois, chez la bactérie, on ne sait mener que la première partie de cette chaîne : la conversion de glucose en un intermédiaire, la (S)-réticuline. Et chez la levure, à l'inverse, une étape précoce résistait : il était impossible de convertir en quantité suffisante l'intermédiaire L-tyrosine en L-DOPA (un précurseur de la dopamine). Les enzymes qui effectuent cette



La culture du pavot sera-t-elle remplacée par celle de levures ?

conversion, les tyrosine hydroxylases, produisent aussi une autre réaction, et si l'on en connaissait bien quelques-unes favorisant la réaction voulue, aucune ne fonctionnait dans la levure.

William DeLoache, de l'Université de Californie à Berkeley, et ses collègues ont trouvé un tel candidat grâce à un biocapteur : une enzyme qui convertit la molécule L-DOPA en un composé jaune et le produit de la réaction annexe en un composé violet. Avec ce biocapteur, ils ont passé au crible les tyrosine hydroxylases connues jusqu'à en trouver une produisant des levures jaunes. Ils ont ensuite

modifié le gène de l'enzyme pour augmenter son efficacité, puis inséré dans les levures tous les gènes pour mener la chaîne de réactions jusqu'à la (S)-réticuline. La suite ayant déjà été produite chez la levure, il ne reste à présent plus qu'à coller les morceaux...

Le rendement obtenu est encore faible, mais la route est tracée. Et de nombreuses questions éthiques ou juridiques vont se poser, puisque ces travaux laissent entrevoir la production d'héroïne en laboratoire...

Marie-Neige Cordonnier

W. C. DeLoache et al., *Nature Chem. Biol.*, en ligne le 18 mai 2015

Des taches sur Véga

Véga de la Lyre est une étoile brillante du ciel de l'hémisphère Nord. Cet astre présente un champ magnétique très faible découvert en 2009, mais dont on ignore l'origine. S'il est produit par un effet dynamo, comme dans le Soleil, Véga devrait présenter des taches stellaires qui apparaissent et disparaissent. Torsten Böhm, de l'Université de Toulouse et du CNRS, et ses collègues ont confirmé cette hypothèse grâce à des observations spectroscopiques menées à l'Observatoire de Haute-Provence.

Le varroa change de peau

On savait que *Varroa destructor*, un acarien parasite des abeilles, a une cuticule dont certains composés imitent ceux de la cuticule de son hôte, ce qui l'aide à passer inaperçu. Anne-Geneviève Bagnères (CNRS-IRBI, Tours) et des collègues viennent de montrer que, de plus, la composition de la cuticule du varroa se modifie lorsqu'on transfère le parasite d'une espèce d'abeille à l'autre. Une remarquable adaptation chimique !

Paléanthropologie

Un nouveau proche parent australopithèque

Le paléanthropologue éthiopien et américain Johannes Hailé-Selassié propose l'introduction d'une espèce d'Australopithèque dans notre arbre de parenté : *Australopithecus deyiremeda*, c'est-à-dire en langage afar « proche parent australopithèque ».

Johannes Hailé-Selassié ne fait cette proposition que sur la base de deux fragments de maxillaire, l'un gauche et l'autre droit, trouvés à cinq mètres l'un de l'autre, ainsi que de deux mandibules, l'une complète et l'autre représentée par la branche droite. Ces fossiles ont été trouvés dans la vallée de l'Aouache, en Éthiopie, dans un espace de quelque

trois kilomètres carrés et à 30 kilomètres du lieu de la découverte de Lucy. Alors que cette australopithèque des Afars remonte à 3,2 millions d'années, les quatre fossiles trouvés par l'équipe de Johannes Hailé-Selassié datent de 3,3 à 3,5 millions d'années.

Ainsi, *Au. deyiremeda* provient des Afars, comme Lucy. Selon Johannes Hailé-Selassié, les architectures mandibulaires de *Au. deyiremeda* et de *Au. afarensis* sont différentes, notamment par la position et l'angle des branches, ainsi que par l'absence d'un creux sur le côté du corps mandibulaire. Pour diverses raisons, il distingue

aussi *Au. deyiremeda* de l'ardipithèque (*Ardipithecus ramidus*, plus de 4 millions d'années), d'*Australopithecus anamensis* (3,9 millions d'années), et de *Kenyanthropus platytops* (3,2 millions d'années).

Nul doute que les arguments de Johannes Hailé-Selassié vont être disséqués par ses pairs. Quoi qu'il en soit, une chose est claire : l'idée que Lucy constitue la mère de l'humanité est douteuse, tant elle avait de cousines contemporaines et vivant dans la même région.

F. S.

Y. Haile-Selassie et al., *Nature*, vol. 531, pp. 483-488, 2015



Le fragment de maxillaire gauche à l'origine de la description de *Australopithecus deyiremeda*.

Un poisson à sang chaud

En battant en permanence des nageoires dorsales, le poisson-lune augmente sa température corporelle, a montré l'équipe de Nicholas Wegner, de l'Agence américaine d'observation océanique et atmosphérique. Un réseau de veines agit comme un échangeur thermique dans les branchies pour y limiter la perte de chaleur lors de l'oxygénation du sang. Il s'agit du premier poisson endotherme ayant une température trois à six degrés supérieure à celle de l'eau. D'autres poissons, tels le thon ou le requin, sont capables de réchauffer localement leurs muscles pour gagner en vitesse.

Le corbeau et l'outil

On sait que les corbeaux sont capables d'utiliser des instruments. Plus étonnant, ils les conservent afin de les réutiliser. Barbara Klump et ses collègues, de l'Université de St Andrews, en Grande-Bretagne, ont ainsi observé des corbeaux calédonniens (*Corvus moneduloides*), qui utilisent des brindilles pour extraire de la nourriture. Ils ont remarqué que les corbeaux cachent très souvent leurs outils dans un trou d'arbre lorsqu'ils mangent en hauteur et qu'ils s'en resservent.

Ouverture sur le VIH

Les personnes infectées par le virus du sida, le VIH, produisent des anticorps qui suffiraient à déclencher sa destruction. Toutefois, pour cela, les cibles des anticorps, les glycoprotéines Env sur l'enveloppe du virus, doivent d'abord « s'ouvrir » grâce à une petite protéine des cellules immunitaires, CD4. Or le VIH neutralise celle-ci. Jonathan Richard, de l'Université de Montréal, et ses collègues ont trouvé un moyen de produire ces ouvertures à l'aide d'un analogue de CD4 que le VIH ne sait pas contrer. En sa présence, les cellules immunitaires de patients infectés reconnaissent le virus et le détruisent. La stratégie doit à présent être testée chez le singe.

Neurobiologie

L'enivrante hormone de l'amour



Plus amical après un petit verre ? Vous le seriez aussi après une bouffée d'ocytocine !

Surnommée l'« hormone de l'amour », l'ocytocine a une réputation flatteuse. Elle facilite les relations sociales, si bien qu'on envisage de l'utiliser contre certaines pathologies, telles que l'autisme. Mais selon Ian Mitchell, de l'Université de Birmingham en Angleterre, et ses collègues, ses effets ressemblent à ceux d'un autre composé plus ambivalent : l'alcool.

Les psychologues ont examiné la littérature scientifique, traquant les conséquences d'une absorption d'alcool ou d'ocytocine. Et la liste des similitudes est longue. Ainsi, ces deux composés réduisent l'anxiété, la peur et le stress, tandis qu'ils augmentent l'altruisme et l'empathie. Ils peuvent cependant aussi accroître

l'agressivité et le rejet des étrangers au groupe. Si l'alcool est associé à un risque de dépendance et de maladie, les conséquences d'une consommation régulière d'ocytocine sont, elles, mal connues.

Pourquoi l'alcool et l'ocytocine ont-ils des effets communs ? Les deux composés renforcent l'action du GABA, une molécule qui éteint les neurones. Dès lors, ils diminueraient l'activité de l'amygdale – le centre cérébral de la peur – et du cortex préfrontal. Ce dernier régule nos comportements, et quand il est désactivé par l'alcool ou par l'ocytocine, des attitudes réprimées referaient surface.

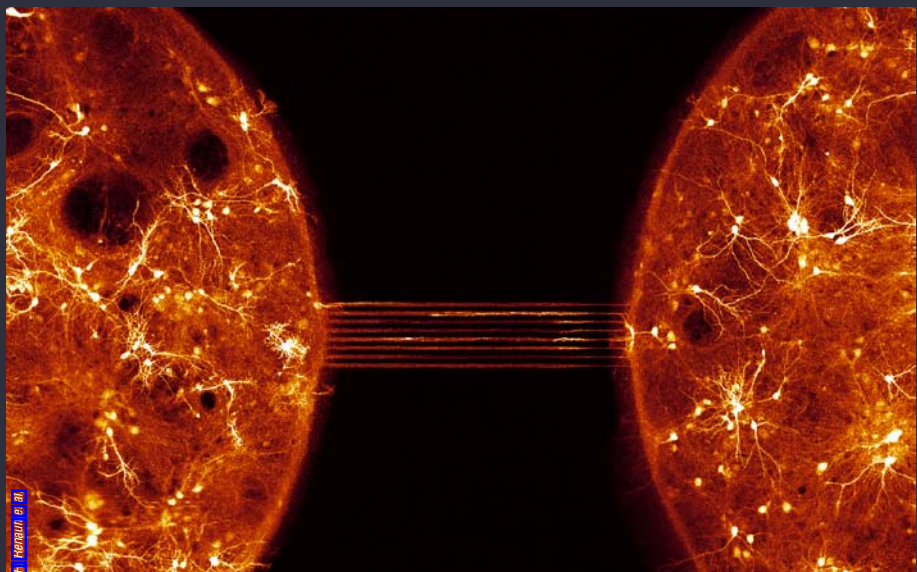
G. J.

I. Mitchell et al., *Neurosci. Biobehav. R.*, en ligne le 5 mai 2015

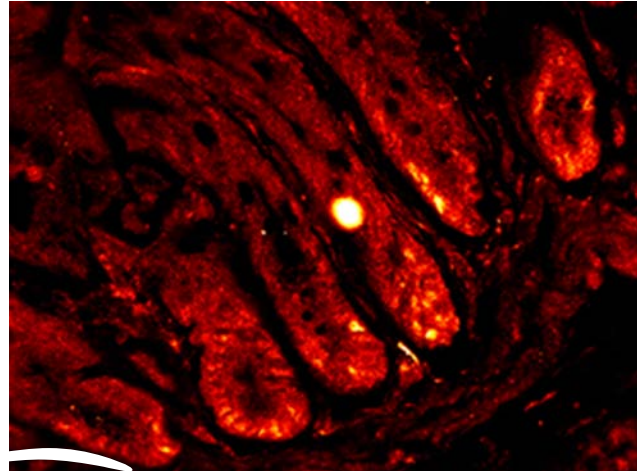
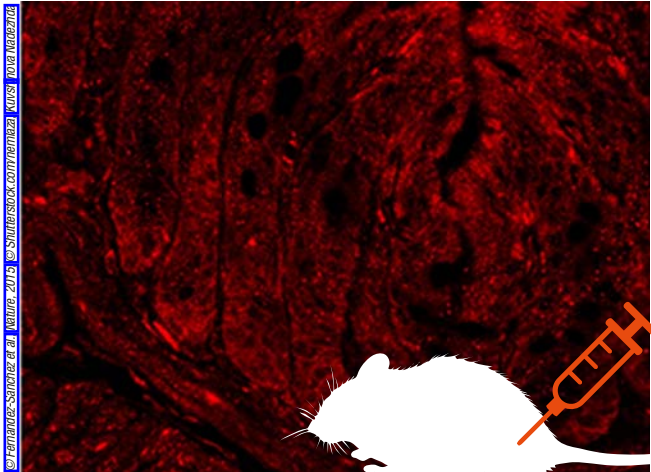
Insolite

Des neurones bien dirigés

Avec des collègues, Maéva Vignes et Renaud Renault, à l'Institut Curie à Paris, ont cultivé *in vitro* des groupes de neurones de rat communiquant à sens unique : les axones les reliant n'ont poussé qu'à partir d'un groupe, à l'intérieur de microcanaux rectilignes et asymétriques (se rétrécissant). Complété par des techniques d'optogénétique et d'imagerie, ce système constitue un outil prometteur d'étude des circuits neuronaux.



Biophysique



Une tumeur déclenchée par pression mécanique

Quand une tumeur grossit dans un tissu, elle appuie sur ce dernier.

La pression exercée suffit à produire une nouvelle tumeur dans le tissu.

Une tumeur peut en déclencher une autre. La seule pression mécanique qu'elle exerce en permanence sur les cellules voisines suffit, a montré l'équipe Mécanique et génétique du développement embryonnaire et tumoral (CNRS/UPMC/Institut Curie) dirigée par Emmanuel Farge, à Paris.

Depuis quelques années, on étudie le rôle des contraintes mécaniques dans la régulation des cellules. Diverses équipes ont montré l'importance de l'équilibre des forces physiques dans le développement et le fonctionnement des tissus de l'organisme. Au sein d'un tissu, les cellules sont étirées, cisailées, compressées au gré de son évolution et des mouvements des fluides. On s'est aussi aperçu que certains gènes sont mécanosensibles : ils s'activent lorsque la cellule subit une pression suffisante.

Oren grossissant, une tumeur comprime les cellules voisines, ce qui, par réaction mécanique, comprime aussi la tumeur. Plusieurs biologistes ont émis l'hypothèse, jusqu'ici testée en culture cellulaire, que cette pression modulait le degré d'agressivité de la tumeur. Emmanuel Farge et ses collègues ont proposé que

la pression permanente exercée sur les cellules saines voisines serait suffisante pour y déclencher l'expression anormale de gènes mécanosensibles tumoraux et, ainsi, les transformer en cellules tumorales.

Afin de vérifier cette hypothèse *in vivo*, ils ont d'abord évalué la pression qu'exerce une tumeur croissante sur les tissus voisins (une tumeur du colon à un stade précoce déclenchée chez des souris modèles). Ils ont ensuite appliqué au colon de souris saines une pression mécanique équivalente et vérifié si cette force déclenchait l'apparition d'une tumeur. Comment ? À l'aide de vésicules magnétiques et d'un aimant.

Les chercheurs ont injecté par intraveineuse, près du colon, des vésicules lipidiques chargées d'un fluide magnétique. Elles se sont nichées dans des cellules entourant les cryptes du colon. Les biophysiciens ont alors produit la force en attirant les vésicules magnétiques à l'aide d'un aimant placé à une distance adéquate de la souris. Après deux semaines sous cette contrainte, une protéine des jonctions entre cellules, la β -caténine, se comportait différemment dans la région ciblée. Sous l'effet de

la pression, une proportion plus importante de cette protéine s'était détachée des jonctions et relocalisée dans le noyau cellulaire.

La β -caténine est connue pour activer – quand elle est dans le noyau – l'expression de gènes impliqués dans la survenue de nombreux cancers. Or au bout d'un mois, ces mêmes gènes étaient exprimés en quantité dans la région sous contrainte, et celle-ci avait grossi tandis qu'apparaissaient des foyers d'anomalies dans les cryptes – premiers signes qu'une tumeur se forme. Certaines tumeurs induites avaient toutes les caractéristiques pour devenir invasives.

Au sein d'une tumeur, les cellules sont loin d'être toutes identiques. L'origine de cette diversité est un mystère : les mutations aléatoires ne sont pas assez fréquentes pour l'expliquer. Plusieurs facteurs concourent sans doute. Le mécanisme de propagation tumorale par pression mécanique en ferait-il partie ? Pour l'heure, Emmanuel Farge et ses collègues testent chez la souris s'il serait possible, par un moyen chimique, de freiner ou bloquer la croissance d'une tumeur induite mécaniquement.

M.-N. C.

M. E. Fernandez-Sanchez, S. Barbier et al., *Nature*, en ligne le 11 mai 2015

Dans les cryptes du colon d'une souris soumise à une pression mécanique permanente pendant plusieurs semaines, l'expression d'un gène tumoral est activée (à droite, observée par immunofluorescence). La pression est exercée à l'aide d'un aimant qui attire des vésicules magnétiques injectées près du colon (à gauche, les cryptes sans pression mécanique).

Géosciences

La tectonique accélérée de l'Inde

A la fin du Crétacé (145 à 66 millions d'années), l'Inde accélère sa course vers le nord pendant 20 millions d'années. Pourquoi ? Avec plusieurs collègues, Oliver Jagoutz du MIT en propose une explication : un double système de subduction (plongée d'une plaque tectonique sous une autre) aurait été à l'œuvre il y a plus de 80 millions d'années à l'avant de la plaque indienne.

Afin de vérifier son hypothèse, l'équipe d'Oliver Jagoutz a d'abord restitué la position possible de ce double système de subduction, à partir des traces géologiques qui documentent la disparition de la Néotéthys – un ancien océan disparu situé à l'est de l'Afrique. Puis les géophysiciens ont simulé numériquement par deux approches – l'une de nature géométrique, l'autre fondée sur la « méthode des éléments finis » – le fonctionnement de ce système tectonique particulier.

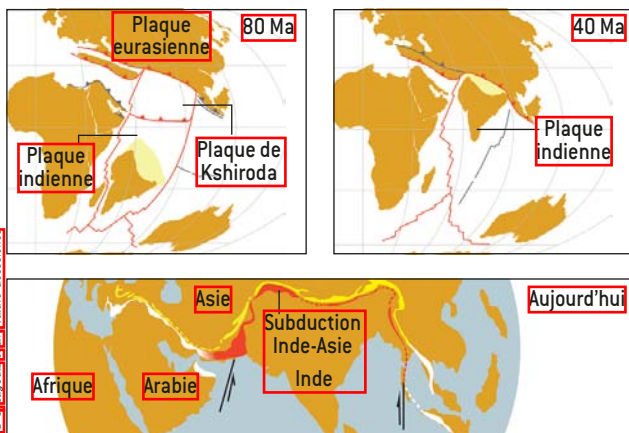
D'après leur scénario, il y a quelque 90 millions d'années, la zone de subduction de la plaque de la Néotéthys (devenue la plaque indienne) sous la plaque Kshiroda (une plaque disparue située au nord de la Néotéthys) a commencé à se rapprocher de celle de la plaque de Kshiroda sous l'Eurasie (voir la figure ci-dessous).

Dès lors, une sorte de « tuyau » orienté est-ouest s'est formé entre les deux plaques plongeantes, d'où le manteau supérieur ductile devait s'évacuer au fur et à mesure du rapprochement des deux zones de subduction. Peu sensible au début, ce phénomène se serait accéléré après 70 millions d'années, quand la distance entre les deux zones de subduction s'est réduite. En effet, montrent les simulations, la longueur du « tuyau » s'est réduite avec la progression de la plaque indienne, ce qui a accéléré le flux de matière ductile s'évacuant, car la résistance visqueuse des « parois », devenues moins longues, était moindre. Ce mécanisme aurait facilité le rapprochement des deux zones de subduction. Résultat : la plaque indienne a accéléré vers le nord durant 20 millions d'années.

En somme, tout s'est passé comme si l'arrivée de l'Inde avait réduit la longueur d'une saucisse ouverte aux deux bouts, diminuant ainsi la résistance au flux sortant de « chair mantellique » : celle-ci s'est donc évacuée plus vite, ce qui a accéléré le rapprochement des parois du tube créé par la double subduction.

F. S.

O. Jagoutz et al., *Nature Geoscience*, vol. 8, pp. 475-478, 2015



La progression de la plaque indienne vers la plaque eurasienne a réduit la longueur est-ouest du système de subduction entre les deux plaques, ce qui y a accéléré l'évacuation de la matière mantellique.

Biomédecine

Bactéries diagnostiqueuses

Deux équipes de chercheurs, l'une essentiellement française et l'autre américaine, viennent de montrer que des bactéries transformées peuvent servir à diagnostiquer de façon commode des pathologies telles qu'un diabète ou un cancer.

L'équipe de Jérôme Bonnet, chercheur de l'Inserm au Centre de biochimie structurale de Montpellier, a développé des méthodes pour transposer à l'univers génétique d'une bactérie des équivalents des transistors et autres portes logiques de l'électronique, ce qui permet de manipuler les fonctions accomplies par la cellule. Avec ces outils, elle a transformé des colibacilles (*Escherichia coli*) de façon qu'ils puissent détecter la présence excessive de glucose dans l'urine : les bactéries, intégrées à des billes de gel immergées dans l'échantillon d'urine, produisent un changement de couleur si la concentration de glucose dépasse le seuil.

De leur côté, Tai Danino, au MIT, et ses collègues ont modifié des colibacilles de façon à détecter des tumeurs métastatiques du foie, chez la souris. Les bactéries, administrées oralement, atteignent les tumeurs et produisent alors une enzyme dont le produit métabolique est détectable visuellement dans l'urine.

Le début d'une nouvelle approche du diagnostic médical ?

Maurice Mashaal

A. Courbet et al., T. Danino et al., *Science Translational Medicine*, 27 mai 2015



Modifier des colibacilles de façon qu'ils réagissent spécifiquement à certaines substances : la biologie de synthèse s'annonce dans le domaine des analyses médicales.

Psychologie

Endormir sexisme et racisme

Sexisme et racisme influent encore considérablement sur les comportements, parfois de façon inconsciente. Xiaoqing Hu, de l'Université Northwestern, aux États-Unis, et ses collègues ont réussi à atténuer durablement ces préjugés chez des sujets... grâce à une sieste !

Le sommeil est essentiel à la mémorisation : les souvenirs sont alors réactivés, ce qui les renforce. Or cette réactivation peut être déclenchée en présentant au dormeur un indice sonore ou olfactif lié au souvenir. C'est ce que les chercheurs ont fait. Ils ont couplé l'émission d'un son particulier à des associations allant à l'encontre des préjugés (par exemple un visage de femme et un mot scientifique), puis réémis ce son pendant que les participants dormaient. Une semaine plus tard, des tests ont révélé une diminution de leur racisme et de leur sexisme.

G. J.

X. Hu et al., *Science*, en ligne le 28 mai 2015

Astrophysique

Un modèle pour l'émission des ondes gravitationnelles

L'un des grands défis de l'astrophysique du XXI^e siècle est l'observation des ondes gravitationnelles prédites par la théorie de la relativité générale. Celle-ci décrit l'interaction gravitationnelle non plus comme une force, mais comme une manifestation de la courbure de l'espace-temps due à la présence d'un objet massif. Elle prévoit que le champ gravitationnel peut présenter des ondes gravitationnelles, des déformations périodiques qui se propagent, à l'image des vagues à la surface d'un lac. L'amplitude de ces ondes est très faible. Aussi, pour les détecter au sein du bruit ambiant, il est crucial de connaître *a priori* leurs propriétés. Thibault Damour et Alessandro Nagar, de l'Institut des hautes études scientifiques (IHÉS), à Bures-sur-Yvette, en collaboration avec deux spécialistes de la relativité numérique, ont développé un modèle précis des ondes gravitationnelles émises lors de la coalescence de deux étoiles à neutrons ou de deux trous noirs.

La description de ces ondes peut être obtenue par des approches numériques, mais le calcul est très long. Les méthodes analytiques (c'est-à-dire sous forme d'expressions mathématiques) sont rapides, mais elles ne permettent pas de décrire les derniers instants avant la fusion des astres. Thibault Damour et ses collègues ont développé une technique qui concilie les avantages des deux approches, analytique et numérique. Ils réduisent la description de l'évolution du système de deux étoiles à celle d'un système d'un seul corps effectif, comme on peut le faire en mécanique classique avec la définition d'un corps fictif de masse effective reliée à la masse des deux étoiles, en orbite autour du centre de masse. Toute la difficulté ici est de construire une bonne modélisation du potentiel gravitationnel relativiste. L'approche semi-analytique développée décrit rapidement et précisément de nombreux systèmes binaires.

À terme, cette technique devrait aider à identifier des ondes gravitationnelles dans les signaux des interféromètres *Ligo*, aux États-Unis, et *Virgo*, à Pise. Ces dispositifs ont d'ailleurs bénéficié d'importants travaux d'amélioration qui les rapprochent du seuil de détectabilité des ondes gravitationnelles en provenance de systèmes binaires compacts.

S. B.

S. Bernuzzi et al., *Phys. Rev. Lett.*, vol. 114, 161103, 2015

Concours

Des doctorants communicants

Faire comprendre des années de recherche en trois minutes et au plus grand nombre, tel était le défi lancé aux jeunes doctorants participant au concours « Ma thèse en 180 secondes », organisé par le CNRS et la Conférence des présidents d'universités et dont *Pour la Science* est partenaire. Chaque participant devait faire, en 180 secondes, un exposé clair, pertinent et convaincant sur son projet de recherche. Le tout avec l'appui d'une seule diapositive!

Vingt-sept valeureux candidats ont relevé le gant lors de la finale nationale qui s'est déroulée dans un auditorium bondé le mercredi 3 juin à Nancy. Le public débordant d'enthousiasme a désigné son favori : Alexandre Artaud (Université Grenoble Alpes), dont la thèse porte sur la « spectroscopie tunnel à très basse température de graphène

sur rhénium supraconducteur ». Le brillant physicien a également convaincu le jury qui lui a décerné son premier prix. Le deuxième prix du jury est allé à Rachida Brahimi (Aix-Marseille université), et le troisième à Grégory Pacini (Sorbonne Paris Cité). Enfin, Camille Rouillon (Clermont université) a reçu le Prix des internautas 2015 organisé par *Pour la Science* (merci aux 6 000 participants). La jeune femme, qui rêve de travailler dans l'industrie, a réussi à expliquer avec humour et sans jargon son sujet de thèse : l'« Étude de l'impact des vieillissements photochimique, thermique et climatique sur les propriétés d'aspect de polypropylènes teintés masse colorés ». Une pétillante prestation à regarder, avec celles des autres lauréats, sur le site web de *Pour la Science*.

Cécile Lestienne

<http://bit.ly/1eTbvsM>



De gauche à droite : Alexandre Artaud, Rachida Brahimi, Grégory Pacini et Camille Rouillon.

Des données sur polymères

Jean-François Lutz, de l'Institut Charles-Sadron à Strasbourg, et ses collègues ont réussi, pour la première fois, à stocker des données sur des polymères artificiels. En s'inspirant de l'ADN qui stocke l'information génétique, ils ont utilisé deux monomères assimilés aux bits 0 et 1, un troisième servant d'« espace » pour faciliter la synthèse. La chaîne de monomères forme alors un message en langage binaire. Ces polymères sont plus aisés à manipuler que l'ADN et pourraient servir à créer des codes-barres moléculaires infalsifiables.

Compter les arthropodes terrestres

Aujourd'hui, nous connaissons environ 1,5 million d'espèces animales, mais il pourrait en exister dix fois plus d'après certains spécialistes. L'incertitude provient surtout du recensement incomplet des arthropodes. En effet, ceux-ci sont beaucoup plus nombreux et moins connus

que les vertébrés, dont on pense avoir recensé la quasi-totalité. Nigel Stork, de l'Université Griffith en Australie, et ses collègues ont réduit l'incertitude en combinant huit méthodes pour estimer le nombre d'espèces d'arthropodes. Leurs résultats suggèrent qu'il existerait entre 5,9 et 7,8 millions d'espèces d'arthropodes terrestres.

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



Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

COSMETIC VALLEY

Renforcer le leadership français grâce à l'innovation et la recherche

Par Christophe Blanc (EDB)



Avec plus de 20 % de parts de marché, la France est le leader mondial de la cosmétique. « On estime qu'à l'échelle du pays la filière représente à peu près 25 milliards d'euros de chiffre d'affaires annuel et 150 000 emplois. Et c'est un marché en forte croissance », déclare Christophe Masson, directeur scientifique du pôle de compétitivité de la Cosmetic Valley. « Dans tous les pays du monde on veut acheter du "Made in France" en cosmétique, c'est une réalité économique. »

Pour garder et renforcer cette position, les industriels et la recherche publique doivent travailler main dans la main. « Un des rôles essentiels de la Cosmetic Valley est de favoriser les rapprochements entre les entreprises, les universités et les organismes de recherche pour développer les produits de beauté de demain », ajoute Christophe Masson. Un

travail qui débouche sur des innovations concrètes, comme le montrent les trois exemples présentés ici.

Ses autres activités incluent l'accompagnement des entreprises à l'export, ou encore la création le 1^{er} janvier dernier, de la plateforme d'accompagnement des PME Cosmet'Up à Orléans. Mais la grande nouveauté de cette année 2015 sera la première édition du salon Cosmetic 360 à Paris, en octobre. « Aujourd'hui, les principaux salons sont plutôt organisés en Asie, où le marché connaît une croissance à deux chiffres, indique M. Masson, [...]. Il est important qu'un salon consacré à l'innovation de la filière ait lieu tous les ans en France, afin de repositionner encore plus Paris comme le lieu où l'ensemble de ses acteurs viennent se rencontrer. Nous y organiserons en outre les Victoires de la Cosmétique. »



© Shutterstock.com / iwen124 / iM

Simple « cluster » d'entreprises départementales à sa création en 1994, le pôle de compétitivité a pris une ampleur nationale et regroupe aujourd'hui trois régions – Centre, Haute-Normandie et Île-de-France. Huit universités et 200 laboratoires de recherche publics y sont affiliés, ainsi que plus de 800 entreprises privées (dont

78 % de PME) qui représentent tous les métiers de la filière : producteurs de matières premières, fabricants d'ingrédients, de produits finis, entreprises spécialisées dans le packaging, les technologies numériques, les services, le marketing, la logistique. Un dixième des cosmétiques vendus dans le monde est produit par la Cosmetic Valley.

ALOCA

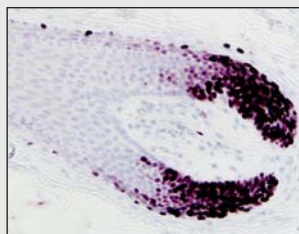
L'alopécie et la canitie bientôt vaincues

Nous connaissons tous ces publicités dans la presse ou à la télévision pour des produits « miracles » contre la chute des cheveux... aux résultats souvent décevants. Cette fois pourtant il se pourrait bien qu'un pas décisif ait été franchi, grâce au projet ALOCA, lancé par la Cosmetic Valley et mené à bien par l'Institut Européen de Biologie, Alès Groupe, l'Inserm, le laboratoire BIO-EC et celui de Joanna Bakala, implanté au CNRS à Gif-sur-Yvette (91). « Lors des expériences que nous avons menées *in vitro* puis *ex vivo* sur des explants de scalp, nous avons

obtenu une amélioration de 40 % de la croissance des cheveux ! » explique Joanna Bakala.

De quoi rendre espoir aux millions de Français touchés à des degrés divers par la chute des cheveux, ou alopécie. La molécule découverte « appartient au groupe des peptides biomimétiques qui miment l'activité de certains facteurs de croissance », précise la chercheuse. Après une sélection qui a duré quatre ans, les chercheurs ont isolé « une famille de peptides, qui stimule la croissance folliculaire », et donc la repousse des cheveux. Un de ces peptide, dont la structure est un secret

industriel, « est actuellement entrée en phase clinique, et les premiers produits devraient être commercialisés en 2016 ».

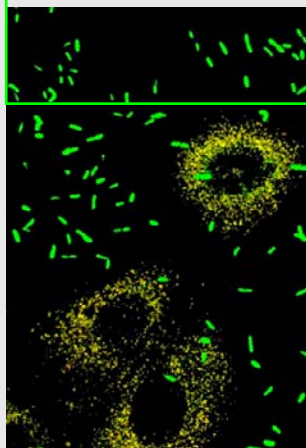


Coupe longitudinale du bulbe d'un follicule de cheveu dans lequel on distingue l'antigène Ki-67, principal marqueur de la prolifération des cellules.

Autre innovation prometteuse : le projet ALOCA a aussi permis « de sélectionner une molécule originale, là encore un peptide biomimétique, particulièrement efficace contre le blanchissement des cheveux, ou canitie », s'enthousiasme Joanna Bakala. « Elle mime un facteur de croissance qui participe à la mélanogénèse », c'est-à-dire à la production des pigments qui colorent les cheveux. Une véritable percée, car « à ce jour, il n'existe sur le marché aucun produit cosmétique capable d'empêcher le phénomène de canitie », précise Joanna Bakala.

SKIN-O-FLOR

Les bactéries pacifiées



Sur cette image, on distingue nettement, en vert, des bactéries (*Pseudomonas fluorescens*) au contact de cellules de la peau (des kératinocytes, qui constituent 90 % de l'épiderme), en jaune.

Comment combattre le phénomène de «peau sensible» responsable de rougeurs, d'irritations et de tiraillements ? Le projet Skin-O-Flor, cofinancé par l'État et les régions Centre et Haute-Normandie, a pour but de rendre inoffensives les bactéries responsables de ces désagréments en agissant sur les signaux chimiques qu'elles échangent avec la peau.

«La plupart des millions de bactéries présentes sur et à l'intérieur de notre peau sont inoffensives», affirme Marc Feuilloley, directeur du laboratoire de Microbiologie Signaux et Microenvironnement de l'Université de Rouen à Évreux (Eure), qui étudie la communication entre les bactéries et les cellules de la peau. «Mais quelques-unes deviennent

pathogènes lorsqu'elles sont stimulées par les signaux chimiques émis par certaines hormones. Ainsi, lorsqu'une personne est victime de stress ou de dépression, sa peau libère un peptide nommé substance P, qui se diffuse dans la sueur et peut stimuler la virulence des bactéries», explique le chercheur. «Ce phénomène expliquerait certains symptômes cutanés, dont le "syndrome de peau sensible" qui touche environ 50 % des femmes.»

La méthode Skin-O-Flor consiste à bloquer la communication entre les bactéries et la peau pour maintenir son intégrité. «C'est une démarche totalement nouvelle et originale, se réjouit Marc Feuilloley, qui permet de combattre les irritations cutanées sans tomber dans le domaine de

la pharmacie. Car lorsque vous agissez directement sur la peau ou sur les bactéries, vous créez un médicament, un antiseptique ou un antibiotique, qui nécessite une autorisation de mise sur le marché. En revanche, si vous travaillez sur la communication entre les deux, vous êtes efficace tout en restant strictement dans le domaine cosmétique.»

«Nous avons donc testé tout une série de produits cosmétiques, et en avons identifié deux capables de bloquer l'effet de la substance P sur les bactéries.» Ces produits sont l'Eau d'Uriage et le Teflose de BioEurope (groupe Solabia), deux partenaires du projet Skin-O-Flor. D'autres produits de la marque Uriage, dont le Xémose et le Bariéderm, ont bénéficié de ces travaux.



CONVERRCOL

Flacons : l'ivresse des couleurs

La contrefaçon est un fléau pour l'industrie cosmétique mondiale, en particulier pour la parfumerie. L'une des stratégies pour la combattre consiste à fabriquer des flacons infalsifiables. «Pour cela, nous incluons dans le verre des oxydes métalliques de cuivre, d'or ou d'argent et les précipitons sous formes de nanoparticules», explique Jean-Philippe Blondeau, enseignant-chercheur à l'Université d'Orléans. Son laboratoire, le CEMHTI, est avec le GREMI, l'institut PRISME et l'Université de Cracovie l'un des partenaires du projet ContVerrCol, financé par la région Centre.

Une première application possible de cette technologie est d'utiliser «des particules d'argent visibles uniquement à la lumière ultraviolette. C'est un bon moyen de distinguer les

vrais flacons des contrefaçons». Mais il est plus intéressant encore de colorer le verre localement, en surface ou en volume : les motifs ainsi créés enjolivent les flacons et les rendent pratiquement infalsifiables. C'est l'objet de la technologie mise au point par Jean-Philippe Blondeau et son équipe. «Une méthode consiste à passer un flacon contenant des nanoparticules de cuivre dans un four avec un gradient de température de bas en haut : c'est ainsi que Saint-Gobain fabrique le flacon Fahrenheit de Dior.»

Par ailleurs, la méthode ContVerrCol permet d'aller plus loin. «Notre équipe travaille sur la coloration locale par laser. Elle permet de tracer des motifs en surface et à l'intérieur même du verre, grâce à des échanges entre les ions métalliques – Ag⁺, Cu⁺,

Au⁺ – et des éléments réducteurs tels l'étain ou l'antimoine pour former les nanoparticules.» Il est ainsi possible de dessiner toutes sortes de motifs au cœur du matériau. «Les couleurs obtenues dépendent de l'oxyde utilisé – rouge pour le cuivre, jaune à ambré pour l'argent, rouge à bleu pour l'or – ainsi que de la taille et de la fraction volumique des nanoparticules métalliques.»



Si le four à gradient de température crée des dégradés de couleurs (flacon à droite), seule la coloration locale par laser peut produire des motifs au cœur même du verre, à l'aide par exemple de nanoparticules d'argent (ci-dessus).

POINT DE VUE

Renseignement : le traitement massif de données est aussi dangereux qu'inefficace

Au nom de la lutte contre le terrorisme, la France adopte un dispositif de détection de profils de comportements suspects inopérant, coûteux et menaçant pour la vie privée.

Claude CASTELLUCCIA et Daniel LE MÉTAYER

Au motif de lutter contre le terrorisme, plusieurs pays ont adapté leur cadre juridique pour permettre un traitement massif de données à des fins de renseignement. La France s'est également engagée dans cette voie avec le projet de loi relatif au renseignement, adopté par l'Assemblée nationale en première lecture le 5 mai 2015 et en passe d'être discuté au Sénat à l'heure où nous écrivons. L'objectif affiché de ces dispositions est de doter les États de moyens de détecter des « signaux faibles », autrement dit des profils de comportements suspects qu'il conviendrait de repérer le plus tôt possible pour déjouer des projets terroristes. D'un point de vue strictement technique, on peut cependant s'interroger à la fois sur les risques liés à ces procédés et sur leur efficacité.

Le risque principal posé par un traitement massif de données est celui d'une atteinte tout aussi massive à la vie privée des citoyens. Les promoteurs de ces lois utilisent un double argument pour rassurer les populations : dans un premier temps ne seraient collectées « que » des métadonnées (ou des « données de connexion ») et celles-ci seraient « anonymisées ». Or des données sont considérées comme anonymes s'il n'est pas techniquement

possible de retrouver les identités des personnes concernées.

On ne peut donc pas à la fois prétendre que des données sont anonymes et prévoir en cas de suspicion la levée de cet anonymat. Les données en question sont donc

des personnes et, si leur état civil n'est pas dévoilé dans un premier temps, il pourra l'être ensuite.

Revenons aux données de connexion. L'adresse de la page web à laquelle un internaute souhaite accéder est une donnée de connexion qui fournit souvent autant d'informations que la page elle-même. De manière générale, il est bien connu des spécialistes que les données de connexion sont parfois plus intrusives que les données elles-mêmes. Par exemple, le fait de savoir qu'un appel téléphonique est destiné à un cardiologue ou au bureau des alcooliques anonymes apporte plus d'informations que la conversation en soi, qui peut se réduire à une simple prise de rendez-vous. Autre illustration, l'analyse des données de géolocalisation des taxis new-yorkais a montré qu'elles pouvaient être utilisées pour inférer la religion de

certains chauffeurs.

Ce n'est pas vraiment rassurant, mais est-ce efficace ? Pour cette question, un autre mot-clef apparaît de manière récurrente dans les débats, comme un remède magique : l'*algorithme* censé analyser les fameuses données de connexion pour en extraire inexorablement la liste des suspects. Il est vrai que des techniques d'apprentissage ou de classification automatique se révèlent très utiles et efficaces

Le paradoxe des faux positifs
démontre que l'on risque d'identifier des centaines de milliers de « faux terroristes »

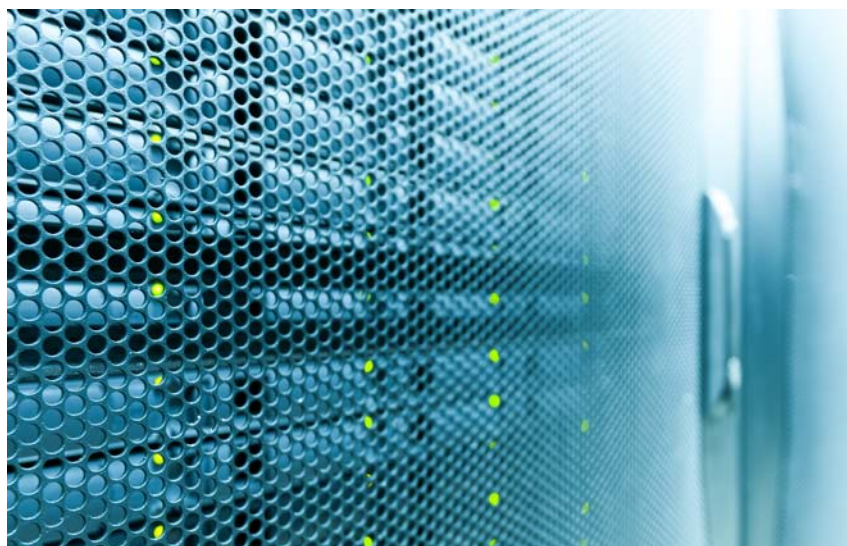
au mieux « pseudonymisées », ce qui implique, comme l'a rappelé la CNIL, qu'elles restent couvertes par la loi Informatique et Libertés. L'usage du mot « anonyme » est en l'espèce un contresens : l'objet est bien de collecter des informations liées à

dans certains scénarios, notamment dans les systèmes de recommandation ou de personnalisation à des fins commerciales. Amazon les utilise avec succès pour recommander des livres et Google pour envoyer des publicités ciblées.

Toutefois, ces algorithmes reposent sur des modèles (profils suspects dans le cas du renseignement) imparfaits qui, par conséquent, introduisent des erreurs, qu'on appelle généralement faux négatifs et faux positifs. Le « paradoxe des faux positifs », bien connu des mathématiciens, démontre que le nombre de faux positifs est considérable lorsque l'événement à identifier est rare, ce qui est le cas ici. Il faudra donc consacrer des ressources considérables pour identifier et étudier ces nombreux faux positifs qui, pour une population de 60 millions d'habitants, pourraient se chiffrer à 600 000 personnes avec un algorithme fiable à 99 % !

En d'autres termes, en faisant l'hypothèse énoncée par le gouvernement que 3 000 personnes mériteraient d'être surveillées, la probabilité qu'une personne identifiée par le système soit vraiment un terroriste serait alors de 0,5 %, ce qui est négligeable. Les ressources étant limitées, il serait plus rationnel et responsable de les concentrer sur des systèmes de surveillance ciblée plus efficaces, faute de quoi notre sécurité risque en réalité d'en pâtir. N'oublions pas que les frères Kouachi, à l'origine des actes terroristes de janvier dernier en France, étaient connus des services de renseignement : ce n'est donc pas un traitement massif de données qui aurait permis d'éviter ces drames, mais plutôt une meilleure exploitation des informations disponibles.

Une posture rationnelle reposant sur l'examen des risques et des bénéfices conduirait vraisemblablement à abandonner toutes les mesures de collecte de données non ciblées. Mais se concentrer sur des mesures ciblées ne dispenserait pas de prévoir des solutions pour en minimiser les risques. Ces solutions devraient être juridiques et organisationnelles, avec notamment des prérogatives de contrôle et des moyens significatifs pour une commission



© Shutterstock.com/Konsistent Yous

LES MÉTADONNÉES OU DONNÉES DE CONNEXION SONT BIEN PLUS BAVARDES qu'elles n'en ont l'air : savoir qu'un appel téléphonique est destiné à un cardiologue ou au bureau des alcooliques anonymes est parfois plus parlant que la conversation elle-même, qui peut se résumer à une simple prise de rendez-vous.

LES AUTEURS



Claude CASTELLUCCIA et Daniel LE MÉTAYER sont directeurs de recherche à l'institut Inria.

BIBLIOGRAPHIE

A. Berlee, Using NYC taxi data to identify muslim taxi drivers, billet de blog, janvier 2015. <http://bit.ly/1I9p50x>

J. Parra-Arnau et C. Castelluccia, Dataveillance and the false-positive paradox, prépublication, mai 2015 : <https://hal.inria.fr/hal-01157921>

J. Mueller et M. G. Stewart, Responsible counterterrorism policy, Cato Institute, Policy Analysis n° 755, septembre 2014. <http://bit.ly/1BHC8lq>

véritablement dotée de solides compétences en informatique, comme devrait l'être en France la future Commission nationale de contrôle des techniques de renseignement (CNCTR). Ce n'est pas le cas aujourd'hui, puisque la commission comporterait un seul expert. Les solutions devraient également inclure un volet technique, notamment pour assurer que les données collectées soient authentiques et intègres, ne puissent être accessibles qu'aux agents habilités et authentifiés, pour des finalités bien définies et avec une traçabilité fiable des autorisations.

Sans ces garanties techniques, tout contrôle risque de se révéler illusoire, ce qui n'est pas acceptable vu les enjeux en matière de droits individuels. En effet, le seul garde-fou possible en matière de traitement des données personnelles est l'instauration d'une véritable « responsabilité », dans le sens de l'*accountability* des Anglo-Saxons, le devoir de rendre des comptes, condition *sine qua non* de la confiance et contrepartie nécessaire de tout pouvoir. ■



Réagissez au Point de vue sur www.pourlascience.fr

ENTRETIEN

« Le problème du gluten est un symptôme de nos mauvaises pratiques alimentaires »

La vague du « sans gluten » est-elle un simple effet de mode ? Pas seulement. Les maladies liées au gluten sont en augmentation et témoignent des dérives de notre alimentation, explique Christian Rémésy.



Christian RÉMÉS Y est nutritionniste et ex-directeur de recherche à l'Institut national de recherche agronomique.

Les restaurants, les épiceries et les rayons de supermarché estampillés « sans gluten » se multiplient. Le gluten serait à l'origine de nombreux maux. Qu'en est-il ? Le décryptage de Christian Rémésy, nutritionniste et chercheur à l'Inra, auteur notamment de *L'Alimentation durable* (Odile Jacob, 2010).

gluten du blé, du seigle et de l'orge, même si on mange peu de cette dernière aujourd'hui. Le cas de l'avoine n'est pas tranché.

PLS
L'essor du « sans gluten » est si important qu'il paraît disproportionné. Est-ce un effet de mode ou un réel problème de santé ?

indiquait que 30% des Américains voulaient adopter un régime sans gluten. Toutefois, d'après Alessio Fasano, directeur du Centre de recherche sur la maladie cœliaque de l'Université du Maryland, seuls 5 à 6 % de ces personnes seraient vraiment hypersensibles. Mais comment les distinguer de ceux qui s'en sont juste persuadées ?

POUR LA SCIENCE
Qu'est-ce que le gluten, au juste ?

CHRISTIAN RÉMÉS Y : Le terme de gluten, souvent utilisé comme fourre-tout, désigne pourtant une chose précise : la matrice de protéines qui renferme des granules d'amidon dans les tissus des réserves nutritives des céréales.

Le gluten est constitué de plusieurs types de protéines, des prolamines pour la plupart. Il y a autant de types de gluten que d'espèces et de variétés de céréales. Ainsi, les prolamines du blé sont des gliadines et des gluténines, celles du seigle sont des sécilines, celles de l'orge des hordénines, etc. Les propriétés physiques des différents types de gluten (la viscoélasticité, par exemple) et leur digestibilité par les enzymes du corps humain sont variables. Une personne souffrant de la maladie cœliaque doit éviter le

C. R. : L'effet de mode est sans doute supérieur aux facteurs physiopathologiques. Une grande part de la population souffre à cause de mauvaises habitudes alimentaires et de produits de piètre qualité nutritive. Ces gens cherchent un coupable et, pour certains, le trouvent dans le gluten. Il n'est même pas sûr qu'un régime sans gluten ait un impact significatif sur leur santé.

Cependant, ce constat ne doit pas faire oublier que deux problèmes de santé bien réels sont liés au gluten : la maladie cœliaque, que l'on sait dépister, et l'hypersensibilité, dont la prise en charge est aujourd'hui difficile : nous n'en connaissons pas vraiment les mécanismes et nous ne savons pas la diagnostiquer.

On estime que la maladie cœliaque touche 0,5 à 1 % de la population occidentale. Ce chiffre est important et augmente régulièrement, en partie parce que le diagnostic est de plus en plus performant. Pour l'hypersensibilité, un sondage de 2009

PLS
Comment l'ingestion de gluten influe-t-elle sur la santé ?

C. R. : D'abord, une hypersensibilité est le signe d'un problème de digestion des molécules du gluten. Une hypothèse communément admise est que cette condition est liée à une perméabilité insuffisante de la paroi de l'intestin grêle. Cette dernière est constituée de villosités et de microvillosités – des replis de la muqueuse et du tissu conjonctif –, qui sont équipées d'enzymes qui terminent la digestion pancréatique et qui augmentent la surface d'absorption des nutriments. L'eau et les nutriments passent entre les cellules des villosités ou à travers leur membrane. Si la paroi est imperméable aux bactéries et aux molécules mal digérées, il n'y a pas de problème. En revanche, si des molécules étrangères traversent la paroi, il peut y avoir une réaction immunitaire du système,

une inflammation. On pense que dans le cas de l'hypersensibilité, les enzymes du pancréas puis celles de l'intestin grêle ne parviennent pas à digérer correctement les protéines du gluten, dont certains fragments traversent la paroi de l'intestin et déclenchent une inflammation. Mais nous n'en savons pas beaucoup plus.

PLS

Et pour la maladie cœliaque ?

C. R. : Le mécanisme est ici plus clair. Il s'agit d'une maladie auto-immune déclenchée par la gliadine du blé, principalement. Cette réaction entraîne une destruction des cellules des villosités de l'intestin grêle. Les symptômes sont des diarrhées et une difficulté à absorber les nutriments, ce qui se traduit par une fatigue, une déminéralisation des os, un amaigrissement, etc.

Cette maladie touche des personnes ayant une prédisposition génétique. Et il est possible de la diagnostiquer par un prélèvement sanguin pour détecter les anticorps antigliadines, suivi d'une biopsie pour confirmer l'atrophie des villosités. Cependant, le patient ne doit pas avoir entamé un régime sans gluten, sans quoi il sera impossible de distinguer la maladie cœliaque d'une hypersensibilité au gluten.

Actuellement, la seule solution est de suivre un régime strict sans gluten, parce qu'il n'existe pas encore de médicaments contre la maladie cœliaque. Ce régime est difficile à suivre, le gluten étant utilisé en grandes quantités par l'industrie agroalimentaire pour ses propriétés viscoélastiques. C'est pourquoi on en trouve dans

produits transformés, et aussi moins de produits végétaux à l'état naturel. L'industrialisation de l'alimentation a permis d'augmenter les rendements, mais a aussi entraîné une baisse de la qualité de la nourriture et un déséquilibre nutritionnel de l'offre. Cela a conduit, entre autres, à une épidémie d'obésité dans le monde et à une augmentation

des cas de diabète.

Les habitudes alimentaires modernes ont pu augmenter les problèmes de perméabilité intestinale

de nombreux produits dépourvus *a priori* de blé : les sauces, les glaces, le chocolat, la charcuterie...

PLS

L'homme mange du blé depuis près de 10 000 ans. Pourquoi le problème a-t-il pris de l'ampleur ces dernières années ?

C. R. : Le problème du gluten est un symptôme de nos mauvaises pratiques alimentaires. Notre alimentation a beaucoup changé ces dernières décennies. Nous mangeons plus de produits d'origine animale, plus de sucres, de graisses et de

En ce qui concerne le gluten, les habitudes alimentaires modernes ont pu modifier l'état de la paroi intestinale et diminuer son imperméabilité à des peptides issus du gluten, augmentant ainsi les risques

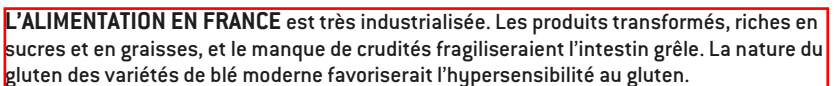
d'hypersensibilité au gluten. Une nourriture trop raffinée, trop riche en graisses et trop pauvre en fibres, fragilise en effet la paroi intestinale et risque de la rendre trop perméable.

PLS

Prenons un aliment typique à base de céréales : le pain. Qu'est-ce qui a changé dans la fabrication de ce produit ces dernières décennies ?

C. R. : Tout d'abord, les boulangers n'utilisent plus la même farine qu'avant. La filière blé-pain a





Par ailleurs, l'emploi de la levure s'est généralisé au XX^e siècle. Il est dommage que l'on ait abandonné le levain : il assure une fermentation à pH acide, ce qui active des enzymes dont l'effet est de scinder les molécules du gluten. Une bonne fermentation panaire conduit ainsi à une prédigestion du gluten. Aujourd'hui, il y a un certain retour au levain, mais les boulangers n'utilisent pas toutes ses potentialités. Ils incluent quand même de la levure et ne laissent pas assez de temps au levain pour agir. En outre, la fermentation est conduite à froid, ce qui ralentit la prédigestion du gluten par les enzymes.

PLS La population ne semble pas suffisamment informée. Comment les médecins généralistes conseillent-ils les gens ?

D'ailleurs, des personnes hypersensibles au gluten du blé, que la consommation de pain ou de biscuits rendrait malades, pourraient tout à fait manger des pâtes bouillies, car la cuisson à l'eau bouillante dénature les molécules du gluten et les rend ainsi beaucoup plus digestes.

PLS Que peut faire par exemple l'Anses, l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'aliment, pour informer le public ?

L'idée que la gestion de la santé passe en grande partie par une alimentation saine et équilibrée n'en est qu'à ses débuts. Le premier programme national nutrition-santé ne date que de 2001. Et il y a beaucoup de progrès à faire en matière de recommandations compréhensibles.

C. R. : Une frange trop importante de la population, mal informée, est victime des déséquilibres de l'offre alimentaire. L'impact sur la santé est important et très coûteux sur le plan humain ou sur celui des finances publiques. Il est urgent d'effectuer une transition vers une alimentation plus durable, plus efficace pour la gestion de la santé et la protection de l'environnement. Nous devons d'abord apprendre à manger mieux et plus équilibré en fonction de nos besoins : davantage de produits végétaux, moins de sucres, de graisses et de produits d'origine animale qui ont, par ailleurs, une empreinte écologique fortement négative.

Autre aspect de cette transition, il faut réformer l'industrie agroalimentaire pour donner la priorité à la qualité nutritive plutôt qu'à la productivité. Les questions autour du gluten illustrent particulièrement bien les limites des pratiques actuelles et soulignent la nécessité d'avoir une approche plus globale et d'engager une transition alimentaire raisonnée. ■

Source	Access	Article	DOI	2006-2007
--------	--------	---------	-----	-----------

OBSERVATOIRE DE PARIS

DIPLÔME D'UNIVERSITÉ

EN PRÉSENTIEL ET À DISTANCE

“EXPLORER ET COMPRENDRE L'UNIVERS”



Objectifs

L'Observatoire de Paris propose la préparation d'un diplôme d'Université permettant d'acquérir un panorama des connaissances actuelles et des recherches en cours en astronomie et en astrophysique auprès d'astronomes professionnels.

Publics concernés

Ces cours s'adressent à toutes les personnes passionnées d'astronomie et de niveau baccalauréat scientifique ou équivalent.

Les étudiants inscrits à l'université dans le cadre du LMD peuvent valider en ECTS sous réserve d'accord avec leur responsable pédagogique. Possibilité d'inscription dans le cadre de la formation permanente.

Contenu

Cette formation, de niveau L1-L2, peut être suivie en présentiel et à distance sous forme de cours le mardi soir de 17h à 20h à l'Observatoire de Paris ou de cours filmés en différé.

Un stage pratique de traitement de données a lieu en mars à l'Observatoire de Meudon.

Un stage facultatif de 4 nuits d'observation a lieu l'été à l'Observatoire de Haute-Provence.

Les sujets abordés sont les suivants :

- ▶ Mécanique céleste et astrométrie
- ▶ Histoire de l'astronomie
- ▶ Ondes et instruments
- ▶ Le soleil
- ▶ Planétologie comparée
- ▶ Traitement de données
- ▶ Étoiles et milieu interstellaire
- ▶ Galaxies
- ▶ Cosmologie
- ▶ Observations



Inscriptions

Dossiers à déposer avant le 15 septembre sur le site d'inscription en ligne : https://ufe.obspm.fr/candidatures_ufe

Renseignements

<http://duop.obspm.fr/-DU-Explorer-et-Comprendre-l-Univers->

contact.duecu@obspm.fr

Téléphone : 01.45.07.78.87

Le paradoxe du petit échantillon

par Nicolas Gauvrit, sur le blog *Raison et psychologie*

Il y a quelque temps, une étude apparemment sérieuse montrant les bienfaits du chocolat pour perdre du poids a été reprise par de nombreux médias dans le monde entier. Mais fin mai, rebondissement imprévu : l'auteur de l'étude avoue dans un billet que c'était un canular destiné à montrer à quel point il est facile de duper les médias généralistes.

L'auteur, « John Bohannon » (un pseudonyme), explique comment il a réalisé une véritable étude – très mal faite, mais à dessein –, qu'il a ensuite réussi à publier dans une revue scientifique « prédatrice ». Parmi les techniques permettant d'obtenir les résultats voulus (à savoir que le chocolat est bon pour votre régime), l'auteur

En statistique, on utilise un risque de première espèce en général fixé à 5 %. Cela signifie que lorsqu'il n'y a pas d'effet (par exemple, si le chocolat n'a pas d'effet sur le poids), il y a quand même une probabilité de 5 % d'observer par hasard un effet statistiquement significatif. Cette valeur de 5 % ne dépend pas de la taille de l'échantillon : on exigera que l'effet observé soit plus important (par exemple une différence de poids plus marquée entre les consommateurs de chocolat et les autres) si l'échantillon est plus petit, mais la probabilité de conclure à tort à un effet reste égale à 5 %.

Dans une étude qui vise à tester plusieurs effets, certains n'existent pas réellement, et donc quelle que soit la taille de

Imaginons que l'on teste 200 effets possibles, parmi lesquels 100 sont réels et 100 n'existent pas. Sur les 100 tests correspondant à des effets inexistantes, on conclura (à tort) qu'il y a un effet dans 5 cas, que les échantillons soient petits ou grands. Sur les 100 tests correspondant à des effets réels, on conclura (par exemple) à un effet dans 80 cas si les échantillons sont grands, mais dans 20 cas seulement si les échantillons sont petits.

Ainsi, le taux de faux positifs parmi les résultats positifs est plus élevé si les échantillons sont petits (5 cas sur 25, soit 20 %) que s'ils sont grands (5 cas sur 85, soit environ 6 %). Les assertions suivantes sont toutes deux vraies : le taux de faux positifs ne dépend pas de la taille des échantillons, mais le taux de faux positifs parmi les résultats positifs est plus grand si l'on prend de petits échantillons.

Si toutes les études étaient publiées, il n'y aurait pas plus de faux positifs parmi celles fondées sur de petits échantillons – à condition de tenir également compte des études qui ne montrent pas d'effet. Mais dans le monde réel, où l'on publie de préférence des résultats positifs (le fameux biais de publication), il y a probablement plus de faux positifs parmi les études portant sur de petits échantillons. ■



Selon une idée répandue, un petit échantillon statistique augmente le risque de faire apparaître des effets qui n'existent pas réellement. C'est pourtant faux.

a calculé un grand nombre d'indices, tels que le taux de cholestérol, le poids, la qualité du sommeil, etc. C'est une procédure trompeuse efficace, car chaque nouvelle mesure augmente la probabilité d'avoir au moins un faux positif, c'est-à-dire de conclure qu'il y a un effet alors qu'il n'y en a pas.

John Bohannon ajoute cependant ceci : « Même si nous avions fait attention à ne pas multiplier les tests, notre étude était condamnée par le petit nombre de sujets, qui amplifie l'effet des facteurs non contrôlés. » En d'autres termes, en choisissant un petit échantillon, on augmenterait la probabilité d'avoir un faux positif. Or c'est faux. C'est ce que j'ai appelé le sophisme du petit échantillon.

En réalité, le taux de faux positifs ne change pas avec la taille des échantillons.

l'échantillon, on doit s'attendre à 5 % de faux positifs. Quant aux effets qui existent réellement, il est par définition impossible d'avoir un « faux positif ». Ainsi, le nombre de faux positifs ne dépend pas de la taille des échantillons, et l'argument avancé par John Bohannon est faux.

Il y a néanmoins des raisons de se méfier des résultats fondés sur de petits échantillons. Si la taille des échantillons n'a aucun impact sur la probabilité d'observer un faux positif, elle joue en revanche sur la probabilité de détecter un effet réel. Avec des petits échantillons, il est impossible de détecter des effets faibles (des petites différences). C'est pourquoi on utilise souvent en génétique des échantillons gigantesques : autrement, les effets étant très petits, on ne trouverait rien.



Nicolas GAUVRIT est maître de conférences en mathématiques à l'Université d'Artois et psychologue du développement. Il est l'auteur du blog

Raison et psychologie
(www.scilogs.fr/raisonetpsychologie/).



Retrouvez tous nos blogueurs sur www.scilogs.fr et suivez-les sur les réseaux sociaux.

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 - 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

HOMO SAPIENS INFORMATICUS chronique de Gilles Dowek

Écrire et se repentir

Parce qu'elle rend très faciles les modifications, l'écriture au moyen d'un traitement de texte exige des savoir-faire différents de l'écriture à la main.



Quand, à une époque reculée du XX^e siècle, j'ai commencé à utiliser un logiciel de traitement de texte, j'ai appris que, pour écrire un mot en italique, il fallait d'abord changer de mode, en cliquant sur le bouton « italique », puis taper le mot en question et revenir ensuite au mode initial, en cliquant sur ce bouton à nouveau.

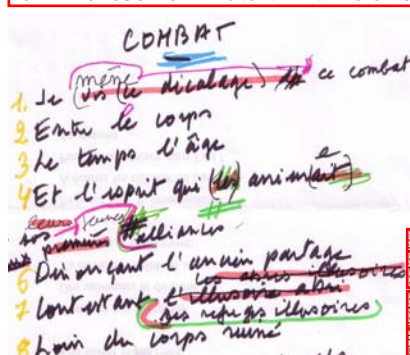
Je crois cependant que, par la suite, je n'ai jamais procédé ainsi : comme tout le monde, pour écrire un mot en italique, je l'écris d'abord en romain, je le sélectionne, puis je clique sur le bouton « italique » pour en changer la fonte. Cette possibilité de repentir, de modification *a posteriori*, distingue la peinture de la sculpture, la composition musicale de l'improvisation et l'écriture au traitement de texte de l'écriture à la main.

L'ancienne méthode – changer de mode –, qui existe encore dans la plupart des logiciels de traitement de texte, est un vestige de l'époque où le repentir était impossible, où pour écrire un mot en rouge plutôt qu'en noir, il fallait changer de stylo avant d'écrire ce mot, et non après.

L'écriture à la main était générative. Elle exigeait des savoir-faire permettant de produire un texte parfait dès le premier jet ou, au moins, de limiter le nombre de brouillons. Pour cela, le plus important était de savoir faire un plan, c'est-à-dire organiser assez précisément un texte qui n'avait encore aucune matérialité. Il fallait aussi faire coïncider la temporalité de l'écriture avec celle du texte ; par exemple, écrire d'abord

l'introduction parce qu'elle venait en premier. Enfin, il fallait une certaine habileté pour, par exemple, repérer les répétitions avant qu'elles ne se produisent et les éviter en choisissant un synonyme avant qu'il ne soit trop tard.

L'écriture au traitement de texte est générative et transformationnelle. Et elle demande des savoir-faire tout à fait différents.



LE MANUSCRIT du poème « Combat », d'Andrée Chédid. Sans ordinateur, modifier un texte est laborieux...

Plus que savoir construire un plan parfait d'emblée, il est utile de savoir restructurer un texte après que l'on a décidé d'en changer le plan. Si l'on décide par exemple de permuter deux parties, il faut souvent repenser les transitions et se mettre dans la peau d'un lecteur qui lit en premier ce que l'on a écrit en second. Si l'on décide de fusionner deux parties, finalement redondantes, il faut savoir retrouver les idées de chacune, leur donner une structure commune et réordonner le texte.

Le travail de la phrase est aussi modifié : il n'est plus nécessaire de savoir placer

d'emblée un adverbe, mais il faut percevoir quand il contrarie le rythme du texte et le déplacer. De même, il n'est plus nécessaire d'écrire directement dans le bon niveau de langue, mais il faut savoir modifier son langage *a posteriori* en remplaçant une locution familière par une autre plus soutenue, ou en transformant une proposition subordonnée en une phrase indépendante.

Plus intéressant, il faut savoir changer la perspective d'un texte. Alors que, afin de discuter une question spécifique, on était parti pour raconter une anecdote, on décide, le texte se développant, d'élargir son propos et de fondre cette anecdote dans une épopée. Il faut alors savoir reprendre son récit (ou son argumentation), pour le résumer et le mettre en relation avec le reste du propos.

En apprenant aux écoliers à rédiger, on devrait peut-être leur enseigner que, quand ils écrivent au traitement de texte, comme quand ils écrivent un programme, le plan du texte, son registre, sa perspective... n'ont pas besoin d'être décidés *a priori*, puis projetés sur la feuille comme sur le mur d'une caverne : ils émergent souvent d'un patient travail d'écriture et de repentir.

Cela rend l'écriture plus créative, car, comme disait Pablo Picasso, lui-même grand utilisateur du repentir : « Le tableau n'est pas pensé et fixé d'avance, pendant qu'on le fait il suit la mobilité de la pensée. » ■

Gilles DOWEK est chercheur à l'Inria et membre du conseil scientifique de la Société informatique de France.

Objets D'ici & D'ailleurs



Bijoux solaires



Météorites



Cadrams solaires



Montres solaires



 bijouxsolaires.com

La Clef des ÉTOILES

Boutique à Toulouse
& sur internet

laclefdesetoiles.com

Votre spécialiste du
matériel d'observation
astronomie & nature

La Clef des ÉTOILES - 3 rue Romiguières 31000 TOULOUSE - 05 61 22 58 55



CABINET DE CURIOSITÉS SOCIOLOGIQUES par **Gérald Bronner**

Les bonnes nouvelles sont ennuyeuses

Soumis à une rude concurrence, les médias traitent plutôt d'événements inhabituels, qui captent mieux notre attention.



On peste souvent contre nos journaux : ils sont déprimants et n'annonceraient que de mauvaises nouvelles. Pourquoi ne parle-t-on que des trains qui arrivent en retard et jamais de ceux qui arrivent à l'heure ? Cette question classique qui se pose dans toute école de journalisme trouve facilement une réponse : un train à l'heure est un événement beaucoup plus banal qu'un train en retard.

Nous avons tous connu les deux situations et, avant d'accuser la presse de déverser sans cesse un tonneau de nouvelles angoissantes, nous devrions nous demander laquelle de ces situations nous avons évoquée le plus souvent avec nos amis. Il est évident que nous serons beaucoup plus enclins à parler de l'événement « Mon train est arrivé en retard » que de celui où il fut ponctuel, tout simplement parce que nous pouvons éventuellement capter l'attention de nos congénères avec le premier, mais certainement pas avec le second.

Nous le savons intuitivement, mais il se trouve que plusieurs expériences, par exemple celles menées en 2005 par Laurent Itti et Pierre Baldi, deux chercheurs californiens en neurosciences et en informatique, ont montré que les individus sont plus attentifs, capables de mieux mémoriser et ressentent plus d'émotion lorsqu'ils sont confrontés à des événements présentant un écart entre leurs anticipations et leurs perceptions.

En d'autres termes, plus un événement échappe à nos attentes, plus nous lui accordons de l'intérêt.

Cela n'est pas surprenant, mais rappelle que la condition de survie des médias, qui connaissent une concurrence de plus en plus forte, est de faire en sorte de capter du temps d'attention de notre cerveau. Ils peuvent donc y parvenir plus facilement avec des informations qui seront traitées en dehors des routines mentales de notre esprit. C'est pourquoi le conflit, la violence,

Le conflit, la violence, la surprise ou le danger représentent une plus-value cognitive sur un marché hautement compétitif.

la surprise ou le danger seront d'excellents produits médiatiques : ils représenteront une plus-value cognitive sur un marché hautement compétitif.

Cela peut d'ailleurs avoir des effets rétroactifs sur notre perception des choses. L'Américain Paul Slovic, un spécialiste de la perception des risques, a fait remarquer que l'on a tendance à croire que les morts par inondation sont dix fois plus nombreux qu'ils ne le sont en réalité. À l'inverse, nous pensons que ceux qui succombent à une maladie cardiovasculaire sont dix fois plus rares qu'on ne peut les dénombrer par les statistiques de santé publique.

Là encore, il est évident que les morts du premier genre donnent lieu à un traitement médiatique plus intense que ceux du second genre. Dans ce domaine, ce qui est rare est rendu socialement visible, alors que ce qui paraît plus banal est moins évoqué. La boussole de notre jugement peut ainsi aisément s'égarer.

Peut-être que tout cela ne vous paraît pas convaincant. Peut-être restez-vous persuadé qu'un média annonçant uniquement de bonnes nouvelles rencontrerait le succès foudroyant d'un produit qui ferait du bien aux gens. Je ne voudrais pas paraître catégorique, car s'il est bien quelque chose de surprenant et d'imprévisible, c'est le cerveau humain lorsqu'il est socialisé.

En fait, l'expérience a déjà été tentée. Le quotidien russe *City Reporter* a décidé de consacrer son édition en ligne, et ce pendant toute une journée, aux bonnes nouvelles, du genre « La construction du passage sous-terrain sera bien achevée pour la fête de la Victoire ». La journée parut longue aux lecteurs, semble-t-il, puisque près de 70 % d'entre eux désertèrent le site. L'expérience fit long feu. Dès le lendemain, le quotidien revint à une économie de l'attention plus prudente et à son cortège d'informations angoissantes. Il est d'ailleurs étonnant que cette information soit passée plutôt inaperçue... car c'est une assez mauvaise nouvelle. ■

Gérald BRONNER est professeur de sociologie à l'Université Paris-Diderot.



LA MARCHÉ DES SCIENCES

DÉCOUVERTES, INVENTIONS, AVENTURES SAVANTES AU FIL DE L'HISTOIRE



AURÉLIE LUNEAU
CHAQUE JEUDI
14H - 15H

Écoute, réécoute, podcast
franceculture.fr



L'ère annoncée des méduses

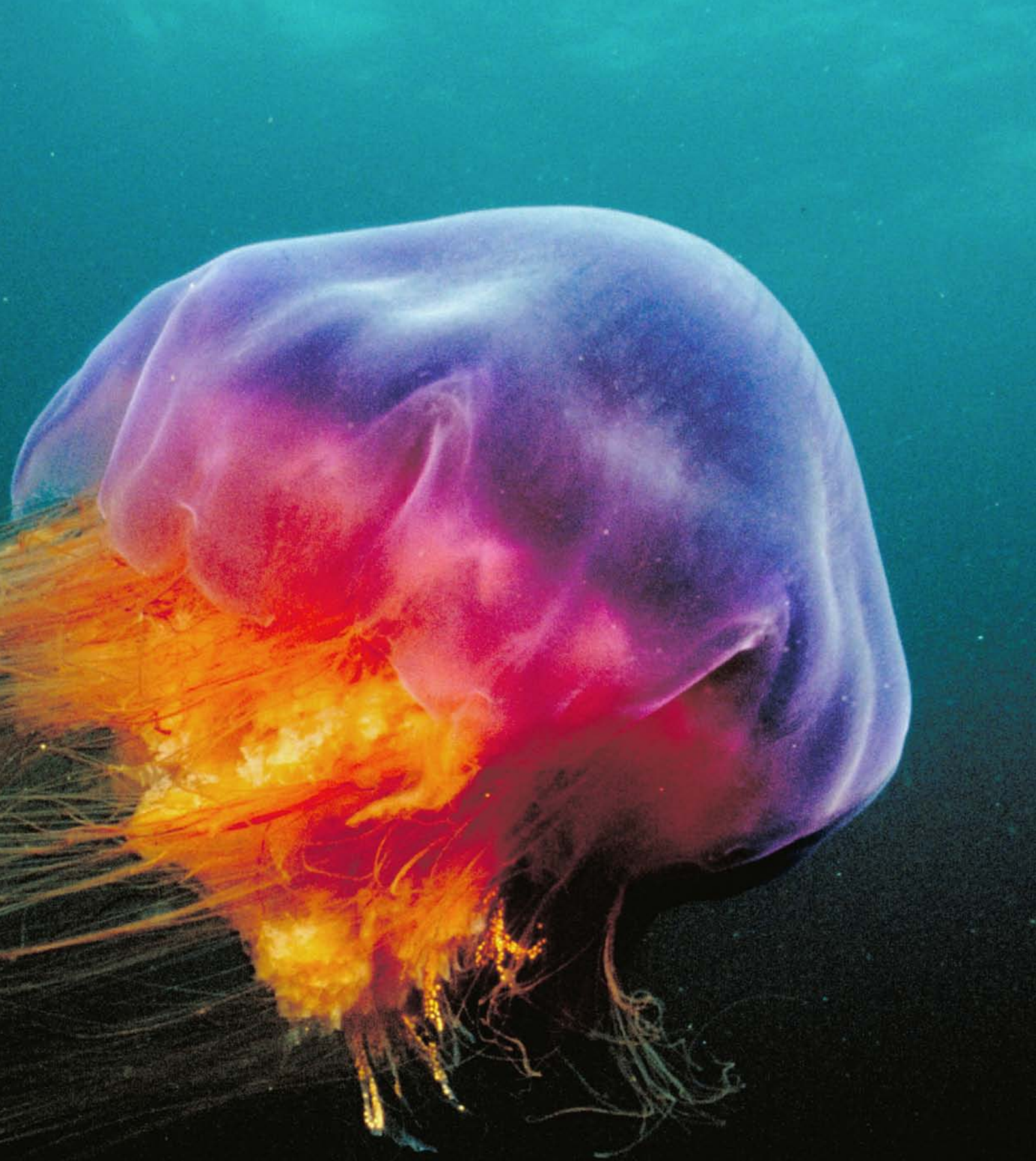
Corinne Bussi-Copin et Jacqueline Goy

Depuis quelques années, les méduses pullulent. Rien ne semble enrayer l'essor de ces animaux d'aspect pourtant si fragile et rudimentaire. Leur secret ? Une étonnante faculté d'adaptation... et le coup de pouce humain.

Personne ne l'a vu s'approcher. En quelques minutes, le banc de petits organismes gélatineux a coimaté les immenses filtres du circuit de refroidissement d'un réacteur de la centrale nucléaire de Gravelines, près de Dunkerque, provoquant son arrêt immédiat. Inutile de calculer le coût de revient d'une telle invasion, ni d'épiloguer sur le ridicule de la situation : la plus haute technologie humaine à la merci d'une boule de gélatine. C'était, il y a vingt ans, la première manifestation spectaculaire de la gélification des océans. Connu sous le doux nom de groseille des mers, le coupable, un animal marin carnivore et translucide de quelques centimètres, prolifère tant par endroits que la mer ressemble à... une gelée de groseilles décolorée. Mais les plus redoutés des contributeurs à la gélification des océans sont ses cousines, les méduses.

En quelques années, par leur pullulation, les méduses se sont imposées non pas comme sujet d'étude pour les chercheurs, mais comme une grave préoccupation des professionnels de la mer à cause des nuisances qu'elles provoquent. Ainsi, c'est un peu par la force des choses que les scientifiques se sont penchés sur le sujet, mais depuis, leur cri d'alarme est unanime : la conquête des océans par les méduses ne fait que commencer, et l'homme est leur plus précieux allié...

Les méduses sont des animaux très simples constitués de deux feuillets, l'ectoderme et l'endoderme, limitant une masse gélatineuse dans laquelle sont insérés leurs deux uniques organes : l'estomac et les gonades (voir l'encadré page 31). Cela résume assez bien la vie d'une méduse : manger pour se reproduire. Et jusqu'au début des années 2000, la prolifération des méduses *Pelagia noctiluca* sur les côtes méditerranéennes était tout aussi simple : cyclique et bien réglée. Depuis les premières pullulations décrites dans la région, en 1775, il y avait des années



CYANEA CAPILLATA doit son nom de genre à sa couleur bleue et son nom d'espèce à ses nombreux tentacules qui donnent l'image d'une belle chevelure. De plus d'un mètre de diamètre, c'est la « crinière du lion » du roman de Conan Doyle, si fréquente dans les mers arctiques.



PELAGIA NOCTILUCA est devenue le cauchemar des vacanciers en mer Méditerranée.

S. LUSTIG / OBSERVATOIRE OCÉANOLOGIQUE DE VILLEFRANCHE-SUR-MER

à méduses et des années sans méduses, selon une périodicité de 12 ans. Et cette périodicité était corrélée aux fluctuations climatiques, en particulier au recul des glaciers alpins. On avait même déduit de l'analyse des conditions climatiques que les années à *Pelagia* étaient toujours précédées de trois années chaudes peu pluvieuses. Mais en 12 ans, les méduses *P. noctiluca* ont brouillé les pistes.

Désormais, elles sont là tous les ans, été comme hiver, et il faudra apprendre à nager en slalomant entre ces masses de gelée et en évitant soigneusement leurs tentacules pour ne pas être piqué (c'est l'espèce la plus urticante de la Méditerranée). Comment ces animaux que tous les naturalistes des XVII^e et XVIII^e siècles surnommaient gelée de mer ou eau coagulée, ces organismes composés à 98 % d'eau – presque des gouttes d'eau dispersées dans la mer – ont-ils pu en 12 ans contrarier tous les modèles de fluctuations hydroclimatiques établis jusqu'alors et qui avaient fonctionné pendant deux siècles ?

Puisque, comme tous les animaux, les méduses mangent pour se reproduire, il est vraisemblable que l'étude de leur physiologie apportera des réponses. Que

L'ESSENTIEL

■ Depuis quelques années, les océans se gélifient : on y observe une augmentation spectaculaire des organismes gélatineux.

■ Les méduses sont les principaux contributeurs de cette gélification.

■ Surpêche, hausse de la température marine, pesticides, déchets... De multiples causes se dessinent.

■ Par leurs étonnantes facultés d'adaptation, des méduses profitent de ces conditions.

■ Et la vie de la plupart de ces organismes nous est encore inconnue...

POUR L'ESSENTIEL : S. LUSTIG / OBSERVATOIRE OCÉANOLOGIQUE DE VILLEFRANCHE-SUR-MER

mangent-elles et quand se reproduisent-elles ? C'est l'un des axes des programmes de l'Observatoire océanologique de Villefranche-sur-Mer animés par Gabriel Gorsky ou encore Fabien Lombard.

Manger ? Vivant en pleine eau, les méduses mangent du plancton et leur régime alimentaire est varié. Elles attrapent aussi bien les œufs de tous les organismes marins que des larves et des adultes de crustacés ou de mollusques, voire des alevins de poissons. En étirant au maximum leurs tentacules très élastiques, elles augmentent considérablement le volume d'eau prospecté. Et comme elles n'ont pas de satiété, elles sont capables d'avaler leur propre poids en nourriture en une journée. Elles exercent ainsi une prédation énorme sur le petit zooplancton (des animaux de quelques millimètres), mais aussi sur l'échelon supérieur des poissons. Par leur pullulation, elles deviennent le point central de l'écosystème pélagique marin en modifiant la composition du zooplancton et en diminuant l'ensemble de la production marine. Dès lors, on les considère comme l'un des acteurs principaux des changements de la biodiversité marine.

Se reproduire ? Dès que la température des eaux se réchauffe, au début du printemps, les méduses *P. noctiluca* mâles émettent dans l'eau des spermatozoïdes, lesquels fertilisent les femelles qui les avalent. Entre midi et 14 heures, les femelles pondent les œufs fécondés (de taille 0,3 millimètre, parmi les plus gros des méduses) et les évacuent par la bouche. Ces œufs éclosent, libérant une larve ciliée, la planula, dont la croissance aboutit en quelques jours à une petite méduse ou éphyrule. Chez cette espèce, il n'y a pas de stade fixé comme chez les autres méduses (voir l'encadré page 32).

La surpêche : une aubaine pour les méduses

Ainsi, l'équation est simple : manger pour se reproduire – et plus la nourriture est abondante, plus vite la maturité sexuelle est atteinte (*Pelagia* atteint sa maturité sexuelle en cinq mois en moyenne). En Méditerranée, *Pelagia* constitue presque un cas d'école : côté nourriture, la mer en regorge depuis que la surpêche a pratiquement éliminé les poissons, abandonnant ce qu'ils mangeaient aux espèces les plus opportunistes – les méduses. Quant à la

température, elle poursuit inexorablement son ascension grâce à l'effet de serre, rendant les hivers moins rigoureux et prolongeant l'été. Dans ces conditions favorables, les méduses *P. noctiluca* se reproduisent en masse et s'installent durablement.

La conjonction de ces deux phénomènes est l'une des explications les plus vraisemblables de la disparition de leur périodicité. On utilise d'ailleurs cette espèce comme témoin, une sorte de marqueur des changements profonds qui touchent l'écosystème pélagique de la Méditerranée.

Déjà en 1983, au congrès d'Athènes organisé par le Programme des Nations unies pour l'environnement, David Cargo, spécialiste américain des méduses, avait manifesté son intérêt pour les études sur celles de la Méditerranée, afin d'en transposer ensuite les résultats à d'autres mers. Cela est d'autant plus plausible que tous les océanographes s'accordent pour considérer la Méditerranée comme un modèle réduit d'océan et donc comme un modèle de production biologique. D'où l'intérêt des programmes qui se poursuivent depuis plus de 30 ans dans tous les laboratoires riverains.

Triste constat au large de la Namibie

De fait, la Méditerranée est loin d'être la seule zone concernée. Différents observateurs – touristes, pêcheurs, industriels – ont rapporté des scènes identiques de pullulation dans toutes les mers de la planète. L'inventaire des zones infestées fait ressortir une vingtaine d'espèces de méduses dont la prolifération est due à une même cause désormais bien identifiée et produisant les mêmes déséquilibres : la surpêche. Des zones entières sont devenues de grands déserts marins où se côtoient des populations de méduses qui paraissent définitivement installées et une faune appauvrie survivant à leurs agressions.

Le cas le plus spectaculaire est celui des eaux territoriales de la Namibie, sur la côte sud-occidentale de l'Afrique, eaux réputées il y a 60 ans encore pour leur exceptionnelle richesse en poissons frétillant dans le courant du Benguela. Ce courant froid océanique qui longe la côte depuis l'Afrique du Sud jusqu'à la zone équatoriale produit une remontée des eaux profondes riches en nutriments, favorisant la productivité du plancton et de l'ensemble de l'écosystème. Au large de la Namibie, la mer regorgeait de petits

UN CHASSEUR REDOUTABLE

L'apparente fragilité des méduses cache une remarquable efficacité pour se nourrir. Le corps de ces animaux s'organise en parapluie à partir de l'ombrelle, constituée d'une masse gélatineuse, la mésogée, délimitée par deux feuillets, l'ectoderme et l'endoderme.

Au centre de l'ombrelle pend le manubrium, renfermant l'œsophage, qui relie la bouche à l'estomac et qui contient aussi les gonades chez certaines espèces. L'ombrelle est bordée de filaments – les tentacules –, parfois regroupés en faisceaux.

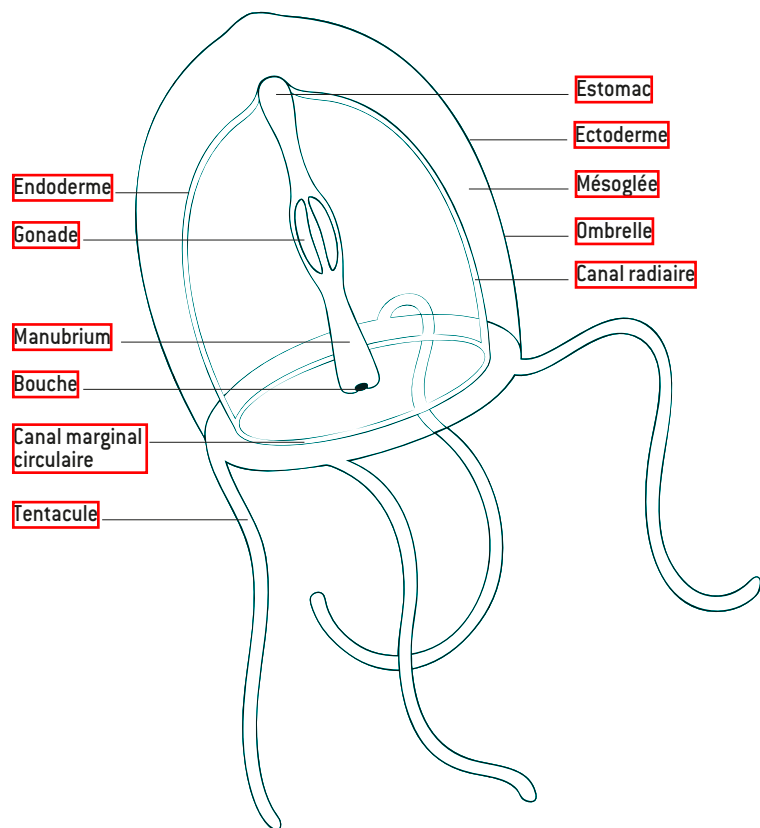
Pour se nourrir, les méduses utilisent une arme originale : les cnidocytes, des cellules urticantes contenant un micro-harpon venimeux, dont sont couverts leurs tentacules (chez certaines méduses, ces cellules tapissent tout le

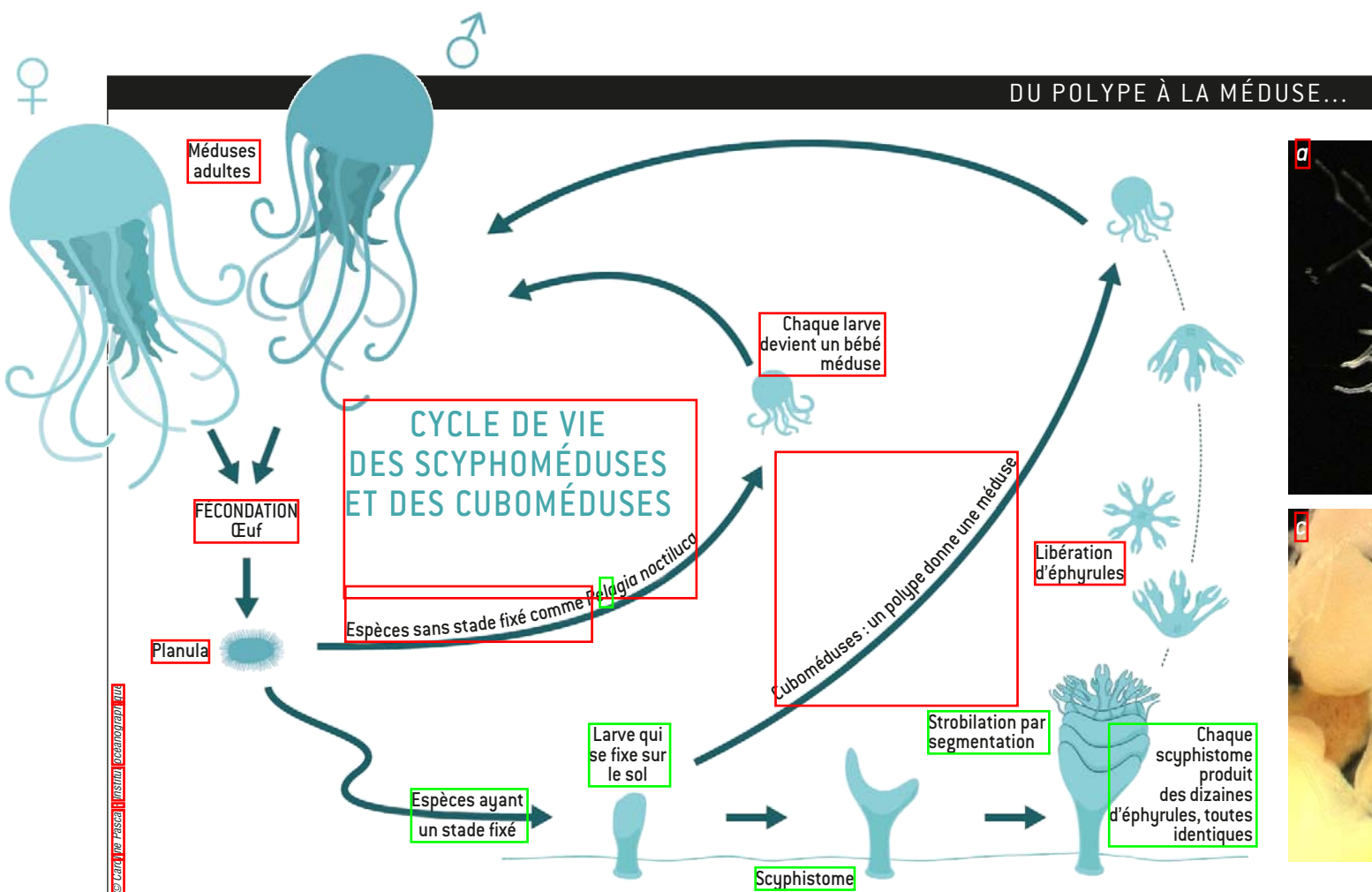
corps). Lorsqu'un minuscule cil associé au harpon détecte le contact avec une proie, le harpon, jusqu'alors replié, se détend, pénètre dans la proie et injecte le venin. Le tentacule ramène alors la proie paralysée à la bouche, qui l'engloutit. Entourée de lèvres parfois si allongées qu'elles forment des bras, la bouche rejette aussi les déchets.

L'estomac est prolongé par des canaux radiaires qui rayonnent comme les baleines d'un parapluie et aboutissent à un canal marginal circulaire, lequel

nourrit tout l'organisme. Restés attachés à la proie, les cnidocytes sont immédiatement remplacés par d'autres cellules de même nature. Celles-ci se forment à la base des tentacules, zone d'activité intense de différenciation de cellules souches, puis migrent le long du tentacule jusqu'à la zone concernée.

Les méduses réservent bien d'autres surprises. Elles respirent par la peau. Elles disposent de minuscules organes de l'équilibre, les statocystes, répartis au bord de l'ombrelle, de même que des ébauches d'yeux reliées à des cellules nerveuses. Elles ont aussi la capacité d'émettre de la lumière : leur gène de bioluminescence est devenu un outil classique en biologie.





poissons (sardines, anchois) qui attiraient les grands prédateurs – poissons (merlus, thons, mérus), oiseaux marins et otaries.

La pêche s'est intensifiée. Les grosses proies se raréfiant, les pêcheurs se sont rabattus sur les sardines et les anchois. À partir des années 1960, de multiples chalutiers ont déversé leur trésor de poissons dans des navires-usines, poissons aussitôt transformés en farine. Depuis 15 ans, l'effondrement des stocks de sardines et d'anchois a entraîné un changement total de la production biologique dans les eaux namibiennes. Les oiseaux de mer et les mammifères marins sont en régression, et le gobie, le seul prédateur encore en lice, est en voie de disparition. Les méduses, qui jusqu'alors luttèrent pour une petite part du territoire, ont profité à la fois de la raréfaction de leurs prédateurs – notamment les thons et les tortues – et de celle de leurs compétiteurs directs pour le zooplancton : les anchois.

En particulier, deux méduses de grande taille quasiment absentes de cette région dans les années 1950, *Aequorea forskalea* et

LES AUTEURS



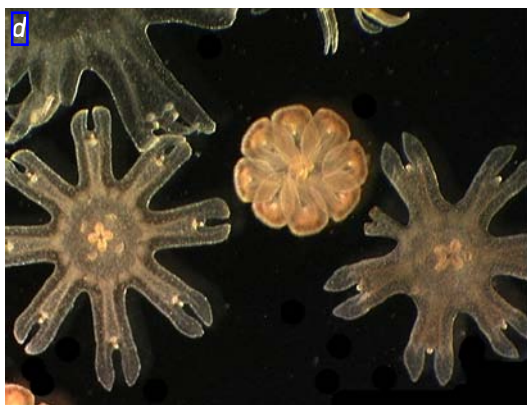
Corinne BUSSI-COPIN est océanographe, chargée de mission pour la politique des océans à l'Institut océanographique, Fondation Albert I^{er}, Prince de Monaco.

Jacqueline GOY est attachée scientifique de l'Institut océanographique. Elle a consacré sa carrière au sein du Muséum national d'histoire naturelle à l'étude des méduses.

Chrysaora hysoscella, se sont mises à pulluler et à supplanter les poissons, au grand dam des habitants, privés de leurs plats traditionnels à base de poissons. La biomasse des méduses dans les eaux namibiennes est aujourd'hui estimée à trois fois celle des poissons ! Par comparaison, et pour conforter ces observations, l'Afrique du Sud, voisine de la Namibie, qui a établi des conditions rigoureuses de pêche dans ses eaux, ne connaît pas d'anomalies aussi spectaculaires dans son environnement marin.

D'autres zones sont touchées. En mer de Chine, la baie de Liaodong, dont Jing Dong, de l'Institut de recherche des pêcheries marines de Liaodong, et ses collaborateurs étudient la rentabilité de la pêche commerciale depuis 1984, est devenue un immense plan d'eau réservé à l'élevage d'une méduse comestible, *Rhopilema esculenta*. Cette espèce est la seule qui résiste à la dégradation du milieu due à la pêche excessive et aux polluants chimiques.

La baie de Chesapeake, sur la côte orientale des États-Unis, a elle aussi subi une



L'originalité des méduses, et certainement leur plus grand atout, est d'avoir, pour la plupart, un cycle de vie comportant un stade plus discret – le polype. La différence entre les stades polype (fixé à un support) et méduse (libre) est telle qu'on les a longtemps pris pour deux espèces différentes.

Les méduses se reproduisent en pleine eau de façon sexuée : des mâles produisent des spermatozoïdes, et des femelles, des ovules. En général, les cellules reproductrices sont évacuées dans la mer, où a lieu la fécondation. L'œuf évolue en quelques heures en une larve ciliée, la planula, qui tombe sur le fond, s'y fixe et devient un polype. Chez les espèces de la classe des *Scyphozoa* telle *Aurelia aurita* (a-d) et chez les cuboméduses, notamment, le polype, nommé scyphistome, bourgeonne ou reste solitaire (a). Sous de bonnes conditions de température et de nourriture, des sillons se forment dans sa partie supérieure (b, c).

Chaque segment ainsi produit se détache en éphyrule qui se développe en pleine eau (d) pour donner une méduse sexuée. Un polype en produit ainsi des dizaines. Certaines espèces de *Scyphozoa* n'ont cependant pas de stade fixé, comme *Pelagia noctiluca*.

agression, d'abord à cause de l'augmentation de la population humaine sur ses rives, puis de la pêche et enfin de la récolte des huîtres, laissant cette baie envahie par la pollution. Une autre méduse *Chrysaora*, l'espèce *C. quinquecirrha*, a exercé une prédation telle que l'écosystème est aujourd'hui fortement modifié : d'abondantes espèces gélatineuses, sans aucun intérêt commercial, se succèdent tout au long de l'année.

Et les exemples s'accumulent : *P. noctiluca* s'attaquant aux fermes de saumons dans le nord de l'Écosse, attirée par l'abondance de nourriture ; *Aurelia aurita* bouchant les filtres des tuyaux de refroidissement des centrales nucléaires installées dans les fjords de Suède ou immobilisant un porte-avion américain dans le port de Brisbane... Les mêmes causes – nourriture abondante du fait de la surpêche et température anormalement élevée – ont produit les mêmes effets : une déviation de la production des océans vers le maillon gélatineux.

Toutefois, les pêcheurs ne sont pas entièrement responsables de cette dégradation

du milieu marin. Ils sont allés pêcher dans les zones qu'on leur avait indiquées. Grâce à l'*Atlas des ressources biologiques des mers* publié en 1972 par l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture, ils avaient à leur disposition une cartographie précise de la répartition des espèces commerciales appartenant à tous les groupes depuis le phytoplancton, le zooplancton, les mollusques, les crustacés jusqu'aux principales espèces de poissons et de mammifères marins.

À qui profite le krill... et surtout son déclin ?

Cet atlas a été établi grâce aux relevés des instituts des pêches du monde entier et il a fait la fierté des statisticiens qui, hélas, n'avaient pas prévu la moindre mise en garde sur la fragilité de ces stocks. En 30 ans, cette manne a été dilapidée et la pêche minotière s'attaque désormais à d'autres groupes que les poissons, en particulier au krill. Or, ces petites crevettes des eaux froides – les

Euphausiacés (*Meganyctiphanes norvegica* dans les eaux boréales et *Euphausia superba* dans les eaux australes) – sont des espèces indispensables à la vie de nombreux animaux : mammifères marins (notamment la baleine, qui en mange plusieurs tonnes par jour), oiseaux de mer, poissons, calmars...

De plus, l'absence de krill, grand consommateur de phytoplancton, permet à d'autres animaux pélagiques phytophages et à fort taux de croissance et de multiplication de pulluler, en particulier les salpes, des animaux coloniaux gélatineux dont les chaînes dépassent parfois cinq à six mètres de longueur. Ces animaux contribuent à la gélification des océans au même titre que les méduses. Et comme ils renferment 90 % d'eau, ils n'offrent aucun avantage alimentaire aux prédateurs supérieurs. Ils ont un autre inconvénient, majeur pour les baleines : ils colmatent les fanons, empêchant alors la filtration du plancton nourricier.

Mais la pêche n'est pas la seule attaque que subit le krill. Les stocks de krill s'effondrent aussi par un autre mécanisme

QUI SONT LES MÉDUSES ?

Tout ce qui flotte en mer n'est pas méduse ! Le plancton gélatineux - l'ensemble des organismes gélatineux qui flottent en pleine eau, entraînés par les courants - compte ainsi nombre d'autres organismes si divers qu'il est impossible de représenter leur classification.

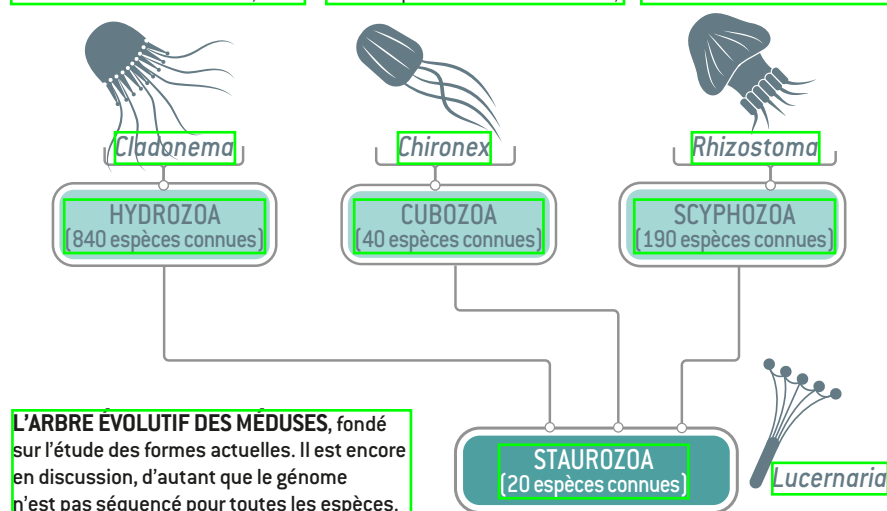
Il comporte les siphonophores - telle la physalie -, souvent pris pour des méduses parce qu'ils présentent aussi des cellules urticantes ; les cténaires, telle la groseille de mer, dont les deux tentacules portent des cellules adhésives et non urticantes ; les

thaliacés, telles les salpes, animaux coloniaux non urticants qui se nourrissent en filtrant le phytoplancton ; sans oublier les œufs des poissons.

A elles seules, les méduses ont des caractéristiques si variées que même à leur échelle,

la classification est un casse-tête. On en compte plus de 1000 espèces, peu connues pour la plupart. On distingue tout de même quatre grands groupes. Les Scyphozoa ou « méduses vraies », dont on connaît 190 espèces, sont très variées : de quelques millimètres à deux mètres de diamètre, rondes, carrées, plates ou en dôme, lisses ou lobées, avec ou presque sans tentacules, avec des bras oraux lisses ou en chou-fleur. Comme

les Scyphozoa, la plupart des Hydrozoa ont un stade fixé (polype) et un stade libre (méduse). On en dénombre 840 espèces, dont seulement 20 % ont un cycle de vie connu. Les Cubozoa, qui tirent leur nom de leur forme cubique, comptent 40 espèces. Enfin, les Staurozoa - 20 espèces - n'ont pas de stade libre. L'une d'elles, la très rare *Lipkea ruspoliana*, serait aux méduses ce que le coelacanth est aux vertébrés : un lointain ancêtre commun...



© Broadwell / iStockphoto.com

plus complexe, faisant intervenir plusieurs niveaux du réseau trophique pélagique (l'ensemble des chaînes alimentaires de la mer). L'usage des pesticides dans l'agriculture intensive a un impact sur les organismes marins lorsque, par lessivage, ces produits toxiques se déversent en mer. Destinés à bloquer la mue des insectes, ils bloquent celle des crustacés, qui sont aussi des arthropodes, et ceux-ci n'atteignent plus le stade adulte. C'est ce qu'ont montré notamment Rabin Sen Gupta, de l'Institut océanographique indien, à Dona Paula, et ses collègues en 1996. Des pans entiers de la biologie marine sont touchés, notamment le krill, ce qui favorise encore la prolifération des salpes et d'autres organismes gélatineux phytophages.

Et comme si ce scénario catastrophe ne suffisait pas, il faut encore lui ajouter l'effet indirect des résidus médicamenteux sur la gélification des océans. Les hormones de substitution sont ingérées en concentration

BIBLIOGRAPHIE

R. Calcagno et J. Goy, *Méduses. À la conquête des océans*, Éditions du Rocher, 2014.

K. A. Pitt et C. H. Lucas (éd.), *Jellyfish Blooms*, Springer, 2014.

Ph. Cury et D. Pauly, *Mange tes méduses !*, Odile Jacob, 2013.

L.-A. Gershwin, *Stung !*, Univ. of Chicago Press, 2013.

J.-Cl. Braconnot, *Les salpes, reines du plancton marin*, *Pour la Science*, n° 419, pp. 36-43, 2012.

Ph. Cury et Y. Miserey, *Une mer sans poissons*, Calmann-Lévy, 2008.

telles que les excès sont rejetés dans les urines et ne sont pas retenus par les stations d'épuration, non équipées pour filtrer ces molécules. Arrivés en mer, ces hormones et d'autres perturbateurs endocriniens ont le même effet sur les organismes marins que sur le corps humain : blocage de la reproduction sexuée et féminisation. Toutefois, ces produits épargnent les espèces qui, comme les salpes et les méduses, ont une autre reproduction que la seule sexualité - une reproduction asexuée par bourgeonnement. Cette explication de la gélification des océans est très probable à cause du rendement de ce mécanisme de multiplication, mais doit encore être confirmée.

Le cycle de vie des méduses préoccupe d'ailleurs particulièrement les biologistes. Contrairement aux salpes, qui effectuent tout leur cycle de vie en pleine eau, la plupart des méduses ont un stade fixé à un support, le polype. Ce stade correspond à la forme de

résistance des méduses et il reste ainsi tant que la température de l'eau n'augmente pas. Il est difficile de localiser les polypes à cause de leur petite taille. Or ils sont à l'origine des pullulations de méduses : lorsque la température de l'eau est suffisamment élevée, ils bourgeonnent abondamment.

En général, l'œuf des méduses évolue en larve qui se fixe et se transforme en polype. Deux types de bourgeons se forment : les uns, identiques au polype, restent reliés à lui et forment une colonie nommée hydraire. D'autres s'évadent des polypes. Ce sont alors des méduses qui nagent, grandissent et se reproduisent. Mais les conditions du milieu modifient ce schéma. Certaines méduses émettent des œufs de résistance. C'est le cas de *Margelopsis haeckeli* qui conserve dans ses tissus un œuf plein de réserves pour survivre dans le froid et la nuit polaires. De plus, toutes les méduses ont la capacité de résorber leurs cellules sexuelles déjà formées en cas de disette et de les utiliser comme produits de réserve, puis de reprendre leur croissance quand les conditions s'améliorent. On voit là toutes les stratégies adaptatives sélectionnées au fil de l'évolution et permettant à ces animaux de survivre si les conditions du milieu sont perturbées.

Des envahisseurs immortels

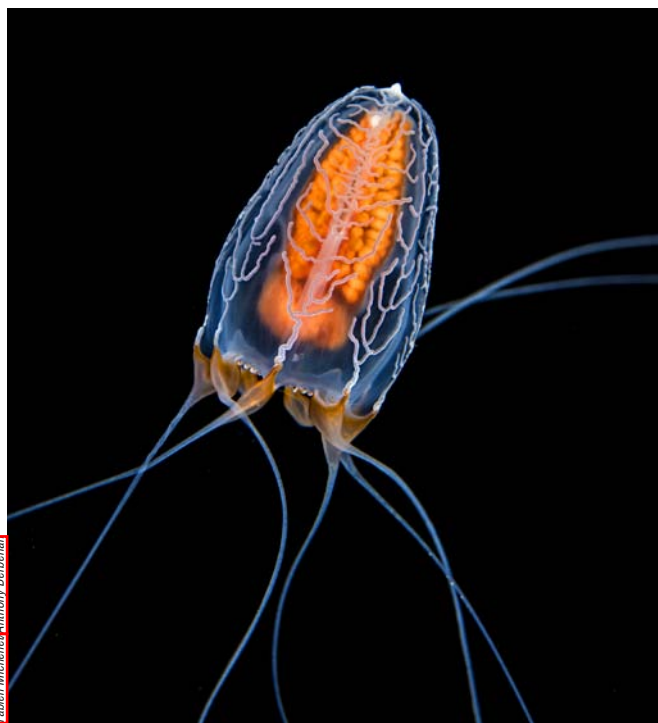
En combinant ces réactions des méduses aux modifications de l'environnement, on comprend comment des organismes d'apparence aussi fragile transforment la mer en « gelée ». Cette résistance expliquerait comment ces animaux ont traversé toutes les vicissitudes des ères géologiques depuis plus de 600 millions d'années, âge du gisement d'Ediacara, en Australie, où ont été récoltés leurs premiers fossiles.

À cela s'ajoute l'étonnante immortalité des méduses, qui a fait la joie des médias du monde entier il y a deux ans avec l'exemple de la petite méduse *Turritopsis nutricula*, dont les élevages ont mis en évidence la capacité à revenir à un stade antérieur de développement. Ce phénomène, qu'un naturaliste suisse, Pierre Tardent, a qualifié de réversion en 1980, consiste en une inversion du cycle de vie et avait été décrit dès 1844 par le biologiste belge Edouard Van Beneden. De nombreux auteurs se sont étonnés de ces réversions et les ont attribuées aux mauvaises conditions d'élevage. Elles traduisent surtout l'exceptionnelle capacité des méduses à résister dès que le milieu se dégrade. Certaines peuvent même s'enkyster, telles ces méduses d'eau douce *Craspedacusta sowerbyi* qui ont survécu sous cette forme de kyste pendant plus de 40 ans.

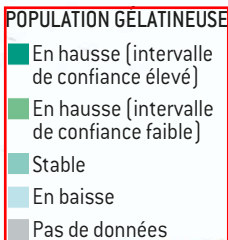
Tous les polypes n'émettent pas leurs méduses au même rythme. Seules une vingtaine d'espèces bourgeonnent avec une intensité telle que le milieu est vite envahi. C'est le cas de la méduse-lune



CETTE MÉDUSE *LINUCHE UNGUICULATA*, photographiée au large des côtes de Tahiti, pullule tous les ans autour de l'île, jusqu'à entraîner des interdictions de baignade et de navigation. Elle a la particularité de vivre en symbiose avec une algue (les petites taches brunes). Les croissants orange sont ses gonades.



CETTE MÉDUSE, photographiée elle aussi au large de Tahiti, lors de plongées nocturnes au-dessus de fonds marins de plusieurs milliers de mètres, est à l'inverse extrêmement rare : troisième spécimen observé de la famille des *Eutiara*, elle représente une nouvelle espèce, *Eutiara decorata*, qui doit rejoindre les collections déposées au Muséum national d'histoire naturelle.



- LA GÉLIFICATION DES Océans** est un phénomène mondial, comme le montre cette carte, fruit d'une méta-analyse réalisée en 2012 sur les écosystèmes marins le long des côtes. Les méduses impliquées, dont certaines sont indiquées ici, diffèrent selon les mers. Sur le millier d'espèces connues, toutes ne pullulent pas. Moins d'une vingtaine sont problématiques.

La liste n'est pas close de tous les mécanismes qui favorisent les méduses, d'autant

En fabriquant ce nouvel écosystème, cet inquiétant plastisphère, l'homme n'a-t-il pas joué à créer un nouveau *pelagos*, un monde destiné à dériver éternellement à la surface des flots ? Toutefois, à l'inverse des dieux grecs, il ne domine pas sa création, qui risque fort de perturber à jamais la quiétude des océans. ■

Versions numériques
OFFERTES*
sur www.pourlascience.fr



Offre PASSION

POUR LA
SCIENCE

Le magazine mensuel
Pour la Science (12 n^{os})
+
Le hors-série trimestriel
Dossier Pour la Science (4 n^{os})

79€ seulement
1 AN - 16n^{os}

* des numéros recus pendant la durée de votre contrat en cours uniquement

VOS AVANTAGES ABONNÉ

- ✓ 27 % d'économie et plus par rapport au prix en kiosque
- ✓ L'envoi des magazines en avant-première
- ✓ La garantie de ne **manquer aucun numéro**

BULLETIN D'ABONNEMENT

À compléter et à retourner, accompagné de votre règlement,
dans une enveloppe non affranchie à : Groupe Pour la Science
Service abonnements - Libre réponse 90 382-75 281 Paris cedex 06

POUR LA
SCIENCE

OUI, je m'abonne à Pour la Science (12 n^{os}/an) + Dossier Pour la Science (4 n^{os}/an) :

☐ 1 an • 16 numéros • 79€ au lieu de 108,50€ → Offre disponible en ligne sur www.pourlascience.fr/pls/passionne

Tarif valable uniquement en France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter : Europe 16€ - autres pays 35€.

☐ 2 ans • 32 numéros • 148€ au lieu de 217€

Tarif valable uniquement en France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter : Europe 34€ - autres pays 72€.



Le mensuel

Le trimestriel

J'indique mes coordonnées :

Nom : _____
Prénom : _____
Adresse : _____

CP : _____ Ville : _____
Pays : _____ Tél. : _____
Pour le suivi client (facultatif)

Je choisis mon mode de règlement :

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ Par carte bancaire

Numéro de carte _____

Date d'expiration _____

Clé _____
(les 3 chiffres au dos de votre CB)

Signature obligatoire

Mon e-mail pour recevoir la newsletter Pour la Science (à remplir en majuscule).

_____ @ _____

En application de l'article 27 de la loi du 6 janvier 1978, les informations ci-dessus sont indispensables au traitement de votre commande. Elles peuvent donner lieu à l'exercice du droit d'accès et de rectification auprès du groupe Pour la Science. Par notre intermédiaire, vous pouvez être amené à recevoir des propositions d'organismes partenaires. En cas de refus de votre part, merci de cocher cette case ☐

Sous l'ombrelle des méduses

Si toutes les méduses arborent une ombrelle, celle-ci ne porte pas ombrage à leur diversité.

Voici un aperçu des étonnantes variations que l'évolution a produites chez ces animaux.

Jacqueline Goy

Tous les océans sont peuplés de méduses. Certaines espèces, telle *Aurelia aurita*, sont cosmopolites – répandues dans toutes les mers –, mais la plupart ont des aires de répartition bien délimitées par les gradients de température des eaux. Les grands fonds hébergent plusieurs espèces d'*Atolla* dont la couleur rouge sombre est typique des animaux de profondeur. La haute mer abrite une population de méduses originales qui ne se fixent jamais au cours de leur cycle. Dans ces eaux moins riches en nourriture que les eaux littorales, leur croissance est lente, avec une seule génération en hiver et deux ou trois dans les eaux chaudes estivales de notre zone tempérée.

La diversité des méduses est maximale dans les eaux superficielles des zones littorales. C'est là qu'ont été photographiés les spécimens présentés ici. Chacun révèle le grand pouvoir adaptatif de ces valseuses des mers... et leur beauté.

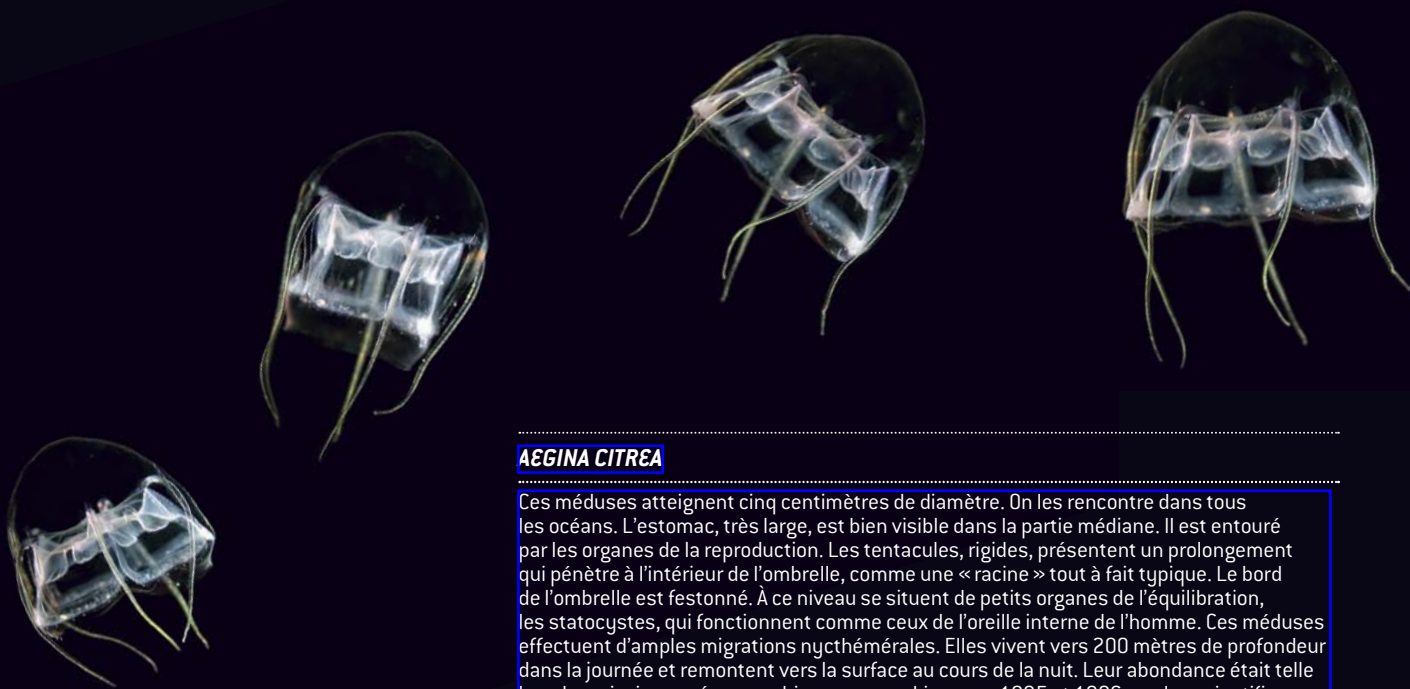
THYSANOSTOMA THYSANURA

Parmi les cinq méduses de la classe des *Scyphozoa* trouvées au large de la Réunion, ce rhizostome *Thysanostoma thysanura* est très commun. Son ombrelle, qui atteint dix centimètres à peine de diamètre, est dépourvue de tentacule. Les lèvres de sa bouche sont divisées en huit bras oraux portant chacun une épaulette réduite à leur base et un long fouet à leur extrémité. Entre les deux, des pores oraux – ou ostioles – sont dispersés sur la partie médiane : cette méduse est microphage. Toutefois, elle bénéficie aussi des échanges avec son algue symbiotique qui colore délicatement les bras oraux. Son aire de répartition se limite à l'océan Indo-Pacifique.



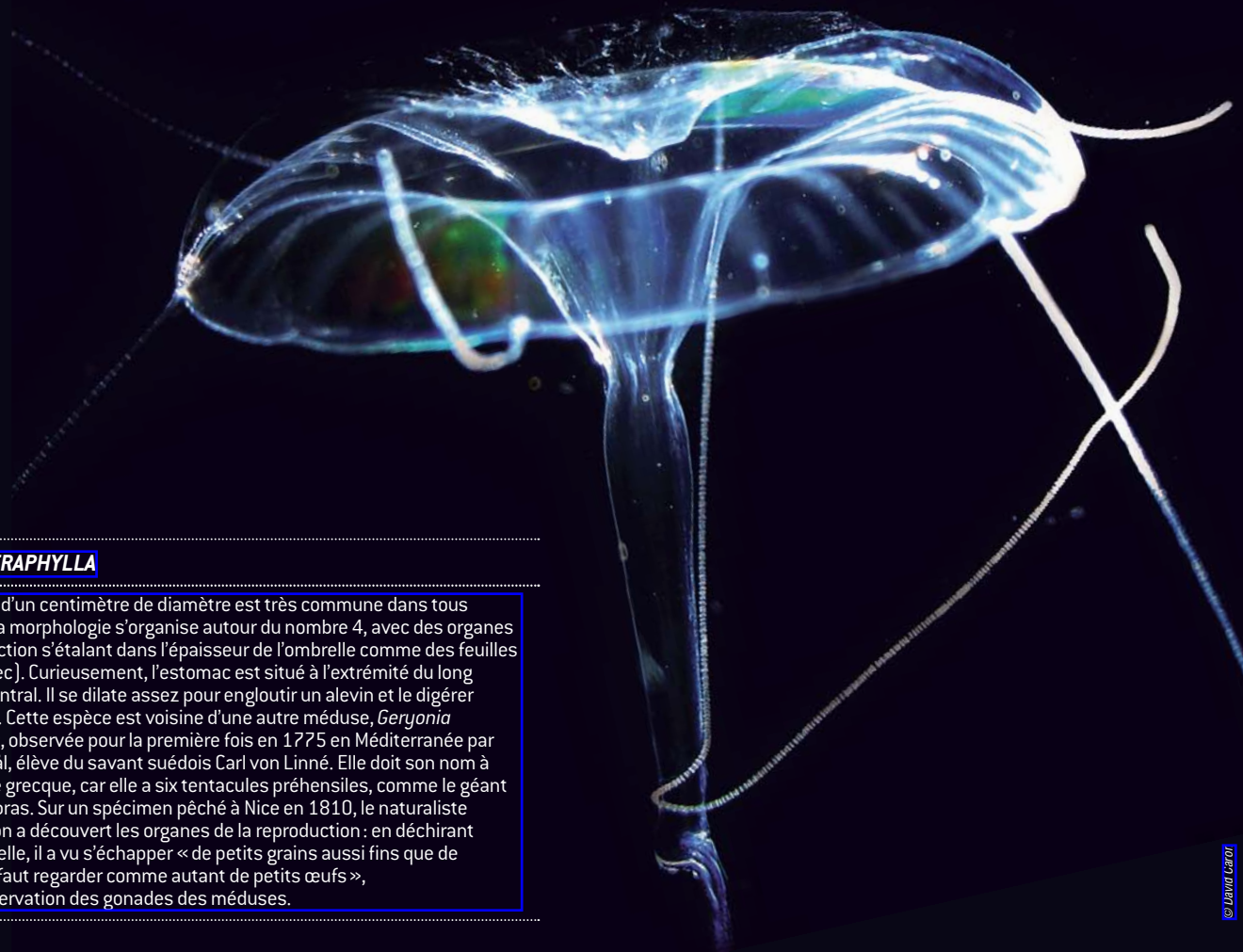
© David L. Taylor





AEGINA CITREA

Ces méduses atteignent cinq centimètres de diamètre. On les rencontre dans tous les océans. L'estomac, très large, est bien visible dans la partie médiane. Il est entouré par les organes de la reproduction. Les tentacules, rigides, présentent un prolongement qui pénètre à l'intérieur de l'ombrelle, comme une « racine » tout à fait typique. Le bord de l'ombrelle est festonné. À ce niveau se situent de petits organes de l'équilibration, les statocystes, qui fonctionnent comme ceux de l'oreille interne de l'homme. Ces méduses effectuent d'amples migrations nyctémérales. Elles vivent vers 200 mètres de profondeur dans la journée et remontent vers la surface au cours de la nuit. Leur abondance était telle lors des missions océanographiques en mer Ligure en 1985 et 1986 que les scientifiques les ont prises comme mascotte.



LIRIOPE TETRAPHYLLA

Cette espèce d'un centimètre de diamètre est très commune dans tous les océans. Sa morphologie s'organise autour du nombre 4, avec des organes de la reproduction s'étalant dans l'épaisseur de l'ombrelle comme des feuilles (*phylla* en grec). Curieusement, l'estomac est situé à l'extrémité du long pédoncule central. Il se dilate assez pour engloutir un alevin et le digérer en une heure. Cette espèce est voisine d'une autre méduse, *Geryonia proboscidalis*, observée pour la première fois en 1775 en Méditerranée par Peter Forsskal, élève du savant suédois Carl von Linné. Elle doit son nom à la mythologie grecque, car elle a six tentacules préhensiles, comme le géant Géryon à six bras. Sur un spécimen pêché à Nice en 1810, le naturaliste François Péron a découvert les organes de la reproduction : en déchirant la sous-ombrelle, il a vu s'échapper « de petits grains aussi fins que de la farine qu'il faut regarder comme autant de petits œufs », première observation des gonades des méduses.

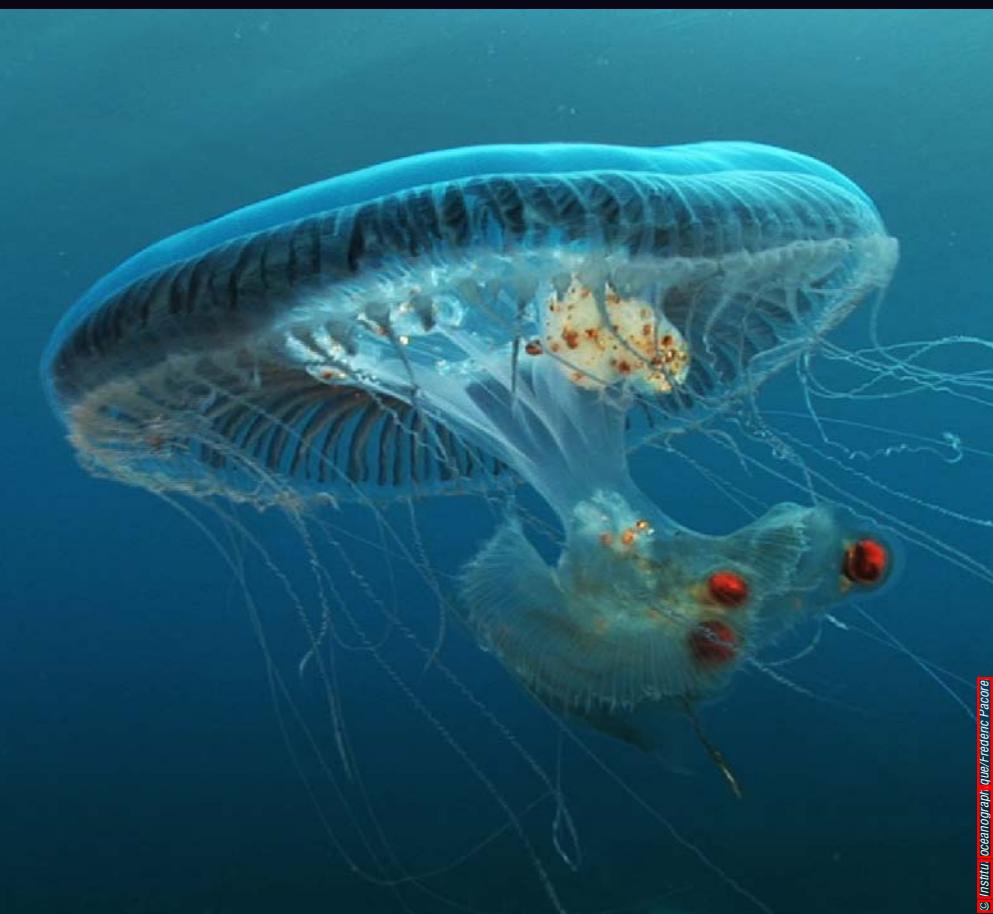


AEQUOREA VICTORIA

Cette méduse du Pacifique nord-américain atteint parfois 20 centimètres de diamètre. Elle est presque parfaitement hémisphérique, avec un large estomac central d'où partent jusqu'à 100 canaux radiaires, lui donnant l'allure d'une roue de vélo. Ces canaux apportent les nutriments à tout l'organisme. Autant de petites lèvres bordent la bouche et autant de tentacules s'étirent autour de l'ombrelle. Les organes de la reproduction tapissent chaque canal radiaire. Cette méduse émet de la lumière grâce à deux protéines, l'aequorine et la GFP (*green fluorescent protein*), qui émettent une lumière respectivement bleue et verte en présence de calcium. Ce mécanisme a été découvert en 1961 par le biologiste japonais Osamu Shimomura. Puis deux chercheurs américains, Martin Chalfie et Roger Tsien, ont isolé le gène qui code la GFP et l'ont greffé à d'autres animaux, lesquels ont produit à leur tour de la lumière verte. Tous trois ont reçu le prix Nobel de chimie en 2008. Cette technique de marquage est désormais courante en biologie et en médecine.

CRAMBIONE MASTIGOPHORA

Ce rhizostome est une espèce à répartition limitée et sporadique dans les eaux de la Malaisie. Il atteint 40 centimètres de diamètre. Son ombrelle est parsemée de verrues et ses huit organes des sens (équilibre, vision) sont cachés dans les replis des lobes marginaux. Les bras oraux, percés de nombreux pores, s'étalent à leur extrémité. Les rhizostomes, souvent incapables d'avalier des proies aussi grosses, servent de refuge aux alevins. Les poissons s'enduisent du mucus qui exsude de l'ectoderme (la partie externe de l'ombrelle); ce mucus bloque le fonctionnement des cellules urticantes et les alevins sont ainsi protégés. Ces méduses ont alors un rôle de crèche à poissons. À une échelle plus grande, c'est ce même dispositif de concentration de poissons que les pêcheurs utilisent. Ils immergent des radeaux superficiels sous lesquels les poissons se réfugient. Ce système de pêche presque gratuit se répand sans aucune réglementation.



© Institut océanographique, Quai Fabrice Pécave

ZYGOCANNA DIPLOCONUS

Les *Zygocanna* sont rarement observées. Elles vivent dans l'océan Indien. Leur taille ne dépasse pas dix centimètres et elles ont un grand nombre de canaux radiaires qui partent de l'estomac central, comme *Aequorea*. À l'extrémité du long pédoncule s'ouvre la bouche entourée de lèvres très plissées. Au bord de l'ombrelle, les tentacules, nombreux, sont recouverts de cellules urticantes, les cnidocytes, dont le venin paralyse les proies. Celles-ci sont ensuite déposées sur les lèvres, puis acheminées jusqu'à l'estomac. Le trajet de la nourriture, colorée en rouge, est bien visible sur cette photographie.

© Alamy Stock Photo, Shutterstock.com

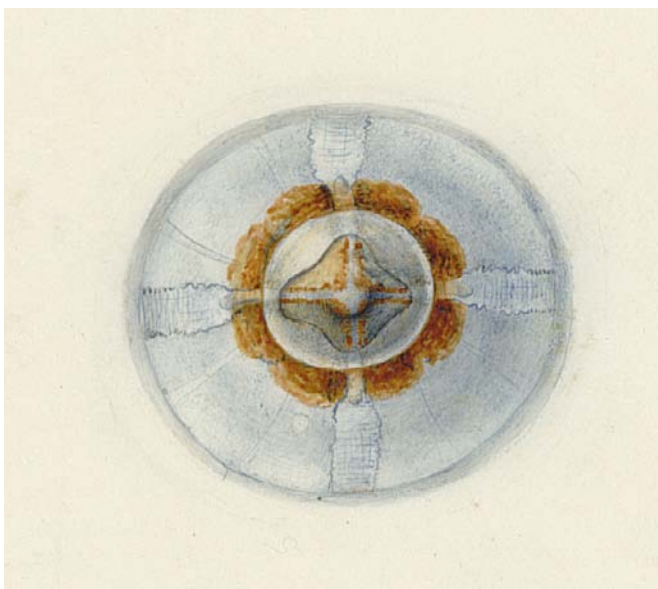




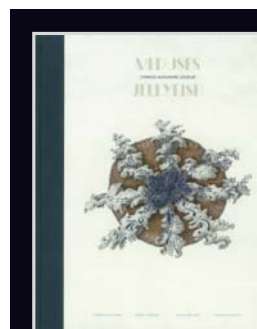


LEUCKARTIARA OCTONA

Ces images peintes par le naturaliste français Charles-Alexandre Lesueur (1778-1846) illustrent le texte où son confrère François Péron décrit les méduses pêchées à Nice en 1810. L'espèce *Leuckartiara octona* y est commune au printemps. Haute d'environ trois centimètres, son ombrelle est surmontée d'un bouton de gelée. Libre comme le battant d'une cloche, l'estomac pend dans la cavité. Il est recouvert par les gonades brun-rouge et se termine par des lèvres plissées. Les tentacules bordent l'ombrelle et Lesueur ajoute sur son ébauche : « petit point roux à la base du tentacule ». C'est la première mention de l'œil des méduses. Vue de dessus (*en bas à gauche*), l'ombrelle recouvre l'estomac central, entouré des quatre gonades. Les quatre canaux radiaires sont disposés en croix. L'animal se déplace en contractant ses fibres musculaires (*ci-dessous*), puis une dilatation lui permet de reprendre sa forme et de nager. Péron constate que « les tentacules ne prennent aucune part à la nage et que c'est l'ombrelle qui en fait tous les frais ».



MUSEUM D'HISTOIRE NATURELLE DU HAVRE



Gabrielle Baglione et al.,
Méduses – Jellyfish.
Charles-Alexandre Lesueur,
MkF, 2014.

Ce magnifique ouvrage rassemble les vélins de Lesueur, conservés au Muséum d'histoire naturelle du Havre. Ceux-ci seront présentés à l'automne 2015 à l'Aquarium de Paris.

Votre application **Pour la Science** maintenant disponible dans le kiosque Apple !

Abonnez-vous
sur tablette et smartphone
3 mois
55% de réduction*



Téléchargez gratuitement l'application sur App Store et Google Play, **et feuilletez gratuitement un extrait du numéro en cours !**



Disponible sur
App Store

DISPONIBLE SUR
Google play



Flashez ce QR code avec votre mobile ou votre tablette pour télécharger immédiatement l'application.

Avec l'application « Pour la Science », retrouvez dès leur sortie le mensuel *Pour la Science* à 4,49 € et son trimestriel *Dossier Pour la Science* à 5,99 € en version numérique optimisée pour tablette : lecture intuitive, sommaire interactif, contenus enrichis, feuillette hors connexion, etc.

*Soit 4 numéros pour 9,99 € au lieu 20,96 € pour un achat à l'unité.

Transparence s'adapter ou

À l'ère du numérique, il est bien difficile de garder un secret. Si elles veulent survivre à cette transparence sans précédent, les institutions et les entreprises devront évoluer et s'adapter.

Daniel Dennett et Deb Roy

Il y a plus d'un demi-milliard d'années, notre planète a connu une soudaine et spectaculaire période d'accélération de l'évolution biologique, l'« explosion cambrienne ». En un clin d'œil géologique de quelques millions d'années, de nouvelles formes anatomiques, de nouveaux organes, de nouvelles stratégies de prédation et de défense sont apparus dans le monde vivant.

Les spécialistes de l'évolution ne sont pas tous d'accord sur l'origine de ce big bang biologique. Le zoologiste Andrew Parker, de l'Université d'Oxford, a publié en 2003 l'intéressante hypothèse selon laquelle la lumière en aurait été le détonateur. D'après lui, les mers

peu profondes et l'atmosphère ont subi il y a environ 543 millions d'années de soudaines transformations de nature chimique qui les ont rendues beaucoup plus transparentes. À l'époque, la vie animale était confinée au fond des océans. À partir du moment où la lumière du jour s'est mise à pénétrer les flots, l'œil est devenu un organe précieux, qui a exercé sur les organismes une forte pression évolutive.

Auparavant, toute perception était une question de proximité: contact, effleurement, différences



numérique disparaître



L'ESSENTIEL

■ Il y a environ 540 millions d'années, la vie marine s'est brusquement diversifiée.

■ Selon une hypothèse, le moteur de ce phénomène a été une augmentation soudaine de la transparence des mers.

■ Par analogie, la technologie numérique, *via* la transparence qu'elle induit, va transformer nos sociétés, en forçant les organisations à évoluer.

■ Celles-ci se diversifieront et seules les plus réactives et les plus flexibles survivront.

ILLUSTRATION DE KOJI KAWA

sensorielles de nature chimique, ondes de pression. Désormais, c'était aussi une affaire de distance : les animaux pouvaient pister leur proie à vue, repérer un prédateur et, le cas échéant, fuir. Se mouvoir est un processus lent et hasardeux quand on n'y voit goutte. C'est pourquoi vision et mobilité ont évolué parallèlement dans cette course aux armements, laquelle est à l'origine d'une grande partie de la ramification de l'arbre de la vie tel que nous le connaissons aujourd'hui.

L'hypothèse d'Andrew Parker sur l'explosion cambrienne fournit un parallèle idéal pour explorer un nouveau phénomène n'ayant, en apparence, aucun rapport : la généralisation de la technologie numérique. Si l'évolution des techniques de communication (invention de l'écriture, puis de l'imprimerie) a transformé notre monde plusieurs fois par le passé, l'impact de la technologie numérique pourrait bien atteindre un degré jusqu'ici inégalé. La technologie numérique renforcera la puissance de certains individus et de certaines organisations, tout en mettant à mal le pouvoir des autres.

Internet a placé des instruments de communication planétaire entre les mains des particuliers. Youtube, Facebook, Twitter, Tumblr, Instagram, WhatsApp ou Snapchat constituent de nouveaux moyens de communication sociale comparables au téléphone ou à la télévision, mais la vitesse à laquelle ils apparaissent est déconcertante.

Parce qu'il a fallu des années pour que les ingénieurs développent et déploient les réseaux de téléphonie et de télévision, tout le monde a eu le temps de s'adapter. Aujourd'hui, un nouveau réseau social, un service de partage de fichiers, etc. sont mis au point en quelques semaines, et sont adoptés en quelques mois par des centaines de millions de personnes. Ces innovations se succèdent à un rythme effréné sans que les entreprises aient la possibilité de s'ajuster à l'une avant l'arrivée de la suivante.

Face à ce déferlement, notre monde et ses structures organisationnelles subissent un bouleversement majeur qu'un seul mot suffit à résumer : la transparence.

Désormais, nous voyons plus loin, plus vite, plus facilement et à peu de frais – et nous pouvons être vus de même. Et vous et moi voyons que chacun peut voir ce

que nous voyons, dans un jeu de miroirs des connaissances mutuelles qui à la fois affranchit et entrave.

L'impact de ce changement sur nos organisations et nos institutions est vertigineux. Les gouvernements, les armées, les institutions religieuses, les universités, les banques et les sociétés se sont déployés dans un environnement épistémologique relativement trouble, où une grande partie du savoir était locale, où la confidentialité et les secrets étaient bien protégés, et où les protagonistes, s'ils n'étaient pas aveugles, souffraient de myopie.

Lorsque ces organisations se retrouvent soudain exposées au grand jour, elles découvrent qu'elles ne peuvent plus se fier aux bonnes vieilles méthodes. Elles doivent faire face à cette transparence inédite ou s'éteindre. Tout comme les cellules vivantes ont besoin d'une membrane pour protéger leur mécanisme interne des vicissitudes du monde extérieur, les entreprises humaines ont besoin d'une interface protectrice avec le domaine public, les dispositifs utilisés jusqu'ici perdant leur efficacité.

Des structures à adapter

Dans son livre *In the Blink of an Eye* (« En un clin d'œil ») paru en 2003, Andrew Parker soutenait que les carapaces et autres types de protection corporelle sont plus ou moins directement issus de la pression évolutive de l'explosion cambrienne et du processus de sélection qu'elle a entraîné. La soudaine transparence des mers a conduit à l'émergence de rétines qui, à leur tour, ont mené à la formation de griffes, mâchoires, coquilles et autres éléments anatomiques défensifs. Les systèmes nerveux ont eux aussi évolué, avec l'apparition de nouveaux comportements de prédation qui eux-mêmes ont conduit à de nouvelles méthodes d'évitement et de camouflage.

Par analogie, on pourrait s'attendre à ce que les organisations de nos sociétés réagissent à la transparence numérique en adaptant leurs structures. En plus des organes opérationnels qu'elles utilisent pour fournir des marchandises et des services, elles en ont d'autres qui leur permettent de contrôler l'information sur leurs propres activités ainsi que sur leur image : relations publiques, marketing, services juridiques...

C'est là que se fait sentir avec le plus d'acuité l'impact de la transparence. À travers les réseaux sociaux, les rumeurs et

Lorsque ces organisations se retrouvent soudain exposées à la lumière du jour, elles découvrent qu'elles ne peuvent plus se fier aux bonnes vieilles méthodes. Elles doivent faire face à cette transparence inédite ou s'éteindre.

les critiques – positives ou négatives – se propagent d'un bout à l'autre de la planète en quelques jours, voire quelques heures. Les départements chargés des relations publiques et du marketing sont sollicités pour « se joindre à la discussion » lancée sur les réseaux sociaux par des particuliers, selon leurs propres modalités, de façon intelligible, honnête et sur un ton familial. Les structures qui passaient des semaines ou des mois à élaborer leur stratégie de communication et à la faire valider par des services juridiques vont se retrouver hors circuit.

La facilitation de l'accès aux données donne lieu à la publication de nouvelles formes de commentaires fondés sur des observations empiriques d'ordre général. Le journaliste de données Nate Silver l'a démontré lors de l'élection présidentielle de 2012 aux États-Unis. Alors que certains organes de presse faisaient tourner en boucle des messages du type « pourquoi-notre-candidat-va-gagner », fondés sur des résultats de sondages triés sur le volet, Nate Silver, lui, s'est appuyé sur l'ensemble des données des sondages. Non seulement il a prédit le résultat du scrutin avec une étonnante précision, mais, en partageant ouvertement sa méthodologie, il a aussi éliminé les doutes éventuels sur le « coup de chance » dont il aurait bénéficié. Étant donné la facilité avec laquelle chacun peut aujourd'hui consulter les résultats de sondages, les instituts et les analystes politiques qui, en les sélectionnant, manipulent les données afin que leur récit ait la tournure souhaitée, ont des soucis à se faire pour leur avenir.

Les fabricants de biens de consommation font face à des difficultés similaires. En mettant en ligne leurs avis sur des produits ou des services, les consommateurs modifient l'équilibre des pouvoirs entre le client et l'entreprise. Le travail de marketing effectué autour d'une marque perd son impact à mesure que l'opinion des consommateurs gagne en influence. Certaines entreprises apprennent à réagir rapidement et publiquement aux mécontentements et aux avis peu élogieux. Et si les critiques négatives fusent de toute part, il ne reste plus qu'une seule solution : changer le produit, ou l'abandonner. Continuer d'investir dans la promotion d'un produit médiocre n'a plus aucun sens.

Les petits groupes de personnes partageant les mêmes valeurs, convictions et objectifs – en particulier ceux qui, en cas de crise, sont capables de rapidement coordonner leurs actions en utilisant les canaux

ad hoc de communication interne – seront les plus aptes à gérer la communication avec la rapidité, l'ouverture et la réactivité qu'exige aujourd'hui la transparence. Pour les différencier des grandes bureaucraties et entreprises très hiérarchisées, nous pourrions qualifier ces structures d'« adhocraties ». Avec l'augmentation de la transparence, nous verrons apparaître de nouvelles organisations beaucoup plus décentralisées que les grandes structures actuelles, ou bien les pressions darwiniennes sélectionneront les plus petites et les plus légères.

La demi-vie des secrets

On cite souvent, sur ces sujets, Louis Brandeis (1856-1941), membre de la Cour suprême des États-Unis et l'un des premiers ardents défenseurs de la transparence. « On dit que la lumière du soleil est le meilleur désinfectant », déclarait-il. Il avait bien sûr raison, tant littéralement que métaphoriquement. Mais la lumière du soleil peut aussi se révéler dangereuse. Et si, dans notre souci de purification, nous détruisons un trop grand nombre de cellules saines ? Et que dire du risque d'anéantir l'intégrité ou l'efficacité des organismes en exposant abusivement leur fonctionnement interne aux regards extérieurs ?

Brandeis était opposé au secret. Il pensait que plus les institutions seraient transparentes, meilleures elles seraient. Plus d'un siècle plus tard, on constate que la campagne qu'il a contribué à lancer a été fructueuse. Mais en dépit de beaux discours sur les incontestables vertus de la transparence, le secret, dans les allées du pouvoir, est toujours cultivé – et pour d'excellentes raisons.

Sur le plan biologique, on perçoit combien la transparence est un bienfait tout à fait relatif. Les animaux, et même les végétaux, peuvent être considérés comme des agents ayant des priorités. Informés par leurs organes sensoriels, ils agissent pour leur propre bien-être. Toute organisation humaine fait de même. Mais contrairement aux cellules qui constituent les plantes et les animaux, les humains ont des intérêts particuliers et des capacités de perception. Un animal ou une plante n'a pas à s'inquiéter : il n'y a aucun danger que ses cellules aient envie de quitter le navire ou de déclencher une mutinerie. Excepté dans le cas du cancer, les cellules d'un organisme sont obéissantes et serviles. Ce n'est pas le cas des individus humains.

LES AUTEURS



Daniel C. DENNETT est professeur de philosophie et codirecteur du Centre d'études cognitives à l'Université Tufts (Massachusetts, États-Unis).

Deb ROY est maître de conférences au MIT, l'Institut de technologie du Massachusetts, aux États-Unis. Il dirige le Laboratoire des machines sociales, au Laboratoire de recherche multimédia du MIT.

« Dorénavant, très peu de secrets seront conservés, et ceux qui le seront ne le resteront pas très longtemps [...]. Le véritable objectif en matière de sécurité, aujourd'hui, est de retarder au maximum la dégradation de la demi-vie des secrets. »

Joel Brenner, ancien conseiller de la NSA

Il n'en a pas toujours été ainsi. Jadis, les dictateurs pouvaient diriger leur pays d'une main de fer, derrière de hauts murs. Ils pouvaient compter sur une organisation hiérarchisée, composée de fonctionnaires mal informés sur la structure dont ils faisaient eux-mêmes partie. Peut-être ces derniers savaient-ils encore moins ce qui se passait dans le reste du monde.

Les autorités religieuses ont été particulièrement habiles à étouffer la curiosité de leurs membres en les maintenant dans l'ignorance partielle ou totale de ce qui se passait ailleurs, nimbant d'un épais brouillard leur fonctionnement interne, une partie de leur passé, leur financement et leurs intentions.

Les armées ont toujours eu intérêt à garder leurs stratégies secrètes – non seulement vis-à-vis de l'ennemi, mais aussi à l'égard de leurs propres troupes. Des soldats qui apprendraient le taux de pertes estimé d'une opération militaire ne seraient pas aussi efficaces que ceux qui ignorent leur probable destin. De plus, si un soldat mal informé est capturé, il aura moins d'informations importantes à divulguer lors d'un interrogatoire.

Des secrets à garder

L'un des concepts fondamentaux de la théorie des jeux est que les agents sont tenus de garder les secrets. Si l'un d'eux révèle à un autre l'état réel des choses, il perd une part précieuse de son autonomie et prend le risque de se faire manipuler. Pour se livrer à une juste concurrence dans un marché libre, les industriels ont besoin de protéger leurs secrets de fabrication, leurs plans de croissance et autres informations commerciales. Les écoles et les universités se doivent de garder secrets les sujets d'examens jusqu'au jour où les étudiants devront les passer.

Le président américain Barack Obama a promis une nouvelle ère de transparence gouvernementale. Or, malgré des améliorations significatives, le privilège du secret d'État accordé à l'exécutif (règle juridique qui, aux États-Unis, consiste à écarter des preuves lorsque la sécurité nationale est en jeu) n'a jamais été aussi vigoureusement appliqué. C'est dans l'ordre des choses. Il est nécessaire, par exemple, que des statistiques économiques restent

confidentielles jusqu'à ce qu'elles soient officiellement divulguées, afin d'éviter les délits d'initiés. Dans la conduite de ses activités, un gouvernement ne peut pas dévoiler son jeu en permanence, ce que la nouvelle transparence rend de plus en plus difficile.

Les révélations d'Edward Snowden sur le fonctionnement interne de la NSA, l'Agence de sécurité américaine, montrent combien, à l'ère de la transparence, un seul lanceur d'alerte, ou une seule taupe, peut déstabiliser une gigantesque organisation. Bien qu'Edward Snowden ait utilisé les organes de presse classiques pour révéler ces informations, la réaction des médias et l'écho produit ont garanti leur pérennité, faisant durablement et fortement pression sur la NSA et le gouvernement fédéral afin qu'ils agissent.

Face à la situation, la « carapace extérieure » de la NSA est en train de s'adapter. Le simple fait que l'agence se soit publiquement défendue vis-à-vis des accusations d'Edward Snowden est une mesure sans précédent pour une organisation qui a longtemps fonctionné dans le secret le plus total. De grands changements sont inévitables au sein de la NSA, qui cherche à définir le type de secrets qu'elle sera en mesure de conserver dans ce monde plus transparent.

Lors de la commission de décembre 2013 qui s'est tenue au sein du Laboratoire de recherche multimédia du MIT, Joel Brenner, ancien conseiller de la NSA, a exposé ses réflexions sur la soudaine transformation de l'environnement dans lequel l'agence opère. Il a déclaré : « Dorénavant, très peu de secrets seront conservés, et ceux qui le seront ne le resteront pas très longtemps [...]. Le véritable objectif en matière de sécurité, aujourd'hui, est de retarder au maximum la dégradation de la demi-vie des secrets. Les secrets, c'est comme des isotopes radioactifs. »

Nous aimerions croire que cette période troublée conduira les différentes structures à s'aligner davantage sur les codes moraux de la société civile et que seront adoptés de puissants moyens pour corriger les comportements organisationnels déviants. En revanche, on ne peut exclure que la fragilisation des services de renseignement ne réduise durablement leur capacité à identifier de potentielles menaces.

Dans sa course évolutionniste aux armements, la faune cambrienne a inventé toute une panoplie de mesures et de

contre-mesures d'évitement, et cet arsenal de ruses et d'astuces n'a fait que s'accroître par la suite. Les animaux ont développé des techniques de camouflage, des cris d'alarme pour avertir d'une menace toute proche, des iridescences colorées qui alertent d'éventuels prédateurs sur leur caractère faussement venimeux. De même, dans cette guerre de l'information, la nouvelle transparence conduit à une prolifération d'outils et de techniques : campagnes de discrédit des sources, attaques préventives, infiltrations...

La nature avait déjà inspiré un certain nombre d'armes sournoises. Le nuage d'encre expulsé par les céphalopodes fuyant un prédateur a été réinventé pour les combats aériens sous la forme d'un nuage réfléchissant vis-à-vis des radars, un « rideau de leurres » destiné à attirer les missiles ennemis.

On peut ainsi prédire l'introduction de leurres composés tout simplement de mégaoctets d'information erronée. Ceux-ci seront eux-mêmes démasqués grâce à des moteurs de recherche toujours plus sophistiqués, ce qui poussera à la création

de leurres encore plus performants. Les systèmes de cryptage et de décryptage continueront également à proliférer, tandis que les organisations et les individus lutteront pour préserver leur intimité et leur réputation.

Diversification massive des organisations ?

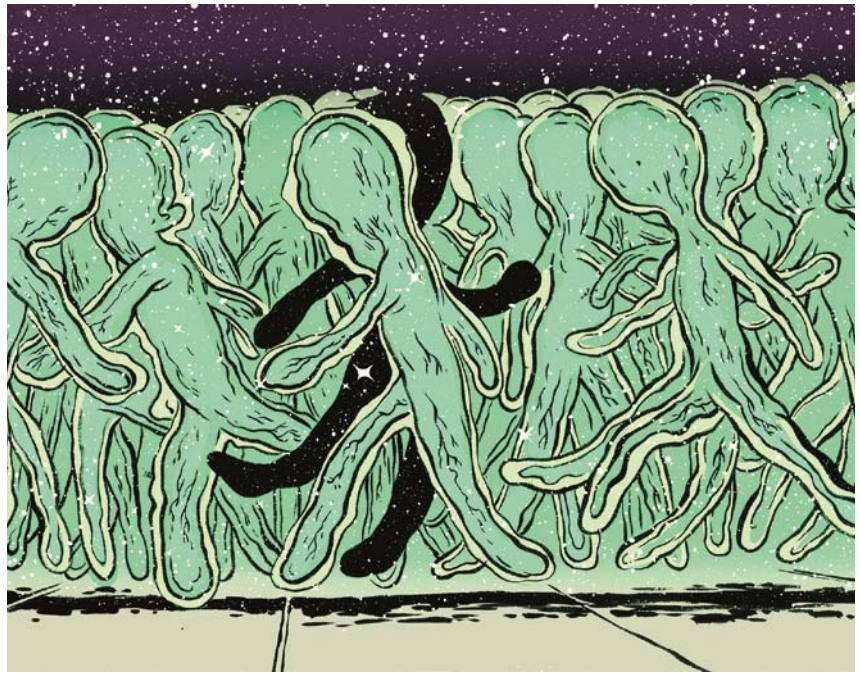
Dernier parallèle avec l'explosion cambrienne : nous devrions être bientôt témoins d'une diversification massive des « espèces » d'organisation. On peut en percevoir les premiers signes. Aux États-Unis, le label B Corp (Benefit Corporation) a été récemment créé. Ce statut permet aux entreprises de se fixer des objectifs extrafinanciers et de considérer, dans leur processus de décision, tant la rentabilité que des missions sociales et environnementales. Google et Facebook ont rompu avec les habitudes en adoptant des droits de vote particulièrement puissants pour leurs fondateurs, en inscrivant des objectifs d'intérêt public dans le marbre de sociétés détenues par des fonds privés, et en permettant à ces

Dans l'interêt de la science

mathieu vidard

la tête au carré 14:05-15:00

france inter venez franceinter.fr



BIBLIOGRAPHIE

G. Greenwald, *No Place to Hide: Edward Snowden, the NSA, and the U.S. Surveillance State*, Metropolitan Books, 2014.

D. Dennett, *The social cell: What do debutante balls, the Japanese tea ceremony, Ponzi schemes and doubting clergy all have in common ?*, *New Statesman*, vol. 140, pp. 48-53, décembre 2011.

A. Parker, *In the Blink of an Eye: How Vision Sparked the Big Bang of Evolution*, Basic Books, 2003.

mêmes fondateurs de diriger leur entreprise sur le long terme en restant assez indifférents aux caprices de Wall Street.

La vitesse à laquelle la transparence façonnera une entreprise dépendra de son degré de compétitivité. Face à l'opinion publique, les sociétés commerciales sont très vulnérables, car les clients peuvent facilement passer à d'autres produits. Si l'on ne s'en occupe pas, une marque qui s'est construite en plusieurs dizaines d'années pourra s'effondrer en quelques mois.

Les Églises et les ligues sportives sont un peu plus protégées, grâce à des habitudes culturelles profondément enracinées et à leurs réseaux de fidèles ou d'amateurs. Or si les pratiques pédophiles de certains ecclésiastiques ou les traumatismes crâniens dans le football américain ont pu si longtemps nager dans les eaux troubles de la connivence et du non-dit, la transparence de l'ère d'Internet les a fait remonter à la surface et les a placés sous le feu des projecteurs. Même les Églises et les ligues sportives les plus puissantes doivent s'adapter, sous peine de disparaître.

Les plus à l'abri de la pression évolutionnaire immédiate sont les systèmes gouvernementaux. Les manifestations alimentées par les médias sociaux peuvent renverser des dirigeants et des partis au pouvoir, mais les organes étatiques subalternes, eux, continuent en général de fonctionner sans être réellement perturbés par ces changements. Les rouages de l'État sont peu soumis à la pression concurrentielle,

c'est pourquoi ils sont les plus lents à évoluer. Pourtant, là aussi, on doit s'attendre à certains bouleversements.

Sous la pression populaire, les gouvernements donnent peu à peu accès à de grandes quantités de données brutes. Grâce aux avancées en matière d'analyse de structures à grande échelle, de visualisation des données et d'enquêtes journalistiques réalisées à partir de celles-ci par des professionnels ou des citoyens, se créeront de puissantes boucles de rétroaction qui forceront ces organisations à être plus transparentes.

Une autorégulation

Cet ordre humain émergent pourrait néanmoins s'autolimiter. De même que les colonies de fourmis accomplissent des tâches qu'une fourmi n'est pas capable d'effectuer isolément, les organisations humaines ont aussi les moyens de transcender les capacités d'un seul individu, et de générer des mémoires, croyances, projets et actions suprahumains – et peut-être même des valeurs suprahumaines. Or, pour le meilleur et pour le pire, nous sommes dans un processus d'évolution qui nous conduit à tenir les rênes de nos organisations suprahumaines en exigeant qu'elles respectent les normes humaines individuelles. Ce mécanisme d'autorégulation, facilité par des capacités de communication de plus en plus rapide entre l'homme et la machine, est aussi unique à notre espèce que l'est le langage. ■

URGENCE CLIMATIQUE : QUELS OBJECTIFS POUR LA COP21 ?

UNIVERSITÉ D'ÉTÉ DE SAUVONS LE CLIMAT

Venez assister aux conférences
et participer aux débats

CONFÉRENCE

ACCÈS LIBRE

**JEUDI 24 SEPTEMBRE
2015 - 19h À PARIS**

Espace Reuilly - 21, rue Hénard - 12^e

par **François-Marie BRÉON**

Climatologue au LSCE (IPSL)

Membre du GIEC (UNEP/WMO)

UNIVERSITÉ

**VENDREDI 25 & SAMEDI 26
SEPTEMBRE 2015 À PARIS**

CISP Maurice Ravel

6, avenue Maurice Ravel - 12^e

2 jours de formation intensive par des spécialistes,
avec des débats passionnants et interactifs.

INSCRIPTION OBLIGATOIRE

sur sauvonsleclimat.org

Tarifs : Étudiant : 10€ / Adhérent : 30€ / Public : 57€



Le glacier de Muir (Alaska) en 1941 et en 2004...



S Pourquoi la COP21 est la «conférence de la dernière chance».

E La transition énergétique est mal engagée dans certains pays, trop lente dans d'autres : peut-on s'en sortir ?

M Comment décarboner l'économie suffisamment vite pour éviter des conséquences catastrophiques.



sauvonsleclimat.org
idées pour le futur, actions au présent

« **Sauvons le climat** » est un collectif d'associations dont l'objectif est de comprendre et de diffuser les connaissances acquises sur le problème du réchauffement climatique, et sur les actions qui permettront d'en limiter l'ampleur.

Ses travaux s'appuient sur un conseil scientifique regroupant des personnalités dont des membres des Académies des Sciences, des Technologies et de Médecine.

Découvrez notre site
et venez adhérer à notre association :
www.sauvonsleclimat.org/

Comment diminuer les gaz à effet de serre ?
Voir notre scénario de transition écologique : Négatep

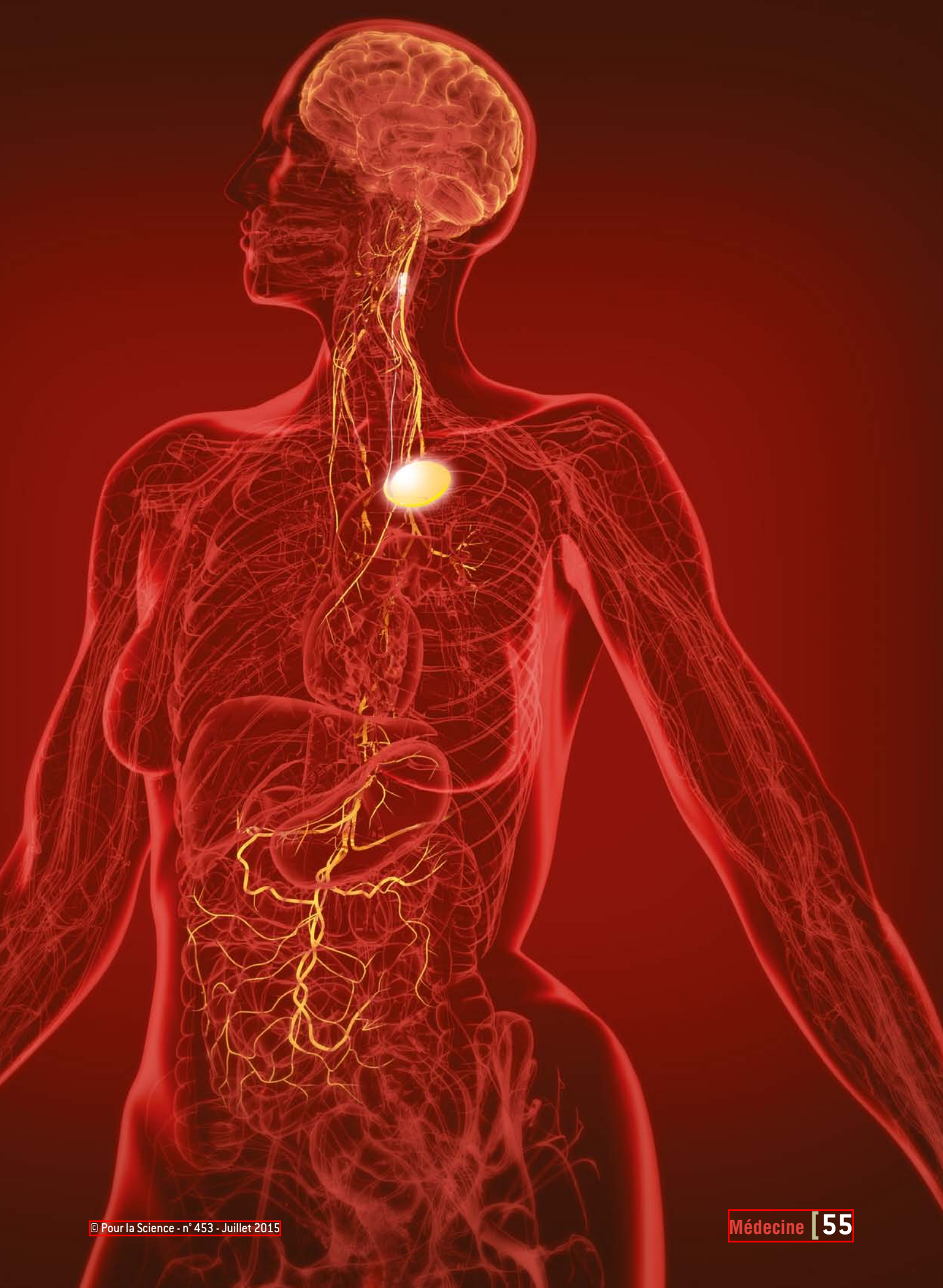
Vidéos à visionner :
« Un autre monde est possible »
« Doit-on craindre la Science ? »

Retrouvez-nous aussi sur Facebook :
<https://www.facebook.com/groups/sauvonsleclimat>
et suivez-nous sur Twitter : @sauvonsleclimat

SOIGNER avec l'électricité

Kevin Tracey

Comment lutter contre les maladies où l'organisme s'attaque lui-même ? La médecine bio-électronique propose de stimuler, grâce à des dispositifs implantés, les voies nerveuses qui régulent les réponses immunitaires.



L'inflammation est une arme à double tranchant: elle permet à l'organisme de se défendre contre une agression, mais elle peut aussi l'endommager. Avec mes collègues, j'ai travaillé sur des façons d'atténuer la douleur, les œdèmes et les lésions tissulaires qu'elle cause quand elle se dérègle. C'est notamment le cas dans les maladies auto-immunes, où le système immunitaire attaque l'organisme parent. Citons par exemple la polyarthrite rhumatoïde (une pathologie caractérisée par une inflammation des articulations) et les maladies inflammatoires chroniques de l'intestin.

En 1987, j'ai publié les résultats d'une expérience sur des babouins qui visait à neutraliser une molécule inflammatoire nommée TNF (pour *Tumor necrosis factor*, ou facteur de nécrose tumorale). Cette étude a contribué à la découverte d'une nouvelle classe de médicaments, nommés anticorps monoclonaux et commercialisés dans les années 1990. Ils permettent d'atténuer les symptômes inflammatoires dus notamment à la surproduction de TNF par des cellules immunitaires.

Les anticorps : une solution très limitée

Pour de nombreux patients, ces anticorps sont la seule chance de mener une vie normale, mais ils ont un coût exorbitant: entre 13 500 et 27 000 euros par an et par patient. En outre, ils sont inefficaces chez près de la moitié des malades et peuvent avoir des effets secondaires dangereux, voire létaux.

Mon expérience de neurochirurgien m'a guidé sur la voie d'une solution alternative. À la fin des années 1990, nous avons découvert que les réflexes neurologiques (des réponses inconscientes à certains stimulus sensoriels) bloquent la production de TNF. J'ai alors conçu un appareil pour traiter l'inflammation avec de petits dispositifs électroniques implantés dans l'organisme, dont ils stimulent les nerfs.

De tels dispositifs, utilisés aussi pour d'autres pathologies (voir l'encadré page ci-contre), sont au fondement d'une nouvelle discipline, la médecine bio-électronique. Elle est en cours de test pour plusieurs maladies, telle la polyarthrite rhumatoïde. Le principe est d'exploiter les réflexes naturels du corps pour développer des thérapies efficaces, sûres et économiques, en alternative aux médicaments.

L'ESSENTIEL

■ **Les réactions inflammatoires protègent l'organisme d'agressions diverses, mais parfois elles se dérèglent et deviennent nocives.**

■ **Des circuits réflexes les régulent : des signaux nerveux inhibent la production de molécules inflammatoires.**

■ **La médecine bio-électronique cherche à éliminer les inflammations excessives en stimulant ces circuits grâce à des dispositifs implantés. Elle est en phase de test chez l'homme.**

Photo: P. BOUTIER / G. BOUTIER

Quand la sonnerie du téléphone vous fait sauter de votre chaise et dévaler l'escalier pour répondre, vous n'avez pas à penser à coordonner votre respiration, votre rythme cardiaque et votre pression artérielle. Des réflexes règlent tous ces paramètres et adaptent le fonctionnement des organes aux besoins du corps. Ils se fondent sur des circuits nerveux simples, qui déclenchent les multiples actions nécessaires au fonctionnement de l'organisme sans que l'on en ait conscience.

Ces circuits réflexes comportent plusieurs segments. Premièrement, un stimulus (chaleur, pression, lumière, produit chimique, etc.) est détecté par des neurones sensoriels, qui émettent un signal électrique. Ce signal est transmis à des « interneurons », un autre type de cellules nerveuses. En réponse, ces dernières activent des neurones qui envoient des commandes aux muscles et aux organes. Cela déclenche un comportement réflexe, qui peut aller du retrait automatique de la main quand on saisit un plat brûlant à la dilatation d'une voie respiratoire lors d'un marathon.

Selon une hypothèse proposée par le physiologiste britannique Charles Sherrington, lauréat du prix Nobel en 1932, les circuits réflexes sont les constituants de base du système nerveux. On sait aujourd'hui que les millions de signaux électriques qui y circulent contrôlent le fonctionnement des organes, en provoquant la libération par les neurones de substances appelées neurotransmetteurs: ces substances se fixent sur les cellules cibles (dont la surface est tapissée de récepteurs adaptés) et modifient leur fonctionnement.

Aider le corps à produire ses propres médicaments

C'est aussi de cette façon qu'agissent de nombreux médicaments. En se liant à des récepteurs spécifiques, ils modifient l'activité métabolique des cellules et activent certains gènes. L'industrie pharmaceutique investit des milliards d'euros pour concevoir et fabriquer de nouveaux composés chimiques capables de cibler des récepteurs particuliers.

Cependant, une fois avalés ou injectés, les médicaments circulent dans tout le corps, où ils peuvent interagir avec des cellules non visées. En stimulant les neurones pour

qu'ils produisent eux-mêmes les « médicaments » (des neurotransmetteurs spécifiques), la médecine bio-électronique évite cet écueil : l'organisme les libère alors dans les tissus adéquats, en quantités calibrées et non toxiques, et juste au bon moment. Le risque d'effets secondaires est ainsi minimisé.

L'inflammation, contrôlée par le cerveau

C'est presque par hasard que ce domaine de la médecine s'est intéressé à la lutte contre l'inflammation. Dans mon laboratoire, à l'institut de recherche médicale Feinstein, à Manhasset dans le New Jersey, nous développons une molécule anti-inflammatoire alternative aux anticorps monoclonaux, que nous avons nommée CNI-1493. Injectée directement dans le cerveau, cette molécule devait y empêcher la production de TNF pendant une attaque cérébrale. C'est bien ce qui s'est produit chez le rat, mais l'expérience nous a réservé une surprise : la molécule CNI-1493 a bloqué la production de TNF dans l'organisme entier, alors qu'elle n'était injectée que dans le cerveau, en quantités infimes. Pendant des mois, nous avons discuté de ces résultats sans comprendre comment agissait le médicament.

Nous pensions au départ que la molécule CNI-1493 activait l'hypophyse, une glande située à la base du cerveau ; cette dernière aurait alors déclenché dans les glandes surrénales la production de stéroïdes (ou glucocorticoïdes), qui se seraient propagés dans les organes, où ils auraient inhibé la production de TNF. Mais c'était une fausse piste : l'ablation de l'hypophyse chez des rats n'empêchait pas le CNI-1493 injecté dans le cerveau de stopper la production de TNF dans tout l'organisme.

Nous avons alors envisagé que le signal inhibiteur soit envoyé directement par des neurones projetant leurs terminaisons (dont le groupement forme les nerfs) en dehors du cerveau. Mais comment identifier précisément les nerfs qui contrôleraient la fabrication de TNF ? Il existe des millions de connexions de ce type entre le cerveau et les organes !

Alors que nous cherchions un plan d'attaque, nous avons découvert un article de Linda Watkins, de l'Université du Colorado à Boulder, qui montrait que le nerf vague joue un rôle majeur dans la transmission au

cerveau d'informations sensorielles issues des organes. La biologiste a injecté une molécule appelée interleukine-1, ou IL-1, dans l'abdomen de rats. En temps normal, cette molécule déclenche une inflammation et donne de la fièvre, mais ce n'était plus le cas quand le nerf vague était sectionné. Linda Watkins en a conclu que ce nerf renseigne le cerveau sur la présence d'IL-1 et que ces signaux neuronaux contrôlent l'apparition de la fièvre.

De façon indépendante, Akira Niiijima, de l'Université de Niigata, au Japon, a montré que l'administration d'IL-1 à des rats déclenche une activité électrique dans le nerf vague, où des influx nerveux transitent jusqu'au cerveau.

Ces deux études m'ont amené à supposer que le nerf vague était au cœur d'un circuit réflexe entre le cerveau et le système immunitaire, circuit qui régulerait les processus

L'AUTEUR



Kevin TRACEY
préside l'Institut de recherche médicale Feinstein et est professeur à

l'École de médecine Hofstra North Shore-LIJ, à Manhasset, aux États-Unis. Il a cofondé la société SetPoint Medical. Ses travaux ont été soutenus financièrement par l'entreprise GlaxoSmithKline.

QUELS NERFS ET QUELLES MALADIES CIBLER ?

La médecine bio-électronique, fondée sur des techniques de stimulation électrique, est prometteuse pour soigner diverses maladies et pourrait même remplacer certains médicaments. L'une de ces techniques, sujet du présent article, cible le nerf vague. La stimulation cérébrale profonde, quant à elle, consiste à implanter des électrodes au cœur du cerveau et est déjà utilisée pour atténuer les symptômes de patients parkinsoniens. D'autres techniques, comme la stimulation du nerf splénique (qui connecte le nerf vague et la rate), n'ont pas encore atteint le stade des essais cliniques.

Stimulation cérébrale profonde

- Maladie d'Alzheimer
- Maladie de Parkinson
- Diabète
- Hypertension

Stimulation hépatique/pancréatique

- Diabète
- Hépatite
- Cancer

Stimulation du nerf vague

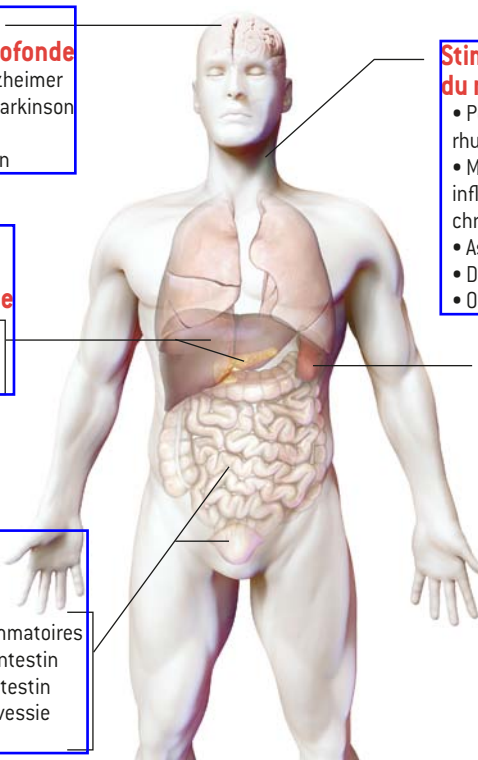
- Polyarthrite rhumatoïde
- Maladies inflammatoires chroniques de l'intestin
- Asthme
- Diabète
- Obésité

Stimulation du nerf splénique

- Fatigue chronique
- Polyarthrite rhumatoïde
- Lupus

Stimulation du nerf splanchnique

- Maladies inflammatoires chroniques de l'intestin
- Irritation de l'intestin
- Irritation de la vessie
- Cancer



inflammatoires et les bloquerait avant qu'ils ne causent des dommages importants. Dans un premier temps, la présence de molécules inflammatoires dans les tissus déclencherait l'émission de signaux nerveux qui remonteraient jusqu'au cerveau par le nerf vague. Ensuite, des commandes cérébrales retourneraient jusqu'aux tissus par ce même nerf pour arrêter la production des molécules inflammatoires. Ces dernières seraient en particulier des cytokines, dont le TNF est un représentant.

Une telle hypothèse avait des implications profondes pour la compréhension des mécanismes de défense de l'organisme contre les infections et les blessures. Ces mécanismes s'appuieraient sur un ensemble de circuits réflexes contrôlant l'immunité et assurant que les processus inflammatoires restent dans les limites bénéfiques à la santé.

L'immunité, une question de réflexes ?

L'idée m'a semblé si évidente que j'ai pensé que quelqu'un l'avait eue avant moi. En consultant la littérature scientifique, j'ai découvert que les principaux organes du système immunitaire (tels le thymus, la rate, le foie, les ganglions lymphatiques et les poumons) sont tous innervés par des connexions en provenance du cerveau. Mais je n'ai trouvé aucune trace de recherches sur des circuits réflexes contrôlant l'immunité. En fait, l'antithèse était devenue un dogme médical. Des décennies durant, l'immunologie avait insisté sur la capacité du système immunitaire à protéger l'organisme indépendamment du système nerveux. Les études se focalisaient sur les divers types de globules blancs, mais pas sur les neurones.

J'ai nommé *réflexe inflammatoire* le circuit qui empêche la suractivité ou la sous-activité du système immunitaire. J'ai supposé qu'en cas de dysfonctionnement de ce circuit réflexe, les cytokines provoquaient les complications observées dans les maladies auto-immunes telles que la polyarthrite rhumatoïde.

Encore fallait-il tester cette idée. Pour ce faire, nous avons sectionné le nerf vague en divers endroits chez des rats anesthésiés. Le nerf part du tronc cérébral (à peu près à la hauteur des oreilles chez l'homme), descend le long du cou, traverse le thorax puis se prolonge dans l'abdomen, atteignant la rate ; tout au

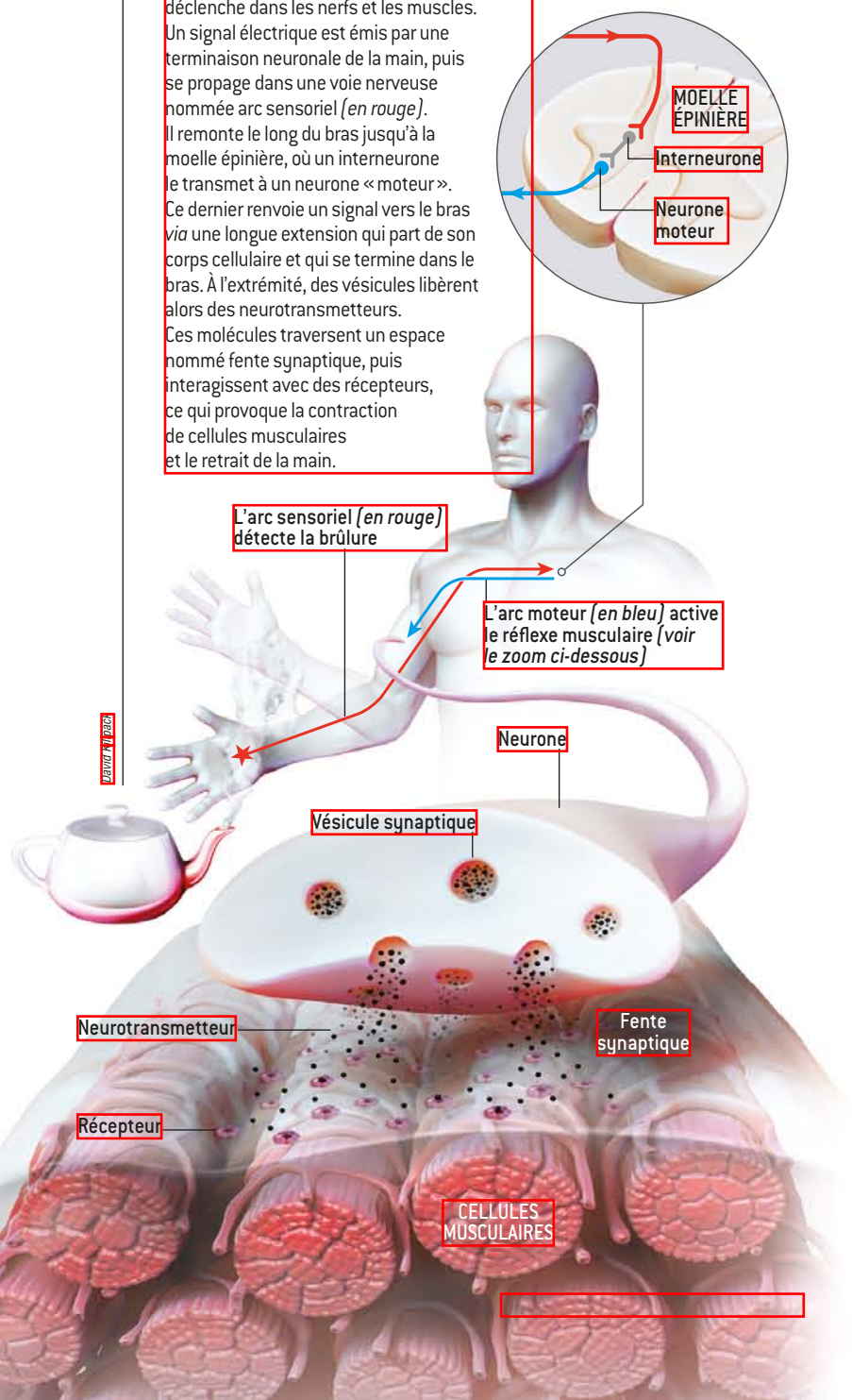
EXPLOITER LES RÉFLEXES POUR SOIGNER LE CORPS

Le système nerveux reçoit et traite des informations issues de l'ensemble de l'organisme, dont il assure le fonctionnement harmonieux. Il déclenche notamment les réflexes. Certains sont musculaires, tel celui qui fait retirer automatiquement la main quand on se la brûle, et d'autres régulent les réactions inflammatoires. On cherche à exploiter ces derniers pour de nouvelles thérapies, qui permettraient de soigner sans médicaments les processus inflammatoires pathologiques.

Des réflexes salvateurs

Si vous passez la main dans un jet de vapeur brûlante sorti d'une théière, vous aurez une réaction instantanée de retrait. C'est le résultat d'une série d'événements (un réflexe) qui se déclenche dans les nerfs et les muscles.

Un signal électrique est émis par une terminaison neuronale de la main, puis se propage dans une voie nerveuse nommée *arc sensoriel* (en rouge). Il remonte le long du bras jusqu'à la moelle épinière, où un interneurone le transmet à un neurone « moteur ». Ce dernier renvoie un signal vers le bras via une longue extension qui part de son corps cellulaire et qui se termine dans le bras. À l'extrémité, des vésicules libèrent alors des neurotransmetteurs. Ces molécules traversent un espace nommé *fente synaptique*, puis interagissent avec des récepteurs, ce qui provoque la contraction de cellules musculaires et le retrait de la main.

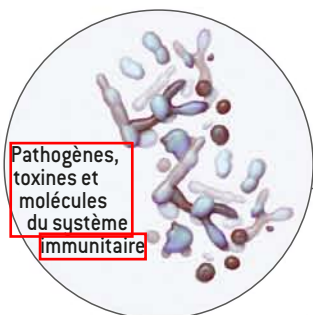


Une voie pour réguler les inflammations

Les réflexes ne sont pas que musculaires : ils régulent aussi l'activité de différents organes et les réactions inflammatoires déclenchées par le système immunitaire. Le nerf vague, qui échange des signaux avec de nombreux organes, est une courroie de transmission majeure dans ces processus. Des recherches récentes ont montré qu'en le stimulant au niveau du cou grâce à un dispositif médical, on peut stopper la production d'une molécule inflammatoire impliquée dans la polyarthrite rhumatoïde (une forme d'arthrite) et d'autres pathologies.

1 Arc sensoriel

Des agents pathogènes, des toxines ou même nos propres molécules immunitaires déclenchent l'envoi de signaux alertant le cerveau sur une réaction inflammatoire excessive. Ces signaux remontent le nerf vague jusqu'au tronc cérébral (en rouge).

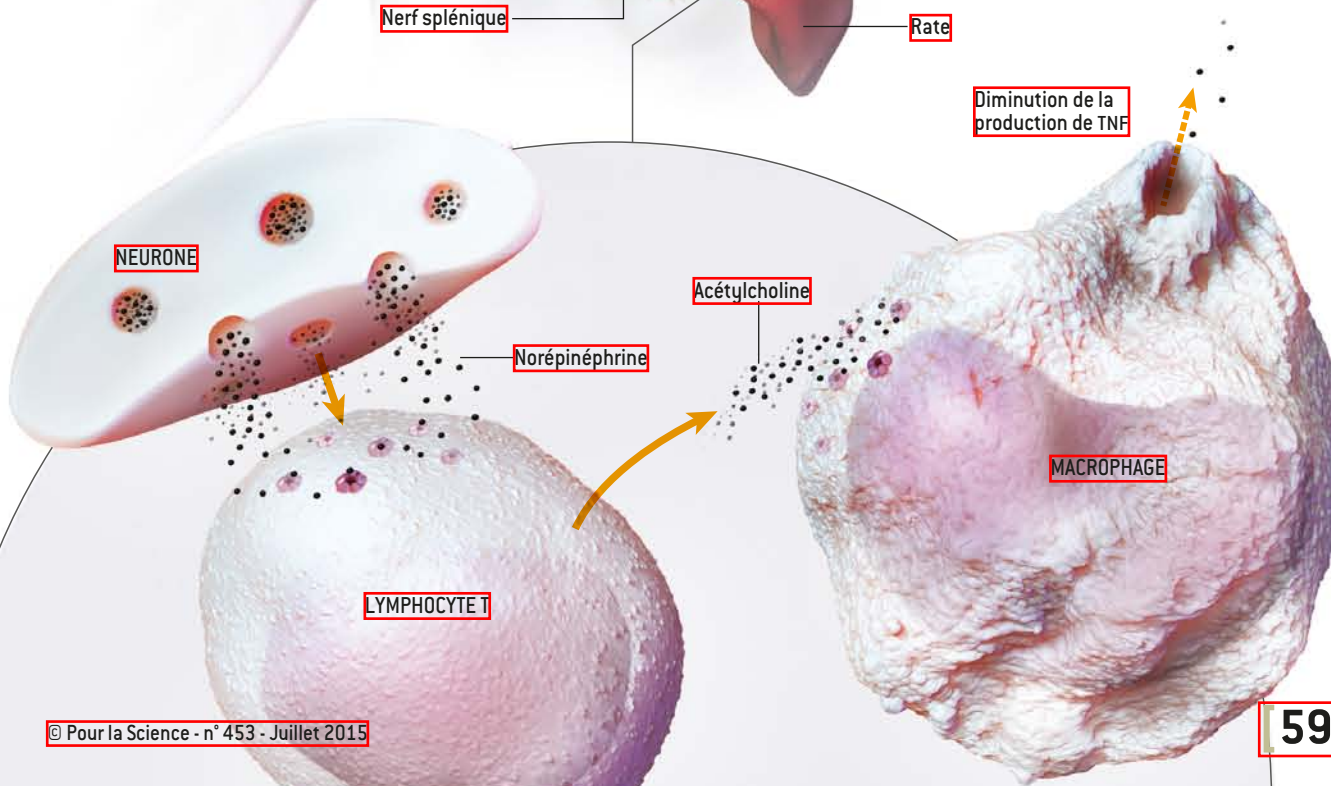


2 Arc moteur

Après avoir reçu le message sensoriel relayé par un interneurone, le neurone « moteur » transmet des commandes aux organes touchés, le long d'une autre voie du nerf vague (en bleu). Ces commandes arrivent par exemple à la rate via le ganglion cœliaque, d'où partent des fibres du nerf splénique. Elles peuvent être renforcées par un stimulateur électrique implanté.

3 Atténuation de l'inflammation

Dans la rate, des neurones libèrent le neurotransmetteur norépinephrine, qui incite les lymphocytes T voisins à sécréter un autre neurotransmetteur, l'acétylcholine. Cette dernière interagit avec les macrophages, diminuant leur production de TNF, une molécule inflammatoire. Stimuler cette voie est une piste de traitement de maladies liées à une surproduction de TNF.



BIBLIOGRAPHIE

D. Clarençon et al., Long term effects of low frequency (10 Hz) vagus nerve stimulation on EEG and heart rate variability in Crohn's disease : a case report, *Brain Stimulation*, vol. 7, pp. 914-916, 2014.

B. Bonaz et al., Vagus nerve stimulation : From epilepsy to the cholinergic anti-inflammatory pathway, *Neurogastroenterology & Motility*, vol. 25, pp. 208-221, 2013.

J. Andersson et K. J. Tracey, Reflex principles of immunological homeostasis, *Annual Review of Immunology*, vol. 30, pp. 313-335, 2012.

K. J. Tracey, The inflammatory reflex, *Nature*, vol. 420, pp. 853-859, 2002.

long de son parcours, il se connecte à la plupart des organes. Nous avons injecté du CNI-1493 dans le cerveau des rats au nerf sectionné, puis mesuré la concentration de TNF à divers endroits. Nos résultats ont confirmé qu'un nerf vague intact est indispensable pour que le CNI-1493 injecté dans le cerveau stoppe la production de TNF dans les organes.

L'inflammation stoppée avec une électrode

Pour prouver que le nerf vague transmet des signaux inhibiteurs du TNF, j'ai utilisé une électrode manuelle de neurostimulation. Le dispositif ressemble un peu à une lampe de poche, mais à son extrémité, il présente un petit fil électrique au lieu d'une ampoule. Placé sur un nerf, le fil délivre une charge électrique qui déclenche l'émission de potentiels d'action (des influx nerveux); ceux-ci se propagent ensuite le long des fibres.

Lorsque j'ai appliqué l'extrémité du stimulateur nerveux sur le nerf vague de rats anesthésiés, la production de TNF a cessé dans les organes. C'était la preuve qu'elle est bien régulée par des impulsions électriques provenant de ce nerf. Nous avons alors envisagé de traiter les états inflammatoires à l'aide d'un dispositif bio-électronique, dont j'ai dessiné un schéma au dos d'une serviette en papier dès le déjeuner. Mon croquis représentait un stimulateur relié à une électrode, placée

sur le nerf vague d'un patient atteint d'une maladie inflammatoire.

J'ai perdu la serviette, mais cela n'a pas empêché plusieurs collègues de mon laboratoire et d'autres institutions de poursuivre les recherches sur le réflexe inflammatoire pendant plus d'une décennie. Nombre des études ont ciblé la rate, qui est l'un des principaux sites de production de TNF. Le fonctionnement de ce réflexe est maintenant clarifié (voir l'encadré page 58). Le nerf vague envoie des signaux du cerveau vers la rate, le foie, le système gastro-intestinal, le cœur et d'autres organes. Ces signaux déclenchent la libération d'acétylcholine, un neurotransmetteur, par des cellules immunitaires appelées lymphocytes T. L'acétylcholine se fixe sur des récepteurs à la surface d'autres cellules immunitaires, les macrophages, qui, en temps normal, produisent des molécules inflammatoires telles que le TNF et l'IL-1. Cet amarrage provoque l'arrêt de la production en inhibant deux voies moléculaires, qui gouvernent respectivement l'activité des gènes codant le TNF et la libération d'IL-1 et d'autres molécules inflammatoires.

Ainsi, une réponse immunitaire peut être contrôlée par le système nerveux. Lorsqu'une infection ou une blessure crée un déséquilibre biochimique, le cerveau en est informé et des neurones renvoient des signaux aux tissus touchés. Ces signaux régulent la libération de TNF, d'IL-1 et d'autres molécules inflammatoires dans les tissus et la circulation sanguine.

De nouvelles techniques d'observation et de contrôle de ces phénomènes physiologiques se développent rapidement. Aujourd'hui, on mesure les quantités de cytokines pour surveiller l'évolution de l'inflammation. À l'avenir, on déchiffrera les signaux électriques véhiculés par les nerfs pour diagnostiquer et contrôler les pathologies inflammatoires. Comme on l'a vu, la carte des circuits neuronaux qui régulent les réponses immunitaires est accessible en sectionnant et en stimulant des nerfs, ainsi qu'en cherchant les voies par lesquelles les gènes sont activés et les molécules immunitaires produites. Les résultats obtenus jusqu'ici suggèrent que ces approches seront efficaces contre diverses pathologies, telles que la polyarthrite rhumatoïde, les maladies inflammatoires chroniques de l'intestin, la sclérose en plaques et peut-être même le diabète et le cancer.

LES RÉFLEXES, DU VER À L'HOMME

Les réflexes sont partout et ils sont apparus très tôt dans l'évolution. Les animaux primitifs, dépourvus de cerveau ou de conscience, dépendent d'eux pour trouver leur nourriture et leurs partenaires, éviter les prédateurs et se défendre contre les infections et les blessures. Par exemple, *Caenorhabditis elegans*, un petit ver, se nourrit de bactéries présentes dans le sol, mais certaines sont pathogènes pour lui. Quelques neurones parmi les 302 qu'il possède sont capables de les détecter. Ils activent un circuit réflexe qui contrôle la réponse immunitaire, l'empêchant de devenir toxique pour le ver lui-même.

MÊME LES NÉMATODES

Caenorhabditis elegans, de petits vers longs d'environ un millimètre, ont des réflexes qui contrôlent leur réponse immunitaire.



Premiers succès contre les maladies inflammatoires de l'intestin

La stimulation du nerf vague ne sert pas qu'à lutter contre la polyarthrite rhumatoïde. Elle en est au stade des essais cliniques pour d'autres maladies inflammatoires qui endommagent l'intestin. On en compte deux principales, la maladie de Crohn et la rectocolite hémorragique.

Ces maladies touchent plus de 200 000 personnes en France, souvent des sujets jeunes. Elles causent des lésions du tube digestif, aux conséquences désagréables : douleurs abdominales, diarrhée, sang dans les selles, amaigrissement, lésions anales (pour la maladie de Crohn)...

Comment bloquer l'inflammation ? Aujourd'hui, on utilise des médicaments qui se lient à

la molécule inflammatoire TNF, l'un de ses principaux vecteurs, et la neutralisent. Le traitement est efficace, mais il a des effets secondaires lourds, ouvrant notamment la voie aux infections. On cherche alors à empêcher la libération de TNF en stimulant électriquement le nerf vague.

Ce nerf, le plus long de l'organisme, assure notamment une liaison bidirectionnelle

entre le cerveau et le tube digestif. Quelque 80 % de ses fibres font remonter les informations vers l'encéphale et 20 % les transmettent dans l'autre sens, stimulant par exemple la sécrétion d'acide dans l'estomac.

En 2000, l'équipe de Kevin Tracey, l'auteur de l'article, a montré que le nerf vague transmet des commandes cérébrales qui inhibent la libération de TNF dans l'intestin. C'est ce qui nous a donné l'idée de les stimuler pour traiter les maladies inflammatoires chroniques de l'intestin, et notamment la maladie de Crohn. Par cette méthode,

nous avons réussi à soigner un modèle de cette maladie chez le rat. Depuis 2012, nous testons la neurostimulation vagale pour soigner cette maladie chez l'homme, avec un dispositif envoyant dix impulsions électriques par seconde. Nous avons implanté le dispositif sur huit patients et, quelques mois plus tard, les symptômes se sont améliorés chez bon nombre d'entre eux. Chez certains, la muqueuse intestinale a même cicatrisé.

- Bruno Bonaz
Directeur de l'équipe Stress et interactions neuro-digestives au Grenoble Institut des Neurosciences (GIN, Inserm U836)

En 2011, à Mostar, en Bosnie-Herzégovine, j'ai rencontré celui qui deviendrait le premier patient traité par un stimulateur du nerf vague (une version plus perfectionnée de mon petit dispositif manuel), treize ans après l'esquisse dessinée sur une serviette. Atteint de polyarthrite rhumatoïde, il m'a confié que ses mains, ses pieds et ses genoux lui faisaient si mal qu'il passait des journées entières allongé sur le canapé, incapable de travailler, de jouer avec ses enfants et d'apprécier la vie. Les traitements médicamenteux étaient soit inefficaces, soit trop chers pour lui. Il a accepté de participer à un essai clinique mené par Paul-Peter Tak, un rhumatologue de l'Université d'Amsterdam et de l'entreprise GlaxoSmithKline. Des neurochirurgiens ont implanté un stimulateur du nerf vague juste en dessous de sa clavicule et l'homme est rentré chez lui.

De la quasi-paralysie au tennis

En quelques jours, il s'est senti mieux. Après quelques semaines, ses douleurs avaient presque disparu. Il s'est mis au ping-pong, puis au tennis. Après qu'il se fut blessé au genou, les cliniciens lui ont déconseillé les efforts violents, mais cela mesure la distance parcourue : cette personne pouvait à peine bouger quelques semaines plus tôt ! Aujourd'hui, près de quatre ans

après l'intervention, il reste guéri, libéré de toute menace liée aux effets secondaires des médicaments (les stéroïdes, testés par le patient, peuvent par exemple diminuer la résistance aux infections ou favoriser le diabète et l'hypertension).

Son cas a été présenté en novembre 2012 au Congrès international de rhumatologie de l'ACR (*American College of Rheumatology*) par Paul-Peter Tak et sa collègue de l'Université d'Amsterdam Frieda Koopman, ainsi que par Ralph Zitnik, de SetPoint Medical, une société que j'ai cofondée pour développer la régulation du réflexe inflammatoire par la stimulation nerveuse. Parmi les huit personnes traitées pour une polyarthrite rhumatoïde invalidante de longue durée, mon patient et cinq autres ont vu leur état s'améliorer notablement après l'implantation d'un stimulateur du nerf vague.

D'autres études sont en cours pour évaluer l'efficacité de cette technique contre les maladies inflammatoires de l'intestin (voir l'encadré ci-dessus). Plus généralement, la médecine bio-électronique commence à prendre son envol. Mi-janvier 2015, l'Agence américaine des aliments et des médicaments (la FDA) a approuvé un dispositif qui stimule le nerf vague pour déclencher la satiété chez des patients obèses. Le premier sommet de médecine bio-électronique s'est tenu en 2013 et une feuille de route des recherches à mener dans ce domaine est en cours d'élaboration. L'entreprise

GlaxoSmithKline a engagé 50 millions de dollars dans ces recherches et a lancé un prix de l'innovation d'un million de dollars. En outre, les Instituts de la santé américains (NIH) ont récemment créé un programme doté de 248 millions de dollars, SPARC (Stimulation de l'activité périphérique pour soulager l'état de santé), afin d'améliorer les techniques bio-électroniques.

Ces techniques remplaceront-elles les médicaments ? Je pense qu'elles se substitueront à certains d'entre eux et en compléteront d'autres : les antibiotiques et les autres médicaments anti-infectieux, notamment, ne devraient pas disparaître. Je m'attends en tout cas à ce que les sociétés pharmaceutiques augmentent leurs investissements dans ce domaine.

Nous sommes arrivés à un moment clef de l'histoire de la médecine. Nos outils sont devenus assez fins pour détecter les circuits réflexes qui contrôlent le système immunitaire et que l'on pourrait exploiter pour des traitements. Au début du XX^e siècle, Sherrington postulait que l'espèce humaine s'était imposée au sein du règne animal grâce à sa capacité à maîtriser ses réflexes primitifs, *via* des régions cérébrales apparues tardivement dans l'évolution. Il ignorait alors que nous pousserions encore plus loin le contrôle des réflexes, en développant des techniques qui les utilisent pour réguler la réponse immunitaire. Ce temps-là est venu. ■

Les fossiles de la Voie lactée

Kathryn Johnston

Pour comprendre comment la Voie lactée s'est formée, les astronomes traquent les vestiges de petites galaxies déchirées et avalées par notre galaxie il y a fort longtemps.

LA VOIE LACTÉE, un ensemble de centaines de milliards d'étoiles, aurait absorbé de nombreuses galaxies naines au cours du temps.



L'AUTEURE



Kathryn JOHNSTON
est professeure
et dirige
le département
d'astronomie

de l'Université Columbia,
à New York (États-Unis).

L'ESSENTIEL

■ La force gravitationnelle de la Voie lactée déchire lentement les galaxies naines en orbite autour d'elle.

■ Ces galaxies naines forment de longues queues d'étoiles : les courants stellaires.

■ Les astronomes utilisent ces « fossiles » de galaxies pour étudier le passé de la Voie lactée.

■ L'analyse de ces courants étaye la théorie selon laquelle la Voie lactée a grossi peu à peu en avalant des galaxies plus petites.

Photo : NASA/ESA, Hubble, ESO, G. Gilman

Les images des galaxies spirales, telle la Voie lactée, sont trompeuses. Elles donnent l'impression d'une structure régulière et tranquille à l'histoire peu mouvementée. En réalité, ces galaxies ont un appétit d'ogre. Elles ont grandi en phagocytant de petites galaxies voisines. Des astronomes ont récemment confirmé qu'au fil du temps, la Voie lactée a attiré et englobé de nombreuses autres galaxies plus petites dont elle s'est approprié les étoiles.

Nous connaissons au moins une trentaine de galaxies dites « naines » en orbite autour de la Voie lactée. Elles sont cent à un million de fois plus petites que la Voie lactée. Certaines n'ont été découvertes qu'au début de l'année 2015 et il en reste probablement des dizaines à découvrir. Les galaxies satellites actuelles ne représenteraient qu'une petite fraction de celles qui ont existé, les autres ayant été capturées et avalées par la Galaxie depuis bien longtemps. Cette ingestion a débuté quand la Voie lactée était plus jeune et plus petite. Elle se poursuit encore aujourd'hui : les galaxies satellites observables finiront par être avalées elles aussi.

Longtemps après la disparition des victimes de l'appétit gravitationnel de la Voie lactée, on en perçoit des traces sous la forme de traînées d'étoiles s'étirant sur le ciel, nommées courants stellaires. Depuis une quinzaine d'années, les chercheurs d'un domaine relativement nouveau, l'archéologie galactique, ont mis en évidence un grand nombre de tels courants, parfois à peine visibles. En étudiant ces « fossiles », témoins du passé de la Galaxie, les astronomes reconstituent les détails de l'histoire de la Voie lactée et recueillent des indices sur la manière dont les galaxies spirales se forment et évoluent.

Les astronomes-archéologues ont déjà confirmé l'un des processus de croissance de la Voie lactée et des galaxies jeunes en général. La découverte de multiples courants d'étoiles issus de satellites disparus depuis longtemps étaye la théorie largement admise selon laquelle notre galaxie était initialement petite et a grandi en ingérant de la masse par grosses bouchées : on parle de formation hiérarchique des structures. Bien que nombre de détails de ce scénario restent à clarifier, il révèle peu à peu la biographie de la Voie lactée.

La théorie de formation hiérarchique des galaxies stipule que le principal moteur

de la croissance des grandes galaxies ressemblant à la Voie lactée n'est pas la matière baryonique (les étoiles, le gaz et la poussière que nous pouvons observer, et qui sont constitués des mêmes particules que vous et moi). Au lieu de cela, la force motrice est liée aux vastes « halos » de matière noire invisible, des sortes de nuages sphériques. Grâce à des observations indirectes, les astrophysiciens estiment que les halos de matière noire sont beaucoup plus massifs et étendus que les galaxies de matière visible normale qu'ils peuvent renfermer. On pense qu'il se forme initialement de petits halos de matière noire qui s'agglomèrent progressivement en halos plus gros. Les galaxies qu'ils contiennent se rapprochent alors les unes des autres et les grosses galaxies avalent les petites.

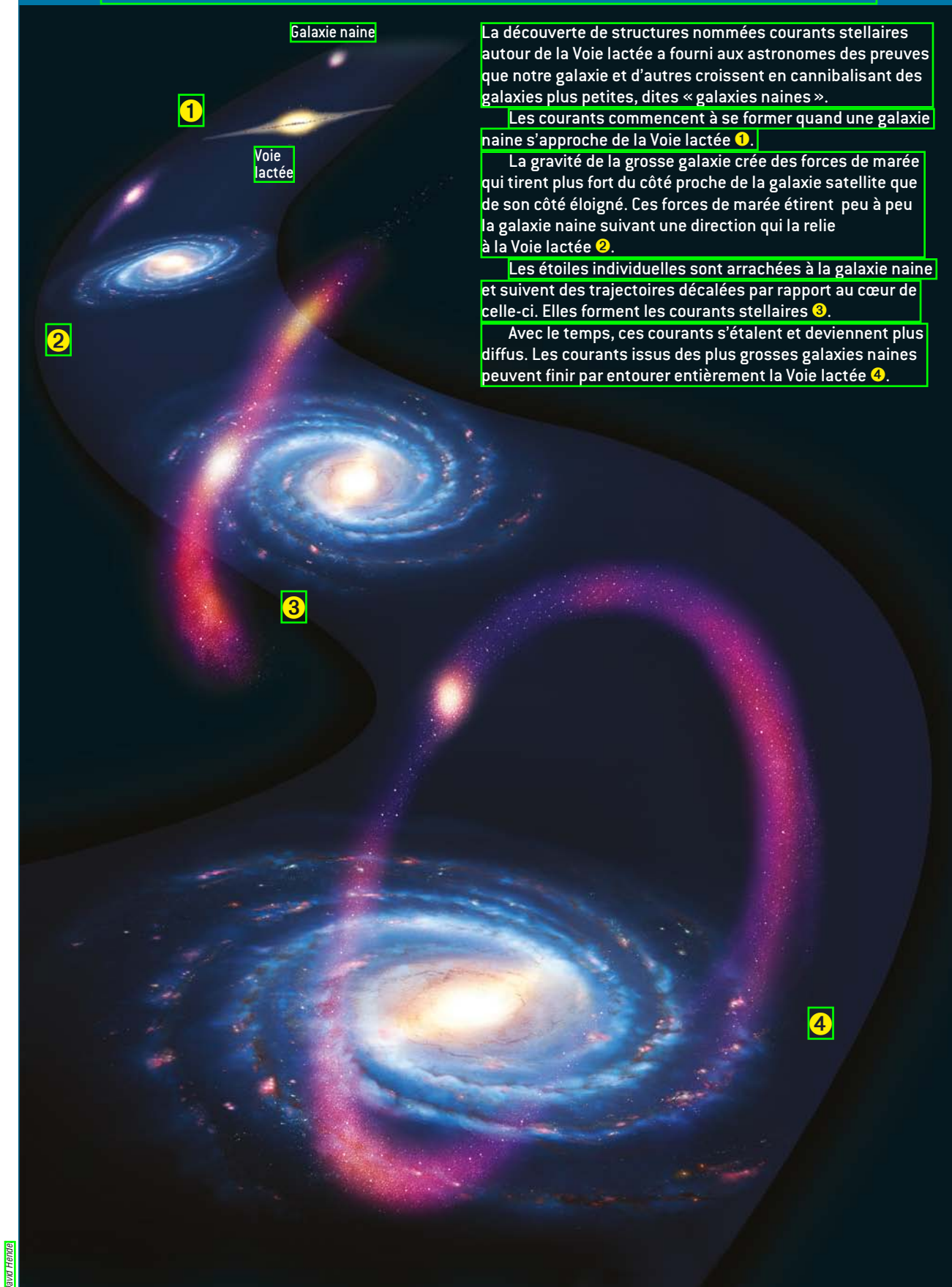
La nature de la matière noire reste à découvrir (nous ne la percevons qu'à travers son attraction gravitationnelle sur tout le reste). Néanmoins, la plupart des astronomes pensent que cette représentation est juste pour les galaxies spirales. De nombreuses observations sur les amas de galaxies et leur dynamique ne s'expliquent qu'avec la présence de matière noire.

Construire une galaxie avec la matière noire

Cependant, si la matière noire crée les conditions d'agglomération des galaxies, les détails de leur formation sont dictés par les forces en jeu dans la matière baryonique. En effet, le halo de matière noire attire vers son centre la matière baryonique sous forme de gaz, par l'intermédiaire de la force gravitationnelle. Le gaz devient de plus en plus dense et s'effondre dans certaines régions au point de former des étoiles. Quand ces étoiles arrivent en fin de vie, elles expulsent de la matière en restituant leurs atomes au gaz de la galaxie (et éventuellement au-delà) et déclenchent souvent la formation d'une nouvelle génération d'étoiles à partir de la poussière et du gaz restants. C'est vraisemblablement de cette façon que se forme et se renouvelle la population stellaire du cœur de la Voie lactée (le « bulbe ») et de ses bras spiraux (le « disque »).

La Voie lactée comporte aussi une immense sphère d'étoiles plus diffuses entourant le bulbe et le disque, nommé halo galactique (à ne pas confondre avec le halo

COMMENT UNE GALAXIE NAINE SE TRANSFORME EN COURANTS STELLAIRES



La découverte de structures nommées courants stellaires autour de la Voie lactée a fourni aux astronomes des preuves que notre galaxie et d'autres croissent en cannibalisant des galaxies plus petites, dites « galaxies naines ».

Les courants commencent à se former quand une galaxie naine s'approche de la Voie lactée **1**.

La gravité de la grosse galaxie crée des forces de marée qui tirent plus fort du côté proche de la galaxie satellite que de son côté éloigné. Ces forces de marée étirent peu à peu la galaxie naine suivant une direction qui la relie à la Voie lactée **2**.

Les étoiles individuelles sont arrachées à la galaxie naine et suivent des trajectoires décalées par rapport au cœur de celle-ci. Elles forment les courants stellaires **3**.

Avec le temps, ces courants s'étalent et deviennent plus diffus. Les courants issus des plus grosses galaxies naines peuvent finir par entourer entièrement la Voie lactée **4**.

de matière noire, beaucoup plus étendu). Une part de ces étoiles pourrait être issue de galaxies naines détruites depuis longtemps. On pense que la fraction d'étoiles initialement nées dans d'autres galaxies et finalement incorporées à la nôtre est faible, tout au plus un pour cent sur les centaines de milliards d'étoiles que compte la Voie lactée.

D'après la théorie de la formation hiérarchique des galaxies, les étoiles rejoignent le halo galactique dans une séquence d'événements que l'on peut résumer ainsi : tandis que la galaxie naine tourne autour de la Voie lactée, elle ressent l'attraction gravitationnelle de la grande galaxie, qui se renforce à mesure que la distance diminue (voir la figure page 65). La matière de la galaxie satellite – étoiles, gaz, poussière et matière noire – située du côté le plus proche de la Voie lactée est soumise à une attraction légèrement

supérieure à celle exercée sur la matière se trouvant du côté le plus éloigné. Ainsi, la galaxie naine est étirée le long de la direction qui la relie à la grande galaxie.

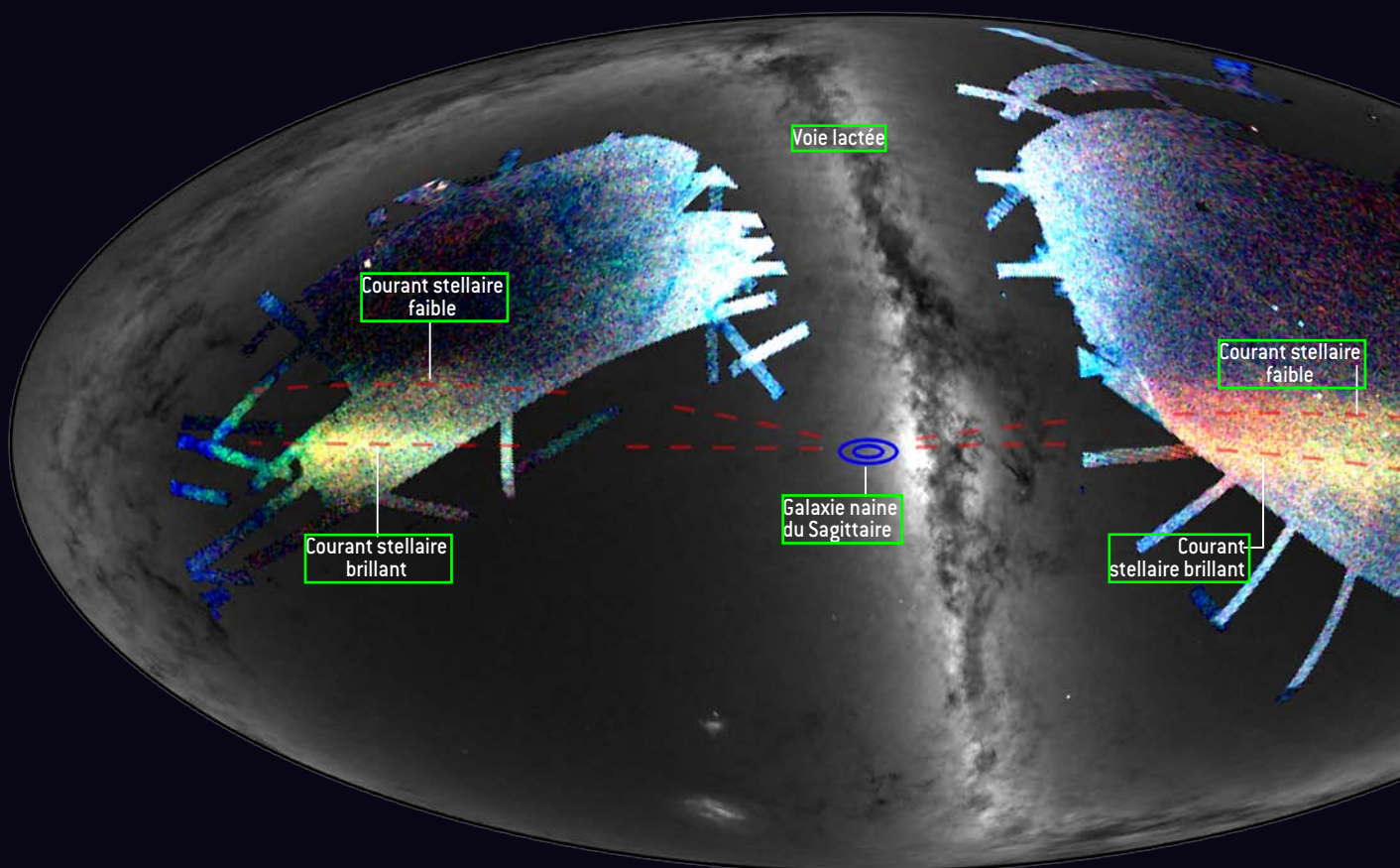
L'étirement résulte des forces dites de marée – similaires à celles qui font se soulever les océans sous l'influence de la Lune. Les forces de marée de la Voie lactée sur ses satellites sont assez puissantes pour extraire des étoiles de la galaxie naine. Une fois arrachées, les étoiles restent sous l'emprise de la Voie lactée et continuent sur une trajectoire légèrement décalée par rapport à l'orbite du cœur de la galaxie satellite. Au fil du temps, le léger décalage entraîne un étalement continu des débris, qui deviennent plus diffus et s'éloignent de la galaxie satellite pour former les courants stellaires.

Les astronomes ont longtemps cherché une confirmation de l'existence de ces courants stellaires. C'est désormais

chose faite. La découverte de nombreux courants d'étoiles a révélé que la Voie lactée a commencé à dévorer ses voisines il y a plusieurs milliards d'années, quand elle était encore jeune, et qu'elle continue d'absorber des galaxies naines à l'heure actuelle. Bien que les traces de tels courants d'étoiles issues de compagnons galactiques nains aient essentiellement été détectées autour de notre propre galaxie, ces courants existent probablement autour de toutes les galaxies spirales, même s'ils sont trop ténus pour être détectés à de telles distances.

La traque aux courants stellaires

Toutefois, de nombreux détails du modèle restaient mal définis, comme l'époque précise à laquelle la Voie lactée a absorbé la plupart de ses galaxies satellites, la



fréquence d'ingestion de galaxies naines et le temps nécessaire pour s'approprier leurs étoiles. Les archéologues galactiques ont donc cherché à localiser davantage de courants stellaires, afin de les étudier en détail, et à repérer des vestiges de courants disparus.

Ils ont exploité plusieurs approches pour trouver les courants d'étoiles de la Voie lactée. En premier lieu, ils ont cherché des ensembles d'étoiles situées à des distances comparables qui se regroupent en longs filaments. Pour cela, ils avaient besoin d'une bonne carte tridimensionnelle des étoiles de la Galaxie, qui indique la position d'autant d'étoiles que possible dans toutes les directions.

Les archéologues galactiques se sont ainsi penchés sur les données du projet SDSS (*Sloan Digital Sky Survey*). Un télescope est dédié à ce relevé à l'observatoire d'Apache Point, au Nouveau-Mexique.

Les astronomes ont ainsi créé une base de données de plus de 80 millions d'étoiles de la Voie lactée réparties sur plus d'un quart du ciel, avec des renseignements sur leur position, leur couleur et d'autres caractéristiques. Le nombre important d'étoiles de ce catalogue constitue un excellent « site de fouille » pour chercher des fossiles, témoins du passé de la Voie lactée.

Les chercheurs y ont repéré des étoiles susceptibles d'être à la bonne distance pour se trouver dans le halo galactique. Ils ont identifié près d'un million d'étoiles qui seraient des intruses potentielles, ayant appartenu à une galaxie depuis longtemps défunte. Et, parmi ces étoiles, ils ont retrouvé des courants stellaires en ciblant des zones plus denses en étoiles et en forme de queue.

Les astronomes savaient à quoi ces queues ressembleraient, en partie grâce à des simulations que j'avais créées et publiées en 2005 avec le cosmologiste James Bullock de l'Université de Californie à Irvine. Nous avons utilisé notre compréhension de la formation hiérarchique des halos de matière noire, combinée à la physique des forces de marée, pour prédire la taille et l'étalement des courants stellaires créés lors de l'absorption de nombreuses galaxies naines par la Voie lactée en formation. Nous savions, par exemple, que la queue devait s'étaler en amont et en aval de la galaxie, contrairement à celle d'une comète dont les débris sont repoussés dans une seule direction par le vent solaire.

La première preuve convaincante d'un courant stellaire étendu a été obtenue en 2003, quand une équipe d'astronomes dirigée par Steve Majewski, de l'Université de Virginie, a découvert des queues géantes émanant du plus proche satellite connu de la Voie lactée, la galaxie naine du Sagittaire. L'analyse reposait sur les données d'un projet similaire au SDSS, mais dans l'infrarouge, le projet 2MASS (*Two Micron All Sky Survey*). Les courants se situent près de l'orbite du Sagittaire et contiennent presque autant d'étoiles qu'il n'en reste dans la galaxie du Sagittaire elle-même. Les queues sont si longues qu'elles encerclent presque la Voie lactée. Les astronomes avaient pris la Galaxie en flagrant délit.

Depuis cette découverte, les archéologues galactiques ont mis au jour une douzaine d'autres courants stellaires autour de la Voie lactée dans le catalogue SDSS. D'après la longueur des queues du Sagittaire, on estime que la galaxie naine perd ses étoiles depuis deux à trois milliards d'années. Les autres courants semblent également âgés de quelques milliards d'années. Ces

Le catalogue SDSS constitue un bon « site de fouille » pour chercher des témoins du passé de la Voie lactée

observations suggèrent que la Voie lactée digérait des galaxies plus souvent au début de son histoire, et que ce rythme a decru récemment à mesure que le nombre de galaxies naines disponibles diminuait.

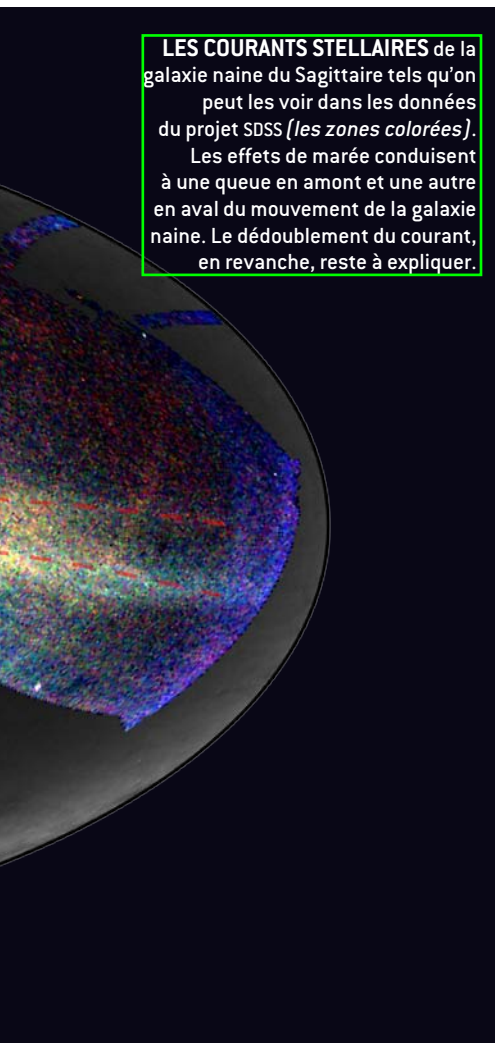
La découverte des courants stellaires est en accord avec les prédictions de la théorie de formation hiérarchique. Cependant, les courants stellaires connus ne représentent probablement qu'une fraction de ceux qui existent. De nombreux autres plus anciens, trop diffus et discrets pour être vus avec les moyens actuels, renferment sans doute des informations sur le passé de notre galaxie.

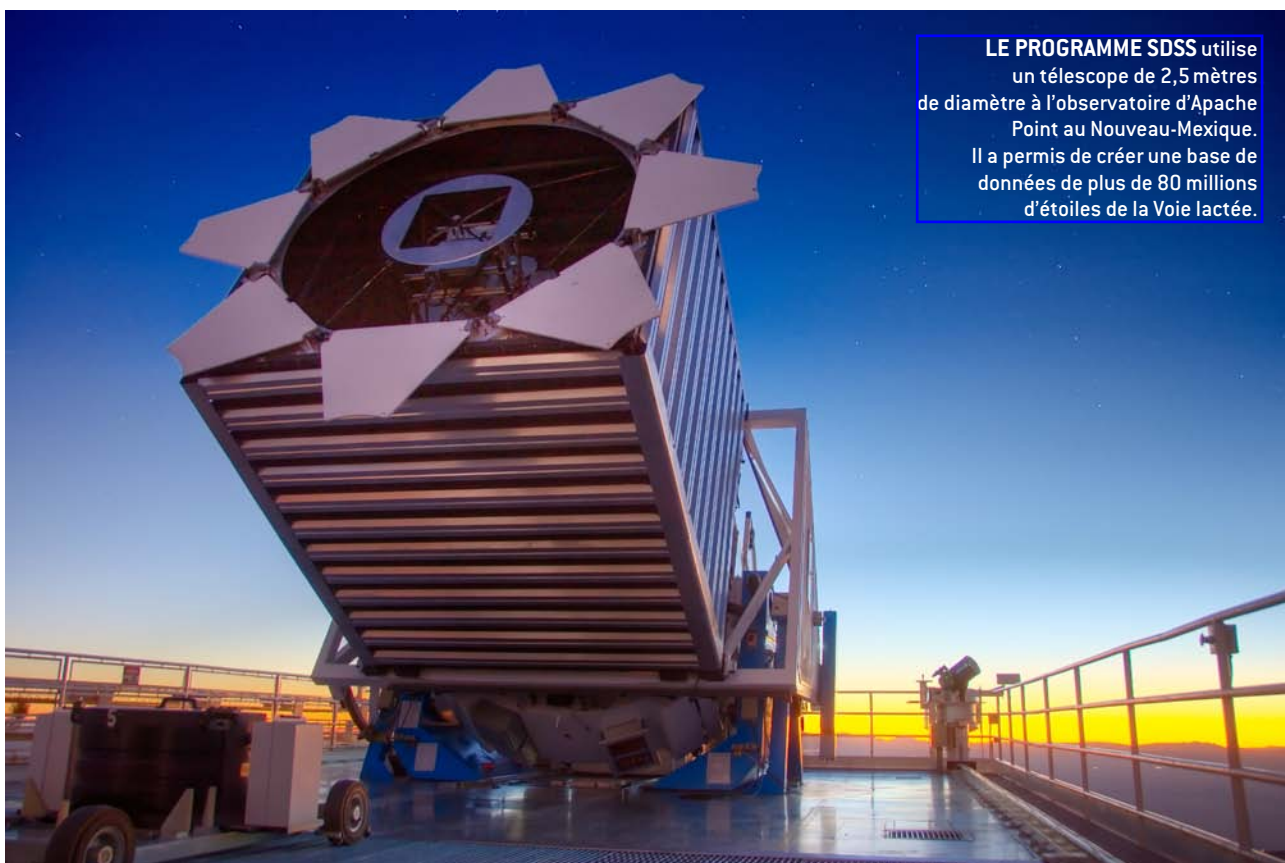
Nouveaux outils de fouille

De fait, en se fondant uniquement sur la position des étoiles pour trouver les courants stellaires, on passe à côté de nombreuses queues anciennes. En effet, même si les différences de propriétés orbitales entre les étoiles sont initialement petites, les courants finissent par s'allonger, diffuser et s'estomper au point de perdre toute structure évidente au bout de quelques milliards d'années.

Les astronomes cherchent maintenant à exploiter d'autres propriétés stellaires pour trouver des courants plus diffus, ainsi que des vestiges de courants disloqués. Ces ensembles d'étoiles aideront à explorer l'époque la plus active de formation des galaxies, il y a plus de dix milliards d'années, c'est-à-dire dans les quelques milliards d'années qui ont suivi le Big Bang, quand la plupart des étoiles de l'Univers se sont formées. À cette époque, ce ne sont

LES COURANTS STELLAIRES de la galaxie naine du Sagittaire tels qu'on peut les voir dans les données du projet SDSS (*les zones colorées*). Les effets de marée conduisent à une queue en amont et une autre en aval du mouvement de la galaxie naine. Le dédoublement du courant, en revanche, reste à expliquer.





LE PROGRAMME SDSS utilise un télescope de 2,5 mètres de diamètre à l'observatoire d'Apache Point au Nouveau-Mexique. Il a permis de créer une base de données de plus de 80 millions d'étoiles de la Voie lactée.

pas seulement quelques petites galaxies et amas stellaires, mais des centaines, qui sont happés pour former la Voie lactée.

L'une des manières de traquer les restes de galaxies défunctes consiste à rechercher des étoiles ayant des orbites similaires. Si la dispersion des étoiles d'un courant stellaire a commencé il y a longtemps, leur position actuelle ne permet plus de les reconnaître comme appartenant au même courant. En revanche, nous pouvons utiliser leur mouvement pour identifier les étoiles qui ont fait autrefois partie de la même galaxie satellite et pour apprendre comment elles ont rejoint la Voie lactée. En effet, leur mouvement devrait garder certaines similarités. C'est l'un des nombreux objectifs du satellite *Gaia* de l'Agence spatiale européenne, lancé en décembre 2013.

Gaia consacrera les quatre prochaines années à enregistrer des données pour les archéologues galactiques en mesurant la distance, la position et le mouvement de plus d'un milliard d'étoiles. Cette moisson de données permettra aux astronomes de calculer l'orbite complète de chaque étoile. Ainsi, nous pourrons sélectionner

■ BIBLIOGRAPHIE

N. Libeskind, **Les galaxies naines et la toile cosmique**, *Pour la Science*, n° 439, mai 2014.

J. S. Bullock et K. V. Johnston, **Tracing galaxy formation with stellar halos. 1. Methods**, *Astrophysical Journal*, vol. 635, pp. 931-949, 2005.

K. Freeman et J. Bland-Hawthorn, **The new galaxy : Signature of its formation**, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, vol. 40, pp. 487-537, 2002.

des astres présentant des propriétés orbitales similaires et ayant probablement la même galaxie d'origine, et cela même si les positions dans le ciel n'indiquent plus leur parenté.

Comparer les compositions chimiques

La composition chimique des étoiles est encore une autre façon de traquer leur lieu de naissance et donc un autre moyen potentiel de découvrir les courants stellaires. La composition globale des étoiles évolue constamment en raison de la fusion nucléaire qui anime le cœur de l'astre, transformant les éléments légers en éléments plus lourds. Mais la fusion nucléaire ne se produit que dans les régions centrales les plus denses et chaudes de l'étoile. L'atmosphère de l'étoile, qui est la région accessible aux instruments des astronomes, serait quasi identique au gaz d'où elle a émergé.

Kenneth Freeman, de l'Université nationale australienne, à Canberra, et Joss Bland-Hawthorn, de l'Université de Sydney, utilisent cette information pour regrouper des étoiles présentant la même empreinte

chimique et pour reconstituer l'amas de gaz qui les a vus naître, indépendamment de leur position actuelle dans le ciel.

Fondée sur la seule composition chimique, la méthode de Kenneth Freeman et Joss Bland-Hawthorn n'est pas suffisante pour identifier des étoiles associées à une galaxie naine, car ces galaxies contiennent probablement des étoiles nées dans divers amas de compositions chimiques distinctes. Néanmoins, en complétant cette approche avec les connaissances sur la formation des galaxies et des étoiles, on détermine certains aspects de l'accrétion des galaxies naines par la Voie lactée.

Tout d'abord, les étoiles se formant plus tardivement au sein d'une galaxie donnée contiennent généralement plus d'éléments lourds que celles qui se sont formées au début, parce que le matériau qui les constitue a déjà été enrichi avec les restes des générations précédentes d'étoiles. Ensuite, le processus d'enrichissement dépend d'écoulements de gaz qui sont gouvernés en partie par l'influence gravitationnelle du halo de matière noire de la galaxie.

Ces deux effets suggèrent que des galaxies de masses proches happées et détruites à peu près en même temps devraient fournir une collection d'étoiles dont la distribution de composition chimique est similaire, c'est-à-dire ayant le même éventail d'abondances pour de nombreux éléments. À l'inverse, des différences sur la masse des galaxies naines ou sur l'époque d'accrétion vont conduire à des variations de distribution chimique des étoiles entrant dans leur composition. Par conséquent, la distribution globale de composition chimique des étoiles autour de la Voie lactée nous permettrait de définir des classes de galaxies de même masse et avalées en même temps, puis d'estimer la part des étoiles de la galaxie provenant de chaque classe, même si on ne pourra pas isoler une galaxie individuelle.

Duane Lee a exploré cette voie quand il était étudiant dans mon équipe à l'Université Columbia. Ses travaux préliminaires suggèrent que les marqueurs chimiques seraient assez sensibles pour que l'on retrouve les contributions des galaxies naines, même les

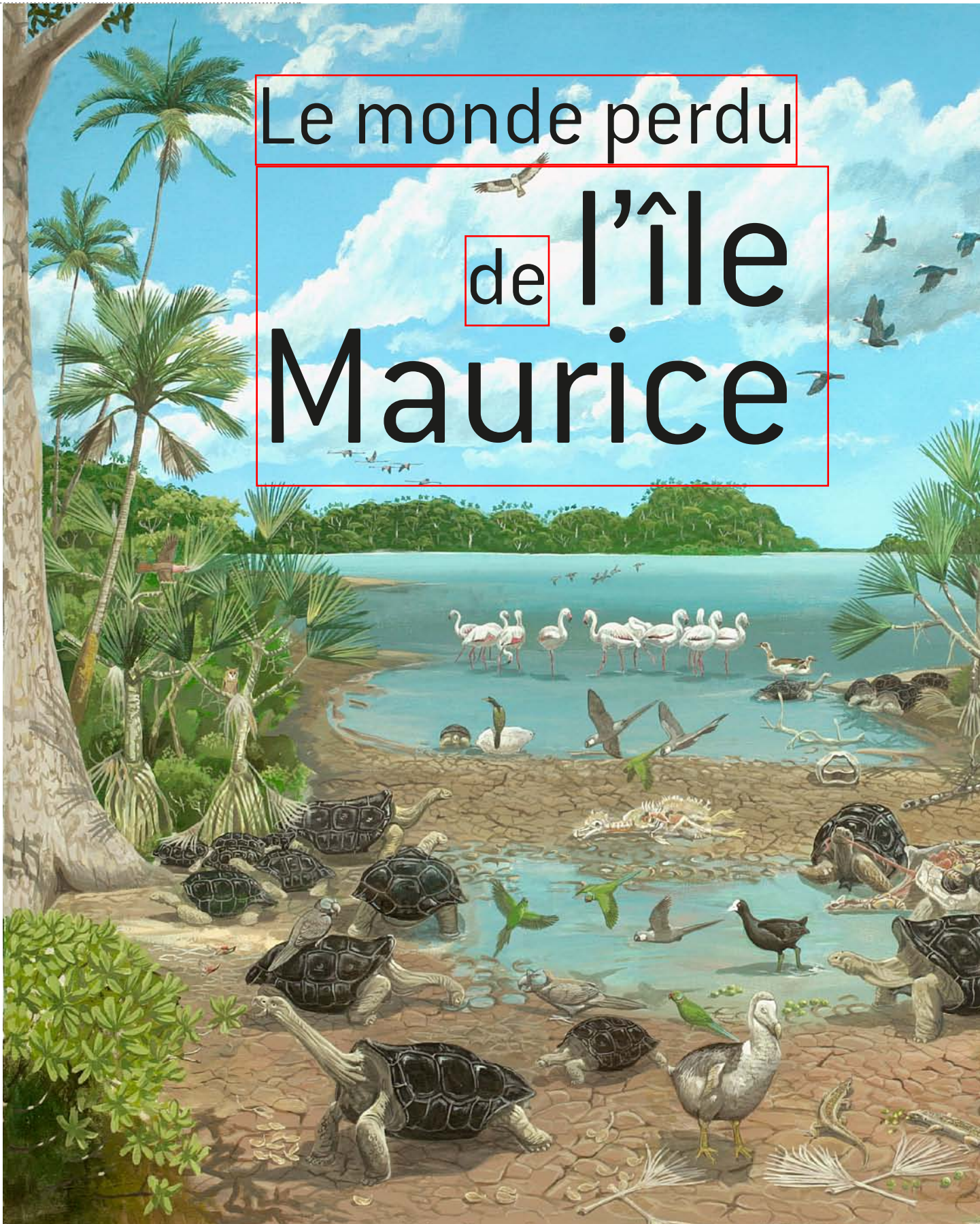
plus petites, détruites très tôt dans l'histoire de la galaxie. En sachant à quelle époque est arrivée chaque classe d'étoiles, nous pouvons commencer à esquisser une séquence de cannibalisations et à retracer l'histoire de l'accrétion de la Voie lactée, en remontant aux périodes les plus anciennes. Plusieurs équipes d'astronomes mesurent actuellement les compositions chimiques de millions d'étoiles. Le premier groupe est celui du relevé GALAH (*GALactic Archeology with HERMES*) dirigé par Kenneth Freeman et Joss Bland-Hawthorn. Un autre est APOGEE (*APO Galactic Evolution Experiment*), démarré en 2011 dans le cadre du relevé SDSS. Le projet *Gaia*-ESO de l'Observatoire européen austral étudiera plus de 100 000 étoiles et utilisera les données du satellite *Gaia*.

Les archéologues galactiques commencent seulement à réaliser qu'étudier la Voie lactée revient en quelque sorte à étudier un millier de galaxies – tous ces objets plus petits qui se sont combinés pour former notre grande galaxie. Les fossiles de ces galaxies disparues ne nous renseignent pas seulement sur l'histoire de la Voie lactée, mais aussi sur celle de toutes les petites galaxies qu'elle a incorporées. Nous devrions bientôt être en mesure d'étudier comment les galaxies de différentes tailles se sont formées à différentes époques. Dans la prochaine décennie, ces analyses contribueront autant à notre compréhension de la Galaxie que la découverte de courants stellaires autour de la Voie lactée durant la décennie passée.

À terme, nous aimerions savoir comment se sont formées les toutes premières galaxies de l'Univers. Les premiers ancêtres de galaxies semblables à la nôtre sont trop petits et lointains pour être directement détectables, mais l'archéologie galactique pourrait révéler les vestiges de ces premiers germes : les étoiles très anciennes qui portent encore la marque de leur origine sont dispersées ici même, dans la Voie lactée. Ainsi, ce n'est pas en cherchant plus loin, mais en creusant dans notre propre jardin, que nous pourrions enfin accéder à l'Univers primordial et aux premières étapes de la formation des galaxies. ■

Le programme
Gaia
consacrera
les prochaines années
à mesurer les positions et
les mouvements de plus
d'un milliard d'étoiles

Le monde perdu de l'île Maurice





Avant l'arrivée des humains au XVI^e siècle, l'île Maurice était peuplée d'une faune particulière qui avait évolué dans l'isolement. Depuis le XIX^e siècle, une ancienne mare révèle la richesse de ce monde perdu.

Eric Buffetaut et Delphine Angst

A l'île Maurice comme ailleurs dans le monde, au XIX^e siècle, le progrès technique se matérialise par la construction de voies de chemin de fer. En octobre 1865, un jeune ingénieur britannique du nom de Harry Higginson supervisait les travaux d'une ligne en cours de construction dans la partie sud de l'île. Il nota dans son journal : « Je marchais un matin le long du talus lorsque je remarquai quelques coolies qui extrayaient de la tourbe d'un petit marécage. Ils séparaient et entassaient un certain nombre d'os divers parmi les débris. Je m'arrêtai pour les examiner, car ils paraissaient appartenir à des oiseaux et des reptiles, et nous avions toujours été à l'affût d'os du dodo, alors considéré comme mythique. » Ses poches remplies d'os, Higginson se rendit chez George Clark, instituteur à la ville voisine de Mahébourg, qui lui-même était sur la piste du dodo et possédait un livre à son sujet. Une comparaison avec les illustrations montra vite que certains os récoltés par Higginson appartenaient bien à cet oiseau.

Ainsi eut lieu, il y a 150 ans, la découverte de la Mare aux Songes. Le nom de ce marécage n'a d'ailleurs rien à voir avec les rêves que le dodo a pu susciter. Les songes sont le nom local

IL Y A 4 000 ANS, la Mare aux Songes, au sud-est de l'île Maurice, ressemblait sans doute à cette reconstitution récente peinte d'après les restes de faune et de flore exhumés dans le marécage, due au paléontologue et artiste anglais Julian Hume.



LE MARÉCAGE DE LA MARE AUX SONGES
(à droite, une vue du site actuel) regorge encore de fossiles, comme le montre ce bloc exhumé récemment (à gauche).

d'une plante des marais. Ayant obtenu l'autorisation du propriétaire du terrain, Clark entreprit des recherches dans la mare à l'aide d'une technique de fouille pour le moins originale : les hommes affectés à cette tâche palpaient la tourbe au fond du marécage avec leurs pieds nus pour repérer les ossements. Clark constitua ainsi une collection importante qu'il envoya en Angleterre, où elle fit le bonheur des spécialistes – au premier rang desquels l'anatomiste et paléontologue Richard Owen, qui publia dès 1866 un mémoire sur le dodo. La Mare aux Songes devint dès lors la source principale d'information sur la faune éteinte de l'île Maurice.

parce que l'on savait très peu de choses sur les animaux qui peuplaient l'île lors de l'arrivée des premiers voyageurs, et dont beaucoup avaient ensuite vite disparu. Jusque-là inhabitée par l'homme, l'île Maurice avait été découverte à la fin du XVI^e siècle par des navigateurs portugais. Au début du XVII^e siècle, les Hollandais l'avaient colonisée, puis les Français les avaient remplacés au XVIII^e siècle, avant de céder l'île à la Grande-Bretagne en 1815, lors du congrès de Vienne.

Lorsque les Européens avaient découvert l'île Maurice, elle était peuplée d'une faune très particulière, qui avait évolué dans l'isolement sur cette terre volcanique sortie des eaux de l'océan Indien il y a une dizaine de millions d'années. En l'absence de mammifères terrestres, des tortues géantes et des oiseaux incapables de voler (tel le dodo, *Raphus cucullatus*, mais aussi la « poule rouge », *Aphanapteryx bonasia*), s'y étaient développés. Mais cette faune endémique, peu habituée aux prédateurs, était vulnérable et nombre d'espèces ont disparu, victimes à la fois de la chasse et des animaux introduits par l'homme, tels les chiens, les chats, les cochons, les rats et même les singes, qui s'attaquaient soit aux adultes, soit aux jeunes ou aux œufs. Ainsi, il semble que le dodo ait disparu dès la fin du XVII^e siècle, même si les discussions vont encore bon train au sujet de la date exacte de son extinction.

L'ESSENTIEL

- En 1865, un ingénieur ferroviaire découvre un important gisement d'ossements au sud-est de l'île Maurice, dans un marécage nommé la Mare aux Songes.
- La mare recèle les restes de nombreux vertébrés disparus, notamment le mythique dodo.
- Immédiatement, les paléontologues se passionnent pour cette fenêtre unique sur le monde perdu de l'île.
- L'étude du gisement se poursuit de nos jours, avec la redécouverte de collections oubliées.

Dodos, poules rouges et tortues géantes

Aujourd'hui, loin d'être tombée dans l'oubli, et en dépit de quelques vicissitudes qui auraient pu conduire à sa disparition par comblement (lors de campagnes antipaludéennes), la Mare aux Songes demeure un site-clé pour les paléontologues. Non seulement des fouilles systématiques y sont menées depuis 2005, mais les spécimens récoltés par le passé suscitent un nouvel engouement, avec la redécouverte des collections d'un des protagonistes du lieu, le naturaliste franco-mauricien Paul Carié (1876-1930).

Si la découverte de Higginson et Clark eut un tel retentissement en 1865, c'est



Qui plus est, tous ces animaux ont été exterminés avant d'avoir pu faire l'objet d'études scientifiques. Les navigateurs et les colons qui les ont rencontrés sur place au XVII^e siècle n'étaient nullement des naturalistes et, d'ailleurs, les sciences naturelles n'en étaient alors qu'à leurs balbutiements. On dispose donc de récits anciens assez nombreux au sujet de la faune endémique de l'île Maurice ou, du moins, de ses éléments les plus remarquables, tel le dodo, mais les descriptions y sont souvent vagues ou contradictoires.

Certes, quelques dodos vivants furent amenés en Europe (et en Inde), mais s'ils suscitèrent la curiosité, celle-ci se manifesta surtout par de nombreuses représentations plus ou moins fidèles sous forme de peintures et gravures, et non par des études scientifiques. Au milieu du XIX^e siècle, les naturalistes ne disposaient au sujet du dodo que de quelques rares ossements provenant de ces individus « importés ». Le spécimen potentiellement le plus intéressant, un dodo naturalisé qui se trouvait au musée d'Oxford, avait dû être mis au rebut en 1755, car il était dans un piteux état : seule la tête et un pied furent conservés (ils sont aujourd'hui un des trésors du musée d'histoire naturelle de l'Université d'Oxford – et ont donné à Lewis Carroll l'idée du dodo dans *Alice au pays des merveilles*, qui, par une curieuse coïncidence, parut l'année de la découverte de la Mare aux Songes).

Au début du XIX^e siècle, le dodo, comme les autres espèces éteintes de l'île Maurice, était bien oublié. La plupart des habitants de l'île Maurice n'en avaient plus aucun souvenir. Certains se demandaient même si le dodo avait existé. D'autres, cependant, avaient bien compris que cet oiseau avait disparu du fait de l'action de l'homme. En 1848, les naturalistes anglais Hugh Strickland et Alexander Melville publièrent une monographie sur le dodo qui faisait le point sur la question et confirmait l'opinion du zoologue danois Johannes Reinhardt, lequel voyait dans le dodo un pigeon géant. L'hypothèse fut confortée bien plus tard par des études sur l'ADN : le plus proche parent encore vivant du dodo serait le pigeon de Nicobar, *Caloenas nicobarica*, qui vit sur certaines îles du Sud-Est asiatique, et c'est sans doute de cette région que provenaient les ancêtres de *Raphus cucullatus*, encore capables de voler.

Mais le matériel ostéologique dont disposaient Strickland et Melville demeurait limité. C'est pourquoi la découverte à la Mare aux Songes d'une accumulation d'ossements de dodos et d'autres animaux endémiques disparus fit sensation dans les milieux scientifiques. Il devenait possible d'étudier en détail l'ostéologie non seulement de *Raphus cucullatus*, mais aussi de nombreuses autres créatures peu ou pas connues qui avaient vécu à l'île Maurice avant l'arrivée des humains, et de reconstituer ainsi toute une faune disparue.

La Mare aux Songes, source d'os inépuisable

À la suite de Clark, d'autres naturalistes vinrent collecter des spécimens à la Mare aux Songes pour en faire bénéficier diverses institutions scientifiques – ainsi Théodore Sauzier, président d'une commission du gouvernement mauricien chargée d'étudier les « souvenirs historiques » de l'île, qui reprit les fouilles dans le marécage en 1889. Les ossements d'oiseaux qu'il découvrit firent l'objet d'études par les Britanniques Edward Newton et Hans Gadow et le Français Alphonse Milne-Edwards, révélant une diversité ornithologique qui allait bien au-delà du célèbre dodo, avec la « poule rouge » (un membre du groupe des râles, qui, en fait, avec son long bec courbé, ne ressemblait pas du tout à une poule), mais aussi des perroquets, des hérons, des hiboux, des canards...

LES AUTEURS



Eric BUFFETAUT est paléontologue au Laboratoire de géologie de l'École normale supérieure, à Paris (CNRS, UMR 8538).



Delphine ANGST effectue un postdoctorat au Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement, au Commissariat à l'énergie atomique (CEA), à Saclay.



LE NATURALISTE PAUL CARIE

(ici en uniforme de l'armée française durant la Première Guerre mondiale) a beaucoup contribué à l'étude des fossiles de la Mare aux Songes en constituant d'importantes collections de spécimens que l'on redécouvre aujourd'hui.

AVEC L'AMBIANCE, L'AMBIANCE DE L'AMBIANCE



Mais la faune éteinte de l'île Maurice

ne se composait pas uniquement d'oiseaux. Elle comprenait aussi des reptiles, dont des lézards et des serpents, et deux espèces de tortues géantes appartenant au genre *Cylindraspis*, dont l'une possédait une étrange carapace en forme de selle. Les uniques mammifères présents étaient des chauves-souris : seuls des mammifères volants avaient pu coloniser l'île Maurice avant l'arrivée de l'homme.

La Mare aux Songes apparaissait donc comme une source inépuisable de spécimens subfossiles (c'est-à-dire un peu trop récents pour être considérés comme fossiles au sens propre du terme) représentatifs de la faune qui avait peuplé l'île Maurice avant l'arrivée des humains. Hors de ce marécage, quelques rares sites en ont livré des restes. Il s'agit essentiellement de fissures et de grottes (à proprement parler des tunnels de lave) dans les montagnes volcaniques du nord de l'île.

Leur principal explorateur fut Louis Thirioux (1846-1917), un coiffeur français de la ville de Port-Louis. Il parcourut inlassablement la région et y fit des découvertes remarquables, avec notamment des squelettes articulés plus ou moins complets, alors que la Mare aux Songes livre principalement des os isolés, les squelettes ayant été désarticulés lors de leur enfouissement dans les sédiments tourbeux peu compacts. Mais en ce qui concerne le nombre de spécimens recueillis et la diversité faunique qu'ils révèlent, ce site reste inégalé, un siècle et demi après sa découverte.

PARMI LES SPÉCIMENS de la collection de Paul Carié récemment redécouverte, on trouve de nombreux ossements de dodo (*en haut*) et des crânes de tortue géante *Cylindraspis* (*en bas*).

Longtemps, la Mare aux Songes fut considérée surtout comme une source de spécimens destinés à être envoyés dans des musées européens où des spécialistes les décriraient, fournissant ainsi une image de plus en plus complète de la faune disparue de l'île Maurice. Mais depuis quelques années, des études plus précises sont menées pour mieux comprendre dans quelles conditions géologiques et sédimentologiques ce remarquable gisement fossilifère s'est formé. Depuis 2005, une équipe internationale y mène des fouilles systématiques dans ce but.

Ainsi, il s'avère que le marécage est en fait constitué de trois bassins formés lors de l'effondrement d'un tunnel de lave, à peu de distance de la mer. Au-dessus du basalte se sont d'abord déposées des argiles, puis un sable corallien apporté par le vent. Ensuite, il y a environ 5000 ans, un lac s'est installé dans les bassins, au fond duquel s'est formé un dépôt de marne. Par-dessus, vient la couche fossilifère proprement dite, qui est une sorte de tourbe de couleur marron déposée dans un milieu marécageux en bordure de lac et extrêmement riche en restes de végétaux (trunks d'arbres, branches, feuilles, graines, racines, grains de pollen) et d'animaux (ossements, mais aussi coquilles d'escargots et restes d'insectes).

Paul Carié, héritier de la Mare aux Songes

Comment cette accumulation s'est-elle formée ? La région sud-est de l'île Maurice est particulièrement sèche à cause d'une forte évaporation, et l'était plus encore il y a environ 4000 ans, lorsque s'est constitué le niveau fossilifère d'après les datations au carbone 14. Le lac marécageux de la Mare aux Songes constituait apparemment une sorte d'oasis qui attirait de nombreux animaux à la recherche d'eau douce. Beaucoup d'entre eux semblent s'être enlisés dans la tourbe sans pouvoir s'en extraire, et leurs débris se sont accumulés au cours du temps. La rareté des restes squelettiques articulés s'explique sans doute par des mouvements de l'eau et par le piétinement de certains animaux, telles les tortues.

L'étude de la Mare aux Songes se poursuit aussi grâce aux spécimens qui y ont été récoltés depuis 150 ans, notamment avec la « redécouverte » de nombreux vestiges collectés il y a un peu plus d'un siècle par

BIBLIOGRAPHIE

J. P. Hume *et al.*, **Rediscovery of a lost Lagerstätte : a comparative analysis of the historical and recent Mare aux Songes dodo excavations on Mauritius**, *Historical Biology*, doi : 10.1080/08912963.2014.945927, 2014.

D. Angst *et al.*, **The end of the fat dodo ? A new mass estimate for *Raphus cucullatus***, *Naturwissenschaften*, vol. 98, pp. 233-236, 2011.

D. Angst et E. Buffetaut, **Un dodo en Normandie**, *Bulletin de la Société d'Étude des Sciences Naturelles d'Elbeuf*, vol. 2010, pp. 9-16, 2010.

A. Cheke et J. P. Hume, **Lost Land of the Dodo**, T. and A.D. Poyser, 2008.

Paul Carié. Issu d'une famille d'origine française installée à Maurice depuis le XVIII^e siècle, le naturaliste milita sans succès pour la rétrocession à la France de son île natale. Ses compétences lui valurent d'être nommé correspondant du Muséum de Paris, qui lui confia des missions scientifiques dans l'océan Indien. Il fut président de la Société zoologique de France en 1923, et c'est à Paris qu'il mourut en 1930. Devenu par héritage propriétaire de la Mare aux Songes, il y fit effectuer des campagnes de fouilles dans les premières années du XX^e siècle. Par ailleurs, il acheta à Thirioux des spécimens que ce dernier avait récoltés dans les grottes mauriciennes.

Carié fit don d'importantes collections de vertébrés subfossiles, dont le dodo, à divers musées européens, dont le Muséum de Paris, le musée cantonal de géologie de Lausanne et le musée d'Elbeuf-sur-Seine. Ces spécimens furent étudiés, souvent après le décès de Carié, par divers spécialistes. Les restes de lézards et de serpents conservés à Paris permirent notamment au paléontologue Robert Hoffstetter, dans

les années 1940, de faire mieux connaître l'herpétofaune disparue de l'île Maurice. En 2011, les ossements de dodo du musée d'Elbeuf ont servi de point de départ à une étude plus vaste qui permit de conclure que cet oiseau était sensiblement moins lourd (une dizaine de kilogrammes en moyenne) qu'on ne l'avait souvent pensé.

Des trésors subfossiles en cours d'étude

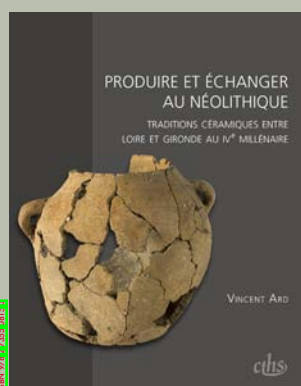
Les descendants de Paul Carié ont généreusement fait don au musée d'Elbeuf d'une importante collection d'histoire naturelle constituée par leur aïeul. Outre d'intéressants documents écrits, elle comprend des insectes, des coquillages, des œufs d'oiseaux, des éléments squelettiques de vertébrés actuels, provenant pour l'essentiel de l'île Maurice. Mais les spécimens les plus significatifs sont sans nul doute les nombreux ossements de vertébrés subfossiles issus pour la plupart de la Mare aux Songes. Leur inventaire est en cours, mais on peut d'ores et déjà affirmer que

la collection comprend une importante série d'os de dodo, ainsi que de nombreux restes de la tortue *Cylindraspis*, dont une cinquantaine de crânes. Diverses autres espèces sont représentées et restent à identifier avec précision.

À côté d'os très bien conservés, d'autres sont beaucoup plus fragmentaires. C'était rarement le cas dans les collections plus anciennes. Celles-ci comprenaient surtout des spécimens sélectionnés pour leur bon état de conservation, et les conservateurs de musées répugnaient à les mettre à disposition pour des prélèvements à des fins d'analyse scientifique. Les os incomplets que Paul Carié a conservés se prêteront plus facilement à des études géochimiques et histologiques, lesquelles aideront à mieux comprendre certains aspects de la biologie des animaux endémiques de la Mare aux Songes. Cent cinquante ans après la découverte de ce site remarquable, il reste en effet encore beaucoup à découvrir du monde perdu dont il témoigne – et les efforts de Paul Carié n'ont pas fini de porter leurs fruits. ■

Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques

une collection complète d'instruments de travail pour la recherche en sciences humaines



**Produire et échanger
au Néolithique**
Vincent Ard

373 pages
21 x 27 cm
2015



Ethnographies plurielles

Sous la direction de Iphaine Barthelemy,
Philippe Combessie, Laurent Sébastien
Fournier et Anne Monjaret

304 pages
17 x 22 cm
2015

Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques • ventes@cths.fr • vente en librairie ou sur notre site : www.cths.fr • Distribution Sodus

Éclairez votre été !

Abonnez-vous à **POUR LA SCIENCE**



+ En **CADEAU** de bienvenue :

Une lampe torche solaire* pour vous accompagner cet été dans toutes vos excursions, randonnées, balades...

Un objet malin et écologique qui fonctionne **sans piles ni manivelle**. Grâce à ses capteurs solaires, cette lampe de poche pourra vous fournir plusieurs heures d'éclairage.

Modèle Medium NEST en aluminium et plastique - Fourni avec 5 Led lumen 30 - Dimension : longueur 12,5 m / diamètre 10 mm - Poids : 87 gr - Valeur : 14 €



Votre OFFRE INTÉGRALE

8,20€ par mois seulement

le magazine
+ le hors-série chez vous
+ l'accès numérique illimité
à toutes les archives sur
www.pourlascience.fr



OFFRE SPÉCIALE D'ABONNEMENT

POUR LA
SCIENCE

A découper ou à photocopier et à retourner accompagné de votre règlement dans une enveloppe non affranchie à :
Groupe Pour la Science - Service Abonnements - Libre réponse 90 382 - 75 281 Paris cedex 06

1. MA FORMULE

☒ **OUI, je m'abonne à l'offre « Intégrale » à 8,20€ par mois.**

Je reçois le magazine *Pour la Science* (12 n°s/an)
+ son hors-série *Dossier Pour la Science* (4 n°s/an)
+ mon cadeau. Je bénéficie aussi de l'accès numérique
illimité aux archives sur **www.pourlascience.fr**.



Mon CADEAU
de bienvenue

Mon e-mail obligatoire pour l'accès aux contenus numériques (à remplir en majuscules)

À réception de votre bulletin, comptez 5 semaines pour recevoir votre n° d'abonné. Passé ce délai, merci d'en faire la demande à abonnements@pourlascience.fr

2. MES COORDONNÉES

Nom :

Prénom :

Adresse :

Code postal :

Ville :

Pays :

Tél. :

Pour le suivi client (facultatif)

3. MON MODE DE RÈGLEMENT

☒ Je règle par prélèvement **8,20€ par mois* et reçois en cadeau**

la **lampe torche solaire** (réf. 00LAM). Je remplis l'autorisation ci-dessous
en joignant impérativement un IBAN/BIC.

* Pour la France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'Europe (pays de la zone SEPA) : 9,70€ par mois. Abonnement en reconduction tacite
dénonçable à tout moment auprès du service abonnement avec un préavis de 3 mois. Conditions complètes sur www.pourlascience.fr

**AUTORISATION
DE PRÉLÈVEMENT PAR
MANDAT SEPA**

En signant ce mandat SEPA, j'autorise Pour la Science à transmettre des instructions
à ma banque pour le prélèvement de mon abonnement dès réception de mon bulletin.
Je bénéficie d'un droit de rétractation dans la limite de 8 semaines suivant le premier
prélèvement. Plus d'informations auprès de mon établissement bancaire.

1 - COORDONNÉES DU TITULAIRE DU COMPTE

Nom, prénom

Adresse

Numéro et nom de la rue

Code postal

Ville

Pays

2 - COORDONNÉES BANCAIRES

IBAN

Numéro d'identification international du compte bancaire - IBAN (International Bank Account Number)

BIC

Code international d'identification de votre banque - BIC (Bank Identifier Code)

Type de paiement

Paiement récurrent/répétitif

POUR LA
SCIENCE

3 - Date et signature obligatoires

A

Date

Signature :

NOM DU CRÉANCIER

Pour la Science - 8 rue Férou - 75006 Paris

ICS N° FR92ZZZ426900

N° de référence unique de mandat (RUM)

Partie réservée au service abonnement. Ne rien inscrire

☒ Je préfère régler mon abonnement d'un an en **une seule fois 99€****
sans bénéficier du cadeau.

** Offre valable en France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter : Europe 16€ - autres pays 35€

☒ Par chèque à l'ordre de *Pour la Science*

☒ Par carte bancaire N°

Date d'expiration

Clé

Signature obligatoire

En application de l'article 27 de la loi du 6 janvier 1978, les informations ci-dessus sont indispensables au traitement de votre commande.
Elles peuvent donner lieu à l'exercice du droit d'accès et de rectification auprès du groupe Pour la Science. Par notre intermédiaire, vous pouvez
être amené à recevoir des propositions d'organismes partenaires. En cas de refus de votre part, merci de cocher cette case ☐.

Comment jouer parfaitement au poker

Un jeu où intervient le hasard et où les joueurs ne disposent que d'une information incomplète, le poker Hold'em à deux joueurs, vient d'être résolu : la stratégie mise au point ne peut être battue par aucune autre.

Jean-Paul DELAHAYE

Il y a deux façons de résoudre par l'informatique un jeu à deux joueurs. Soit on conçoit un programme qui l'emporte sur tout adversaire humain, ce qui n'est pas forcément définitif puisque les joueurs humains pourraient rattraper leur retard : c'est la « résolution faible ». Soit on conçoit un programme impossible à battre parce qu'il joue de façon optimale : c'est la « résolution forte ».

Pour le jeu d'échecs, on a réussi la résolution faible : depuis le fameux match entre Garry Kasparov et l'ordinateur *Deep Blue* en 1997, la machine est meilleure que tout joueur humain, et il n'y a guère d'espoir aujourd'hui qu'un humain renverse la situation. À cause de l'énorme combinatoire du jeu (on évalue à 10^{120} le nombre de parties possibles), la plupart des spécialistes pensent que nous n'arriverons pas à atteindre la résolution forte dans un avenir prévisible. Certains experts en programmation des jeux tels que les Français Simon Viennot et Julien Lemoine (créateurs du meilleur programme pour le jeu des pousses, voir *Pour la Science* de septembre 2008) pensent cependant que les méthodes de simplification de l'arbre de toutes les parties, méthodes qu'ils ont contribué à perfectionner, seront sans doute en mesure de produire une stratégie optimale pour le jeu d'échecs, donc une résolution forte, d'ici une vingtaine d'années. Selon Maxime Vachier-Lagrave, meilleur joueur français depuis Philidor (1726-1795), la stratégie optimale conduira à une partie nulle.

Pour le jeu des dames anglaises (proche des dames françaises, mais qui se joue sur un tableau 8×8), le programme Chinook développé par l'équipe de Jonathan Schaeffer, de l'Université de l'Alberta au Canada, propose depuis 2007 une résolution forte. Ce programme démontre en particulier que le joueur qui commence fera au pire une partie nulle : si l'adversaire de Chinook commet des fautes, Chinook gagnera, s'il joue parfaitement, la partie sera nulle.

Dans le cas du jeu de go, les programmes ont récemment progressé, mais on n'a pas encore atteint la résolution faible : les bons joueurs dominent sans trop de mal les meilleurs programmes.

Les jeux mentionnés ci-dessus sont tous des jeux à information complète : rien n'est caché aux joueurs et le hasard n'y tient aucun rôle. Les jeux de cartes (belote, poker, etc.) sont d'une nature différente. D'une part, le hasard intervient lors de la distribution des cartes ; on peut donc avoir un bon ou un mauvais jeu, et avec un mauvais jeu, la victoire est improbable. D'autre part, l'information sur la répartition des cartes n'est disponible que partiellement aux joueurs, qui ignorent les cartes distribuées à leurs adversaires.

On peut toutefois parler de résolution faible et de résolution forte pour de tels jeux. Un programme résout faiblement le jeu s'il gagne contre tout joueur humain à l'issue d'un nombre suffisamment grand de parties (nombre qui équilibre les coups de chance

ou de malchance). Un programme résout fortement un jeu de ce type s'il est impossible à améliorer, donc s'il gagne ou fait jeu égal contre tout joueur imaginable pourvu que le nombre de parties soit assez grand.

En janvier 2015, une équipe de chercheurs réunie autour de Michael Bowling de l'Université de l'Alberta a publié un article décrivant la résolution forte d'une variante de poker pratiquée par de nombreux joueurs humains : le poker Heads up limit Hold'em ou HULHE, qui est la variante du poker Hold'em pratiquée à deux joueurs avec des mises limitées (voir l'encadré ci-contre).

Résolution faible

On considère que la résolution faible du poker HULHE a été obtenue en 2008 par le programme *Polaris*, développé principalement par Bradley Johanson, lui aussi de l'Université de l'Alberta. En effet, *Polaris* a été confronté à six joueurs professionnels : il gagna trois séries, il en perdit deux et fit match nul pour une. Chacune des séries comportait 500 mains jouées en *duplicate* : chaque distribution était jouée deux fois en inversant les joueurs. Cette méthode établit une parfaite symétrie entre les joueurs, dont aucun ne peut prétendre avoir été victime de malchance. Il aura donc fallu seulement sept années pour passer de la résolution faible à la résolution forte, pour le poker HULHE. C'est assez peu, comparé au jeu d'échecs qui, selon les spécialistes

Le poker Hold'em

Le poker Hold'em a été popularisé par le film *Casino Royale* où James Bond bat son adversaire avec une quinte flush (45678 de pique) contre un full (brelan d'as et paire de 6). La hiérarchie des mains est indiquée ci-contre. Au début de chaque partie de poker Hold'em, chaque joueur reçoit deux cartes visibles de lui seul. Progressivement, s'ajoutent cinq cartes visibles de tous sur la table de jeu.

D'abord trois cartes (le « flop »), puis une (le « turn »), puis la dernière (la « river »). Chaque joueur utilise deux, une ou aucune de ses cartes, auxquelles il ajoute certaines des cinq cartes de la table pour composer une main de cinq cartes qui doit présenter la combinaison la plus forte possible (paire, deux paires, brelan, suite, couleur, full, carré, quinte, quinte flush, quinte royale). Des mises obligatoires au début du jeu constituent le pot, puis à mesure que les cartes de la table de jeu sont dévoilées, les joueurs abandonnent (et perdent alors les sommes qu'ils ont engagées), égalisent ou enchérissent. Les enchères terminées, les joueurs encore dans le jeu dévoilent leurs cartes (« showdown ») et celui qui a la plus forte main emporte le pot. En cas d'égalité, le pot est partagé.

Le vocabulaire utilisé pour la phase d'enchère est le suivant :

- Se coucher (« fold ») : renoncer

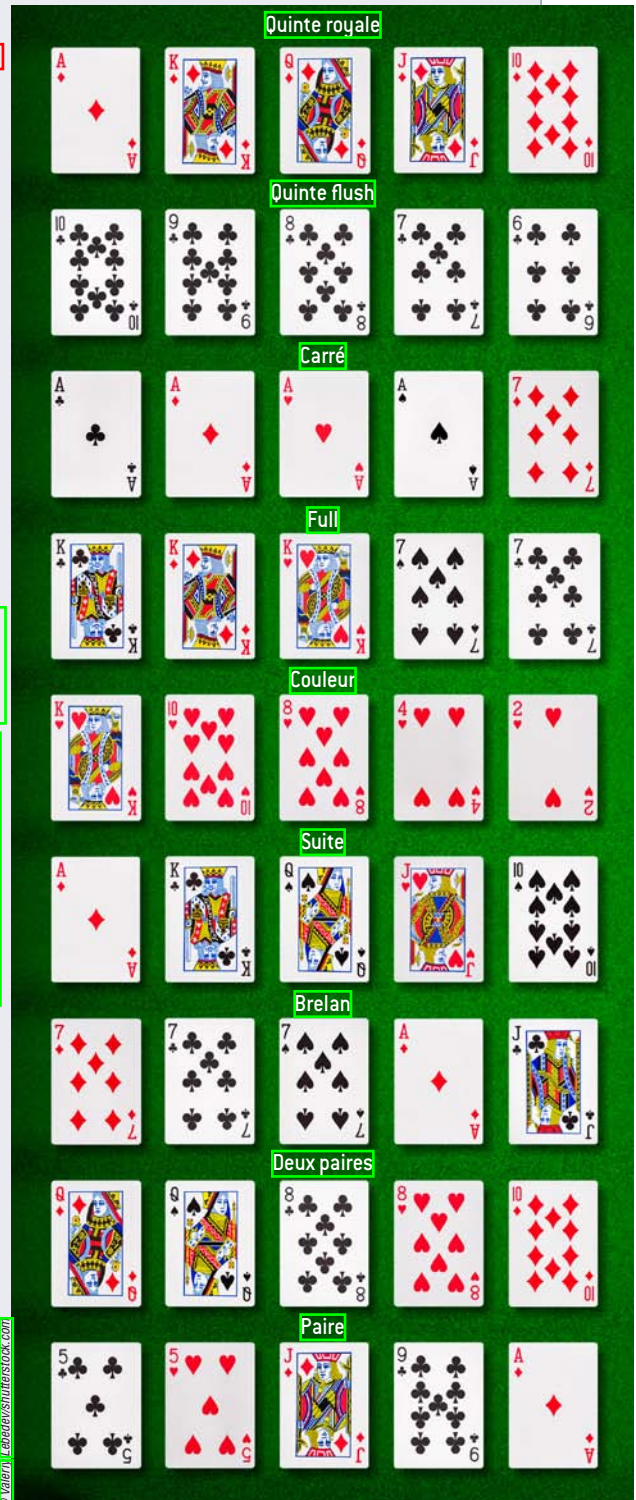
en abandonnant ses mises.

- Suivre (« call ») : égaliser sa mise avec les mises les plus fortes pour rester dans la partie.

- Relancer (« raise ») : ajouter une mise conduisant à un total de ses mises supérieur à celles des autres joueurs, ce qui les oblige soit à se coucher, soit à suivre ou à relancer.
- Tapis (« all in ») : miser tout ce que l'on a.

Dans le Hold'em limit, un maximum de mise pour chaque partie est fixé au départ (plus de détails sur : <http://fr.pokerlistings.com/regles-holdem>).

La chance joue un rôle majeur, mais les différents films sur le poker mettent en exergue les capacités de déduction, le contrôle de ses expressions pour ne pas laisser transparaître son jeu, ainsi que le sens du spectacle de ces héros des tables. Dans tous les films, la dernière main est d'une force exceptionnelle chez les deux joueurs.



les plus optimistes, ne franchira la seconde étape que quarante ans après la première.

Pour les jeux du type poker, du fait de l'information partielle disponible aux joueurs et du facteur chance, les stratégies optimales ne consistent pas en des règles déterministes du type « Si votre jeu est J, que les cartes découvertes sur la table sont D et que votre adversaire vient d'enchérir, alors vous devez suivre », mais en des règles probabilistes : « Si votre jeu est J, que les cartes découvertes sur la table sont D et que votre adversaire vient d'enchérir, alors vous devez suivre dans 20 % des cas, et renoncer dans 80 % des cas ».

La détermination des bonnes probabilités pour chaque situation de jeu est délicate et exige plus de calculs que ceux qu'on ferait pour un jeu à information complète sans

hasard ayant le même nombre de situations de jeu. Pour le poker HULHE, il y a d'ailleurs un nombre colossal de situations de jeu. Après suppression des symétries, on en dénombre $3,19 \times 10^{14}$ (319 mille milliards). On comprend pourquoi ce poker élémentaire (comparé aux versions sans limites de mise et à plus de deux joueurs) a été difficile à traiter. C'est la première fois que l'on résout fortement un jeu véritablement pratiqué par de nombreux joueurs où le hasard intervient et où les joueurs ne disposent que partiellement de l'information sur les distributions.

À vrai dire, la résolution forte du poker HULHE n'a été obtenue qu'à « epsilon près » : la stratégie probabiliste de jeu calculée par l'équipe de Michael Bowling ne peut être battue de manière nette par aucun joueur qui affronterait le programme pendant une

durée humainement envisageable. Le résultat exact est : un joueur jouant 200 parties par heure durant 12 heures chaque jour pendant 70 ans ne peut pas faire la différence, avec une certitude de 95 %, entre la stratégie optimale à epsilon près calculée par l'équipe de Michael Bowling et la stratégie réellement optimale.

D'une certaine façon d'ailleurs la stratégie probabiliste optimale n'est pas calculable, puisqu'elle demanderait la détermination d'une grande quantité de nombres réels (les probabilités liées à chacune des situations de jeu) avec une précision infinie. Le petit décalage entre ce qui a été calculé et la solution mathématique parfaite est donc sans grande importance, et il n'y a pas d'abus à considérer que la solution à epsilon près résout de manière forte le poker HULHE.

La stratégie optimale pour le micro-

Le jeu de micro-poker (poker AKQ) prouve que bluffer est parfois utile et que ce n'est pas une question de psychologie, mais un résultat de la théorie des jeux. Dans ce poker à trois cartes, il y a deux joueurs (A et B) et trois cartes notées 1, 2 et 3 symbolisant les trois cartes Q, K, A (figurées ci-dessous) de l'intitulé du jeu. La carte 3 bat les cartes 2 et 1, la carte 2 bat la carte 1. Au départ, chaque joueur engage un euro. Cela constitue un pot de deux euros. On distribue une carte à chaque joueur.

Chacun regarde sa carte. Le joueur A indique s'il enchérit en engageant un autre euro. S'il n'enchérit pas, B prend le pot (et gagne donc un euro). Si A a enchéri, c'est au tour de B de dire s'il enchérit en ajoutant un second euro, ou non. Si B n'enchérit pas, A prend le pot (et gagne donc un euro). Si B enchérit, il y a maintenant quatre euros dans le pot. Les joueurs montrent alors leur carte. Celui qui a la plus forte emporte le pot.

Analyse du jeu

La seule décision prise par le joueur A (de même pour B) est d'enchérir ou non en fonction de la carte qu'il a reçue. Pour A, il y a trois situations A_1 , A_2 et A_3 selon qu'il a reçu la carte 1, 2 ou 3, et pour B, il y a de même trois situations B_1 , B_2 et B_3 .

Les seules parties possibles sont :

A_1/B_2 , A_1/B_3 , A_2/B_1 , A_2/B_3 , A_3/B_1 et A_3/B_2 .

Certaines décisions sont évidentes à prendre. Dans la situation A_3 , A choisira d'enchérir (il est certain de gagner). Dans la situation B_1 , B choisira de ne pas enchérir (il est certain de perdre). Dans la situation B_3 , B choisira d'enchérir (il est certain de gagner). Dans la situation A_2 , le joueur A doit enchérir. En effet :

Si A enchérit, alors : si B a la carte 1, B n'enchérira pas, et donc A gagnera un euro ; et si B a la carte 3, B enchérira et par conséquent A perdra deux euros. Cela fait pour A une perte moyenne de 1/2 euro par coup.

Si A n'enchérit pas, alors A perd un euro par coup. C'est plus que 1/2 euro.

Il reste deux cas à analyser. Dans la situation A_1 , le joueur A doit-il bluffer en enchérissant, et dans la situation B_2 , le joueur B doit-il risquer de perdre deux euros en enchérissant ? Il n'y a pas de réponse déterministe à ces deux

questions et pour y répondre il faut utiliser les stratégies mixtes de von Neumann : A et B choisiront de bluffer ou d'enchérir avec une certaine probabilité. Notons p la probabilité avec laquelle A doit enchérir dans la situation A_1 pour jouer au mieux. Notons q la probabilité avec laquelle B doit enchérir dans la situation B_2 pour jouer au mieux.

La théorie des jeux enseigne que dans le cas de stratégies optimales pour A et B, les valeurs p et q correspondent à un équilibre de Nash, autrement dit à une situation où :

- Si A change de stratégie (c'est-à-dire la valeur de p), le joueur B peut ajuster la sienne (la valeur de q) de telle façon que A gagne moins (autrement dit, A n'a pas intérêt à changer).

- Même chose en échangeant A et B.



L'un des résultats annexes obtenus par la solution calculée est que le meneur de jeu (celui qui distribue les cartes) est favorisé par rapport à son adversaire dans une partie de poker HULHE : sur le long terme et si c'était toujours le même joueur qui distribuait les cartes, il serait certain de gagner de l'argent. C'est conforme à ce que les professionnels du jeu pensaient depuis longtemps : celui qui parle en premier est désavantagé.

Des calculs massifs

L'analyse du jeu a été un énorme travail mathématique et informatique. Les diverses équipes étudiant le poker ont récemment introduit de nouvelles méthodes cruciales pour réussir. En particulier, la méthode

permettant de calculer les solutions pour des règles de jeux qui amènent un très grand nombre de situations de jeu a été mise au point il y a moins de dix ans.

Cette méthode a pour nom CFR, pour « Counterfactual Regret Minimization ». L'idée est de faire jouer un programme contre lui-même et de faire évoluer les probabilités de choix qu'il calcule pour chaque point de décision en fonction des succès et échecs obtenus lors de parties simulées. Depuis son introduction en 2007, cette méthode a permis d'étudier des jeux dont le nombre de points de décision a été de plus en plus grand. Un poker simplifié ayant $3,8 \times 10^{10}$ situations de jeu a pu ainsi être traité en 2012, ouvrant la porte au calcul de la solution pour le jeu réel HULHE qui en comporte presque 10 000 fois plus.

Comme pour le calcul effectué afin de prouver que 16 données ne garantissent jamais une solution unique pour un problème de sudoku 9×9 (voir *Pour la Science* de janvier 2015), ce qui a été fait est aux limites de ce qui est techniquement envisageable aujourd'hui. Pour déterminer leur solution optimale à epsilon près, l'équipe de Michael Bowling a lancé un travail informatique sur un réseau de 200 machines disposant chacune de 32 gigaoctets (32 milliards de fois 8 bits) de mémoire vive et d'un disque d'un téraoctet (mille milliards de fois 8 bits). Le jeu a été divisé en 110 565 sous-jeux. Chaque itération de l'algorithme CFR exigeait 61 minutes. Les 1 579 itérations requises ont pris deux mois pour l'ensemble du dispositif. Le calcul total équivalait à 900 années de fonctionnement d'une machine à un seul cœur.

poker à trois cartes (poker AKQ)

Calcul des stratégies optimales

GAIN	A_1/B_2		A_1/B_3	A_2/B_1
	$-2pq + p(1-q) - (1-p)$	$-2p - (1-p)$	1	
A	A_2/B_3	A_3/B_1	A_3/B_2	
	-2	1	$2q + (1-q)$	

Pour calculer l'équilibre de Nash, on étudie le gain moyen de A et de B pour des valeurs p et q fixées (tableau ci-dessus).

À titre d'exemple, expliquons l'expression $-2pq + p(1-q) - (1-p)$ correspondant au gain de A dans le cas où A a la carte 1 et B la carte 2. Si A bluffe et B suit (probabilité pq), A perd 2 euros (d'où le $-2pq$) ; si A bluffe et B ne suit pas (probabilité $p(1-q)$), A gagne 1 euro (d'où le $+p(1-q)$) ; si A ne bluffe pas (probabilité $(1-p)$), A perd un euro (d'où le terme $-(1-p)$).

Le gain moyen de A en fonction de p et q (en supposant que les cartes sont distribuées équitablement) s'obtient en faisant la somme des gains dans chaque partie possible et en divisant par 6 (car les six parties possibles sont équiprobables). On trouve :

$$\text{Gain A}(p, q) = -(p - 1/3)(q - 1/3)/2 = 1/9$$

$$= -\text{Gain B}(p, q)$$

L'équilibre de Nash qui donne les stratégies mixtes optimales pour A et B s'obtient par le calcul, en examinant les points où les dérivées de Gain A par rapport à p et par rapport à q s'annulent. En un tel point, si A modifie p , B peut augmenter son gain en ajustant q , et réciproquement : aucun des deux joueurs, s'il est prudent, n'a donc intérêt à changer son choix (p pour A, q pour B).

Ce calcul de dérivées donne ici :

$$\partial(\text{Gain A})/\partial p = (-q + 1/3)/2 = 0, \text{ donc } q = 1/3;$$

$$\partial(\text{Gain B})/\partial q = (-p + 1/3)/2 = 0, \text{ donc } p = 1/3.$$

En ce point $p = q = 1/3$, $\text{Gain A} = -1/9$, ce qui signifie qu'à ce micro-poker, celui qui parle en premier (A) est perdant en moyenne de 1/9 euro à chaque partie.

D'autres détails sur ce micro-poker figurent dans le livre de B. Chen et J. Ankenman, *The Mathematics of Poker*, ConJelCo LLC, 2007 (édition en français : *Poker Maths Sup*, Micro-Application, 2013).

Le hasard semble jouer un rôle très important au poker, aussi parfois on a pensé qu'il n'y avait pas de bons joueurs, mais seulement des joueurs chanceux. Ceux qui pratiquent le poker sont persuadés du contraire : il existe des façons intelligentes de jouer et d'autres qui, lors d'une longue série

de parties, assurent de perdre. Le débat a parfois eu une importance concrète pour l'autorisation ou non du poker en ligne dans certains États où les jeux de pur hasard sont interdits. La loi française définit ainsi les jeux de hasard : « Est un jeu de hasard un jeu payant où le hasard prédomine sur l'habileté et les combinaisons de l'intelligence pour l'obtention du gain. » Plusieurs décisions de justice ont classé le poker dans la catégorie des jeux de hasard. En 2013, une nouvelle décision prise à Toulouse a décidé du contraire. La Cour de cassation a tranché en qualifiant le poker de jeu de hasard (voir <http://www.reynaud-avocat.com/la-légalité-des-jeux-d-argent/>).

Elle a tort, et plusieurs études scientifiques ont établi l'importance du savoir-faire et de l'intelligence dans la pratique du poker. Steven Levitt et Thomas Miles, de l'Université de Chicago, ont mené une étude décisive sur cette question (S. D. Levitt et T. J. Miles, *The role of skill versus luck in poker: Evidence from the world series of poker*, *Journal of Sports Economics*, vol. 15(1), pp. 31-44, 2014, article en accès libre sur <http://jse.sagepub.com/content/15/1/31.abstract>).

Stratégies parfaites ou adaptatives ?

Le calcul mathématique et informatique d'un équilibre de Nash donnant une stratégie mixte optimale pour jouer au poker HULHE a conduit en 2015 au programme de jeu

Cepheus, qui ne perd jamais quel que soit son adversaire

rencontré en face à face sur un grand nombre de parties.

Cependant, ce programme de jeu n'est pas conçu

pour s'adapter au jeu particulier des joueurs rencontrés, et donc ne les exploitera pas toujours au mieux.

Un autre programme, *Polaris*, aussi conçu à l'Université de l'Alberta au Canada, a été élaboré avec un objectif d'ajustement à l'adversaire. L'idée n'a pas été de modéliser le joueur adverse, ce que font d'autres programmes de poker, car cette modélisation ne fonctionne bien que lorsqu'un très grand

nombre de parties consécutives sont connues.

Le principe adopté pour *Polaris* a été de prédéfinir une série limitée d'assez bonnes stratégies de jeux (en utilisant des calculs d'équilibre de Nash pour des versions simplifiées du jeu) et de comparer ce qu'elles auraient donné quand quelques parties ont été jouées contre l'adversaire. Dès que 50 parties sont disponibles pour faire cette comparaison, le choix opéré

parmi la liste des bonnes stratégies fixées au départ, en comparant leurs résultats sur les 50 parties, se révèle judicieux et conduit à une bonne exploitation des particularités du joueur qu'affronte le programme.

En 2008, le programme *Polaris* a affronté six joueurs professionnels dans des séries de 500 parties en *duplicate* (chaque partie est jouée deux fois en inversant les distributions). Il a gagné trois séries, en a perdu deux et a fait un match nul (M. Bowling et al., *A demonstration of the Polaris poker system*, Proceedings of The 8th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2009).



L'ÉQUIPE DE CEPHEUS.
De gauche à droite : Mike Johanson, Michael Bowling et Neil Burch.

Plusieurs questions que les professionnels se posaient sur le jeu, concernant par exemple l'intérêt de bluffer dans certaines situations, ont pu être résolues en examinant la solution calculée. Ainsi, même les professionnels du jeu peuvent tirer de précieuses informations de telles recherches.

Une fois les calculs faits, la stratégie optimale calculée, nommée *Cepheus*, s'applique assez rapidement (*pour la tester et s'informer sur ses propriétés, voir le site <http://poker.srv.ualberta.ca>*).

Pour comprendre le travail des chercheurs, revenons sur ce qu'est une stratégie optimale dans un jeu à information incomplète avec hasard. La compréhension de ce type de jeux repose sur l'analyse qu'en a faite John von Neumann dans son célèbre livre *Theory of Games and Economic Behavior* écrit avec Oskar Morgenstern en 1944. Cette théorie, complétée entre autres par John Nash (qui reçut pour cela le prix Nobel d'économie en 1994, et qui est décédé en mai dernier), permet dans les bons cas de définir et de calculer les meilleures stratégies probabilistes, aussi dénommées stratégies mixtes.

Envisageons d'abord le jeu pierre-feuille-ciseaux (P-F-C) : chacun des deux joueurs choisit au même instant P, F ou C. Le choix P gagne sur C (la pierre casse les ciseaux) ; F gagne sur P (la feuille enveloppe la pierre) ; C gagne sur F (les ciseaux coupent la feuille). La meilleure façon de jouer à ce jeu pour un joueur ne peut pas consister à toujours choisir P (ou F, ou C) car alors son adversaire observant cette stratégie constante gagnerait à chaque coup : il choisira de toujours jouer F (ou toujours C, ou toujours P, respectivement). Le calcul, ici rendu facile par des considérations de symétrie, montre que la stratégie optimale pour un joueur est de jouer aléatoirement C avec une probabilité 1/3, P avec une probabilité 1/3 et F avec une probabilité 1/3. Avec cette stratégie, votre adversaire ne vous battra jamais et si lui-même l'adopte, vous ferez jeu égal, aux fluctuations statistiques près.

Pour nous approcher du poker HULHE, considérons le poker à trois cartes (parfois appelé poker AKQ). Deux joueurs A et B s'affrontent. Le jeu ne comporte que trois cartes qui sont la carte 1, la carte 2, la carte 3

et dont la hauteur détermine la force (la carte 3 gagne sur les deux autres, etc.). Chaque joueur engage un euro. On distribue une carte à chacun. Chaque joueur regarde sa carte. Le joueur A doit choisir : enchérir en ajoutant un euro au pot, ou renoncer et donc perdre l'euro engagé. Si le joueur A a enchéri, le joueur B doit lui-même choisir de suivre (ajouter un euro au pot), ou renoncer (et donc perdre l'euro engagé). S'il suit, les joueurs montrent leur carte et la plus forte emporte le pot.

Théorie des jeux pour micro-poker

La plupart des situations de ce jeu très simple sont évidentes à analyser. Si par exemple A dispose de la carte 3, il doit enchérir puisqu'il ne peut pas perdre. Il y a cependant deux situations de jeu qui méritent une analyse plus fine. Si le joueur A dispose de la carte 1, il peut espérer que B a la carte 2 et tenter de le bluffer en enchérissant. Si A a enchéri et que B a la carte 2, B se demandera si A bluffe ou s'il a vraiment

la carte 3, et ne saura donc pas avec certitude quoi faire : enchérir ou renoncer ?

L'analyse de ce jeu (voir l'encadré pages 80-81) conduit à la conclusion assez peu évidente que lorsque A dispose de la carte 1, il doit bluffer dans un tiers des cas au hasard (comme pour le jeu pierre-feuille-ciseaux). Lorsque B a la carte 2 et que A vient d'enchérir, B doit lui aussi enchérir dans un tiers des cas au hasard. En jouant ainsi, un joueur qui, lors d'une série de parties, sera parfois en position A et parfois en position B ne pourra pas être battu.

Cette stratégie mixte est optimale et correspond à ce qu'on nomme un équilibre de Nash. Il est remarquable ici que la théorie des jeux conseille au joueur A de bluffer parfois quand il a la carte 1. Le bluff, contrairement à ce qu'on pourrait penser, n'est pas une question de psychologie, mais est le comportement rationnel optimal d'un bon joueur qui a étudié mathématiquement le jeu : la théorie ordonne de bluffer et indique précisément avec quelle probabilité. Dans le cas du poker HULHE, la situation est comparable... mais beaucoup plus compliquée.

Vraiment optimale ?

Il faut noter ici un point un peu subtil qui concerne ce type de résultats, et en particulier le calcul de la stratégie optimale *Cepheus*. Lorsqu'un joueur joue mal en commettant toujours les mêmes erreurs, son adversaire s'en apercevra parfois et tentera alors d'en tirer avantage. Au jeu pierre-feuille-ciseaux, il est clair que si votre adversaire joue toujours *pierre*, vous en profiterez en jouant toujours *feuille*. Vous ne jouerez plus la stratégie optimale probabiliste, vous prendrez le risque que votre adversaire se réveille et se mette à exploiter votre jeu constant, mais s'il s'obstine à toujours jouer *pierre*, vous gagnerez bien plus en jouant toujours *feuille* qu'avec la stratégie mixte « optimale ».

Les situations peuvent d'ailleurs être bien plus complexes. Cette rubrique dans *Pour la Science* de septembre 1999 décrivait les succès de méthodes de jeu proposées par Claude Shannon et par un programme d'intelligence artificielle qui, au jeu

de type pierre-feuille-ciseaux, battaient nettement la plupart des joueurs humains. Ces programmes repéraient et exploitaient les régularités des joueurs, régularités dont eux-mêmes n'avaient pas conscience et dont ils n'arrivaient pas à se libérer. Ces programmes ne jouaient bien sûr pas la stratégie optimale de la théorie des jeux, mais une méthode plus subtile fondée sur l'analyse de la succession des choix de l'adversaire. Les méthodes de la théorie des jeux permettent de trouver les stratégies mixtes qui ne perdent jamais (statistiquement) ; c'est très bien. Mais on peut espérer mieux et vouloir tirer le plus possible des faiblesses identifiables de son adversaire, grâce à l'analyse des coups passés et à des algorithmes adaptatifs.

Il n'existe pas de méthode mathématique pour définir et calculer ce que serait une stratégie exploitant aussi rapidement que possible toute faiblesse repérable d'un adversaire. Toutefois, il est clair que dans une vraie partie de pierre-feuille-ciseaux ou de poker, bien jouer implique une telle prise en compte.

Soyons clairs : dans un tournoi qui opposerait des joueurs humains jouant obstinément de mauvaises stratégies (donc analysables et exploitables), la récente stratégie optimale *Cepheus* ou d'autres stratégies prenant quelques risques pour exploiter les joueurs faibles, il n'est pas certain que la stratégie *Cepheus* soit la gagnante. Dit encore autrement : la stratégie optimale *Cepheus* ne se fait battre par personne dans une compétition à deux joueurs, mais dans une compétition où plusieurs joueurs joueraient successivement par deux, les gains moyens de la stratégie *Cepheus* seraient probablement inférieurs à ceux du programme *Polaris* (par exemple) évoqué plus haut, et qui, lui, est conçu pour s'ajuster aux joueurs rencontrés (voir l'encadré page ci-contre).

Quand l'information est incomplète et que le hasard intervient, tout devient compliqué et subtil, et la théorie mathématique n'a pas encore trouvé le moyen d'avoir le dernier mot face aux méthodes heuristiques et indéfiniment améliorables de l'intelligence artificielle.

L'AUTEUR



J.-P. DELAHAYE est professeur émérite à l'Université de Lille et chercheur

au Centre de recherche en informatique, signal et automatique de Lille (CRISTAL).

BIBLIOGRAPHIE

M. Bowling et al., *Heads-up limit hold'em poker is solved*, *Science*, vol. 347, pp. 145-149, 2015.

Cepheus Project, pages web d'information sur le programme optimal calculé par l'équipe de Michael Bowling, 2015 : <http://poker.srv.ualberta.ca/>

O. Tammelin, *Solving large imperfect information games using CFR+*, prépublication arXiv:1407.5042, 2014.

J. Rubin et I. Watson, *Computer poker : A review*, *Artificial Intelligence*, vol. 175(5), pp. 958-987, 2011.

J.-P. Delahaye, *La fin des dames anglaises ?*, *Pour la Science* n° 363, janvier 2008 ; *L'intelligence humaine à nouveau dominée*, *Pour la Science* n° 263, septembre 1999.



Retrouvez la rubrique Logique & calcul sur www.pourlascience.fr

SCIENCE & FICTION

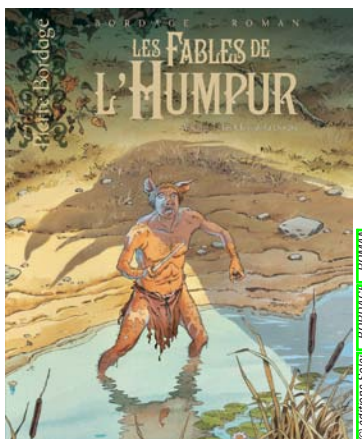
Le cochon, roi de la fiction

Aviateur, esprit de la forêt, monstre... : le cochon s'affiche dans de multiples œuvres. Une omniprésence qui traduit l'importance accordée à cet animal par de nombreuses cultures depuis le Néolithique.

Jean-Sébastien STEYER et Roland LEHOUCQ

S'il est un bestiaire fantastique dont on ne parle presque jamais, c'est bien celui des cochons ! Certes moins impressionnants que les dinosaures, les dragons ou autres géants réels ou fictifs, les porcins sont présents dans l'imaginaire collectif et jouent souvent un rôle de premier plan. Ainsi, dans *Princesse Mononoké* d'Hayao Miyazaki (1997), le gardien de la forêt luttant contre les humains pour protéger la nature n'est autre que le sanglier géant Okkoto, une sorte de divinité armée de quatre défenses impressionnantes – en fait des canines proéminentes et caractéristiques du groupe auquel appartient le sanglier. Et si le même réalisateur met aussi en scène un justicier homme-cochon, héros de la Grande Guerre, dans *Porco Rosso* (1992), il n'est pas le seul à s'inspirer de cet animal. Dans *Les Fables de l'Humpur* (1999), Pierre Bordage narre les aventures de Véhir, un homme-cochon fuyant sa caste d'hybrides pour retrouver sa nature humaine.

Sangliers géants, hommes-cochons... Pourquoi les porcins ont-ils autant marqué notre imaginaire collectif ? La présence de ces animaux dans de nombreuses régions du monde est peut-être un premier élément de réponse. On les retrouve en Europe, en Afrique, en Asie et en Océanie. On compte aujourd'hui 16 espèces – beaucoup plus par le passé – qui constituent la famille des suidés, des mammifères terrestres phylogénétiquement proches des cétacés. En



L'HOMME-COCHON est un personnage récurrent des œuvres fantastiques comme ici dans *Les Fables de l'Humpur* de Pierre Bordage.

POUR INFO

Roland Lehoucq participera, le 30 juin 2015 à 19 h 30, au débat « La science-fiction doit-elle se soucier de la science ? » qui suivra la projection du film *Planète interdite* organisée par l'Institut Henri-Poincaré au cinéma Grand Action, à Paris. Réservation sur : <http://www.ihp.fr/fr/cine-club-2015>

Europe, on trouve bien sûr le sanglier et le cochon. Le phacochère, l'imposant hylochère et le potamochère sont originaires d'Afrique, tandis que le sanglier nain est en voie d'extinction en Inde. Autre espèce notable, le babiroussa d'Indonésie est connu pour ses canines supérieures qui, chez le mâle, s'enroulent presque sur elles-mêmes au-dessus du crâne ! D'ailleurs, à l'instar de certains rongeurs, le babiroussa doit sans cesse user ses dents pour éviter que celles-ci ne le handicapent.

Les canines des suidés, si caractéristiques, ont inspiré certains personnages des œuvres de *fantasy*, tels les Orques de Tolkien, ces humanoïdes monstrueux taillés pour la guerre, qui exhibent un aspect porcine avec leurs canines inférieures sortant de la bouche.

Cependant, le lien avec l'homme est plus que géographique. Le porc (*Sus scrofa domesticus*) a été domestiqué au Néolithique pour la consommation de sa viande et comme « nettoie tout ». En effet, cet animal a un estomac capable de digérer n'importe quoi ou presque. Il faisait d'ailleurs office de poubelle ambulante dans le Paris du XII^e siècle !

Avec une telle omniprésence, il n'est pas étonnant que l'image du suidé soit profondément ancrée dans notre inconscient collectif. Aujourd'hui, le rapprochement entre l'homme et le cochon se fait même en médecine. Certains tissus de porc provenant de la peau, du foie ou encore du



CETTE RECONSTITUTION D'UN SUIDÉ
du genre *Eurolestriodon*
a été réalisée à partir de restes
fossilisés retrouvés dans
le Gers (sud-ouest de la France).
Elle indique que l'animal était
deux fois plus grand que
le sanglier actuel.

pancréas sont compatibles avec les nôtres et sont testés dans le cadre de nouvelles xénogreffes.

En écologie, le sanglier est, comme *Homo sapiens*, une espèce dite ingénieuse, c'est-à-dire capable de modifier de façon volontaire et durable son environnement. Il n'y a qu'à voir les dégâts que peut causer un troupeau de sangliers dans une chênaie. Nous avons donc de nombreux points communs avec cet animal omnivore, sensible, intelligent et doté d'un excellent sens de la communication grâce à ses nombreux grouinements et grognements.

Esprit de la nature ou monstre ?

Sauvage ou domestique et craignant peu l'homme, le suidé jouit donc d'un statut particulier qui nous renvoie à notre animalité et questionne notre rapport ambigu avec la nature. S'il symbolise tantôt une nature féroce mais respectable, tel Okkoto, il est aussi source d'effroi et de terreur et devient vite un monstre : c'est le cas du Razorback, terrible suidé du film d'horreur éponyme de 1984. La taille et la monstruosité de la bête évoquent certains suidés fossiles, tels l'énorme *Notochoerus* dont les restes pétrifiés, découverts en Afrique, suggèrent un animal de près de 450 kilogrammes avec de nombreuses excroissances sur la tête, ou *Kubanochoerus* d'Eurasie avec sa corne

frontale proéminente et son poids estimé à 500 kilogrammes. Chez les suidés actuels, le record est toujours détenu par Big Bill, un cochon domestique américain mort en 1933 qui pesait 1 157 kilogrammes !

L'histoire évolutive des porcins tend à renforcer l'image du monstre. Alors qu'elle ne s'étale que sur les vingt derniers millions d'années environ, elle regorge d'animaux à l'appétit féroce ! Les molaires de ces animaux présentent d'ailleurs des crêtes capables aussi bien de broyer que de découper. Ainsi, une paisible population d'herbivores ou d'omnivores pourrait devenir rapidement une meute de farouches carnivores.

Mais la voracité du suidé nous renvoie à la nôtre et à la consommation massive que nous faisons de cet animal. Car, même si sa viande est proscrite par les religions musulmane et juive, elle reste la plus consommée. La production mondiale augmente constamment et dépasse les 100 millions de tonnes de viande de porc par an, avec les problèmes environnementaux associés : forte consommation d'eau (il faut plus de 5 000 mètres cubes d'eau pour produire une tonne de viande de porc, contre moins de 4 000 pour la volaille, mais plus de 15 000 pour le bœuf), déforestation pour les cultures intensives alimentant les élevages, rejets de gaz à effet de serre, problèmes sanitaires, respect du droit animal...

Rejeté, craint, domestiqué, le cochon ne laisse personne indifférent. Il est sacré

dans certaines cultures indiennes ou celtes, alors qu'il est souvent associé à la saleté en Occident. Voire à une malédiction : dans la mythologie grecque, Circé la magicienne transforme en porcs les compagnons d'Ulysse, fraîchement débarqués sur son île. On retrouve cette métamorphose dans nos contes traditionnels, et finalement très codifiés, où les gueux coupables d'avoir fauté sont changés en porcs tandis que les princes sont transformés en grenouilles. Ainsi, dans *Willow* (Ron Howard, 1988), les soldats sont changés en porcs par la sorcière et dans *Le Voyage de Chihiro* (Hayao Miyazaki, 2001), les parents de la jeune héroïne, se goinfrant de nourriture dans un parc abandonné, se transforment en cochons.

Nul doute, donc, que les suidés réveillent quelque chose en nous. Fantastiques ou mythologiques, ces animaux nous renvoient à nos défauts et à nos peurs. Mais, même avec le cochon, la réalité peut rattraper la fiction : le phacomochère imaginaire aperçu dans *Les Quatre Saisons d'Espigoule*, une comédie de Christian Philibert (1999), est devenu une espèce cryptozoologique qui fait désormais partie intégrante du bestiaire folklorique de la Provence, si bien que son crâne est exposé au Muséum d'histoire naturelle de Toulon et du Var ! ■

J.-S. STEYER est paléontologue au CNRS-MNHN, à Paris. R. LEHOUCQ est astrophysicien au CEA, à Saclay.

ART & SCIENCE

À la recherche du sens perdu

À quoi ressemble une vie sans odorat ?

Une exposition répond en révélant le pouvoir des odeurs sur notre mémoire et sur notre quotidien.

Loïc MANGIN

Pouvez-vous citer des aveugles célèbres ? Tirésias, Œdipe, Homère, et plus proches de nous Ray Charles, Stevie Wonder... Même question avec les sourds ? Beethoven, Quasimodo, Ernest Hemingway, Luis Buñuel... Et enfin, des anosmiques ? C'est bien plus difficile de répondre, même quand on sait que l'anosmie est la perte de l'odorat !

De fait, ce sens semble moins essentiel que la vue ou l'ouïe. Pourtant, ne pas sentir le gaz, le brûlé, l'eau de Javel, la nourriture avariée peut nuire gravement à la santé. Cette anomalie est au cœur de l'exposition « Anosmie : Vivre sans odorat » présentée à l'Espace Pierre-Gilles de Gennes (ESPGG), l'espace grand public de l'ESPCI Paris Tech (réseau PSL).

Elle a été conçue par la photographe Éléonore de Bonneval afin de sensibiliser le public à ce trouble, qui touche 5 % de la population, et de revaloriser l'odorat, un sens négligé dans notre quotidien, notamment en faisant fonctionner notre mémoire olfactive.

Avant la visite, faisons connaissance avec l'anosmie. Lorsqu'elle est permanente, elle résulte le plus souvent de l'altération innée du nerf olfactif (due à une anomalie génétique par exemple) ou bien d'un traumatisme crânien. Elle reste généralement temporaire quand elle est associée à une sinusite, des polypes, un excès de tabac, une intoxication au cadmium.

L'anosmie s'inscrit dans un spectre d'anomalies de l'odorat. Ainsi, la parosmie

se traduit par une mauvaise interprétation des odeurs. L'hyperosmie est une exagération de ce sens. Autre cas, la phantosmie consiste en des hallucinations olfactives : on sent des effluves qui n'existent pas !

Imaginez Marcel Proust souffrant de l'un de ces troubles. L'épisode de la madeleine en aurait été bouleversé. De fait, l'odorat est le sens le plus réminiscent, c'est-à-dire associé à la mémoire. Ainsi, dans la première partie de l'exposition, le visiteur est invité à solliciter sa mémoire autobiographique et émotionnelle grâce au système de diffusion d'odeurs à sec Scentys qui permet d'éviter toute repré-

Imaginez une existence où l'enfance n'a pas d'odeur, où les fleurs ne sont que couleur, où les aliments n'ont pas de goût...

sentation visuelle. On associe alors les odeurs concoctées par Évelyne Boulanger, parfumeuse pour la société allemande Symrise à nos souvenirs intimes.

Les effluves de rose, de pop-corn, d'herbe coupée, de Malabar ressuscitent immédiatement des épisodes du passé, de la même façon qu'une madeleine trempée dans un thé renvoie le narrateur de *Du côté de chez Swann* à ses lointains séjours chez sa tante Léonie.

Dans un second temps, des photographies d'Éléonore de Bonneval offrent à voir des objets ou des situations qui évoquent

des odeurs : pain grillé, cage d'escalier, copeaux de crayons taillés, dictionnaire, métro parisien... En regard de ces clichés, des témoignages écrits racontent les émotions, positives ou non, liées à ces odeurs.

Enfin, un dernier espace est consacré à l'anosmie elle-même via des portraits en noir et blanc d'individus qui en souffrent. Ces photographies sont accrochées dans une sorte de serre où l'on est coupé du monde, au moins celui des odeurs. Les récits de Mark ou de Duncan par exemple nous font imaginer une existence où l'enfance n'a pas d'odeur, où les fleurs ne sont que couleur, où les aliments n'ont pas de goût, tant ce sens est associé à l'odorat... Un tel handicap conduit parfois à la dépression.

On se rend alors compte de l'importance des odeurs dans notre vie sociale. Une illustration parmi d'autres : en 2013, une étude avait révélé que les anosmiques, et particulièrement les hommes, ont beaucoup moins de partenaires sexuels que les autres.

Vous vous demandez encore s'il y a des anosmiques célèbres ? Ils sont rares. Néanmoins, le poète britannique du XVII^e siècle William Wordsworth et l'acteur Bill Pullman en seraient deux cas. ■

Anosmie : Vivre sans odorat, jusqu'au 31 juillet 2015, à l'Espace Pierre-Gilles de Gennes, à Paris : <http://bit.ly/PLS-Anosmie>

J. Croy et al., **Men without a sense of smell [...]**, *Biological Psychology*, vol. 92[2], pp. 292-294, 2013.

Rendez-vous



L'ODEUR DE PAIN GRILLÉ...
que vous évoque-t-elle ?



ROSE, POP-CORN, herbe coupée,
Malabar, métro parisien ?



DE LA CAGE D'ESCALIER au gala de
danse, notre monde est fait d'odeurs.

PHOTO: J. B. BOUTIN

Complétez votre collection!



Retrouvez tous les numéros depuis 1996 !

Commandez vos numéros sur
www.pourlascience.fr

POUR LA
SCIENCE ARCHIVES



Flashez ce QR code
 et accédez
 directement à
 toutes les archives !

IDÉES DE PHYSIQUE

La fontaine-boule : et pourtant elle tourne !

Grâce à un film d'eau légèrement pressurisée, on peut, avec une facilité déconcertante, faire tourner une lourde boule de granit sur son socle.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Qu'ont en commun les villes d'Aix-les-Bains, d'Alençon, de Boulogne-Billancourt, de Mende, de Montbéliard et de Pfaffstatt ? Ce sont les six villes françaises dotées d'une grande « fontaine-boule ». Il s'agit d'une boule de granit massif polie, déposée dans un logement creux parfaitement adapté (voir la figure ci-dessous) : une légère poussée de la main et voilà que la boule tourne longuement sur son socle, maintenue en suspension par un film d'eau de moins d'un millimètre d'épaisseur. Comment ce film si mince

peut-il supporter une masse qui atteint, avec les 2,65 mètres de diamètre de la boule du musée des sciences de Virginie, 27 tonnes ? Pourquoi l'eau n'est-elle pas chassée de dessous la boule ?

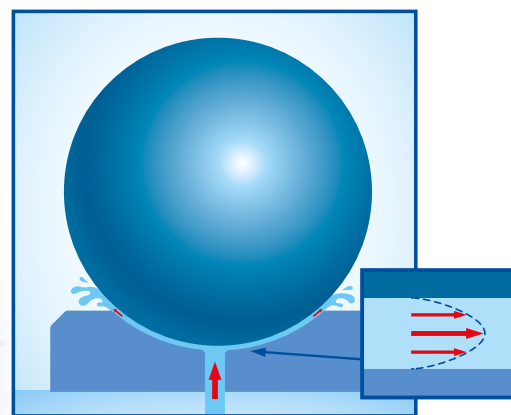
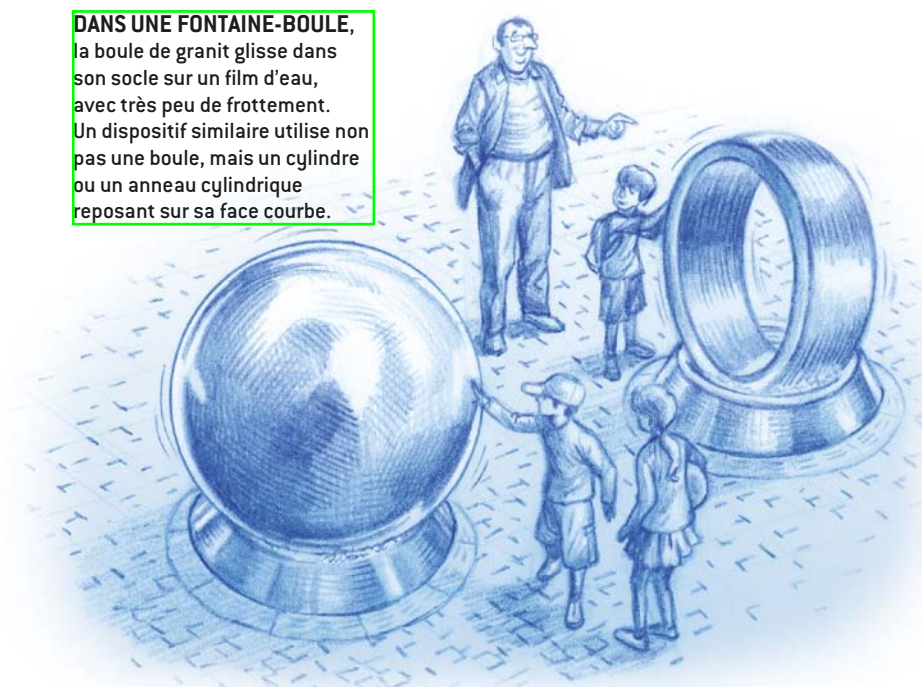
Sustenter avec un jet d'eau

Le granit massif étant 2,75 fois plus dense que l'eau, il ne flotte pas. La seule possibilité pour qu'un film d'eau soulève un objet en granit est que la pression en son sein dépasse la pression atmosphérique. Sachant

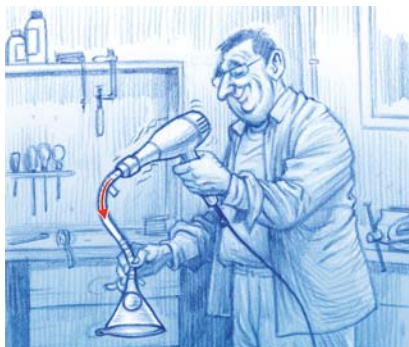
qu'une boule de granit de un mètre de diamètre fait environ une tonne et demie, soit un poids de 15 000 newtons, quelle est la pression requise pour la soulever ? Plus précisément, quelle doit être la surpression, en sus de la pression atmosphérique (qui s'applique partout) ?

Tout dépend de la surface de contact. Plus elle est étendue, plus la surpression sera faible. On calcule que la surpression est de deux atmosphères si la surface fait 750 centimètres carrés (moins de 5 % de la surface de l'hémisphère de notre boule). C'est peu ou prou la surface de contact des

DANS UNE FONTAINE-BOULE, la boule de granit glisse dans son socle sur un film d'eau, avec très peu de frottement. Un dispositif similaire utilise non pas une boule, mais un cylindre ou un anneau cylindrique reposant sur sa face courbe.



L'ÉPAISSEUR DU FILM D'EAU qui sépare la boule de son support est d'une fraction de millimètre. À travers cette épaisseur, le profil des vitesses du fluide est parabolique. À débit fixé, l'épaisseur de liquide s'ajuste de façon que la force exercée par le film d'eau compense le poids de la boule.



dessin de Bruno Vacari

L'EFFET VENTURI explique qu'une balle de ping-pong soit aspirée au fond d'un entonnoir dans lequel on souffle assez fort, et non expulsée comme on s'y attendrait intuitivement. Dans une fontaine-boule, dès que le débit d'eau est trop important, cet effet inertiel peut prendre le dessus sur l'effet de la viscosité et déstabiliser la sustentation de la boule.

LES AUTEURS



Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Leur blog : <http://blog.idphys.fr>



Retrouvez la rubrique
Idées de physique sur
www.pourlascience.fr

pneus sur la route pour une automobile ordinaire. Avec un contact sur l'intégralité de l'hémisphère, la surpression serait 20 fois plus faible, soit un dixième d'atmosphère – une surpression que l'on peut produire en soufflant avec la bouche. Pour les situations intermédiaires, on s'aperçoit qu'une pompe, même peu performante, permettrait d'atteindre la pression désirée.

A l'intérieur d'un pneu ou d'un circuit hydraulique, le fluide est enfermé dans une enveloppe hermétique et peut ainsi être mis sous pression. Ce n'est pas le cas avec la fontaine-boule, puisque l'eau s'écoule à la périphérie du socle. Comment la pression peut-elle être maintenue sous la boule sans que l'eau ne soit chassée ? Réponse : en créant un écoulement et en jouant avec la viscosité du fluide.

Si l'on souhaite maintenir un écoulement d'eau dans un tuyau horizontal dont une extrémité est ouverte à l'air libre, on sait qu'il faut injecter à l'entrée du tuyau une pression supérieure à la pression atmosphérique – ce afin de compenser les « pertes de charge » dues à la viscosité de l'eau, c'est-à-dire au frottement entre les filets d'eau contigus. Ces derniers ont en effet des vitesses différentes : immobile dans les filets au contact des parois, l'eau a une vitesse maximale dans les filets au cœur de l'écoulement. Plus précisément, pour des écoulements pas trop rapides, le profil de vitesse est parabolique (voir la figure de droite page 89).

Pour la fontaine-boule, le phénomène est identique : l'eau, injectée au fond du réceptacle, s'écoule dans le petit interstice qui sépare la boule et le socle, interstice qui fait office de tuyau. Les effets de la viscosité créent alors une variation de pression entre le point d'injection de l'eau, où la pression est maximale, et le bord de la fontaine, où le liquide est à la pression atmosphérique.

Comment s'assurer que la pression est suffisante pour soulever la boule, sans l'éjecter de son socle ? En fait, il n'y a rien à faire : l'ajustement est automatique lorsque l'on contrôle non pas la pression, mais le débit d'eau. Pourquoi ? Selon la loi de Hagen-Poiseuille, établie au XIX^e siècle, quand un fluide visqueux s'écoule entre deux surfaces, la variation de pression par unité de longueur

est proportionnelle au quotient du débit du fluide sur le cube de l'épaisseur de la couche de liquide. Cela signifie qu'à débit constant, une diminution d'épaisseur d'un facteur deux augmente la variation de pression – donc ici la surpression par rapport à la pression atmosphérique – d'un facteur huit.

En fixant le débit, si la (sur)pression est insuffisante au sein du fluide pour porter la boule, cette dernière va s'enfoncer, l'épaisseur de fluide diminue et la surpression augmente jusqu'à compenser, par la force exercée sur la surface de contact, le poids de la boule. Au contraire, en cas de pression excessive, la boule s'élève et la surpression diminue jusqu'à atteindre la valeur qui assure l'équilibre.

Avec une surface de contact occupant 17 % de l'hémisphère, un débit somme toute modeste de 1,5 litre par seconde assure la sustentation de notre sphère de un mètre de diamètre à une distance de un tiers de millimètre de son support, valeur que confirment les mesures.

On comprend alors la difficulté de réaliser de telles fontaines : les aspérités des surfaces de la boule et de son logement doivent être d'épaisseur inférieure au tiers de millimètre, faute de quoi elles entreraient en contact et l'on n'aurait pas de sustentation. En revanche, si le polissage est suffisant, la boule est en contact uniquement avec le film d'eau, d'où un frottement considérablement réduit. Et, très bien lubrifiée, la boule tourne sur elle-même lorsqu'on l'effleure de la main.

Éviter l'aspiration

Pour contourner la difficulté liée aux aspérités, on pourrait être tenté d'augmenter le débit de l'eau, afin que la boule s'éloigne de son logement. Hélas, dans cette situation, un second effet entre en jeu, l'effet Venturi. En quoi consiste-t-il ? Lorsque la vitesse d'un écoulement devient importante, les effets inertiels – notamment liés à l'accélération ou à la décélération du fluide – prennent le pas sur les effets de viscosité : en raison de la conservation de l'énergie, la pression diminue quand la vitesse (donc l'énergie cinétique) du fluide augmente. Ainsi, si l'on place une balle de ping-pong dans un

entonnoir et si l'on souffle de l'air par la petite embouchure cylindrique, la balle, contrairement à notre intuition, est attirée par la dépression qui se crée entre elle et la paroi de l'entonnoir [voir la figure page 90].

C'est ce qui peut se passer avec la boule si le débit de la fontaine est trop important. D'une part, à cause de la géométrie sphérique, le fluide ralentit à mesure qu'il s'éloigne du point d'injection, afin que la conservation du débit soit assurée. Par conséquent, du point d'injection jusqu'au bord de la fontaine, la pression du fluide augmente. Et comme au bord, la pression est égale à la pression atmosphérique, cela signifie qu'ailleurs sous la boule, le fluide est en dépression.

En tenant compte simultanément de ces effets inertiels et des effets de viscosité, on montre ainsi qu'à partir d'une certaine vitesse du fluide, l'augmentation du débit

déstabilise la fontaine : la boule est aspirée vers son socle.

C'est pourquoi il est plus difficile de réaliser un dispositif de type fontaine-boule avec de l'air. L'air étant 50 fois moins visqueux que l'eau, pour un même débit, la variation de pression due à la viscosité est 50 fois plus faible qu'avec l'eau. Pour soulever la sphère, il faut donc réduire l'écart entre la sphère et son logement d'un facteur égal à la racine cubique de 50, soit un facteur 3,7, ce qui fait un écartement de 0,08 millimètre. Et si l'on augmente trop le débit, on sera confronté à l'effet Venturi. Malgré la difficulté, une telle sculpture a été réalisée et exposée en 2004 par l'entreprise indienne Brahma Granitech : une boule de granit noir de 40 centimètres de diamètre qui, comme par magie, semblait léviter au-dessus de son socle, soutenue par un film d'air invisible. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. H. Snoeijer et K. van der Weele, **Physics of the granite sphere fountain**, *American Journal of Physics*, vol. 82, pp. 1029-1039, 2014.

Toutes les ARCHIVES

- Pour la Science
- Dossier Pour la Science

depuis

1996



maintenant disponibles sur www.pourlascience.fr

* Numéros à lire en ligne ou téléchargeables en PDF, en vente à l'unité ou accessibles par abonnement.



CHAQUE MOIS



CHAQUE TRIMESTRE

Retrouvez vos magazines en kiosque ou directement chez vous

POUR LA SCIENCE

La référence de l'actualité scientifique internationale



LES VERSIONS NUMÉRIQUES
feuillettées en PDF sur le site



L'APPLICATION

téléchargeable sur Appstore
et Google Play pour consulter
vos magazines



Suivez Pour la Science
également sur :



DES CONTENUS INÉDITS
sur le site



WWW.POURLASCIENCE.FR

QUESTION AUX EXPERTS

Est-on gros lorsqu'on a un indice de masse corporelle élevé ?

Pas forcément au point de mettre sa santé en danger, car la graisse est plus ou moins nocive selon sa localisation.

Martine DUCLOS

Vous êtes-vous déjà trouvé un peu enrobé(e) en vous regardant dans le miroir ? Si c'est le cas, vous avez sans doute calculé votre indice de masse corporelle, ou IMC, obtenu en divisant votre poids (en kilogrammes) par votre taille (en mètres) au carré. Pour un individu de 1 m 75 et 80 kg, par exemple, l'IMC est d'environ 26 (kg/m²). Mais cet indice permet-il vraiment de déterminer quand un excès de masse grasse devient problématique ?

Plusieurs catégories sont définies à partir de l'IMC : la maigreur (IMC ≤ 18), le poids normal (18 < IMC < 25), LE SURPOIDS (25 ≤ IMC < 30) ET L'OBÉSITÉ (IMC ≥ 30). De nombreuses études épidémiologiques ont montré que plus cet indice est élevé, plus certaines pathologies sont fréquentes et plus la mortalité augmente. Quand l'IMC dépasse 25 – autrement dit quand le sujet est en surpoids –, l'accroissement devient exponentiel. Selon des résultats obtenus en 2010 par Amy Berrington de González, de l'Institut américain du cancer, le risque de mourir d'une maladie cardiovasculaire ou de certains cancers augmente de 13 % en cas de surpoids et jusqu'à 150 % pour la classe d'obésité la plus marquée (IMC > 40).

Ainsi, l'IMC est un outil simple et pertinent pour décrire les problèmes sanitaires de populations entières. En France, l'étude trisannuelle ObEpi-Roche a révélé que la prévalence de l'obésité a progressé de 70 % depuis 1997, passant de 8,5 à 15 %

chez les adultes, alors que le surpoids est resté stable à 32,3 %. C'est aujourd'hui un problème de santé publique, aux multiples conséquences médicales et économiques.

Néanmoins, pour le diagnostic individuel, l'IMC n'est pas toujours très efficace. Les sujets en surpoids ou obèses ont une sensibilité très variable aux troubles métaboliques ou cardiovasculaires, même quand ils ont le même IMC. Existe-t-il un meilleur indice ?

Le paramètre clef pour la santé est la localisation de la masse grasse, qui dépend des sujets : elle est en général répartie sous la peau, mais elle se concentre parfois dans les viscères. Et c'est là qu'elle est la plus dangereuse ! Le tissu adipeux viscéral déclenche en effet une inflammation locale, puis générale. Il s'accumule non seulement dans la cavité abdominale, mais aussi autour du cœur et à l'intérieur des muscles, perturbant le fonctionnement métabolique de l'organisme entier.

Pour quantifier cette « mauvaise graisse », le médecin français Jean Vague a introduit dès 1947 la mesure du tour de taille : celui-ci est d'autant plus élevé que du tissu adipeux s'accumule au niveau abdominal. Le tour de taille est considéré comme élevé quand il est supérieur à 88 centimètres (cm) chez la femme et à 102 cm chez l'homme.

Cette mesure s'est révélée plus adaptée au diagnostic individuel que l'IMC. Ainsi, une personne en surpoids mais au tour de taille modéré n'a pas une vulnérabilité accrue aux pathologies évoquées. En revanche, le risque de maladie et la mortalité augmentent de

façon significative avec un tour de taille élevé, et ce indépendamment de l'IMC. C'est ce qu'ont montré en 2014 James Cerhan, de la clinique Mayo, à Rochester, et ses collègues. Ainsi, pour toute augmentation de 5 cm du tour de taille (à partir de 90 cm chez l'homme et de 70 cm chez la femme), la mortalité masculine s'accroît de 7 % et la mortalité féminine de 9 %.

Le redoutable bedon de la quarantaine

La quantité de graisse abdominale dépend en partie du sexe (les hommes en ont plus), de prédispositions génétiques et de l'âge – le bedon de la quarantaine, cela vous dit quelque chose ? Mais elle n'est pas inéluctable ! Pour la diminuer, les recommandations sont les mêmes que pour lutter contre la prise de poids en général : associer alimentation adaptée et activité physique. Cette dernière fait fondre le tissu adipeux viscéral même quand on ne perd globalement pas de poids, selon des travaux publiés en 2012 par Jean-Pierre Després, de l'Université Laval au Québec. Les médecins recommandent deux heures et demie d'activité physique modérée (marche rapide, natation à vitesse moyenne, etc.) par semaine. Peut-être est-il temps de rechausser vos baskets ! ■

Martine DUCLOS dirige le service de médecine du sport au CHU de Clermont-Ferrand.

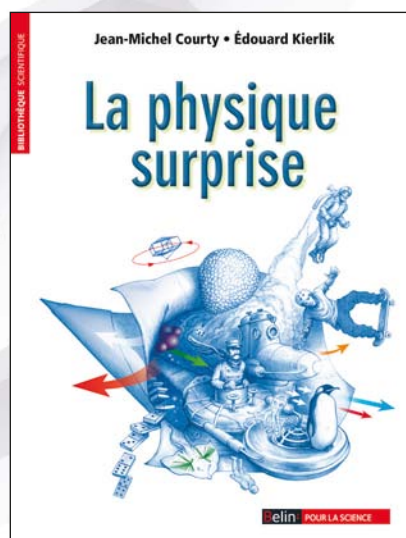
Les meilleures ventes

■ POUR LA
SCIENCE

La physique surprise

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

Réf. 84245121



Passionnés de physique et curieux de tout, Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik vous invitent à une nouvelle promenade sur des chemins de traverse dans un langage accessible et imagé, sans jargon ni formules. Avec eux, laissez-vous surprendre par les phénomènes physiques que vous avez déjà côtoyés sans même les remarquer !

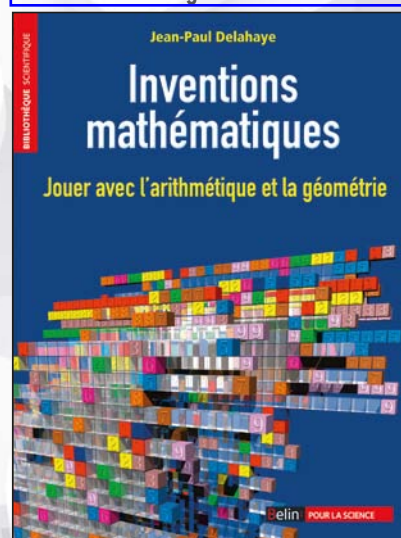
Editions Belin / Pour la Science
184 pages – 24 euros
ISBN 978-2-8424-5121-9

Inventions mathématiques

Jouer avec l'arithmétique et la géométrie

Jean-Paul Delahaye

Réf. 84245128



Dans ce livre, vous trouverez des figures paradoxales, des jeux classiques comme le Tangram et le cube de Rubik, des problèmes du quotidien tels le découpage d'une pizza ou l'accrochage d'un tableau, des énigmes élémentaires ou complexes, ou encore des images grises où la cryptographie cache des visages et des animaux.

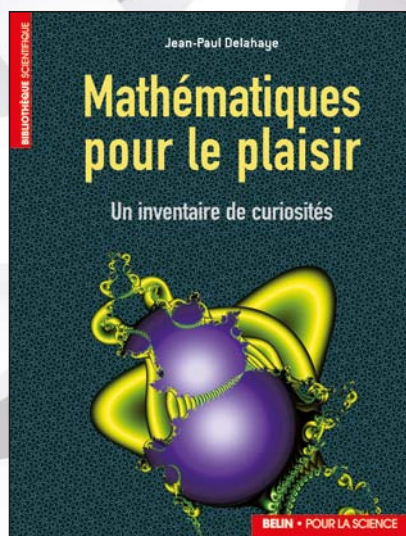
Editions Belin / Pour la Science
125 pages – 25 euros
ISBN 978-2-8424-5128-8

Mathématiques pour le plaisir

Un inventaire de curiosités

Jean-Paul Delahaye

Réf. 84245104



Arts et mathématiques, géométries amusantes, jeux, nombres, casse-tête et énigmes... Les mathématiques sont une source de joie et d'épanouissement pour celui qui sait y consacrer un peu d'attention et d'esprit ludique !

Editions Belin / Pour la Science
208 pages – 25,40 euros
ISBN 978-2-8424-5104-2

La logique,

un aiguillon pour la pensée

Jean-Paul Delahaye

Réf. 84245115



La logique a connu d'incroyables progrès depuis deux siècles : l'incomplétude de Gödel et l'indécidabilité de Turing ; les étranges hyper-ensembles, etc. Cet ouvrage sur la logique moderne intéressera autant mathématiciens que philosophes et curieux intrigués par le monde des raisonnements.

Editions Belin / Pour la Science
200 pages – 27 euros
ISBN 978-2-8424-5115-8

Pour commander ces ouvrages, rendez-vous sur www.pourlascience.fr

SCIENCE & GASTRONOMIE

Les suspensions de microgels

Une généralisation des sauces de type velouté conduit à des systèmes partiellement gélifiés d'une grande tendreté, les « debyes ».

Hervé THIS



La cuisine française lie les sauces depuis au moins le Moyen Âge : leur moléculé est une de leurs principales qualités. Par ailleurs, des solides très mous – un fromage crémeux, un foie gras, etc. – sont appréciés des gourmands. Comme nous allons le voir ici, une façon de produire de tels systèmes est de réaliser des suspensions de microgels.

Commençons avec les sauces liées, puisque ces dernières apparaissent dans *Le Viandier* de Guillaume Tirel, dit Taillevent. Ce livre, dont le plus ancien manuscrit (première moitié du XIV^e siècle) est à la bibliothèque cantonale de Sion, en Suisse, mentionne des sauces produites à partir d'un liquide que l'on fait bouillir avec du pain ; en se délitant, ce dernier donne de la consistance.

Plus tard dans l'histoire, on a cuit la farine avec du beurre pour faire des roux, et l'ajout de ces derniers à des solutions aqueuses a fait les « veloutés », sauces auxquelles des cuisiniers parmi les plus grands, tel Marie-Antoine Carême, ont consacré des pages émouvantes. Les liaisons à l'œuf (crème anglaise, sauce hollandaise, béarnaise) ou au sang (sauce civet) sont venues s'ajouter ultérieurement.

Dans toutes ces préparations, le physicien reconnaît des suspensions, où des particules sont dispersées dans une phase aqueuse. Selon les proportions de liquide et de phase suspendue, on obtient des consistances différentes, dont on sait

évaluer la viscosité : en première approximation, elle est égale à celle de la phase aqueuse multipliée par $1 + 2,5\phi$, où ϕ représente la fraction volumique occupée par les particules.

Cette formule n'est bien sûr qu'approximative, car la nature des particules suspendues importe : selon qu'elles sont sphériques ou non, déformables ou pas, les comportements des suspensions sont différents.

Bien plus près de nous, il y a le jaune d'œuf que j'avais proposé de cuire à 67 °C : sa consistance très tendre, associée au voluptueux goût de jaune d'œuf cru, lui confère une qualité gustative supérieure. Lors de la cuisson à cette température, le jaune prend une consistance de pommade, sans doute parce qu'une partie des protéines n'est pas assez cuite pour coaguler. De ce fait, on obtient une suspension de particules gélifiées, au lieu d'avoir un gel entièrement pris, comme dans un œuf dur. Dans un tel système, on peut imaginer une phase aqueuse (le jaune d'œuf contient 50 % d'eau) où sont dispersés des granules faits de protéines et de lipides, et des petites particules formées par coagulation des protéines.

Pour tous ces systèmes, on a une phase aqueuse bien encombrée par des particules gélifiées. Une généralisation consiste, très naturellement, à produire d'abord un gel, que l'on dissocie, avant de disperser les fragments de gel dans un liquide, eau ou huile.

Un gel ? On peut choisir un gel « physique », réversible, tel qu'on en obtient à

partir d'une solution aqueuse (jus de viande, fumet de poisson, jus de fruit, café) et d'un gélifiant (gélatine, agar-agar, alginate ou carraghénane). Ou bien un gel chimique, irréversible, tel qu'on en obtient en cuisant de l'œuf, du poisson, de la viande. Dans les deux cas, on passe le gel formé au mixeur et on le disperse dans une petite quantité de liquide, solution aqueuse ou matière grasse à l'état liquide (huile, par exemple). Je propose de nommer « debyes » ces systèmes, en l'honneur du physico-chimiste néerlandais Peter Debye (1884-1966), pionnier de l'étude de la matière molle.

Une recette de saison pour un tel système ? Coupons des fraises en lamelles, puis faisons une infusion de menthe poivrée, ajoutons de la gélatine et faisons prendre. Mixons le gel formé et, pour assouplir la préparation, ajoutons quelques gouttes d'eau de fleur d'oranger, ce qui fera une sauce de la tendreté voulue. Et c'est ainsi que la physico-chimie est grande ! ■



Hervé THIS, physico-chimiste, est directeur du Centre international de gastronomie moléculaire AgroParisTech-Inra et directeur scientifique de la Fondation Science & culture alimentaire (Académie des sciences).



Retrouvez la rubrique Science & gastronomie sur www.pourlascience.fr

■ PHYSIQUE

Par-delà le visible

Carlo Rovelli

Odile Jacob, 2015
(272 pages, 23,90 euros).

Membre du Centre de physique théorique de Luminy, l'auteur propose une réflexion sur la gravité quantique à boucles. Ce nom technique désigne l'une des théories qui pourraient – c'est la conviction de l'auteur et celle d'une partie des physiciens – mener à l'un des graals de la physique, la description unifiée des quatre interactions fondamentales connues : les interactions faible, forte, électromagnétique et la gravitation.

Par nature, les avancées théoriques en physique fondamentale sont spéculatives et difficiles à expliquer. Les stratégies adoptées par les auteurs qui en parlent sont diverses : certains font avaler au lecteur un siècle de théorie quantique, de relativité, de physique des particules avant de consacrer une partie finale à ce qui semblait constituer le sujet principal.... D'autres essaient de dégager les grands principes sous-tendant le propos afin de partager plus vite avec le lecteur quelques questions profondes. L'ouvrage de Rovelli est de cette seconde nature.

Le propos est cultivé, illustré de nombreuses analogies éclairantes et les grandes questions



sur la nature de l'espace et du temps sont amenées de façon progressive et naturelle. On peut être en désaccord avec certaines des positions épistémologiques ou philosophiques exprimées dans l'ouvrage, mais c'est précisément l'un de ses points forts : l'auteur les expose avec suffisamment de clarté pour que l'on puisse y réagir, s'y reconnaître ou pas. Il parvient ainsi à nous emmener au cœur de cette gravité quantique à boucles, en prenant le temps de nous faire visiter cette théorie.

Malgré quelques maladroresses dans les traductions de termes techniques, l'ouvrage est extrêmement agréable à lire. J'y ai retrouvé le plaisir que ce type de sujet m'avait parfois fait perdre au fil des années... ce plaisir si particulier procuré par ce qui s'adresse directement à notre intelligence !

Richard Taillet
Université de Savoie, Annecy

■ PRÉHISTOIRE

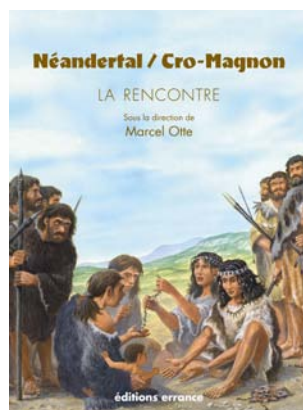
Néandertal/Cro-Magnon - La Rencontre

Marcel Otte (dir.)

Errance, 2014
(304 pages, 45 euros).

Que s'est-il passé au moment de l'arrivée des *Homo sapiens* en Europe occidentale, il y a quelque 40 000 ans ? Quels échanges eurent-ils avec les Néandertaliens, qui peuplaient ces régions depuis des dizaines de milliers d'années ? Voilà l'intéressant sujet de ce livre écrit sous la conduite éclairée de Marcel Otte.

Les préhistoriens relèvent des traces de l'influence que les cultures *sapiens* ont pu exercer sur les populations locales et inversement. Ainsi, dans certains sites, du Proche-Orient aux contrées occidentales de l'Europe, jusqu'à



la plaine russe et les confins de l'Asie, les composantes culturelles locales se mêlent à des traits nouveaux.

L'équipe internationale de préhistoriens qui a réalisé ce livre s'est attachée à démêler l'écheveau complexe de ces interactions culturelles en Europe. Les assemblages d'industries, tels que le Châtelperronien d'Europe occidentale, l'Uluzzien du pourtour méditerranéen en Italie et Grèce, le Széletien et le Bohunien d'Europe centrale, le Streletskien de Russie, ont fait l'objet d'âpres débats. Ils ont été tantôt attribués aux *sapiens*, tantôt aux Néandertaliens seuls, ou bien à leurs échanges. Révéler-ils des formes d'« acculturation », d'apprentissage réciproque, de « diffusion d'idées d'un groupe à l'autre », voire de simple convergence ? « Chaque partie de l'Europe connut diverses réactions parfois d'une extrême complexité, mais toutes ont finalement adopté les modes de vie nouveaux, en articulant leur propre destin sur l'art, la religion et le rapport à l'animal. Une nouvelle histoire des cultures paneuropéennes s'était mise en route » écrit Marcel Otte.

Néandertaliens et *H. sapiens* eurent-ils par ailleurs des échanges génétiques ? L'étude de leurs génomes montre qu'ils se sont croisés et que 1 à 3 % du patrimoine génétique des Eurasiens

actuels proviendraient des Néandertaliens. Il en ressort que ces derniers constituaient peut-être une variété de l'espèce humaine plutôt qu'une espèce distincte.

Bien que ses causes précises restent indéterminées, leur disparition est certainement en rapport avec l'expansion des hommes modernes.

Claudine Cohen
EHESS, Paris

■ BIOLOGIE ANIMALE

Les souris gloussent, les chauves-souris chantent

Karen Shanor et Jagmeet Kanwal

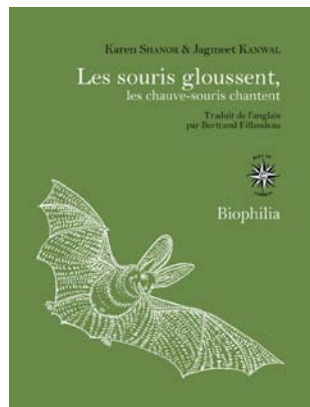
José Corti, 2015
(328 pages, 21 euros).

La grande leçon du darwinisme est qu'il n'existe pas d'espèce globalement supérieure aux autres. Chaque espèce a acquis des capacités « supérieures » dans un domaine qui lui est propre. Les récents progrès de la biologie et de l'éthologie permettent de comprendre certaines de ces aptitudes étonnantes et c'est le thème du présent livre.

Depuis les éléphants qui perçoivent des vibrations par la plante des pieds jusqu'à la grande intelligence des corbeaux, l'ouvrage nous fait appréhender d'innombrables curiosités. Nous découvrons les perceptions électriques de certains poissons, les perceptions magnétiques des oiseaux, les communications par vibrations dans le sol des rats-taupes, l'écholocation des chauves-souris, des dauphins ou des baleines. Nous apprenons les capacités de survie de nombreux animaux, mais aussi de plantes qui « génèrent des signaux électriques susceptibles d'être perçus par d'autres plantes ». Nous admirons les tentatives de « camouflage,

bluff ou manipulation». Nous saisissons l'extrême résistance des cafards aux radiations et la prévision par certains animaux des ouragans ou des tremblements de terre. Nous partageons le rire des rats et des souris, le jeu et l'humour de diverses espèces, les aptitudes étonnantes de perroquets, dont le célèbre Alex qui connaissait les noms des objets, les couleurs, la notion de semblable versus différent... Nous parcourons les cultures des animaux, leurs chants et leurs danses, les langages qu'on peut enseigner aux anthropoïdes, les cas de mensonge et de tromperie.

L'ouvrage se termine sur une mise en cause de la « nature humaine ». Il eût mieux valu mettre en cause le fait que l'homme se veut toujours d'une supériorité absolue sur les autres espèces, ce qui est totalement inexact. Mais les aptitudes cérébrales de la lignée des vertébrés,



dont l'homme est grand bénéficiaire, auraient pu être soulignées. Ce n'est pas parce que les autres espèces vivantes développent des capacités remarquables et méritent le respect que l'espèce humaine n'a pas pu, elle aussi, dans la sphère cérébrale, développer les siennes.

Georges Chapouthier
Chercheur émérite au CNRS, Paris

■ ASTRONOMIE

À la rencontre des comètes

James Lequeux et Thérèse Encrenaz

Belin, 2015
(160 pages, 22,90 euros)



Le 12 novembre 2014, le module *Philae* quitte la sonde spatiale *Rosetta* en direction de la comète *Tchourioumov-Guérassimenko* (aussi appelée « Tchouri »). Il atteint sa destination quelques heures plus tard. C'est la première fois qu'un robot se pose sur la surface d'un noyau cométaire. L'événement est relayé par les médias. Le public se passionne pour cette prouesse et les astronomes sont impatients de découvrir les données qu'apportera cette mission. Il faut dire que les comètes sont des objets célestes atypiques. C'est pour répondre à l'intérêt qu'elles suscitent que les deux auteurs, tous deux astronomes, proposent dans ce livre un état des connaissances sur les comètes.

Témoins privilégiés des premiers âges du Système solaire, les comètes contiennent peut-être l'eau qui est à l'origine des océans. Quant à la matière cométaire, elle est très semblable à la matière interstellaire et, comme cette dernière, est riche en composés organiques complexes. Il se pourrait donc que des comètes aient « inséminé » la Terre avec des molécules prébiotiques ayant joué un rôle dans l'apparition de la vie.

L'angle d'attaque des auteurs consiste à raconter comment les chercheurs sont peu à peu arrivés aux conceptions actuelles. L'ouvrage allie donc la vulga-

risation scientifique à des éléments d'histoire des sciences. Il raconte ainsi comment Edmond Halley fut le premier, au début du XVIII^e siècle, à mettre en évidence le caractère périodique du passage de certaines comètes; comment la nature physique des comètes commence à être percée au XIX^e siècle; puis comment, étape par étape, la composition des comètes se précise, en particulier grâce à l'envoi de sondes spatiales pour étudier le retour de la comète de Halley en 1986. L'ouvrage rappelle que c'est à partir de cette époque que l'on a su que les comètes sont riches en molécules organiques complexes. Les auteurs poursuivent ensuite leur cheminement historico-scientifique en décrivant les résultats apportés par l'étude d'autres comètes, jusqu'à l'exploitation de la mission de *Philae* toujours en cours. Après les dernières pages consacrées aux récentes observations de comètes d'autres systèmes solaires, les auteurs, aidés par une très bonne iconographie, bouclent ce très instructif tour d'horizon des comètes.

Thomas Lepeltier
Oxford



Agrippine

Virginie Girod

Jallandier, 2015
(304 pages, 20,90 euros)

Après Messaline (25-48), une autre femme tente de conquérir le pouvoir impérial en séduisant l'empereur: Agrippine (15-59). L'auteur a réanalysé les sources afin de nous en dresser un portrait dégagé au mieux d'une réputation qui doit beaucoup à la propagande: il fallait en effet que la mère de Néron, tyran haï et matricide, ayant épousé son propre oncle l'empereur avant (peut-être) de le tuer, soit aussi épouvantable que son fils.



Une histoire de l'Institut Pasteur

Marie-Hélène Marchand

Privat, 2015
(224 pages, 18 euros)

Cette petite histoire institutionnelle de l'Institut Pasteur présente un point de vue original sur le célèbre organisme de recherche, celui d'une membre de la direction entre 1983 et 2005. Les brefs portraits des personnalités qui ont emmené l'Institut, depuis les directeurs du début du XX^e siècle jusqu'aux directeurs généraux du début du XXI^e siècle, sont particulièrement intéressants, tout comme la relation d'un « accès de rage à l'Institut Pasteur » (le conflit des années 2004-2005) ou celle des situations bizarres créées par le mécénat dont bénéficie l'Institut.



De l'atome imaginé à l'atome découvert

H. Krivine et A. Grosman

De Boeck, 2015
(144 pages, 19 euros)

« Contre le relativisme ». Le sous-titre de ce petit ouvrage indique l'œuvre salvatrice faite ici: les auteurs relatent les progrès de l'atomisme, mais aussi de quelle façon cette théorie était controversée avant que sa pertinence n'éclate grâce à l'expérience. Un cas emblématique, qui les lance pour montrer comment l'expérimentation empêche qu'une controverse scientifique ne s'achève toujours par la victoire de l'opinion majoritaire et pour critiquer l'idée du relativisme, selon laquelle les résultats de la science ne sont que des « constructions sociales ».

Retrouvez l'intégralité de votre magazine et plus d'informations sur www.pourlascience.fr



NE PAS COMPRENDRE, UN PLAISIR

« Quelle satisfaction peut-on bien éprouver à ne pas comprendre quelque chose ? », demande un personnage de Queneau à propos de ceux qui se vantent de ne rien comprendre aux mathématiques (Odile, Gallimard, rééd. 1987, page 29).

Comme si comprendre était toujours satisfaisant ! Il y a des élucubrations dont saisir l'enjeu me plairait moins que ne pas le saisir. Ainsi, dans *La fin du monde et de l'humanité* (PUF, 2014, p. 210), le philosophe Hicham-Stéphane Afeissa explique en quoi le



mal ne se réduit pas au fait de causer du tort à un homme. Imaginons que le seul survivant d'une catastrophe mondiale se mette à éliminer les animaux : « Le dernier homme agit mal. Or l'action du dernier homme ne porte préjudice à aucun être humain (puisqu'il est le dernier survivant). Donc il n'est pas vrai qu'aucune action humaine ne puisse être mauvaise à moins de porter préjudice à un être humain. » Je doute qu'à me casser la tête là-dessus, je verrais d'un œil neuf quoi que ce soit qui m'importe. Or je ne veux pas comprendre pour comprendre, mais pour être éclairé.

En mathématiques, certaines obscurités sont savoureuses. « Tout couple formé par un schéma noéthérien quasi-excellent et un fermé rare devient, après localisation par des morphismes étales et des altérations convenables, isomorphe au couple formé par un schéma régulier et un diviseur à croisements normaux » (L. Illusie et al., *Travaux de Gabber...*, Soc. Math. de France, 2014). Le sens exotique caché derrière chaque mot familier donne à cette phrase le charme d'un trompe-l'œil (comme il existe des trompe-l'œil). Mais, à

s'initier au sens, ne brise-t-on pas ce charme ? Alors, plutôt goûter la poésie née du mystère que m'imposer des années de travail pour maîtriser une théorie qui, probablement, ne m'éclairerait que sur elle-même.

Les propos du philosophe, eux, n'ont aucun charme – même si on ne les comprend pas ! Ne pas comprendre les mathématiques me satisfait plus que ne pas comprendre la philosophie.

TOPOLOGIE LITTÉRAIRE

Les écrivains s'influencent les uns les autres, y compris lorsqu'ils inventent des lieux fictifs. Entre ces lieux imaginaires, donc, existent des rapports réels. Pourtant, aucune carte n'en rend compte. C'est dommage. La littérature doit être éclairée par toutes les facettes de la géographie.

Géographie générale. Brobdingnag, Erewhon, Flatland, Neverland – autant de contrées créées par des écrivains. Comment percevoir avec finesse les singularités de chacune, si l'on ne dispose pas de carte figurant leurs positions relatives ?

Géographie des communications. Dans l'état actuel de la cartographie, nul ne sait résoudre le problème du voyageur culturel : minimiser la distance à parcourir pour, d'une traite, aller visiter le château de Moulinsart, l'église de Plassans, la vespasienne de Clochemerle, la pharmacie d'Yonville, la mairie de Gleux-lès-Lure.

Géographie physique. Est-il vrai que les territoires dus aux écrivains sont tous surplombés par l'imprenable ville de Nancago, due au mathématicien Bourbaki ?

Bien sûr, les cartes montrant ensemble des endroits imaginés par des auteurs si



divers sont à tracer dans des espaces topologiques biscornus. Le théorème des quatre couleurs s'appliquera-t-il ? Si oui, les vérités mathématiques s'imposent aux créations littéraires : preuve de la supériorité des mathématiques. Si non, l'imagination littéraire se joue de la rigueur des mathématiques : preuve de la supériorité de la littérature.

LOGICIELS DICTATEURS

Je voulais écrire quelques lignes, à l'aide d'un ordinateur qu'on m'avait prêté, mais il ne cessait de s'interposer sans que je sache l'en empêcher. Je n'avais pas tapé trois lettres d'un mot, que déjà il anticipait et complétait à sa façon. Quand il consentait à me laisser aller au bout du mot, il se permettait de suggérer que, en fait, j'en avais probablement un autre en tête, qu'il me proposait fermement.



Bref, cet ordinateur, récent, était très intelligent. Entre lui et moi, le combat fut indécis. À force, j'ai eu les derniers mots : j'ai écrit ceux que je voulais, non ceux qu'il croyait que je voulais. Mais, perdant beaucoup de temps à rectifier les interventions par lesquelles il prétendait m'en faire gagner, j'ai dû me contenter d'un texte plus court que prévu.

Chers inventeurs, lorsque vous concevez un objet, enseignez-lui qu'être intelligent ne consiste pas à toujours savoir mieux que les autres, et ne l'autorise pas à leur couper la parole sous prétexte qu'il est plus rapide. Prévenez-le que quand un utilisateur fait un choix étrange, ce n'est pas forcément une ineptie ou une étourderie de sa part. S'il vous plaît, ne lancez pas sur le marché un objet intelligent tant que vous n'êtes pas sûrs qu'il a compris et retenu ces leçons. Merci d'avance. ■



Une autre terre
Lexique illustré
d'une nature à protéger

O. Dangles, F. Nowicki, B. Mena
ISBN 978-2-7099-1875-6
204 pages, 120 photos couleurs
42 €



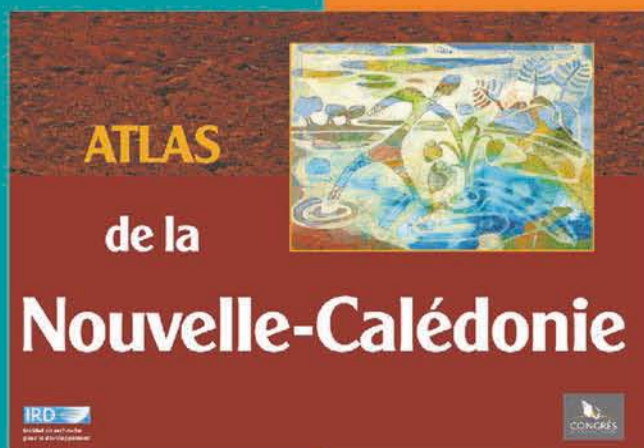
Natura maxima
Équateur, terre de biodiversité

O. Dangles, F. Nowicki, B. Mena
ISBN 978-2-7099-1689-9
252 pages
39,60 €



**Guide illustré
de la flore de Patagonie**

D. Barthélémy, C. Brion, J. Puntieri
ISBN 978-2-7099-1873-2
240 pages, 500 photos couleur
48 €



**La Nouvelle-Calédonie,
un destin peu commun**

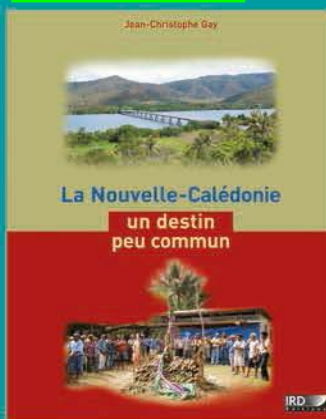
J.-C. Gay
ISBN 978-2-7099-1748-3
240 pages, 120 photos couleur
38 €

Atlas de la Nouvelle-Calédonie

J. Bonvallot, J.-C. Gay
ISBN 978-2-7099-1740-7
384 pages, 60 planches carto.
60 €

**Sous le développement,
le genre**

C. Verschuur, I. Guérin,
H. Guétat-Bernard
ISBN 978-2-7099-1883-1
35 €



**Le corps de l'homme,
l'esprit des plantes**
Soigner chez les Yanésha
en Haute Amazonie péruvienne

C. Valadeau, G. Bourdy
ISBN 978-2-7099-1877-0
224 pages, 160 photos couleur
43 €



Genre et savoirs
Pratiques et innovations
rurales au Sud

H. Guétat-Bernard, M. Saussey
ISBN 978-2-7099-1834-3
292 pages
42 €

CALLS FOR PROPOSALS

by



COSMETIC VALLEY
FRANCE

BOOST YOUR PROJECTS WITH

OPEN INNOVATION

Meet BOOTS, CHANEL,
JOHNSON&JOHNSON,
LVMH RECHERCHE,
PUIG & SHISEIDO !

THE COSMETIC VICTORIES

THE INTERNATIONAL
AWARDS
OF THE PERFUMERY
AND COSMETIC INDUSTRY

APPLY ONLINE
WWW.COSMETIC-360.COM



+33 2 37 211 211 - contact@cosmetic-360.com

FREE REGISTRATION WITH THE DISCOUNT VOUCHER : COSVAL360