

SCIENCE

www.pourlascience.fr

Édition française de Scientific American



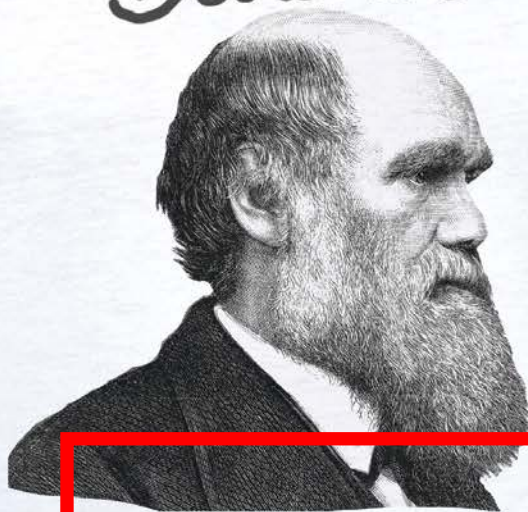
Ondes gravitationnelles

- La dernière preuve de la THÉORIE D'EINSTEIN
- Les TROUS NOIRS comme on ne les a jamais vus
- Une RÉVOLUTION pour l'astronomie





je descends de
Darwin



**DARWIN
ORIGINAL**
JUSQU'AU 31 JUILLET 2016
cité des sciences & de l'industrie
L'EXPO

cité
des sciences &
de l'industrie



POUR LA SCIENCE

www.pourlascience.fr

3 rue Férou - 75278 Paris Cedex 06

Groupe POUR LA SCIENCE

Directrice des rédactions : Cécile Lestienne

Pour la Science

Rédacteur en chef : Maurice Mashaa

Rédactrice en chef adjointe : Marie-Neige Cordonnier

Rédacteurs : François Savatier, Philippe Ribeau-Gésippe, Guillaume Jacquemont, Sean Bailly

Dossier Pour la Science

Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin

Développement numérique : Philippe Ribeau-Gésippe

Directrice artistique : Céline Lapert

Maquette : Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy

Correction et assistance administrative : Anne-Rozenn Joubert

Marketing : Laurence Hay et Ophélie Maillet,

assistées de Marie Chaudy

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 :

Aud Bruquière, Damir Buskulić, Gianpiero Cagnoli,

Ophélie Gallé-Soas, Nadine Guilhou, Evelyne Host-Platret,

Jean-Louis Leridon, Francis Lévi, Christophe Pichon,

Daniel Jacquenet, Loïc Villain

PUBLICITE France

Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin

jf.guillotin@pourlascience.fr

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

BONNEMENTS

Bonnement en ligne : <http://boutique.pourlascience.fr>

Courriel : pourlascience@abopress.fr

Téléphone : 03 67 07 98 17

Adresse postale : Service des abonnements - Pour la Science,

39 rue de l'Industrie, BP 90053, 67402 Illkirch Cedex

COMMANDES 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

Él. : 04 88 15 12 41

Information/modification de service/réassort :

Magazine disponible sur www.direct-editeurs.fr

Canada : Edipresse : 945 avenue Beaumont, Montréal,

Québec, H3N 1W3 Canada.

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

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

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

Tarifs d'abonnement 1 an - 12 numéros

France métropolitaine : 59 euros Europe : 71 euros

Reste du monde : 85-85 euros

SCIENTIFIC AMERICAN Editor in chief : Mariette DiChristina.

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

Stacy 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. Li-

cence accordée à « Pour la Science S.A.R.L. ».

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

dit de reproduire intégralement ou partiellement

la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou

du Centre français de l'exploitation du droit de co-

pie (20 rue des Grands-Augustins - 75006 Paris).



Maurice Mashaa
rédacteur en chef

La découverte du siècle ?

Des rumeurs bruissaient depuis des semaines. Le 11 février 2016, des conférences de presse organisées par les collaborations *LIGO*, aux États-Unis, et *Virgo*, en Europe, ont mis fin au suspense : on y a annoncé que les détecteurs de *LIGO* avaient enregistré le 14 septembre 2015 une onde gravitationnelle. Laquelle avait été émise par un très lointain couple de trous noirs pendant quelques dixièmes de seconde, juste avant que les deux astres ne fusionnent pour n'en faire qu'un.

La détection de ces vibrations de l'espace-temps, qui se propagent à la vitesse de la lumière, a fait la une des médias. À juste titre. Elle confirme directement l'existence des ondes gravitationnelles, prévue en 1916 par Einstein et sa théorie de la relativité générale – où la gravitation s'identifie à la déformation de l'espace-temps. Et elle nous révèle un objet astronomique jamais observé auparavant : un système binaire de trous noirs, en coalescence qui plus est.

Les observatoires gravitationnels vont propulser l'astrophysique dans une nouvelle ère

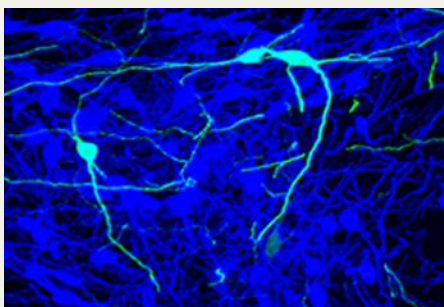
Cela laisse entrevoir tout le potentiel des observatoires à ondes gravitationnelles, qui vont sans doute propulser l'astrophysique dans une nouvelle ère (voir notre dossier pages 26 à 37).

Est-ce la « découverte du siècle », comme beaucoup l'ont claironné ? Espérons que non, car le siècle ne fait que commencer... De plus, le mot « découverte » n'est pas tout à fait approprié, puisqu'on disposait déjà d'une preuve indirecte de l'existence des ondes gravitationnelles. L'événement n'en est pas moins historique.

Par ailleurs, rassurons-nous : bien que ces ondes déforment l'espace et le temps, elles ne risquent pas de dérégler nos horloges biologiques et de nous rendre malades (voir « Quand nos horloges biologiques se dérèglent » pages 38 à 46) : les déformations temporelles sont infimes, bien plus que les déformations spatiales, elles-mêmes si minuscules qu'il a fallu un siècle pour les détecter ! ■

Actualités

20 **Fronte neurones contre la douleur**



7 **Néandertal : un métissage il y a 100 000 ans**

8 **Pourquoi le parasite de la toxoplasmose nous manipule**

9 **À l'écoute de la dynamique cétacés-harengs**

11 **Le vent à tout rompre**

Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

Réflexions & débats

12 **Point de vue**
Huile de palme : une taxe qui ne tirera pas la filière vers le haut
Alain Rival

16 **Entretien**
Université Paris-Saclay : « Pas sûr que les pôles augmentent la visibilité internationale »
Gérôme Aust et Christine Barats

20 **Cabinet de curiosités sociologiques**
Sisyphes au pays des rumeurs
Gérald Bronner

22 **Homo sapiens informaticus**
Essayez de m'oublier... vous n'y parviendrez pas !
Gilles Dowek

24 **Lu sur SciLogs.fr**
Les complots finissent-ils toujours par être révélés ?
Nicolas Gauvrit

À LA UNE

26

ASTROPHYSIQUE

La détection des ondes gravitationnelles, une nouvelle fenêtre sur l'Univers

Sean Bailly

Prédites par Einstein en 1916, les ondes gravitationnelles n'avaient jamais été détectées directement. C'est enfin chose faite : en enregistrant les ondes émises par la fusion de deux trous noirs, l'expérience *Advanced LIGO* inaugure une nouvelle ère pour l'astronomie.

34

« Avec les ondes gravitationnelles, nous verrons l'Univers comme nous ne l'avons jamais vu »

Entretien avec Benoît Mours

La détection d'ondes gravitationnelles par les deux interféromètres d'*Advanced LIGO* est un grand succès technique et scientifique : elle permettra d'étudier des objets cosmiques étonnants et inaccessibles aux télescopes.

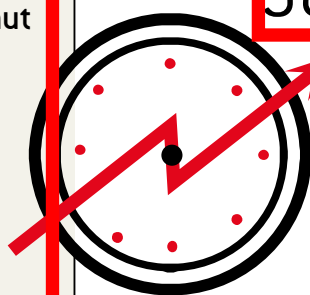
38

BIOLOGIE

Quand nos horloges biologiques se dérèglent

Keith Summa et Fred Turek

Les fonctions du foie, du pancréas et d'autres tissus se synchronisent avec l'horloge centrale de l'organisme grâce à l'action de certains gènes. Le dérèglement de ces horloges périphériques augmente le risque d'obésité, de diabète, de dépression...



48

DÉMOGRAPHIE

6 milliards d'Africains ?

Robert Engelman

Les projections démographiques pour l'Afrique sont alarmantes. Pour les démentir, il faudra donner aux femmes plus de droits et d'autonomie.



56

ÉGYPTOLOGIE

In chemin d'étoiles pour les défunts

Sarah Symons et Elizabeth Tasker

Il y a 4000 ans, les Égyptiens ont peint des tables astronomiques au revers des couvercles de certains cercueils. À quoi servaient-elles ? Peut-être à orienter les morts dans leur voyage vers l'au-delà.



64

ÉTHOLOGIE

Vivre connecté, un atout pour l'animal

Lee Alan Dugatkin et Matthew Hasenjager

Chez de nombreuses espèces animales, la survie et le succès des individus dépendent de la qualité et de l'intensité de leurs liens sociaux.



72

HISTOIRE DES SCIENCES

Émile Duclaux, physicien, pastorien et dreyfusard

Christine Moissinac

Dans le sillage de Pasteur, un jeune Auvergnat, physicien et chimiste, devient à la fin du XIX^e siècle un pilier de la microbiologie naissante. Fort de son autorité en sciences, il s'implique en tant que citoyen pour défendre la vérité, la justice, l'accès au savoir et l'hygiène sociale.

Rendez-vous

30

Logique & calcul

Adoucir son comportement ou le durcir

Jean-Paul Delahaye et Philippe Mathieu

Les simulations des diverses stratégies qu'il est possible d'adopter dans le « dilemme téré du prisonnier » indiquent que, dans les grands ensembles sociaux, il est préférable d'être coopératif, surtout au début.

36

Science & fiction

Antman, petit mais costaud !

Sébastien Steyer et Roland Lehoucq

38

Art & science

L'art-chéologie

Loïc Mangin

41

Idées de physique

Un poisson-coffre dans la voiture

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik



44

Science & gastronomie

Rattraper la sauce hollandaise

Hervé This

46

À lire

48

Blog-notes

Les chroniques de Didier Nordon

SCIENCE.fr

LETTRE D'INFORMATION



Ne manquez pas

la parution

de votre magazine

grâce à la NEWSLETTER

Notre sélection d'articles
Des offres préférentielles
Nos autres magazines



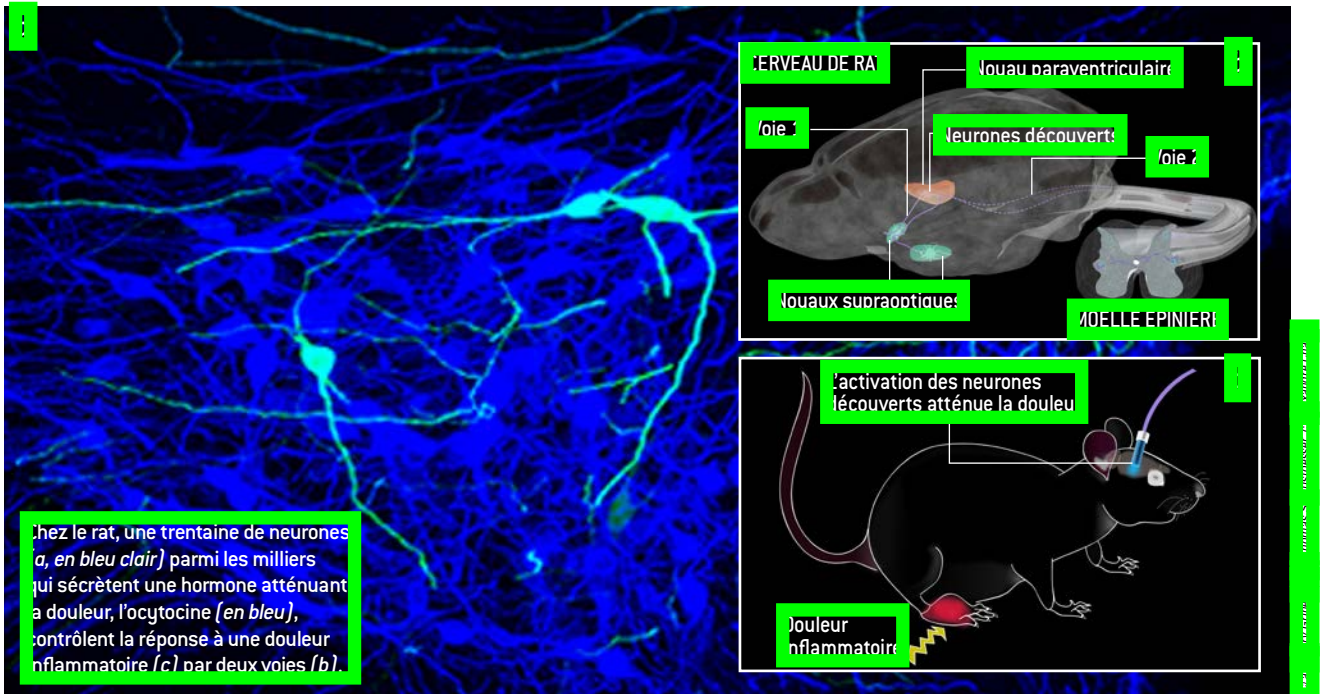
Recevez gratuitement la lettre d'information
en inscrivant uniquement votre adresse mail

www.pour-las-science.fr

Actualités

Trente neurones contre la douleur

Dans le cerveau, une toute petite population de neurones coordonne les différentes étapes d'un processus qui atténue les douleurs de type inflammatoire.



Atténuation de la douleur, contraction de l'utérus lors de l'accouchement, lactation, attachement de l'enfant à la mère, orgasme, régulation de l'anxiété, de l'empathie... Une seule molécule, l'ocytocine, produit tous ces effets. Or, sur les quelque 90 milliards de neurones que comporte notre cerveau, seule une population de 40 000 à 60 000 neurones, située au cœur de l'hypothalamus, sécrète ce messager. Libérée dans le sang ou directement dans le cerveau, l'ocytocine cible les neurones périphériques, les cellules musculaires de l'utérus, les glandes mammaires ou le cerveau antérieur, selon les signaux qui ont déclenché son émission. Comment un si petit centre commande-t-il une telle palette d'actions ?

Au sein de ce centre ocytocinergique, de petites sous-populations de neurones assument chacune un rôle. Cette hypothèse est envisagée depuis quelques années, mais on n'avait encore mis en évidence aucune sous-population... jusqu'à aujourd'hui. Une équipe internationale coordonnée en France par Alexandre Charlet, de l'Institut des neurosciences cellulaires et intégratives (CNRS/université de Strasbourg), a montré que, chez le rat, une trentaine de neurones de ce centre contrôlent la réponse à un certain type de douleurs, les douleurs inflammatoires.

Les neurobiologistes voulaient cartographier le centre ocytocinergique afin de mieux comprendre comment il dialogue avec ses différentes cibles, notamment le cerveau antérieur.

En effet, l'ocytocine est produite par deux types de neurones : les neurones magnocellulaires, de gros neurones qui projettent leur axone vers le système sanguin et le cerveau antérieur, et les neurones parvocellulaires, de petits neurones dont l'axone rejoint d'autres régions du tronc cérébral et de la moelle épinière. Dans l'hypothalamus, ces deux types de neurones cohabitent, certains produisant de l'ocytocine, d'autres non, et l'ensemble ressemble à un écheveau complexe que les chercheurs démêlent.

Ils ont commencé par étudier la neuroanatomie du système ocytocinergique du rat, très proche de celui de l'homme. Ils se sont ainsi aperçus que dans une région de l'hypothalamus, le noyau paraventriculaire, une

trentaine de neurones parvocellulaires ocytocinergiques projettent deux axones les reliant l'un à des neurones magnocellulaires ocytocinergiques d'une autre région de l'hypothalamus, les deux noyaux supraoptiques, l'autre à une population particulière de neurones dans les couches profondes de la moelle épinière.

Or les couches profondes de la moelle épinière sont le lieu où, lors d'une douleur, le message sensoriel provenant des nerfs touchés est interprété et codé en une information qui rejoint d'autres neurones, dont le centre ocytocinergique. Ce dernier libère alors de l'ocytocine dans le sang, qui atteint ainsi les nerfs touchés, dont elle diminue les signaux de douleur émis.

Les neurobiologistes ont donc regardé si la population de trente

neurones jouait un rôle dans la modulation de la douleur. D'une part, ils ont montré que ceux-ci communiquent bien avec leurs deux populations cibles dans la moelle épinière et les noyaux supraoptiques. Ensuite, ils ont vérifié chez le rat que chaque voie était bien fonctionnelle en stimulant les trente neurones et en suivant les réponses sur chacune des voies. Enfin, ils ont observé qu'en activant ou inhibant les trente neurones par stimulation électrique, ils modulaient la réponse de l'animal à une douleur inflammatoire, mais pas à une douleur neuropathique.

En libérant de l'ocytocine dans deux endroits, la petite population de neurones contrôle donc de deux façons l'atténuation de la perception douloureuse. D'une part, elle active des neurones magnocellulaires d'une autre région de l'hypothalamus, qui libèrent à leur tour de l'ocytocine dans le sang; d'autre part, elle module dans la moelle épinière le message de la douleur codé et envoyé notamment au centre ocytocinergique, comme une sorte de boucle de rétroaction négative.

Ce n'est d'ailleurs probablement pas sa seule fonction. Alexandre Charlet et ses collègues étudient son implication dans d'autres processus tels que la lactation et certains comportements sexuels. Ses neurones jouent un rôle dans la moelle épinière et ont en effet partie du système nerveux autonome, impliqué dans ces processus. L'équipe continue aussi l'exploration du centre ocytocinergique. Ses objectifs: déterminer les circuits qui modulent les émotions et préciser le mode d'action de l'ocytocine au niveau du cerveau antérieur.

Marie-Neige Cordonnier

M. Eliava et al., *Neuron*, 3 mars 2011

Paléogénétique

Néandertal: un métissage il y a 100 000 ans

Une étude génétique réalisée par des chercheurs de l'institut Max Planck d'anthropologie évolutionniste et d'autres organismes vient de montrer que les Néandertaliens de l'Altaï se sont métissés il y a plus de 100 000 ans avec des humains modernes. Or la principale sortie d'Afrique d'*Homo sapiens* a commencé il y a environ 65 000 ans. Dès lors, on se demande d'où venaient les hommes modernes qui se sont hybridés avec les Néandertaliens de l'Altaï. Le commentaire de Silvana Condemi, paléoanthropologue au CNRS.

Qui étaient ces *Homo sapiens* avec qui les Néandertaliens de l'Altaï se sont métissés ?

Silvana Condemi: Nous l'ignorons. Ce que nous savons, c'est qu'il y a environ 100 000 ans, *Homo sapiens* était présent au Levant. À Qafzeh et à Skhul, des grottes situées aujourd'hui en Israël. Les sépultures de 14 individus y ont été découvertes. Par ailleurs, une industrie lithique typiquement africaine découverte à Djebel Faya, non loin de Dubaï, nous a appris que les hommes modernes vivaient dans la corne de la péninsule Arabique il y a 125 000 ans, de sorte que l'on peut supposer qu'ils ont aussi passés en Asie.

Où se serait produit ce premier métissage entre *H. sapiens* et Néandertaliens ?

S. C.: Le plus probable est qu'il a eu lieu une première fois au Levant. En effet, avant les *Homo sapiens* de Qafzeh et Skhul, des Néandertaliens vivaient dans la région, où ils sont notamment représentés par Tabun C, une sépulture vieille de 120 000 ans qui, comme son nom l'indique, a été découverte dans la grotte de Tabun. Ainsi, il y a environ 100 000 ans, *H. sapiens* rencontre *H. neanderthalensis* au Levant.

Où est passée cette première vague d'*H. sapiens*, dont on trouve des traces en Chine et dans les gènes des Néandertaliens de l'Altaï ?

S. C.: Comment savoir ? Dans les années 1930, les fossiles de Skhul étaient considérés comme des formes « mélangées » *sapiens*-Néandertaliens, de sorte qu'on les qualifiait de néandertaloïdes. En fait, comme l'a montré le paléoanthropologue français



Silvana Condemi, UMR 7268, Univ. d'Aix-Marseille-EFS-CNRS

Bernard Vandermeersch sur les fossiles de Skhul ou Qafzeh, il n'y a pas de caractères néandertaliens, mais plutôt de nombreux caractères ancestraux, par exemple des os épais et, sur le crâne, des forts reliefs, notamment au-dessus des orbites (torus). D'où l'aspect néandertaloïde des défunts de Skhul et Qafzeh. S'il y a eu au Levant métissage entre les *H. sapiens* sortis d'Afrique et une population néandertalienne locale, on ne le voit pas dans le registre fossile levantin.

Pourquoi, selon vous, les premiers *H. sapiens* sortis d'Afrique ne sont-ils pas allés vers l'Europe ?

S. C.: À leur époque, l'Europe avait une population néandertalienne florissante. La compétition avec elle ne pouvait tourner en faveur d'*H. sapiens*.

Pourquoi les *H. sapiens* qui sont sortis d'Afrique il y a 60 000 ans ont-ils pu, eux, gagner ce continent ?

S. C.: Leur expansion s'est déroulée dans un climat différent: une série de fluctuations climatiques ont fragmenté la population néandertalienne, ce qui a sans doute facilité l'occupation du territoire par les arrivants en expansion démographique.

Ainsi, un très ancien métissage entre *H. sapiens* et des formes humaines archaïques s'est produit en Eurasie ?

S. C.: Oui, depuis que nous savons qu'*H. sapiens* est sorti d'Afrique il y a probablement 125 000 ans par la péninsule Arabique, nous pensons qu'en se répandant en Eurasie, il s'y est mélangé avec les formes archaïques – les Néandertaliens et les Denisoviens au moins – qu'il a rencontrées sur son chemin.

François Savatier

M. Kuhlweilm et al., *Nature*, vol. 530, pp. 429-433, 2016

Neurosciences

Nanos contre Parkinson

Dans la maladie de Parkinson, les lysosomes, des organites qui dégradent les déchets dans la cellule, ne fonctionnent plus correctement, entraînant la mort des neurones. Un pH trop élevé au sein de ces organites serait en cause, d'où l'idée de l'abaisser avec des nanoparticules acidifiantes. C'est ce qui a été tenté avec succès dans un projet dirigé par Benjamin Dehay, de l'Inserm : les nanoparticules ont « réparé » des lysosomes *in vitro* et ralenti la dégénérescence neuronale dans un modèle murin de la maladie.

Liens sociaux innovants

Les techniques humaines dépassent les capacités d'innovation des individus. On considérerait que plus un groupe d'individus est grand et connecté, plus il peut développer des techniques complexes. Maxime Derex et Robert Boyd, de l'université d'État de l'Arizona, ont montré qu'un groupe trop connecté innove moins, car les individus convergent vers les mêmes solutions. Dans des populations partiellement connectées, les solutions sont plus variées et leur confrontation entraîne de brusques augmentations de complexité culturelle.

Exo-atmosphère sans eau

Pour la première fois, des astronomes de la University College de Londres et de l'université catholique de Louvain ont analysé la composition de l'atmosphère d'une super-terre, 55 Cancri e, grâce au télescope spatial *Hubble*. Les chercheurs ont montré que l'atmosphère est riche en hydrogène et en hélium, vestiges du disque protoplanétaire qui a donné naissance à ce système. Elle serait dépourvue d'eau. En revanche, des traces de cyanure d'hydrogène (HCN) sont peut-être présentes, signe que l'environnement est riche en carbone.

Pourquoi le parasite de la toxoplasmose nous manipule



Le parasite *Toxoplasma gondii* (vue d'artiste), responsable de la toxoplasmose.

Certains parasites perturbent le comportement de leurs hôtes d'une façon qui favorise leur propagation. C'est le cas de l'agent de la toxoplasmose, *Toxoplasma gondii*, un protozoaire qui infecte de multiples espèces, mais ne peut accomplir son cycle de reproduction sexuée que chez les félins : une souris parasitée est attirée par l'urine de chat et s'expose davantage à son prédateur. Chez l'homme aussi, *Toxoplasma gondii* provoque divers changements de comportement, augmentant par exemple les temps de réaction. Mais pourquoi ? Peu de chances aujourd'hui que cela nous fasse dévorer par de grands félins...

Il faudrait alors remonter au temps où nous étions encore

leurs proies de choix pour le comprendre. Des chercheurs du Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive (CNRS UMR 5175), à Montpellier, ont ainsi montré que nos plus proches parents, les chimpanzés, sont attirés par l'urine de léopard quand ils sont parasités. Or ces félins sont leurs prédateurs naturels et profitent donc probablement de l'aubaine ! Et lorsqu'ils croquent un chimpanzé infecté, le parasite en profite pour gagner un hôte où il peut se reproduire. Chez notre espèce, les modifications comportementales provoquées par *Toxoplasma gondii* seraient donc un vestige évolutif.

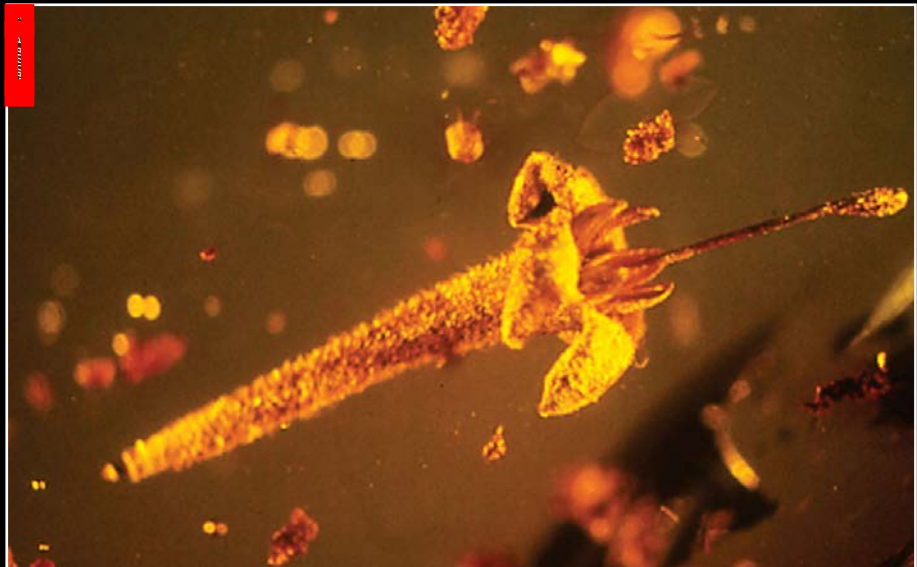
Guillaume Jacquemont

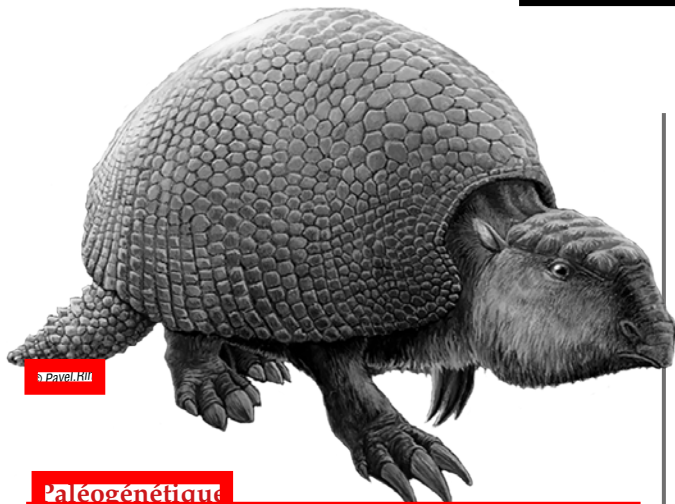
C. Poirotte et al., *Current Biology*, en ligne le 8 février 2016

Insolite

Une fleur ancienne prisonnière de l'ambre

Découverte en République dominicaine par George Poinar, de l'université d'État de l'Oregon, cette fleur serait la plus ancienne représentante des astéridées en Amérique. Lena Struwe, de l'université Rutgers, a évalué son âge à entre 20 et 40 millions d'années. La morphologie de la fleur, longue de deux centimètres, suggère que la plante appartient au genre *Struchnos*, dont certaines espèces sont utilisées pour préparer du curare, un poison.





Paléogénétique

Les glyptodons, des tatous

Une équipe pilotée par l'Institut des sciences de l'évolution de Montpellier vient de préciser l'origine de la lignée des glyptodons, imposants mammifères qui arpentèrent encore l'Amérique du Sud il y a 10 000 ans (voir l'illustration ci-dessus). Comme les glyptodons étaient protégés par une carapace, on les rapprochait généralement des tatous, des mammifères placentaires sud-américains eux aussi carapacés. Toutefois, on pensait que les glyptodons constituaient un groupe frère.

Frédéric Delsuc et ses collègues sont partis de l'hypothèse qu'il s'agit de xénarthres (tatous, fourmiliers et paresseux). Par ordinateur, ils ont reconstitué à partir du génome des espèces actuelles la séquence plausible de l'ADN mitochondrial de leur ancêtre commun, puis se sont servis de ce modèle bio-informatique pour synthétiser des sondes ARN capables de reconnaître les séquences de cet ADN reconstitué. Or ces sondes ont reconnu des fragments d'ADN mitochondrial encore contenus dans un morceau de carapace de glyptodon vieux de 12 000 ans. Une vérité est désormais tatouée sur la mince peau de notre savoir : les glyptodons sont une lignée issue du groupe des tatous !

F. S.

F. Delsuc et al., Current Biology, vol. 26(4), pp. R155-R156, 2016.

Astrophysique

Où se cache la 9^e planète ?

Une neuvième planète dix fois plus massive que la Terre se cacherait aux confins du Système solaire. Cette hypothèse explique la répartition de certains corps évoluant au-delà de l'orbite de Neptune. On a caractérisé la trajectoire de cette planète supposée, mais on ignore où celle-ci se trouve sur son orbite.

Pour restreindre la zone à explorer, Agnès Fienga et ses collègues, de l'observatoire de la Côte d'Azur, ont eu l'idée d'utiliser la sonde Cassini, en orbite autour de Saturne depuis 2004. Ils ont comparé l'évolution de la distance Terre-Saturne, mesurée par la sonde durant plus de dix ans, à ce que donnerait la présence de la neuvième planète, censée perturber légèrement la trajectoire de la géante gazeuse. Les chercheurs ont ainsi montré que les mesures s'accordent mieux avec les résultats théoriques si la nouvelle planète se trouve actuellement dans certaines parties de son orbite – des régions à examiner en priorité.

Sean Baillie

A. Fienga et al., Astronomy & Astrophysics, en ligne, 19 février 2016.

Biologie marine

À l'écoute de la dynamique cétacés-harengs

Quand le hareng de l'Atlantique entame sa période de reproduction dans le golfe du Maine, au large des côtes américaines, ce sont des milliards de poissons qui se rassemblent. Cependant, les harengs ne sont pas les seuls à s'inviter dans la région : pendant quelques semaines, entre septembre et octobre, de nombreux mammifères marins y trouvent une occasion idéale de s'en nourrir. Pour comprendre comment ces différentes espèces interagissent, l'équipe de Nicholas Makris, de l'université Northeastern, à Boston, a enregistré les émissions sonores des mammifères et ainsi pu cartographier la répartition des diverses espèces et sa dynamique.

Les chercheurs ont utilisé des dispositifs acoustiques leur permettant de couvrir environ 100 000 kilomètres carrés du golfe et ainsi d'estimer, d'une part, la population de harengs et, d'autre part, celles de différentes espèces de mammifères marins : des baleines à fanons (à bosse, bleues, de Minke, rorquals et rorquals boréaux), mais aussi des cétacés à dents (cachalot, baleine-pilote, orque et plusieurs espèces de dauphins). Les résultats montrent que les mammifères convergent vers les zones où le hareng atteint des densités de population supérieures à 0,2 poisson par mètre carré (et allant jusqu'à 10 poissons par mètre carré), contre 0,053 hareng

par mètre carré en moyenne pour une population diffuse sur le golfe. Les chercheurs ont noté que la dynamique suit un cycle biennal : les harengs se regroupent la nuit et optent pour une distribution diffuse le jour, ce qui limite les risques d'être dévoré. La plupart des mammifères étudiés ont de même.

Les chercheurs ont traqué les cétacés grâce aux signaux sonores qu'ils émettent. Ceux des cétacés à fanons sont corrélés aussi bien spatialement que temporellement à la densité des harengs. Les baleines émettent plus de sons la nuit et dans les zones de regroupement des harengs. En revanche, les sons des cétacés à dents ne sont pas corrélés à l'activité des poissons. Cette différence s'explique par le comportement de chasse des baleines à fanons qui engouffrent leurs proies par centaines : elles maximisent donc leurs chances de s'alimenter dans les zones de forte densité de harengs. Les cétacés à dents chassent un poisson à la fois et ont donc moins d'intérêt à visiter les zones de densité élevée, où la profusion rend plus difficile la traque d'un individu.

Les chercheurs ont par ailleurs noté que les cétacés se regroupent par espèces. À table, on ne se mélange pas entre baleines à bosse et baleines bleues !

S. B.

D. Wang et al., Nature, en ligne, 2 mars 2016.



Dans le golfe du Maine, les baleines à bosse (ci-dessus) et de nombreuses autres espèces de cétacés profitent de la période de reproduction des harengs pour se nourrir. Le manège a été étudié en enregistrant les sons.

Archéologie

Trois tombes maures du Moyen Âge identifiées à Nîmes

Trois tombes médiévales nîmoises, trouvées en 2006 à l'intérieur des anciens remparts romains, intriguaient

les archéologues. Les défunts y ont été couchés sur le côté droit, face au sud-est, c'est-à-dire... à La Mecque. Leurs datations radiométriques les placent entre le VII^e et le IX^e siècles. Avec des collègues de l'université de Bordeaux et de l'Inrap, dont il fait partie, Yves Gleize a précisé l'identité des trois défunts.

Appliquant une « diagnose sexuelle probabiliste » à l'os de la hanche, les chercheurs ont d'abord montré que les défunts sont des hommes. Ils ont ensuite extrait de l'ADN de leurs dents pour le séquencer. Ils ont ainsi identifié le génome mitochondrial, qui n'est



Homme de 30 ans



Homme de 20-29 ans



Homme de plus de 50 ans

Il y a approximativement 1 250 ans, ces trois hommes d'origine nord-africaine ont été enterrés à Nîmes selon le rite musulman, c'est-à-dire qu'ils ont été couchés sur leur côté droit et face à La Mecque.

transmis que par les femmes, et environ 450 SNP (variations portant sur un seul nucléotide) du chromosome Y qui, lui, n'est transmis que par les hommes.

L'analyse génétique indique que les trois hommes ont des

ancêtres masculins nord-africains et que l'un d'entre eux a des ancêtres féminines de la même région. Pour les deux autres, on ne peut trancher entre des ancêtres féminines d'Eurasie ou d'Afrique du Nord.

Qu'en conclure ? Ces trois hommes, qui ont des ancêtres nord-africains, ont été enterrés selon le rite musulman ; ils faisaient partie de la communauté urbaine nîmoise, puisqu'ils ont été enterrés non loin de la ville médiévale ; la fenêtre temporelle dans laquelle il faut placer leurs tombes contient les quelques dizaines d'années d'occupation de Nîmes par les Maures. Verdict des archéologues : le plus probable est qu'il s'agisse de membres de la garnison maure. Si une communauté maure non militaire a existé à Nîmes au Moyen Âge, d'autres explications sont possibles : il pourrait s'agir par exemple de marchands.

F. S.

PLoS ONE, vol. 11(2), e0148583, 2016

LES RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM

Entrée gratuite

Au Jardin des Plantes

Détails sur mnhn.fr, rubrique : 'Les rendez-vous du Muséum'

SCIENCE

COURS PUBLICS

Et l'Homme domestique la plante : à l'origine des espèces cultivées

Judi 7 avril - 18h : Dattes, figues et raisins : douceur et ivresse des fruits
Par M. Tengberg, spécialiste en archéobotanique de l'Asie du Sud-Ouest, professeur, Muséum

Grand Amphithéâtre du Muséum — 57 rue Cuvier, Paris 5^e

FILMS

Cycle Sous le volcan

Samedi 2 avril - 15h : Coehisa
Réalisé par K. Gillard, Belgique, 2013, VOSTF

REGARDS CROISÉS ART ET SCIENCE

Animés par M.-O. Monchicourt, journaliste

Lundi 4 avril - 18h : Le Domanier Rousseau et le Muséum
Avec C. Bernard, conservatrice « Peinture », Musée d'Orsay, J. Chazim, responsable de la zoothèque, Muséum et E. Joly, directeur des jardins botaniques et zoologiques, Muséum

Lundi 11 avril - 18h : Quentin Garel, sculpteur
Avec C. Argot, enseignant-chercheur en paléontologie, art et science, Muséum, Q. Garel, sculpteur, A. Vila, critique d'art et éditeur, L. Vivès, responsable des Galeries d'Anatomie comparée et de Paléontologie

MÉTIER DU MUSÉUM

Dimanche 24 avril - 15h : Palynologue, spécialiste du pollen, V. Lebret, Muséum

Auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution
36 rue Geoffroy St-Hilaire, Paris 5^e

Epidémiologie

Moins de risque de démence ?

En matière de démences, les chiffres donnent le vertige : 47,5 millions de cas dans le monde et un quasi-triplement d'ici à 2050, selon les prévisions de l'Organisation mondiale de la santé (OMS). Il en existe deux principaux sous-types, la maladie d'Alzheimer et la « démence vasculaire », causée par l'obstruction ou l'éclatement de vaisseaux sanguins dans le cerveau. Une étude dirigée par Sudha Seshadri, de l'université de Boston, et fondée sur le suivi d'une cohorte de 5000 personnes âgées de plus de 60 ans, apporte une lueur d'espoir : à tout âge, la proportion de personnes touchées diminue de 20 % par décennie depuis le début des années 1980, même si le nombre total de cas continue d'augmenter en raison du vieillissement de la population. Les politiques de prévention des risques cardiovasculaires expliqueraient en partie cette baisse.

G. J.

S. Satizabal et al., *The New England Journal of Medicine*, 10 février 2016.

Planétologie

Le grand basculement martien

Il y a environ 3 milliards d'années, la surface de Mars a basculé. Emportés par la masse exceptionnelle du dôme de Tharsis – un complexe volcanique formé il y a plus de 4 milliards d'années, faisant 5000 kilomètres de diamètre et 2 kilomètres d'épaisseur –, la croûte et le manteau martiens ont glissé de 20 à 25 degrés autour du noyau. Ce scénario avait été prévu en 2010 par un modèle théorique. Sylvain Bouley, du laboratoire GEOPS de l'université Paris-Saclay, et ses collègues ont montré que cet événement géologique a changé le visage de la planète et qu'il explique plusieurs anomalies observées.

Aujourd'hui, le dôme de Tharsis est situé sur l'équateur, la position la plus stable du fait de la rotation de la planète. Sylvain Bouley et ses collègues ont montré que, si l'on rebasculait Mars d'une vingtaine de degrés (comme si Tharsis n'existait pas), on trouve, aux pôles antérieurs au basculement, des régions qui présentent des traces de fonte et de retrait de glaciers, comme attendu. Les rivières, aujourd'hui asséchées, sont alors réparties sur une bande tropicale de l'hémisphère Sud, région qui était à l'époque soumise à des précipitations selon les modèles climatiques.

S. B.

S. Bouley et al., *Nature en ligne*, 2 mars 2016.

Biorhysique

Le vent à tout rompre

Les effets de la grande tempête Klaus – suggèrent qu'avec un vent dépassant les 150 kilomètres par heure, les arbres directement exposés rompent, quels que soient l'essence, la taille et le diamètre du tronc. Emmanuel Viot et ses collègues, à l'École polytechnique et à l'ESPCI, viennent d'expliquer cette constatation empirique.

Les chercheurs ont exploité plusieurs lois d'échelle. Bien connue, la première, celle de Hooke, énonce que la déformation d'un solide est proportionnelle à l'effort exercé (la force). La deuxième, celle de Griffith, stipule que la contrainte (l'effort appliqué par unité de surface) faisant céder un matériau présentant des défauts (nœuds et autres bases de branches dans le cas d'un arbre) est inversement proportionnelle à la racine de la taille caractéristique des défauts – qui, dans le cas d'un arbre, est

une fraction du diamètre D . La troisième loi empirique elle aussi, décrit la croissance d'un arbre : son diamètre D varie comme la puissance $3/2$ de sa taille L . Combinées au principe fondamental de la statique (l'effort appliqué est égal à la résistance), ces lois donnent, dans le cas d'un tronc nu de taille L , une formule pour la vitesse critique V_c du vent à laquelle l'arbre rompt : $V_c = CL^{1/8}$, où C dépend (assez peu) des caractéristiques physiques du bois.

Est-ce réaliste ? Pour un arbre de taille typique de 20 mètres, la formule donne 56 mètres par seconde (200 km/h). Or partout où Klaus a atteint son maximum de 12 mètres par seconde (150 km/h), 40 à 60 % des arbres ont rompu, ce qui suggère que la plupart des arbres directement exposés ont cassé. Compte tenu de la brutalité des approximations (tronc nu), on a le bon ordre de grandeur !

F. S.

Plus. Rev. E, vol. 93, 023001, 2016.



Dans la forêt des Landes, les dégâts de Klaus ont été très importants, car les pins maritimes y poussent sans autre protection que leurs voisins. La plupart ont été brisés comme des mines de craillons.

Recueillir de l'eau en copiant la nature

Condenser l'humidité de l'air pour recueillir de l'eau ou l'évacuer est un enjeu industriel. Or il est difficile de concilier condensation rapide de gouttes d'eau et évacuation efficace. La solution conçue par l'équipe de Joanna Aizenberg, à Harvard, est une surface inspirée de la carapace finement bosselée de scarabées du désert du Namib, qui capte l'humidité de l'air. Pour guider les gouttes, les bosses ont une partie copiant la forme conique des aiguilles des cactus. Et un revêtement nanostructuré glissant, inspiré de plantes carnivores, complète le dispositif.

In système visuel bactérien

Les cyanobactéries utilisent la lumière pour produire de l'énergie par photosynthèse. Conrad Mulineaux, de l'université Queen Mary de Londres, et ses collègues ont montré que la cyanobactérie *Synechocystis*, connue pour se déplacer vers la source lumineuse, focalise la lumière afin de

déterminer la position de la source. La cellule entière agirait comme une lentille sphérique : la lumière pénétrant d'un côté de la membrane se focalise à l'extrémité opposée de la cellule, où des entités photosensibles seraient excitées. Il s'agit probablement d'un des plus anciens et plus petits systèmes visuels du monde vivant.

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



Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

POINT DE VUE

Huile de palme : une taxe qui ne tirera pas la filière vers le haut

En France, le Sénat a voté un amendement qui prévoit la surtaxation de l'huile de palme. Cette mesure pénalisera les efforts entrepris par la filière en faveur de la durabilité.

Alain RIVAL

L'enfer est pavé de bonnes intentions. Taxer uniformément les huiles tropicales au prétexte de nous protéger des maladies cardiovasculaires et de lutter contre la déforestation part sans doute d'un noble objectif. Mais cette imposition se révélera à coup sûr contre-productive : elle n'améliorera en rien notre santé ou celle des forêts primaires indonésiennes, et elle stigmatisera les premiers efforts qu'accomplit la filière pour limiter les impacts environnementaux de la culture du palmier à huile sous les tropiques, tout en favorisant la croissance de la production et le bien-être des populations.

De quoi s'agit-il précisément ? Le Sénat français vient d'adopter un amendement déposé par le groupe Europe Écologie Les Verts au projet de loi pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages, qui instaure une taxe additionnelle sur les huiles de palme, palmistes et coprah. Cette taxe serait de 300 euros par tonne dès 2017, et atteindrait 900 euros par tonne en 2020.

La volonté du législateur de protéger la santé publique en dégagant des ressources pour notre système de protection sociale est louable. Toutefois, les arguments développés par la sénatrice Aline Archambaud et ses collègues pour justifier l'amendement déposé sont peu ou mal appuyés par des données scientifiques reconnues ; ils contiennent des approximations et des inexactitudes

qui attestent d'une connaissance très superficielle d'une filière agroalimentaire complexe, mondialisée, dont les acteurs et les enjeux sont multiples.

Commençons par les arguments concernant la santé. On accuse l'huile de palme d'être riche en acides gras saturés. En effet, l'huile végétale parfaite – harmonieusement équilibrée en acides gras saturés et insaturés – n'existe pas et l'huile de palme n'échappe pas à cette règle. Elle est naturellement riche

L'huile de palme représente moins de 2 % du total des graisses consommées en France

en acides gras saturés, comme le beurre, le beurre de cacao ou l'huile de sésame. Sa composante principale, l'acide palmitique, est un concentré d'énergie dont l'*Homo sapiens* occidental du XXI^e siècle, sédentaire et trop bien nourri, n'a pas grand besoin.

Cette caractéristique fait aussi de l'huile de palme une graisse semi-solide à la température ambiante des pays tempérés, ne nécessitant pas d'hydrogénation partielle susceptible de produire des acides gras trans, délétères pour la santé humaine. Cette margarine naturelle, qui fond naturellement en bouche, est devenue de fait une matière première appréciée par les fabricants de produits alimentaires transformés.

L'huile de palme est largement utilisée, mais sa consommation n'a rien d'obligatoire : nos parents et grands-parents ont été élevés sans en consommer une goutte... Il suffit de cuisiner soi-même en utilisant son corps gras favori. En outre, l'étiquetage renseigne désormais en Europe sur les espèces d'origine des huiles végétales incorporées dans les préparations alimentaires.

Or la consommation réelle (et non pas apparente, comme on la déduit trop rapidement des statistiques brutes d'importation) d'huile de palme en France est d'environ 1 kilogramme par an et par personne. Ce chiffre est à comparer aux 60 kilogrammes de graisses consommés annuellement par nos concitoyens : l'huile de palme consommée représente moins de 2 % du total.

Une bonne partie de ces 60 kilogrammes de graisses contient des acides gras saturés provenant d'un régime alimentaire traditionnellement riche en produits lactés (fromages, yaourts, etc.) et charcuteries. C'est le fondement du *French paradox* : ce régime plutôt déséquilibré ne provoque pas plus d'accidents cardiovasculaires que celui de nos voisins européens. Par ailleurs, aucune des méta-analyses publiées à ce jour n'a pu établir statistiquement les liens supposés entre la consommation d'acides gras saturés et le risque de maladies cardiovasculaires ou – encore moins – de maladie d'Alzheimer.

À la lumière de ces chiffres et des connaissances scientifiques, l'arsenal législatif

proposé paraît bien démesuré... En outre, les expériences similaires de surtaxation de certains corps gras effectuées dans d'autres pays européens ont prouvé leur totale inefficacité sur les changements d'habitudes alimentaires et donc sur la santé publique. Ainsi, en 2011, la *fat tax* danoise surtaxant les produits riches en acides gras saturés a dû être rapidement retirée : elle n'a eu pour seuls effets que de créer un cauchemar bureaucratique, de renforcer la contrebande et d'orienter les consommateurs vers les grandes surfaces à bas prix pour compenser l'effet de la taxe.

Déforestation : un lien ni direct ni automatique

Venons-en maintenant au lien entre déforestation et culture du palmier à huile. Ce lien n'est ni direct, ni automatique. Les concessions sont d'abord données par les pouvoirs publics aux compagnies forestières, qui vont exploiter tout ou une partie du bois disponible. Cela entraîne la dégradation de millions d'hectares de forêts, qui seront le plus souvent laissées en friche ou éventuellement mises en culture. En Indonésie, 21 millions d'hectares de forêts ont disparu entre 1990 et 2005, tandis que 3 millions d'hectares de palmeraies ont été créés. Ce taux de conversion s'est accéléré dans diverses régions du monde, telles l'île de Bornéo et le bassin du Congo, pour atteindre 20 %, ce qui demande une vigilance accrue.

La culture du palmier à huile est ainsi l'un des vecteurs de la déforestation tropicale. Mais ce n'est pas le seul, et souvent pas le principal. En Indonésie encore, ce sont les plantations d'essences forestières à croissance rapide qui ont le plus d'impact sur la déforestation, comme l'indique l'étude de Sinan Abood et ses collègues de l'ETH Zurich en 2014.

Par ailleurs, compte tenu de la productivité du palmier à huile, il faudrait 3 à 8 fois plus de terres cultivables et jusqu'à 100 fois plus d'intrants de synthèse pour produire une tonne d'huile végétale issue d'autres plantes oléagineuses, tels le soja ou le colza, lesquelles sont en outre, pour la plupart, génétiquement modifiées. La consommation en huile de palme est principalement tirée par



UNE PLANTATION VILLAGEOISE DE PALMIERS À HUILE, AU BENIN.

Les petites exploitations (plus de 5 millions de petits planteurs dans le monde) ne sont pas une garantie de production durable : peu organisées en structures collectives, elles sont difficiles à atteindre et à sensibiliser à la durabilité.

L'AUTEUR



Alain RIVAL est agronome au Cirad Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement.

et correspondant pour la filière du palmier à huile à Jakarta, en Indonésie.

la Chine, l'Inde et l'Indonésie, des économies émergentes dont les populations souffrent encore de carences chroniques en lipides (33 kilogrammes de lipides consommés par personne et par an en Chine, 18 en Inde et en Indonésie, contre 60 en France).

Qualifier les plantations – qu'elles soient certifiées durables ou non – de néfastes à l'environnement, comme le fait l'amendement, révèle une totale méconnaissance de la question. Ce n'est d'ailleurs pas la position adoptée par les ONG internationales présentes sur le terrain, telles que Greenpeace, WWF, Rainforest Alliance ou TFT.

Des initiatives en faveur d'une filière « durable »

Lancée en 2004 par des compagnies agroalimentaires et des ONG, la table ronde multilatérale RSPD (*Roundtable for Sustainable Palm Oil*) est une initiative internationale dédiée à la certification et à la promotion d'une filière durable d'huile de palme. C'est une plateforme active qui rassemble aujourd'hui plus de 2 500 membres répartis en sept catégories : producteurs, transformateurs et négociants, industrie, banques et investisseurs, détaillants, ONG environnementales et sociales.

En suivant la voie tracée par RSPO, de nouvelles initiatives (regroupant principalement ONG et sociétés de plantation) ont vu le jour afin de pousser la durabilité des pratiques au-delà des principes et critères consensuels de RSPO, jugés insuffisants par plusieurs ONG. Ces initiatives font avancer la filière vers le « zéro déforestation », la conservation des forêts à haute valeur de conservation ou présentant un stock de carbone élevé, telles les tourbières tropicales. Ainsi, le *Palm Oil Innovation Group* (POIG) rassemble à la fois les membres actuels de RSPO et des ONG insatisfaites de l'approche RSPO, et rallie de nombreuses entreprises (par exemple Unilever, Ferrero, Mars et Wilmar) qui vont au-delà des exigences actuelles de la table ronde RSPO.

Décourager par une taxe sans distinction l'approvisionnement en huile de palme certifiée durable, ce n'est pas seulement nier ces efforts et mettre en péril des consensus incertains et fragiles qui se construisent avec tous les acteurs. C'est, en définitive, encourager le commerce d'huile non durable à l'échelle mondiale, dans un marché qui n'aura aucune difficulté à l'absorber.

21 % de la production est certifiée durable

La France importe 150 000 tonnes par an d'huile de palme. C'est une gouttelette... d'huile dans un marché mondial de 62 millions de tonnes, dont 21 % sont certifiées durables par RSPO. Une loi qui surtaxerait à l'aveugle l'huile de palme, certifiée ou non, n'a aucune chance de faire progresser l'ensemble de la filière vers des pratiques volontaires de durabilité, qu'il est plus que jamais impératif de promouvoir.

Un autre argument avancé par l'amendement du Sénat est que la culture artisanale de l'huile de palme ne constitue pas un problème. Cela reflète à nouveau la connaissance très superficielle de la filière et de ses systèmes de production. Bien au contraire, l'ensemble des acteurs de la filière s'accorde à penser que les petits planteurs (plus de 5 millions dans le monde), parce que peu ou mal organisés en structures collectives, sont les plus difficiles à atteindre et à sensibiliser aux changements de pratiques conduisant à une production durable.

Le terme de culture artisanale ne correspond ni à une définition économique

Une telle taxe

indifférenciée encouragera le commerce d'huile de palme non durable dans le monde

rigoureuse, ni à une réalité du terrain. Les plantations familiales ne sont pas, par essence, plus ou moins vertueuses que les plantations industrielles, en termes de gestion des intrants comme des effluents, d'impact sur la déforestation ou de respect des droits sociaux.

Un autre défaut de la taxe spéciale envisagée est qu'elle concerne les huiles de palme, de palmiste et de coprah. Or ces trois huiles ont des compositions en acides gras – donc de possibles impacts sanitaires – très différentes. Et concernant leur impact environnemental, les filières du palmier à huile et du cocotier ne partagent ni leurs fonctionnements biologiques, ni leurs systèmes d'exploitation. Les traiter dans un même cadre ne paraît pas approprié, tant les questionnements associés à ces deux filières sont différents.

Pour tirer efficacement la filière vers le haut, c'est sur l'importation d'huile de palme 100 % certifiée durable – et sur le renforcement des principes et critères amenant à cette certification – qu'il faut activement travailler, avec tous les acteurs concernés.

Le standard RSPO reste volontaire et c'est sa principale faiblesse. Aussi les gouvernements indonésien et malaisien ont-ils commencé à s'en inspirer pour mettre en place des normes obligatoires, regroupant les corpus des lois qui encadrent la production nationale d'huile de palme.

Les consommateurs des pays développés ont également leur rôle à jouer, non seulement en continuant d'exiger des normes de certification crédibles et en améliorant constamment, mais aussi en acceptant d'en payer le prix. Aujourd'hui, le coût de la certification (plusieurs dizaines d'euros par hectare) incombe encore en grande partie aux producteurs du Sud.

Si le législateur doit surtaxer l'importation d'huile de palme, la seule manière d'inciter les producteurs au développement de pratiques agricoles durables et plus respectueuses des populations et de l'environnement reste de taxer uniquement l'importation d'huile de palme non certifiée, afin d'encourager la mise en place sur le terrain de démarches de certification, longues et coûteuses.

BIBLIOGRAPHIE

A. Bødker et al., The Danish fat tax: Effects on consumption patterns and risk of ischaemic heart disease, *Preventive Medicine*, vol. 72, pp. 200-203, 2015.

S. A. Abood et al., Relative contributions of the logging, fiber, oil palm, and mining industries to forest loss in Indonesia, *Conservation Letters*, vol. 8(1), pp. 58-67, 2014.

L. Schwingshackl et G. Hoffmann, Dietary fatty acids in the secondary prevention of coronary heart disease: A systematic review, meta-analysis and meta-regression, *BMJ*, vol. 4, e004487, 2014.

J. Potts et al., The State of Sustainability Initiatives - Review 2014, <http://bit.ly/1T8boV6>

A. Rival et P. Levang, La Palme des controverses Palmier à huile et enjeux du développement. Oupa, 2013



Réagissez au Point de vue sur www.pourlascience.fr

COSMINNOV

COSMETIC INNOVATION DAYS



24-25 MAI 2016 - ORLÉANS, FRANCE

4th

Cosm'innov, le rendez-vous pour découvrir les dernières avancées scientifiques de la cosmétologie

→ Programme scientifique / Conférences plénières

Les communications orales (orales et flash) et les posters sont en cours de sélection

Vieillesse cutanée & Physiologie de la ride

DR. REIKO TANAKA - Faculty of Engineering, Department of Bioengineering - Imperial College London, UK
UK Mathematical modelling approach to understand skin homeostasis

DR. NATHALIE JONCA - CNRS, INSERM Toulouse III University, France
Aging and keratinocyte terminal differentiation

Formulation & Physico - Chimie

DR. JEAN-PAUL FEVRE - CEO, Plant Advanced Technologies, France
"Plant milking" technology, a new sourcing solution for innovative natural actives

DR. PATRICK TABELING - CNRS - ESPCI - Institut Pierre-Gilles de Gennes, France
Colloidal microfluidics

DR. OREN SCHERMAN - Department of Chemistry - University of Cambridge

Science & Maquillage

DR. HENRI SAMAIN - Directeur International, Disruptive Innovation, L'Oréal, France
New opportunities that 2D printing allows for make-up

Cosmétiques & Nouvelles Technologies

DR. TRISTAN ROUSSELLE, PHD - Co-fondateur et CEO, Aryballe Technologies, France
The future of electronic nose

DR. JEAN-MICHEL POUVESLE - Directeur de recherche, GREMI, University Orléans
Cold plasma for cosmetic applications

FABIEN GUILLEMOT - CEO Poietis - Laboratory "Tissular Bio-Engineering" INSERM
Bioprinting of skin models

NIELS GRABE - Bioquant-University of Heidelberg - Germany

Beauté & Digital

DR. GUIVE BALOOCH - Vice Président mondial de L'Oréal Technology Incubator, France
Connected and personalized beauty

MATHIAS HERBERTS - Co-fondateur, Disruptive CTO, Cityzen Data, France

NICOLAS ALMARIC - CEO, Synelvia, France
STANISLAS VANDIER - CEO, Wired Beauty Technologies, France
Beauty can become truly digital: new sensors, new materials, new design for a consumer centric innovation

J.R. MEUNIER - COO Wired Beauty Technologies, France
MAPO - world's first connected beauty mask

Participer à cosminnov : www.cosminnov.com

ENTRETIEN

Université Paris-Saclay : « Pas sûr que les pôles augmentent la visibilité internationale »

Depuis quelques années, incités par le gouvernement, les établissements d'enseignement supérieur et de recherche se regroupent en pôles tels que l'université Paris-Saclay. Les avantages ne sont cependant pas si clairs.



Jérôme AUST est chargé de recherche à Sciences Po, à Paris, au sein du Centre de sociologie des organisations.

Créée en décembre 2014, l'université Paris-Saclay soulève de nombreux débats. En décembre 2015, encore...

Une lettre ouverte au gouvernement, une proposition visant à créer un pôle d'excellence à partir des grandes écoles de l'université Paris-Saclay, et non de l'ensemble de cette Communauté d'universités et d'établissements (COMUE), laquelle regroupe deux universités, neuf grandes écoles et sept organismes de recherche. Les COMUE ont pour objectif de « renforcer les synergies entre les acteurs et l'attractivité internationale des sites ». Entre 2014 et 2015, vingt et une COMUE sont nées, et cinq associations d'établissements sont en cours, auxquelles s'ajoutent des fusions d'universités, à Marseille et Strasbourg, notamment. Mais ces grands pôles sont-ils réellement bénéfiques à l'enseignement supérieur et à la recherche ? Le point avec Jérôme Aust, spécialiste des politiques d'enseignement supérieur et de recherche, et Christine Barats, qui, depuis 2014, étudie la diffusion et les effets des classements académiques internationaux, tel le classement de Shanghai, sur l'enseignement supérieur et la recherche.

POUR LA SCIENCE

Où est venue cette volonté de grands regroupements ?

JÉRÔME AUST : Le projet remonte au début des années 1990. Le ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche portait l'ambition de constituer des pôles européens. L'idée était de regrouper des universités et des grandes écoles dans les principales villes universitaires françaises.

CHRISTINE BARATS : En 1968, la loi Faure avait favorisé une multiplication des sites en créant de nouveaux établissements. On était aussi dans des logiques d'aménagement du territoire. Depuis les années 1990, on observe un mouvement inverse. Les contraintes budgétaires ne sont sans doute pas étrangères à ces logiques, même s'il n'est pas sûr que les regroupements permettent des économies budgétaires. À la fin des années 1990 a aussi émergé un discours sur la compétitivité internationale. Les établissements avaient déjà une réputation internationale, mais les discours politiques ont investi de plus en plus cette thématique.

J.A. : Au départ, ces pôles européens vivent plus ou moins bien. Puis, en 2006, la loi de programme

pour la recherche crée les Pôles de recherche et d'enseignement supérieur (PRES), qui visent à regrouper des universités et des grandes écoles pour limiter la fragmentation du système français entre ces deux types d'établissements. Peu à peu, les PRES se transforment au gré des projets lancés par l'État – l'opération Campus, d'abord, en 2008, puis surtout le programme Investissements d'avenir (PIA), en 2010, à l'origine du projet de Saclay. De structures de coopération, les PRES deviennent des structures de portage des projets collectifs financés par le PIA.

PLS

Qu'apportent les COMUE par rapport aux PRES ?

J.A. : La différence entre COMUE et PRES vient d'abord des compétences. Alors qu'il ne le faisait pas avec les PRES, l'État s'est appuyé sur les COMUE pour signer un contrat de site, qui prévoit une stratégie globale pour le site sur les plans de la formation, la recherche et la valorisation de la recherche. Les contrats des établissements membres de la COMUE sont inclus dans ce contrat de site. Les COMUE constituent donc un pas de plus vers l'intégration des établissements dans une même institution. Cela a apporté un degré d'institutionnalisation supérieur, une strate supplémentaire au système français d'enseignement et de recherche.



Christine BARAIS est maître de conférences en sciences de l'information et de la communication à l'univ. Paris-Descartes, en délégation au CNRS (ISCC)

PLS

Les regroupements sont-ils une spécificité française ?

J. A. : Non. On assiste aussi à des regroupements en Grande-Bretagne, par exemple, et dans d'autres parties du monde, en Asie notamment. La spécificité française réside surtout dans le fait que les institutions d'enseignement les plus prestigieuses sont les grandes écoles, alors qu'en Allemagne, en Grande-Bretagne, les élites sont formées à l'université. On a donc en France un découplage entre le lieu de fabrication de la recherche (l'université) et le lieu de formation des élites, qu'on ne retrouve pas dans beaucoup d'autres pays.

PLS

La fragmentation université-grandes écoles est-elle toujours aussi forte aujourd'hui ?

J. A. : Elle est moins forte qu'auparavant, précisément parce que les politiques de rapprochement ont eu des effets. Dans les années 1980, on était dans deux mondes distincts où les gens se rencontraient peu, voire pas. Aujourd'hui, une multitude de dispositifs organisent un dialogue au moins entre les exécutifs, qui font que ces établissements sont pris dans des projets collectifs. Si l'on s'intéresse à l'expérience des étudiants, en revanche, il n'est

pas certain que le rapprochement soit aussi net. La vie d'un étudiant en grande école reste très différente de celle d'un étudiant en université, et les filières de fabrication des élites restent attachées aux grandes écoles, même si les universités ont su développer des formations de grande qualité.

PLS

L'idée de fusion ne fait-elle pas peur ?

J. B. : En général, les équipes de direction sont plutôt favorables à la fusion. Depuis quelques années, les établissements renforcent leur stratégie de communication, notamment en changeant de nom, et les fusions participent de ce mouvement. Mais les situations sont diverses. Il faut tenir compte des dynamiques territoriales, parfois des tensions entre villes universitaires, ce qui ne facilite pas les fusions. Les ancrages disciplinaires ravivent aussi certains rapports de force. À Paris, les configurations sont complexes, que ce soit entre établissements *intra-muros*, entre établissements *intra-muros* et périphériques, ou entre universités et grandes écoles...

PLS

La loi LRU de 2007 sur l'autonomie des universités a-t-elle accéléré le mouvement ?

J. A. : Cette loi a eu un impact dans certains lieux. À Aix-Marseille, notamment, elle est apparue aux présidents d'université de l'époque comme un cadre législatif permettant de gérer un grand établissement, aux effectifs très importants, ce qui pour eux n'était pas le cas du cadre précédent mis en place par la loi Savary (1984). Dans ce cas précis, l'adoption de la loi LRU a favorisé la fusion.

PLS

On invoque souvent le classement de Shanghai comme baromètre de la santé des établissements français. De quoi s'agit-il ?

J. B. : Ce classement est né en 2003 dans un contexte où la Chine mettait en place des réformes importantes dans l'enseignement supérieur. Dans un premier temps, il visait à comparer les universités chinoises aux établissements étrangers, puis il a été présenté comme un classement qui devait aider les étudiants chinois à trouver une université de qualité à l'étranger. Mais il a surtout contribué à faire émerger la notion d'universités de classe

mondiale, des universités compétitives dans un contexte de comparaison des établissements.

Le prisme de ce classement, cependant, n'est pas l'enseignement, mais la recherche. Les critères sont par exemple le nombre de prix Nobel et de médailles Fields, le nombre de publications dans les revues *Science* et *Nature*, le nombre de chercheurs les plus cités dans leur discipline... Même si depuis 2009, l'université à l'origine du classement publie des classements dits thématiques laissant une place aux sciences humaines et sociales, ces critères restent plus proches des objectifs des sciences dures.

PLS

Comment ce classement est-il devenu une référence ?

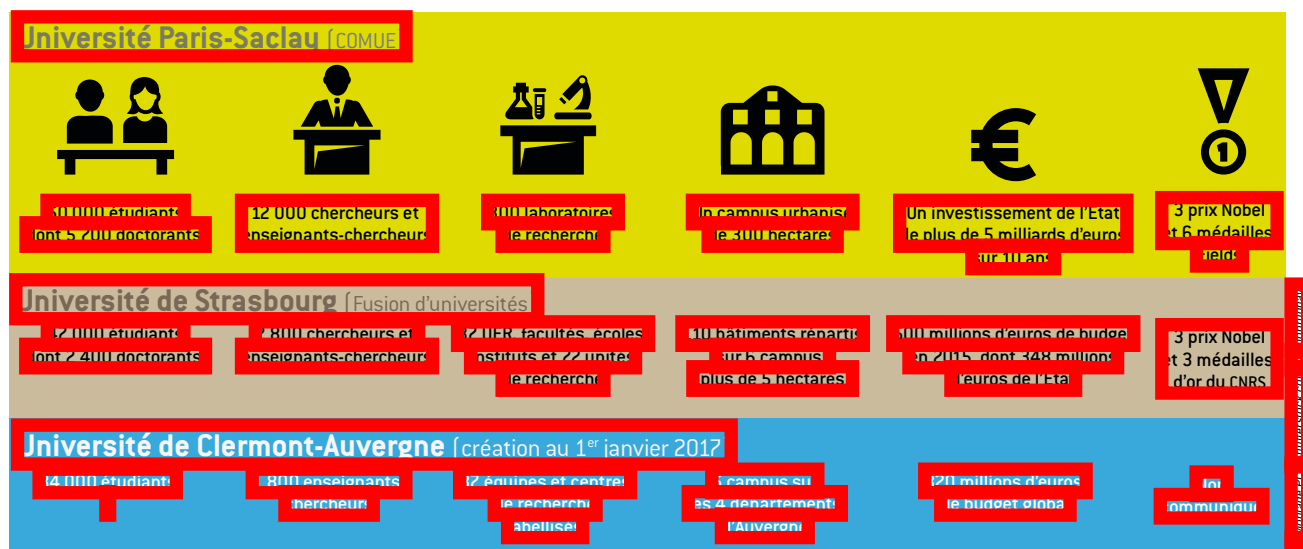
J. B. : Il n'est pas la référence partout. Aux États-Unis, il est même peu connu, car le pays a ses propres classements, publiés par discipline depuis 1983 dans le magazine *US News and World Report*. En Europe, l'écho du classement de Shanghai est assez divers. En fait, son succès dans un pays est en général inversement proportionnel au résultat du pays dans le classement, les résultats fonctionnant comme une ressource médiatique ou politique. En France, sa médiatisation a été importante. Et encore, seulement à partir de 2007, dans un contexte de réforme et de mobilisation. S'il est devenu la référence, c'est parce que, à l'époque, le gouvernement l'a utilisé comme argument pour justifier les réformes, comme un moyen pour renforcer la volonté de faire des regroupements.

J. A. : En lui-même, un classement ne produit pas d'effet. Seule son instrumentalisation en fait une référence. La preuve : d'autres classements sont bien plus flatteurs pour le système académique français. Le classement SCImago, tout aussi contestable que celui de Shanghai, place le CNRS parmi les meilleurs organismes de recherche au monde. Mais ce n'est pas lui que l'on a mobilisé dans les discours. Le classement de Shanghai a été utilisé pour montrer qu'il y avait un problème en France et qu'il fallait réformer son système académique.

PLS

Le classement est-il un bon baromètre ?

J. B. : De tels classements sont réducteurs, car ils comparent des éléments difficilement



comparables. Il en existe beaucoup et chacun favorise telle ou telle structure, ou une représentation que l'on a de l'excellence scientifique. Celui de Shanghai défavorise les sciences humaines et sociales. Il est important de prendre de la distance par rapport à ces outils qui ont forcément des biais, et que l'on instrumentalise.

J.A. : De plus, les gens n'ont pas attendu les classements pour avoir une idée de ce que vaut un établissement. Dans leur domaine au moins, les chercheurs connaissent les universités et les laboratoires qui comptent, parce qu'ils suivent les publications et sont au courant des réputations. Les scientifiques allemands, britanniques ou américains n'ont pas attendu le classement de Shanghai pour savoir qu'en France, Paris 6 et Paris 11 sont des universités performantes en recherche.

PLS
Les regroupements ont-ils conduit à un meilleur classement. L'argument a-t-il été invoqué ?

J.B. : C'est là où il y a un paradoxe. Le classement de Shanghai ne comptabilise les établissements qu'à condition qu'ils soient reconnus comme des établissements cohérents. Les regroupements ne sont ainsi pas pris en compte, seulement les fusions.

J.A. : Même dans ce cas, le bénéfice n'est pas clair. Le classement de Shanghai a de nombreux biais. Les critères utilisés favorisent les universités de grande taille qui regroupent des disciplines de

sciences. Au classement de Shanghai, l'université de Strasbourg est passée d'un rang compris entre le 102^e et le 151^e en 2003 à 87^e en 2015. Mais il n'est pas sûr que ce soit à cause de sa fusion en 2009. La réunion d'une grosse université de sciences, l'université Louis Pasteur, avec deux universités de sciences humaines et sociales aurait pu se traduire par une perte de position. Le gain en taille aurait pu être annulé par l'intégration de disciplines dont les résultats sont très mal pris en compte dans ce classement.

PLS
La taille des regroupements influe-t-elle sur leur productivité, leurs résultats ?

J.A. : Il est trop tôt pour évaluer cet impact des regroupements. Des études tendent à montrer que, à l'échelle des laboratoires, de petites équipes sont parfois plus productives que des grandes, car les coûts de coordination y sont moins élevés, mais il n'existe pas de recherche similaire à l'échelle des établissements. On peut cependant noter que les premiers établissements du classement de Shanghai ne sont pas les plus grands. Harvard ne compte que 21 000 étudiants... En revanche, il a été montré qu'il est profitable pour un scientifique d'avoir à proximité des chercheurs d'un autre domaine. L'innovation scientifique naît souvent de l'importation de concepts ou de techniques relevant d'autres champs scientifiques. La taille de l'établissement n'est pas en cause, l'essentiel est d'être pluridisciplinaire.

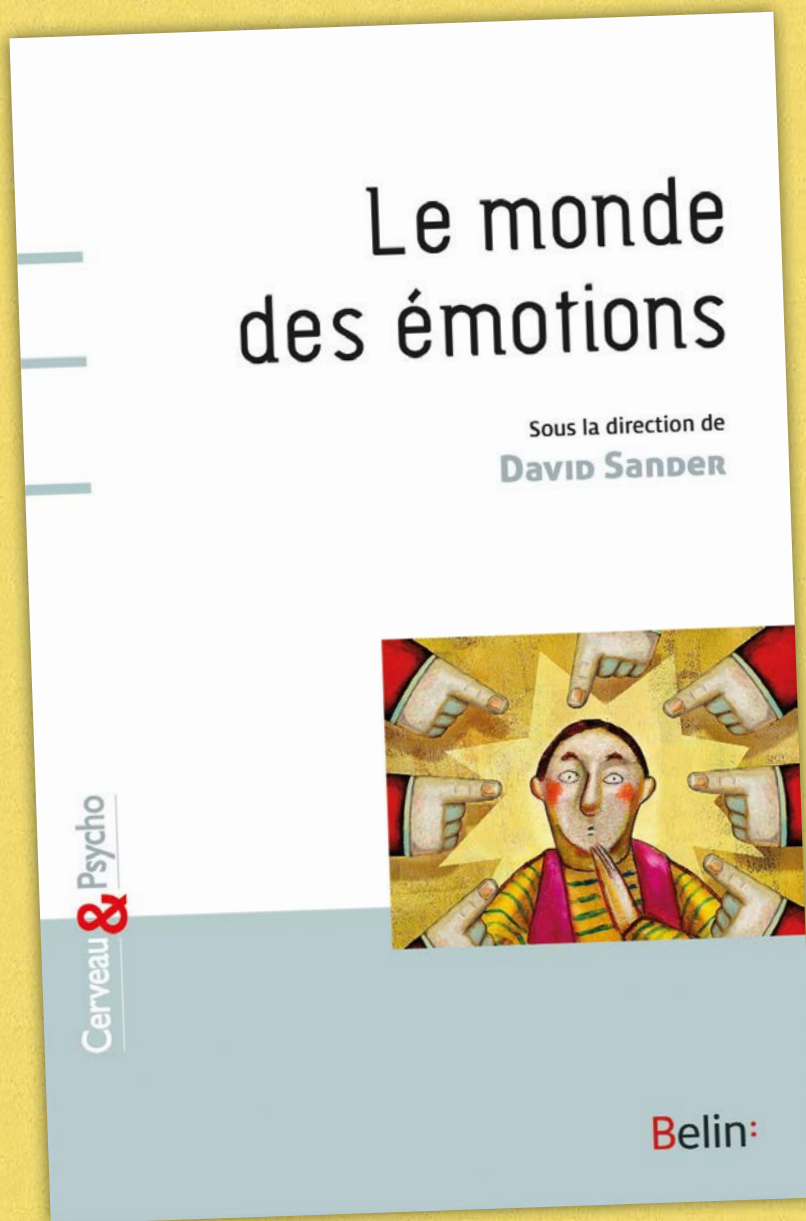
PLS
Faire des pôles, est-ce une bonne idée ?

J.B. : Tout dépend du point de vue. Si l'on raisonne en termes de compétitivité internationale, on oublie parfois les enjeux nationaux et régionaux et on occulte une dimension essentielle de l'enseignement supérieur qui est la formation. Veut-on avant tout attirer des étudiants étrangers ou adapter l'offre de formation au contexte d'emploi difficile ? Il faut définir quelle conception de l'enseignement supérieur et de la recherche on veut privilégier, et se demander si les regroupements sont une bonne solution pour parvenir à cet objectif. La question ne se pose donc pas tant en termes de taille que de projet d'établissement.

J.A. : Des pôles pour quoi faire ? Si c'est pour avoir une meilleure intégration des stratégies entre universités et grandes écoles, cela peut être une bonne idée, car ces établissements sont alors pris dans des projets communs, et de tels rapprochements s'opèrent déjà. Si, en revanche, les regroupements visent à augmenter la visibilité internationale, il n'est pas sûr qu'ils remplissent leur rôle. Dans les cas où une fusion ne s'opère pas, ils se sont surtout traduits par la constitution d'une nouvelle strate qui, en compliquant le dispositif français, le rend encore plus opaque.

Propos recueillis par Marie-Neige CORDONNIER

Quand émotion rime avec raison



Le nouveau livre **Cerveau & Psycho**
maintenant en librairie
et sur www.cerveauetpsycho.fr

CABINET DE CURIOSITES SOCIOLOGIQUES par Gérald Brunner

Sisyphe au pays des rumeurs

Est-il vain de produire des réfutations aux thèses conspirationnistes et autres sottises qui foisonnent sur Internet ? Non : l'honnête homme en a besoin.

Tout le monde connaît le mythe de Sisyphe, narré dans *L'Odyssée* : le fondateur de Corinthe, puni par les dieux, fut condamné aux enfers à faire rouler un rocher vers le haut d'une montagne, à le voir chuter inexorablement et à recommencer jusqu'à la fin des temps. Ce récit est souvent invoqué pour illustrer une entreprise vouée à l'échec.

A ce titre, il pourrait servir d'illustration aux efforts que certains font pour faire reculer les rumeurs, théories du complot, croyances technophobiques en tous genres... À peine coupe-t-on la tête à l'une que dix autres paraissent ressusciter.

C'est du moins la leçon que l'on pourrait croire tirer de l'abandon en décembre dernier de la rubrique « What was fake ? » du *Washington Post*, qui avait justement pour objectif de combattre les erreurs et les mensonges que la Toile diffuse bien souvent. Caitlin Dewey, l'auteur de cette rubrique, expliquait, dans le texte qui clôturait cette aventure, que le déluge de sottises est tel sur Internet que toutes ses luttes lui ont bientôt paru dérisoires.

Est-il possible d'évaluer le rapport de force entre les mystifications et les démystifications sur la Toile ? Prenons l'exemple des théories du complot. Elles sont si nombreuses qu'assez souvent, personne ne prend la peine de les démentir – à quelques notables exceptions près, tels les sites Conspirac

Watch, HoaxBuster ou, dans un autre genre, les initiatives prises par Spicce (une chaîne de documentaires sur le Web qui combat, entre autres, le conspirationnisme).

Pourtant, il arrive parfois que la presse classique se saisisse de ce sujet sur leurs sites internet pour tenter de faire reculer la crédulité collective. Que se passe-t-il alors ? Observe-t-on, enfin, un Sisyphe victorieux ? Pour le savoir, j'ai observé ce

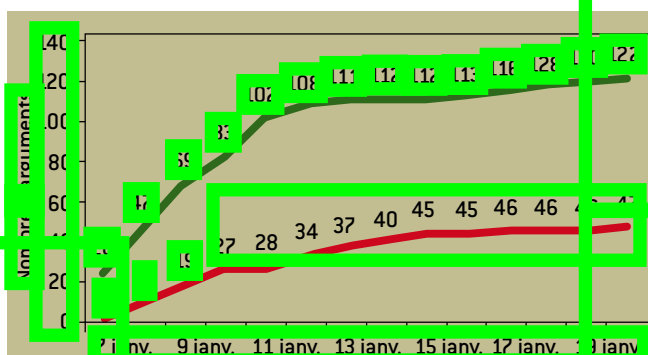
principalement des journalistes] ont opposé des arguments rationnels à ces allégations.

L'évolution, au jour le jour, du rapport de force argumentatif entre mystification et démystification tel qu'il s'est organisé dans cet espace public que constitue Internet est montrée dans le graphique ci-dessous, sur une durée de quatorze jours.

De *L'Express* à *20 minutes*, beaucoup ont contré les lubies conspirationnistes, mais, malgré la puissance apparente des médias classiques, si l'on compare le nombre d'arguments cumulatifs au jour le jour, on s'aperçoit rapidement que le bras de fer tourne en la défaveur de ces médias.

Faut-il en conclure que Sisyphe a tort de vouloir faire remonter son rocher ? Pas sûr. Ceux qui se découragent perdent de vue qu'il ne s'agit pas de faire disparaître les balivernes s'épanouissant sur ce marché dérégulé de l'information qu'est Internet. Au contraire, l'effort doit viser à offrir une voie intellectuelle alternative et solide. Car les indécis, ceux d'entre nos concitoyens qui s'interrogent sur le sens de certains événements, ne doivent pas être abandonnés aux interprétations les plus simplistes et dont l'attrait tient, en quelque sorte, au nombre d'arguments qu'elles avancent. Dans ce domaine, la politique de la chaise vide n'est jamais la bonne et c'est toujours Sisyphe qui a raison !

Gérald BRUNNER est professeur de sociologie à l'université Paris-Diderot.



SUR LA TOILE, les arguments trouvés en faveur de théories du complot (en vert) liées à l'attentat contre *Charlie Hebdo* sont bien plus nombreux que les arguments s'opposant à ces théories (en rouge).

qui s'était produit en matière de théories du complot concernant l'attentat contre *Charlie Hebdo* perpétré le 7 janvier 2015. C'est un bon exemple, car la presse a fait un effort notable pour contredire les thèses farfelues que cette attaque terroriste a inspirées sur le Web et ailleurs.

Comme on s'en souvient, certains doublaient de la couleur des rétroviseurs de la voiture des assassins, considéraient que François Hollande était arrivé trop vite sur les lieux, etc. Or certains commentateurs

**C'EST
POUR
VOUS**
france
culture

LA MARCHÉ DES SCIENCES

DÉCOUVERTES INVENTIONS AVENTURES SAVANTES AU FIL DE L'HISTOIRE

AURÉLIE LUNEAU
CHAQUE JEUDI
16H - 17H



en partenariat avec **POUR LA
SCIENCE**

Écoutez le podcast
franceculture.fr



HOMO SAPIENS INFORMATICS chronique de Gilles Dowek



Essayez de m'oublier... vous n'y parviendrez pas !

L'oubli volontaire est impossible pour un humain. Il le devient aussi pour les ordinateurs. La rançon de la complexité ?

Dans les ordinateurs, on distingue souvent deux types de circuits : ceux qui font des calculs et ceux qui stockent les données. Pour nommer les circuits du second type, deux métaphores sont en compétition : l'« entrepôt » et la « mémoire ». Cette dernière est cependant assez approximative, car la mémoire d'un ordinateur et celle d'un humain ont des propriétés très différentes. Par exemple, s'il est fréquent que nous oublions quelque chose – une date, un nom propre, un mot de passe... –, cet oubli n'est jamais volontaire et, en général, nous ne savons même pas quand nous avons oublié quelle information. Simplement, un jour, nous essayons de nous la rappeler et nous n'y parvenons pas.

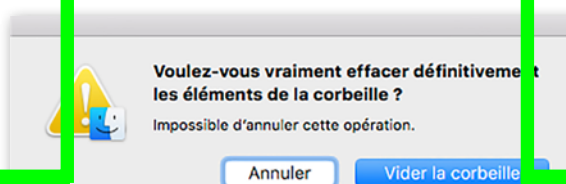
De plus, l'injonction paradoxale « oublie que la bataille de Marignan s'est déroulée en 1515 » ne fait que raviver, dans notre mémoire, la date que l'on demande d'oublier. En revanche, effacer une information dans la mémoire d'un ordinateur est une action aussi volontaire que gommer un mot écrit au crayon.

Ce qui est vrai pour un ordinateur isolé, qui exécuterait un programme unique, cesse de l'être si cet ordinateur est équipé d'un système d'exploitation ou d'un disque ou s'il est connecté à un réseau. La destruction d'un fichier est un bon exemple de la difficulté d'effacer volontairement, dans un tel cas, de l'information.

D'abord, quand nous mettons un fichier à la corbeille, le système d'exploitation ne l'efface

pas réellement, sauf s'il manque de place pour stocker d'autres données, car il anticipe la possibilité que nous ayons fait une erreur et que nous souhaitions aller l'y récupérer.

Ensuite, même si nous vidons cette corbeille, le système d'exploitation se contente de faire disparaître le fichier de la liste des fichiers accessibles, mais il ne l'efface toujours pas, jusqu'à ce qu'il ait besoin de place pour stocker d'autres données. Un parcours systématique du disque d'un ordinateur permet ainsi souvent de récupérer de nombreux fichiers, depuis longtemps oubliés.



METTRE UN FICHIER À LA CORBEILLE
et vider cette dernière ne garantit pas sa complète disparition, en dépit des apparences

Même quand l'espace de stockage a été réutilisé en y mettant d'autres données, on peut parfois récupérer les données initiales, car l'état physique d'une zone de disque contenant le bit 1 diffère légèrement selon qu'il y avait auparavant le bit 0 ou 1. Enfin, même effacé, un fichier laisse une trace dans le système d'exploitation, qui garde souvent un historique des opérations effectuées.

Si, en outre, l'ordinateur est relié à un réseau ou si le fichier est stocké sur un serveur distant, il est possible qu'il soit « sauvegardé » chaque nuit ou chaque minute. Enfin, pour peu

que ce fichier soit arrivé sur cet ordinateur par le réseau, il est possible que les ordinateurs formant ce réseau en aient gardé une copie. S'il est en outre arrivé par courrier électronique, le fournisseur de service de messagerie en a probablement aussi gardé une copie, sans parler des services de renseignement, qui ont probablement aussi la leur.

Du fait de la complexité de ces assemblages, l'information devient aussi collante qu'un chewing-gum et il est très difficile de s'en débarrasser : il y a quelque temps, à la suite d'une erreur de leur fournisseur de service de messagerie, certains utilisateurs ont vu réapparaître, dans leur boîte aux lettres, des courriels qu'ils avaient pourtant « définitivement » effacés des mois auparavant.

Si la mémoire d'un ordinateur a des propriétés différentes de celle d'un être humain, la mémoire d'un assemblage complexe d'ordinateurs, de disques, de réseaux et de logiciels commence à lui ressembler étrangement, notamment en raison de l'émergence de cette impossibilité d'oubli volontaire.

Cette impossibilité est peut-être inévitable quand un système informatique atteint un certain niveau de complexité. De même, c'est peut-être du fait de sa complexité que notre cerveau, si prompt à oublier, est incapable de le faire volontairement. ■

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

ABONNEZ-VOUS À **POUR LA SCIENCE**



43%
d'économie

OFFRE INTEGRALE

8,20€/mois
DURÉE LIBRE

✓ **Le magazine mensuel**
Pour la Science (12n°/an)

✓ **Le thématique trimestriel**
Dossier Pour la science (4n°/an)

✓ **L'accès illimité aux archives**
depuis 1996

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à : Pour la Science - Service abonnements - 19 rue de l'Industrie - BP 901053 - 67 402 Illkirch cedex

OUI, je m'abonne à Pour la Science formule intégrale

☐ En durée libre par prélèvement automatique de 8,20€ par mois et je complète l'autorisation ci-contre. **J'économise 43% par mois (IPV8F20)**

☐ Pour une durée de 1 an et je joins mon règlement de 99€

au lieu de 124,4€ (prix de vente en kiosque) (11A99F)

☐ Chèque à l'ordre du groupe Pour la Science

☐ CB N°

Cle*

Expire le _____
Date et signature obligatoires

Les 3 derniers chiffres figurant au dos de votre carte bancaire

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal _____ Ville : _____

E-mail obligatoire : _____

J'accepte de recevoir les informations de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

et de ses partenaires ☐ OUI ☐ NON

Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre réservée aux nouveaux abonnés valable jusqu'au 30/04/16 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site www.pourlascience.fr. Conformément à la loi "Informatique et libertés" du 6 janvier 1978, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification aux données vous concernant en adressant un courrier à Pour la Science. Votre abonnement en prélevement est reconduit automatiquement et peut être interrompu par simple lettre.

MANDAT DE PRELEVEMENT SEPA En signant ce mandat SEPA, j'autorise Pour la Science à transmettre les 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.

TYPE DE PAIEMENT : PAIEMENT RÉCURRENT

Titulaire du compte

Nom : _____

Adresse : _____

Code postal _____ Ville : _____

Désignation du compte à débiter

BIC (Identification internationale de la banque) _____

BAN _____

Numéro d'identification international du compte bancaire

Établissement teneur du compte

Nom : _____

Adresse : _____

Code postal _____ Ville : _____

Date et signature

Organisme Créancier

Pour la Science - 8 rue Férou - 75006 Paris

N° ICS FR92ZZZ426900

N° de référence unique de mandat (RUM) _____

Joindre un RII

Les complots finissent-ils toujours par être révélés ?

par Nicolas Gauvrit, sur le blog Raison et psychologie

Récemment, un physicien de l'université d'Oxford, David Grimes, a publié un article censé démontrer qu'il est très improbable qu'un vaste complot impliquant un grand nombre de personnes puisse rester secret longtemps (http://bit.ly/pls462_scilogs). C'est un argument intuitif contre les théories du complot. Difficile de croire, par exemple, que des milliers de personnes auraient participé à un complot visant à intoxiquer la population mondiale avec des vaccins sans qu'aucune ne vende la mèche durant des décennies.

Pourtant, cet argument n'était pas prouvé : peut-être est-il vraiment possible de dissimuler indéfiniment des complots ? C'est pourquoi nombre de ceux qui s'inquiètent de la popularité des théories du complot ont accueilli avec enthousiasme l'annonce de cette démonstration, un « coup fatal » pour les « complotistes ». De nombreux sites ont relayé l'information. Hélas, cet article ne démontre rien du tout ! Voyons pourquoi.

Précisons d'abord que le fait que la preuve soit fautive ne signifie pas que la conclusion l'est : il reste vraisemblable qu'un complot à grande échelle soit, forcément, rapidement dévoilé.

David Grimes propose trois modèles pour calculer le risque de fuite dans un complot. Le premier suppose que le nombre de personnes impliquées est constant au cours du temps. Dans les deux autres, le nombre de personnes impliquées diminue avec le temps, ce qui semble réaliste (si on exclut les Illuminati et autres supposées organisations secrètes séculaires). Mais David Grimes commet ensuite une grossière erreur. Pour déterminer la probabilité de fuite au bout de, par exemple, 50 ans, il calcule le nombre de personnes encore impliquées après 50 ans, par exemple 5, puis fait comme s'il n'y avait que ces 5 personnes depuis le début ! Une bourde qui fait très mauvais effet...



L'EXPOSITION AUX ONDES électromagnétiques serait nocive, mais, selon certains, les industriels et les autorités étoufferaient cette « vérité ». Une telle conspiration pourrait-elle persister sans être démasquée tôt ou tard ? C'est peu vraisemblable.

Résultat ? Le seul modèle viable est le moins réaliste, mais aussi le plus défavorable aux « complotistes ». Pire, il converge par construction (loi de Poisson) vers une probabilité de fuite de 100 %. En d'autres termes, il est inscrit dans les hypothèses du modèle qu'un complot ne pourra jamais rester indéfiniment caché. Mais ce n'est pas tout.

Ce modèle nécessite d'estimer la probabilité p qu'un membre d'une conspiration révèle le complot pendant une unité de temps donnée (un an). Pour ce faire, David Grimes a utilisé des complots connus, qui ont été révélés. Mais il n'en a trouvé que... trois : le scandale d'espionnage de la NSA, l'affaire de Tuskegee (des patients atteints de syphilis n'ont volontairement pas été soignés), et le cas des faux témoignages des experts scientifiques du FBI. C'est très peu.

Néanmoins, on pourrait quand même déduire une approximation très grossière de la probabilité de fuite à partir de ces maigres données. Sauf que l'auteur utilise une méthode discutable : il suppose qu'un complot ne peut être révélé que lorsque la probabilité qu'il le soit dépasse 50 %. Cela le conduit à une inégalité aux conséquences

étranges : il suffit qu'une fois dans l'histoire un complot ait été dévoilé après moins de 7 mois pour que $p = 100\%$. Ainsi, si une fuite apparaissait au bout de 7 mois, toute personne ayant participé à un complot le révélerait à coup sûr chaque année... Peu crédible.

Ce que montre cette affaire, c'est que même sceptiques ou rationalistes, nous avons une tendance à accepter avec plaisir et sans défiance un résultat qui abonde dans notre sens. Les absurdités que nous condamnons chez les complotistes se retrouvent hélas parfois de notre côté. Cette erreur rappelle aussi que la publication dans une revue à comité de lecture n'est pas la fin de l'histoire ni la preuve ultime. Restons prudents ! ■



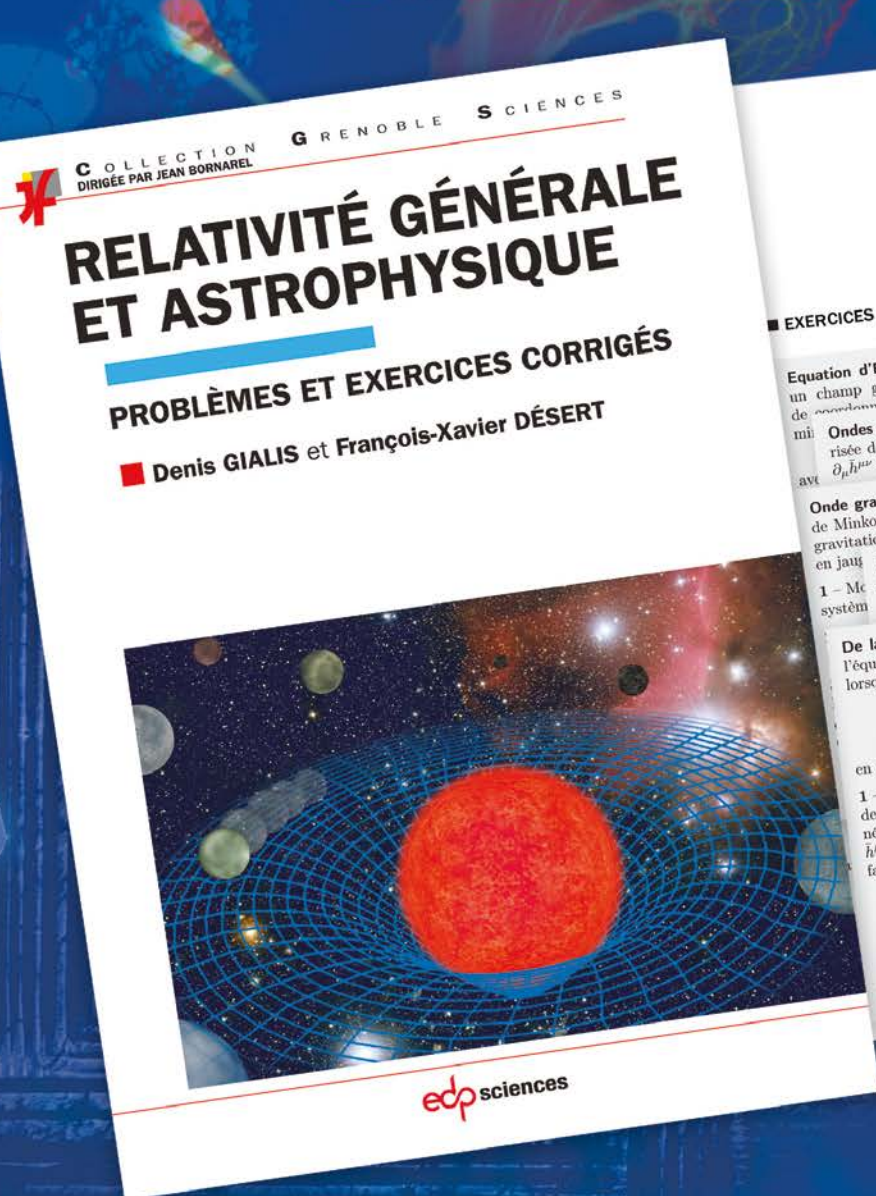
Nicolas GAUVRIT est maître de conférences en mathématiques à l'université d'Artois et psychologue du développement. Il est l'auteur du blog Raison et psychologie (www.scilogs.fr/raisonetpsychologie/).



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

GRENOBLE SCIENCES

■ CONSEIL ■ EXPERTISE ■ LABELLISATION ■ ÉDITION



Chapitre 6 Ondes gravitationnelles

EXERCICES

Equation d'Einstein linéarisée – Dans une région de l'espace-temps où règne un champ gravitationnel suffisamment faible, il existe toujours un système de coordonnées cartésiennes $\{x^\mu\}$ tel que la métrique prenne la forme usuelle $\eta_{\mu\nu}$.

Ondes gravitationnelles et jauge TT – On considère l'équation d'Einstein linéarisée dans le vide ($T_{\mu\nu} = 0$) en jauge harmonique, c'est-à-dire, $\square h^{\mu\nu} = 0$ avec $\partial_\mu h^{\mu\nu} = 0$.

Onde gravitationnelle et particules libres – On se place dans un espace-temps de Minkowski, muni d'un système de coordonnées $\{x_\mu\}$, traversé par une onde gravitationnelle plane se propageant suivant la ligne coordonnée x^3 . On se place en jauge TT.

Formule du quadripôle – L'équation d'Einstein linéarisée, en jauge de Lorenz, s'écrit

$$\square h^{\mu\nu} = -\frac{16\pi G}{c^4} T^{\mu\nu},$$

De la source stationnaire à la limite newtonienne – La solution générale de l'équation d'Einstein linéarisée lorsque la source est stationnaire, c'est-à-dire lorsque $\partial_0 T^{\mu\nu} = 0$, s'écrit simplement

$$\bar{h}^{\mu\nu}(\vec{x}) = -\frac{4G}{c^4} \int \frac{T^{\mu\nu}(\vec{x}')}{|\vec{x} - \vec{x}'|} d^3x',$$

Emission et perte d'énergie d'un système binaire – On s'intéresse à l'émission d'ondes gravitationnelles d'un système binaire constitué de deux étoiles à neutrons N_1 et N_2 , de même masse $M = 1,4 M_\odot$, séparées initialement d'une distance $a = 2,0 \times 10^9$ m. Leur mouvement, décrit dans la limite newtonienne, sera supposé circulaire dans le plan (O, x, y) , le point O étant situé au centre de masse du système.

- 1 – Quelle est la période de révolution des étoiles à neutrons autour de leur centre de masse? Sont-elles en mouvement relativiste? En déduire leurs coordonnées à un instant t , en supposant qu'à $t = 0$, les deux étoiles sont situées sur l'axe (Ox) .
- 2 – Déterminer les composantes du tenseur moment quadrupolaire du système binaire défini par

$$I^{ij}(t) = \int_{\text{Système}} \rho(t, \vec{x}) x^i x^j d^3x,$$

En dé

■ Comprendre la relativité générale par la pratique du calcul

■ ... et d'autres titres de la collection Grenoble Sciences



www.grenoble-sciences.fr

■ GRENOBLE SCIENCES



POUR COMMANDER : les ouvrages en français sont en vente dans le rayon Sciences des librairies ou sur internet : laboutique.edpsciences.fr

Grenoble Sciences, Université Grenoble Alpes, Bât. B de Phitem,
230 rue de la Physique – BP 53, 38041 Grenoble cedex 9
Tél. (33)4 76 51 46 95 • Fax. (33)4 76 51 45 79

Email : Grenoble.Sciences@ujf-grenoble.fr

Auvergne – Rhône-Alpes

La détection des

ONDES GRAVITATIO

une nouvelle fenêtre

Prédites par Einstein en 1916, les ondes gravitationnelles n'avaient jamais été détectées directement. C'est enfin chose faite : en enregistrant les ondes émises par la fusion de deux trous noirs, l'expérience *Advanced LIGO* inaugure une nouvelle ère pour l'astronomie.

Jean Bailly

L'ESSENTIEL

Le 14 septembre 2015.

Les deux interféromètres de *LIGO*, aux États-Unis, ont détecté pour la première fois une onde gravitationnelle, c'est-à-dire une vibration de l'espace-temps.

Sa source, distante

de un milliard d'années-lumière, est un système de deux trous noirs qui ont fusionné.

Cette détection confirme une fois de plus la théorie d'Einstein, met au jour un système de trous noirs et ouvre un nouveau champ de l'astronomie observationnelle.

ONDES GRAVITATIONNELLES

sur l'Univers

■ Il y a bien longtemps, dans une galaxie lointaine, très lointaine, deux trous noirs ont entamé une danse cosmique d'abord lent et à distance, puis de plus en plus rapide et rapprochée. Ils ont spiralé l'un autour de l'autre pendant une période qui pourrait avoir duré jusqu'à des milliards d'années. Puis la chorégraphie s'est achevée brutalement avec la collision des deux corps, qui ont fusionné en un trou noir plus massif.

Au cours de ce ballet, et surtout pendant l'ultime fraction de seconde, le tissu de l'espace-temps a fortement vibré, et ces vibrations se sont propagées à la vitesse de la lumière à travers le cosmos. Environ 1,3 milliard d'années plus tard, le 11 février 2016, les équipes des collaborations *LIGO* et *Virgo* ont annoncé avoir détecté ces « ondes gravitationnelles » dont l'existence a été prédite en 1916 par Albert Einstein. « Gravitationnelles », parce que la théorie de la relativité générale, dont on vient de fêter les cent ans, décrit la gravitation comme une manifestation de la déformation de l'espace-temps.

Une prédiction centenaire

L'événement est historique. Un siècle a été nécessaire pour relever les défis aussi bien théoriques qu'expérimentaux que posaient les ondes gravitationnelles. Dès 1905, en étudiant un modèle incomplet de gravitation incluant l'invariance de la vitesse de la lumière, Henri Poincaré évoquait déjà la notion d'« onde gravifique ». Mais c'est bien dans le cadre de la relativité générale qu'Einstein a émis l'hypothèse la plus convaincante des ondes gravitationnelles. Les physiciens ont mis plusieurs décennies à développer les outils mathématiques pour étudier ces ondes et comprendre qu'il était en principe possible de les détecter.

En 1974, les Américains Joseph Taylor et Russell Hulse ont donné la première preuve indirecte de l'existence des ondes gravitationnelles. Ils ont découvert le système binaire PSR B1913+16, qui contient un pulsar (une étoile à neutrons qui émet des ondes électromagnétiques de façon régulière, un signal utile pour effectuer des mesures précises), puis ils ont montré que la période de révolution du système diminuait lentement (les deux corps se rapprochaient l'un de l'autre) car ce dernier perdait

L'AUTEUR



Jean BAILLY est docteur en cosmologie et journaliste à *Pour la Science*

Des ondes émises
il y a 1,3 milliard
d'années
ont été enregistrées par
les interféromètres de *LIGO*
le 14 septembre 2015

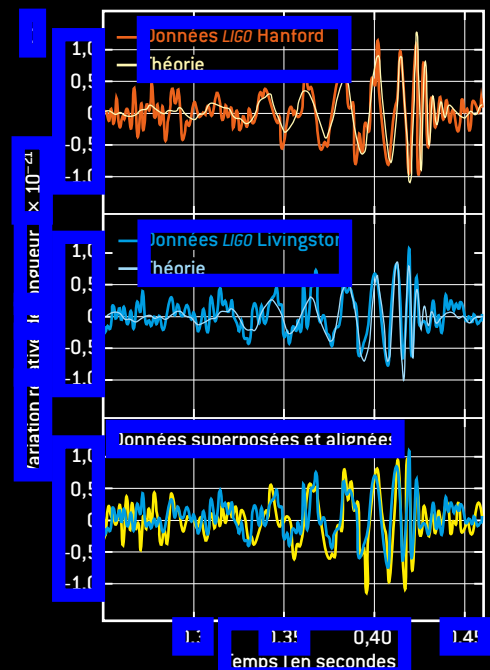
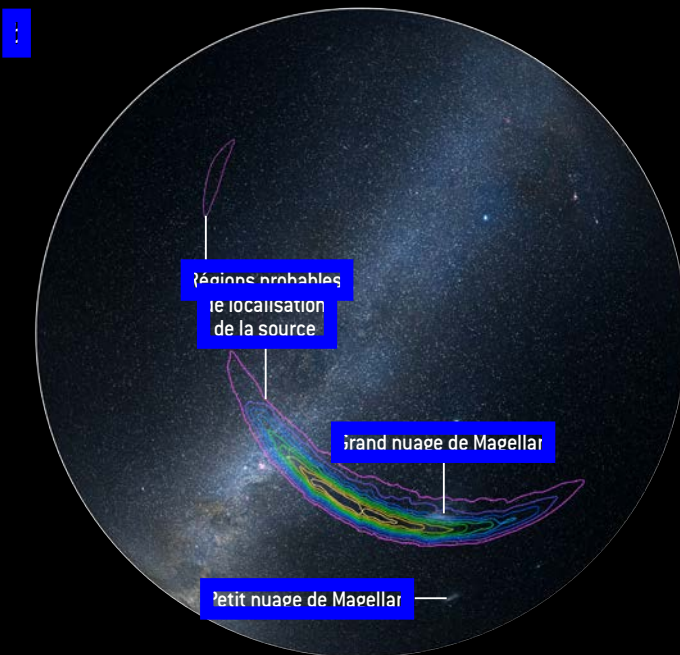
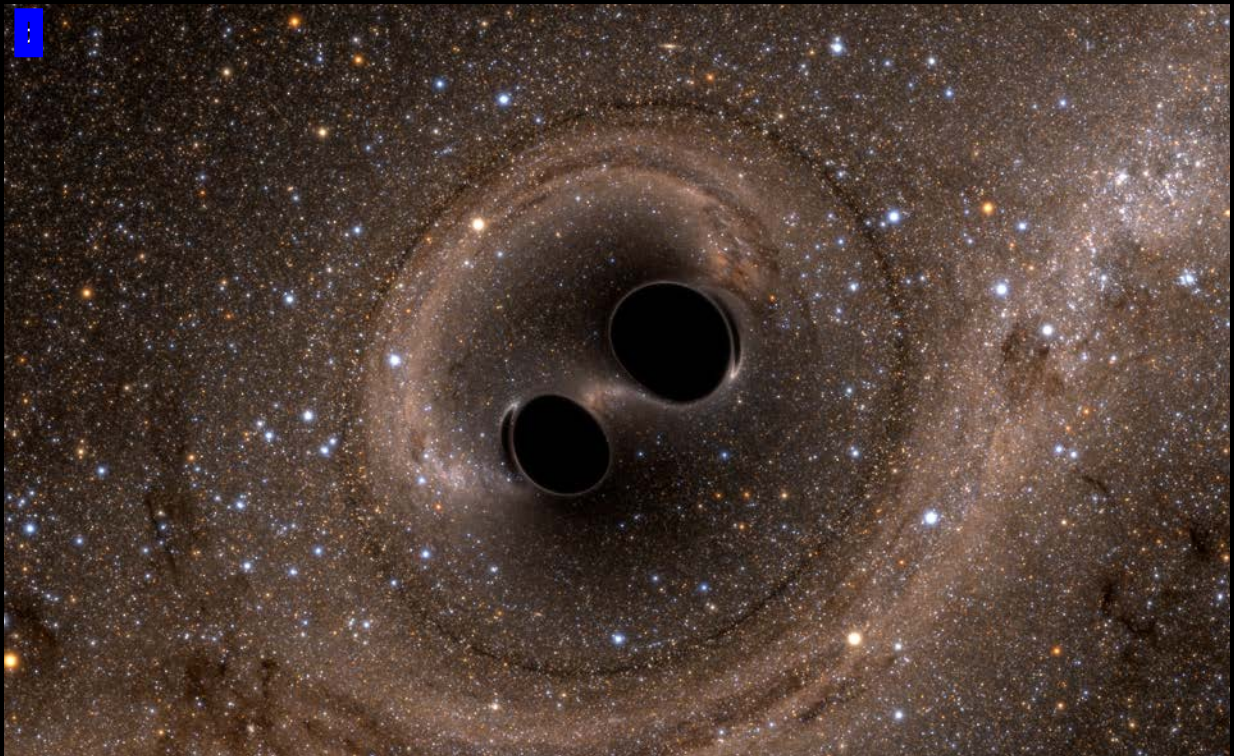
de l'énergie en accord avec les calculs de relativité générale où l'énergie est dissipée sous la forme d'ondes gravitationnelles. Les deux chercheurs ont reçu le prix Nobel de physique en 1993 pour ces travaux.

Il restait à détecter directement les ondes gravitationnelles. La piste la plus prometteuse était d'utiliser un interféromètre géant, concept imaginé dans les années 1960 et qui a connu une amélioration décisive dans les années 1970 sous l'impulsion de Rainer Weiss, du MIT (Institut de technologie du Massachusetts), aux États-Unis. Une première génération de ces dispositifs a été mise en service dans les années 2000 avec *LAMA300* au Japon, *GEO600* en Allemagne, *LIGO* aux États-Unis (situé sur deux sites séparés de plusieurs milliers de kilomètres, l'un à Livingston, en Louisiane, et l'autre à Hanford, dans l'État de Washington, voir les figures page 32) et *Virgo*, une expérience franco-italienne installée près de Pise.

Ces expériences n'ont pas observé d'ondes, mais elles ont ouvert la voie à des améliorations techniques qui ont permis d'augmenter la sensibilité des détecteurs *Advanced LIGO* (*Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory*), opérationnel depuis septembre 2015, et *Advanced Virgo*, qui prendra des données à partir de 2016.

Le signal tant attendu a été détecté le 14 septembre 2015 à 11 h 51 (heure de Paris) par les deux détecteurs jumeaux de l'expérience *Advanced LIGO*. Ce signal entre dans l'histoire sous le nom GW150914, forgé avec la date et l'abréviation de *Gravitational Wave*. L'analyse des données étant assurée conjointement par les équipes de *LIGO* et de *Virgo*, la découverte est attribuée aux deux collaborations.

Le signal GW150914 est en réalité une double découverte : c'est la première détection directe d'ondes gravitationnelles, mais aussi la confirmation de l'existence de systèmes binaires de trous noirs (voir la figure à page ci-contre). Ces objets d'une densité extrême courbent l'espace-temps environnant de sorte que rien ne peut s'en échapper, pas même la lumière. Ainsi, les systèmes binaires de trous noirs isolés n'émettent aucun rayonnement et ne peuvent donc être détectés que par l'émission d'ondes gravitationnelles.



LA FUSION DE DEUX TROUS NOIRS d'environ 30 masses solaires chacun a produit les ondes gravitationnelles détectées par LIGO. La simulation numérique (a) du système en coalescence montre comment ces objets déforment l'espace-temps dans leur voisinage. Le signal enregistré par les deux détecteurs de LIGO a permis d'estimer que le système était situé à près d'un milliard d'années-lumière. Sachant que l'onde se propage à la vitesse de la lumière et que le signal est arrivé à Livingston 7 millisecondes avant d'atteindre Hanford (c), les physiciens ont délimité une zone

où se trouverait la source du signal : approximativement dans la direction du Grand nuage de Magellari, visible dans le ciel de l'hémisphère Sud (b, les courbes délimitent la région d'où viendrait l'onde gravitationnelle). La similarité des signaux de Livingston et de Hanford (c, en bas) a été une preuve que les deux détecteurs avaient enregistré le même phénomène. Par ailleurs, le signal théorique d'ondes gravitationnelles émises lors de la coalescence de deux trous noirs (c) reproduit de façon satisfaisante les variations de fréquence et d'amplitude du signal mesuré.

DES LASERS POUR DETECTER LES ONDES GRAVITATIONNELLES

Dans les années 2000, une première génération d'interféromètres géants a vu le jour (*LIGO* sur deux sites aux Etats-Unis, *Virgo* en Italie, *GEO600* en Allemagne et *TAMA300* au Japon). Ces instruments

mesurent les variations de l'espace-temps. S'ils n'ont pas enregistré d'ondes gravitationnelles, ils ont servi à améliorer les techniques aujourd'hui utilisées par *Advanced LIGO* (dont le détecteur de Livingston est schématiquement représenté ci-contre), *Advanced Virgo* et d'autres projets à venir.

L'ESPACE OSCILLE

Les ondes gravitationnelles (*en vert*) déforment l'espace sur leur passage. Elles le contractent et l'étirent alternativement. Pour détecter leur passage, une solution est de mesurer les variations de la distance qui sépare deux objets, des masses-test.

QUELLE EST LA FORME DE L'ONDE GRAVITATIONNELLE ?

Les ondes gravitationnelles émises par un système binaire de trous noirs ou d'étoiles à neutrons et d'une supernova ont des formes différentes. Leurs caractéristiques dépendent des propriétés de la source, telle la masse des objets qui la composent.

Le signal obtenu en septembre 2015 par *Advanced LIGO* correspond à la coalescence de deux trous noirs. Il se compose de trois parties liées au processus de coalescence. Dans un premier temps, les corps décrivent une spirale l'un autour de l'autre en se rapprochant. La fréquence et l'amplitude du signal augmentent progressivement et l'onde devient détectable juste avant la fusion (le *chirp* en anglais). Lors de la fusion, le signal est bref, irrégulier et d'amplitude importante. Puis l'horizon du trou noir né de la fusion vibre avant de se stabiliser. Cette désexcitation s'accompagne d'un signal dont l'amplitude et la fréquence diminuent régulièrement. le *ringdown* en anglais

«Chirp»
phase finale
de rotation
en spirale

Fusion
coalescence

«Ringdown»
désexcitation
du trou noir

Miroir de fond
du bras sud
(masse-test)

LIGO
HANFORD

LIGO
LIVINGSTON

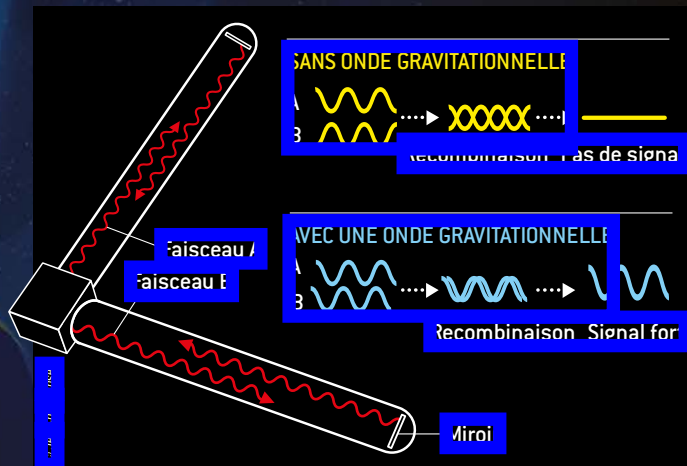
MESURER UNE VARIATION INFIME

Le passage d'une onde gravitationnelle à travers un interféromètre de *LIGO* – ici celui de Livingston – fait osciller la longueur des bras en étirant l'un et contractant l'autre, puis en inversant les effets). Les miroirs aux extrémités des bras servent de masses-test. Grâce à un laser, on mesure la variation de distance entre ces masses-test. La longueur des bras (4 kilomètres) et la centaine d'allers et retours du laser dans les bras amplifient les variations de distance. Néanmoins, celles-ci restent de l'ordre du cent millionnièmes de la taille d'un atome.

Laser

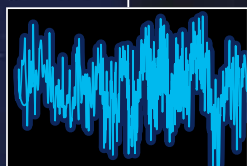
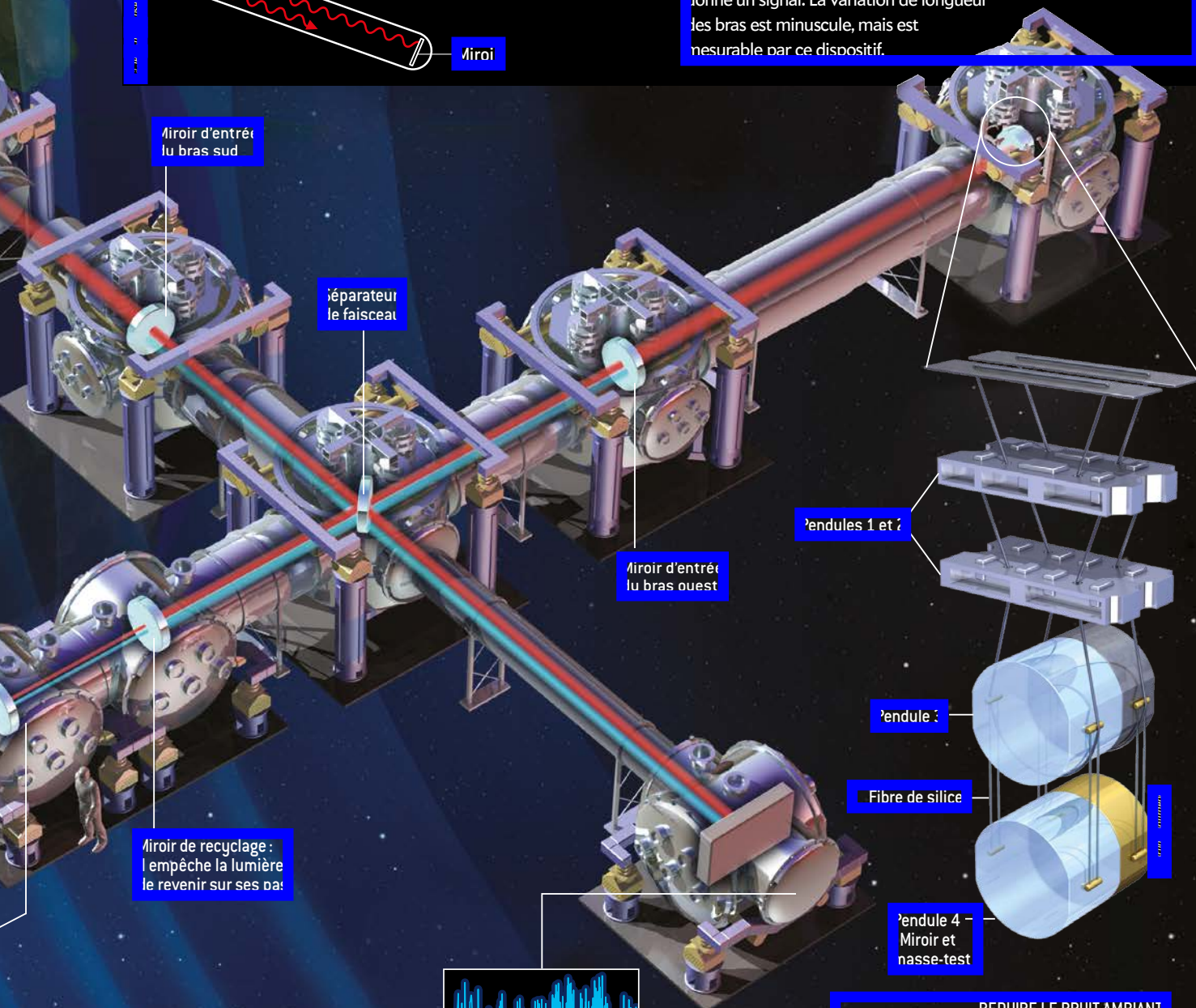
Modulateur
de fréquence :
il crée un faisceau
de référence

Résonateur :
il supprime
les instabilités
du laser



L'INTERFEROMETRIE LASER

Le principe des interféromètres, tels *LIGO* et *Virgo*, est fondé sur la superposition de deux faisceaux laser. Un rayon laser est divisé en deux (A et B, ci-contre), dont l'un est déphasé par rapport à l'autre. Ces deux faisceaux sont envoyés dans des directions perpendiculaires, dans des bras longs de plusieurs kilomètres. Lorsque les faisceaux se recombinent (en jaune), les ondes déphasées se compensent : le faisceau résultant s'éteint et la photodiode n'enregistre aucun signal. Lorsqu'une onde gravitationnelle traverse le détecteur, elle modifie la longueur relative des bras (en bleu). La recombinaison des faisceaux donne un signal. La variation de longueur des bras est minuscule, mais est mesurable par ce dispositif.



La photodiode enregistre le motif d'interférence des deux faisceaux. Les données contiennent du bruit et potentiellement un signal qu'il faut isoler.

REDUIRE LE BRUIT AMBIANT

Les interféromètres mesurent la distance avec une précision subatomique. Afin d'empêcher les phénomènes sismiques de perturber la mesure, les miroirs sont suspendus à des pendules. Dans la version *Advanced LIGO*, les miroirs sont plus gros qu'auparavant et suspendus à un quadruple pendule, au lieu d'un pendule simple. Ces miroirs oscillent, mais dans des gammes de fréquences qui n'empêchent pas la mesure de l'onde gravitationnelle provenant d'une coalescence de deux trous noirs, par exemple.



Par ailleurs, la théorie de la relativité générale décrit les propriétés de ces ondes et comment elles évoluent dans le cas d'une coalescence de deux trous noirs : en particulier, la fréquence et l'amplitude augmentent lors du rapprochement en spirale des deux corps, jusqu'à devenir détectables juste avant la fusion. Pendant la fusion, le signal est très bref, irrégulier avec une amplitude élevée. Puis, lors de la désexcitation (*ringdown* en anglais) du trou noir final – dont la surface (l'horizon) vibre avant de se stabiliser –, le signal perd en amplitude et la fréquence diminue (voir la figure pages 30 et 31).

L'analyse du signal obtenu par *Advanced LIGO* révèle certaines caractéristiques de la source de l'onde gravitationnelle. GW150914 a été produit par la fusion de deux trous noirs de 29 et 36 masses solaires. Et la coalescence a produit un trou noir de 62 masses solaires. L'énergie équivalente à trois fois la masse du Soleil s'est donc convertie en ondes gravitationnelles. Cette énergie, selon la formule d'Einstein qui relie l'énergie à la masse ($E = mc^2$), est colossale. La puissance émise au plus fort de la coalescence est comparable à dix fois la puissance

DEUX DETECTEURS Jumeaux
séparés de 3 000 kilomètres
composent l'expérience
américaine *Advanced LIGO*.
L'un est situé à Hanford, dans
l'État de Washington (*en haut*)
et l'autre est à Livingston,
en Louisiane (*en bas*).

lumineuse émise par l'ensemble des étoiles et galaxies de l'Univers observable ! Tout aussi spectaculaire, juste avant la fusion, les deux trous noirs étaient distants de quelques centaines de kilomètres et effectuaient 75 orbites par seconde (la fréquence des ondes gravitationnelles associées est de l'ordre de 150 hertz), décrites à des vitesses de l'ordre de la moitié de celle de la lumière.

Dix fois la puissance de toutes les étoiles

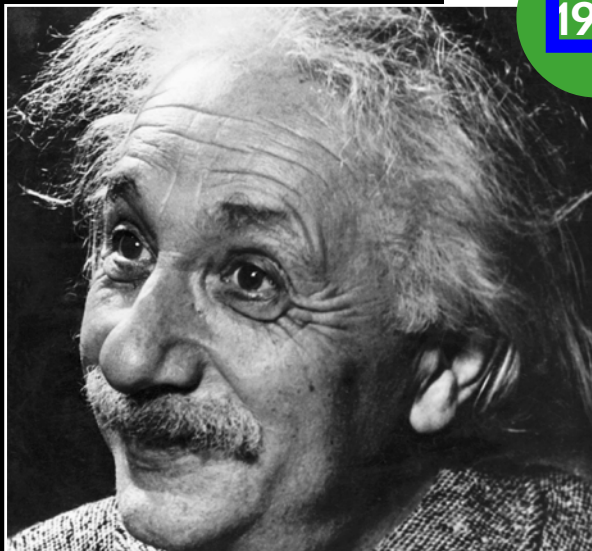
Les signaux enregistrés par les deux détecteurs d'*Advanced LIGO* livrent d'autres informations. Le système binaire était situé à environ 1,3 milliard d'années-lumière. Enfin, le retard de 7 millisecondes entre le signal enregistré à Livingston et celui capté à Hanford et la distance qui sépare les sites ont permis d'estimer, par triangulation, que la source était située dans une région de la voûte céleste de l'hémisphère sud (voir la figure b page 29).

La découverte par *LIGO* et *Virgo* d'une onde gravitationnelle démontre l'efficacité des interféromètres géants. Ces détecteurs utilisent une source laser divisée en deux faisceaux, lesquels font de multiples allers et retours dans deux tunnels perpendiculaires, longs de 3 kilomètres pour *Virgo* et de 4 kilomètres pour *LIGO* (voir la figure pages 30 et 31). À la fin de leur parcours, les faisceaux se rejoignent à l'intersection des deux tunnels, où ils interfèrent de façon destructive (voir la figure page 31). Le capteur placé en aval de ce point reçoit alors un signal nul. Lorsqu'une onde gravitationnelle traverse le dispositif, elle contracte et étire alternativement la longueur des tunnels. L'interférence entre les deux faisceaux n'annule plus exactement le signal.

Le principe physique du dispositif est simple, mais la mise en œuvre est un défi pour les chercheurs et les ingénieurs. En effet, à l'arrivée d'une onde gravitationnelle suffisamment intense pour qu'on puisse espérer la détecter, la variation de longueur des bras de l'interféromètre est de l'ordre de 100 milliardièmes de la taille d'un atome ! Les interféromètres géants sont sensibles à un changement aussi faible, mais les physiciens doivent écarter de nombreuses sources de bruit qui imitent ou couvrent le signal (les mouvements sismiques de la Terre, l'agitation thermique des atomes à la surface des miroirs placés aux extrémités des bras de l'interféromètre, etc.).

CENT ANS A LA POURSUITE DES ONDES GRAVITATIONNELLES

1916 ■ Albert Einstein émet l'hypothèse des ondes gravitationnelles dans le cadre de la théorie de la relativité générale.



1916

1957 ■ Felix Pirani montre qu'il serait possible de détecter les vibrations de l'espace-temps grâce à deux masses-test.

1966 ■ Joseph Weber entame la construction de ses « barres », une première tentative de détection d'ondes gravitationnelles.

1972 ■ Rainer Weiss améliore le concept d'interféromètre pour détecter les vibrations de l'espace-temps.

1974 ■ Joseph Taylor et Russell Hulse montrent que le pulsar binaire PSR B1513-16 perd de l'énergie en accord avec l'hypothèse d'ondes gravitationnelles.

1994 ■ Début de la construction des détecteurs Virgo et LIGO.

2015 ■ Démarrage d'Advanced LIGO et première détection d'une onde gravitationnelle.

2016 ■ Démarrage prévu d'Advanced Virgo.

BIBLIOGRAPHIE

B. P. Abbott et al., Observation of gravitational waves from a binary black hole merger, *Physical Review Letters*, vol. 116, 061102, 2016.

J. Buskulic et L. Villain, L'écoute des ondes gravitationnelles, *Pour la Science*, n° 457, novembre 2015.

P. Binétruy, A la poursuite des ondes gravitationnelles, *l'Espresso*, 2015.

P. Grandclément, Trous noirs et ondes gravitationnelles, *Dossier Pour la Science*, n° 75, avril-juin 2012.

J. Kennefick, *Traveling at the Speed of Thought : Einstein and the Quest for Gravitational Waves*, Princeton University Press, 2007.

Après une première phase d'acquisition de données dans les années 2000, les équipes de LIGO et Virgo ont entrepris d'importantes modifications techniques pour augmenter la sensibilité de leurs détecteurs (et l'améliorer d'un facteur 10 pour certaines fréquences). Advanced LIGO a redémarré en septembre 2015 et Advanced Virgo devrait être opérationnel à l'automne 2016. L'amélioration de la sensibilité des instruments se poursuivra. Ces derniers seront rejoints par KAGRA, un détecteur en cours de construction au Japon. Et le financement pour un interféromètre LIGO installé en Inde vient d'être accepté.

Un réseau de détecteurs

La mise en réseau de tous ces détecteurs ouvre d'extraordinaires perspectives pour l'astronomie et l'étude de l'Univers. Jusqu'à présent, pour étudier l'espace, les astronomes n'utilisaient que la lumière, dont ils exploitaient toutes les longueurs d'onde du spectre (des ondes radio aux rayons gamma). Les ondes gravitationnelles promettent d'explorer des phénomènes inaccessibles à la lumière. Par exemple, une étoile massive en fin de vie qui s'effondre sur elle-même produit des ondes gravitationnelles, alors que le cœur de l'étoile est opaque pour la lumière. Les ondes gravitationnelles pourraient donc fournir des informations précieuses sur ce qui se passe au cœur d'une supernova. Il y a néanmoins une incertitude sur l'intensité du signal et le nombre de supernovæ que l'on pourra détecter ainsi.

Les détecteurs au sol ont une sensibilité optimale pour des ondes gravitationnelles de fréquences comprises entre 10 et quelques milliers de hertz, ce qui est idéal pour l'étude des coalescences de systèmes binaires de trous noirs ou d'étoiles à neutrons, ou pour les supernovæ.

Cependant, d'autres sources d'ondes gravitationnelles de fréquences plus basses émises par des coalescences de trous noirs supermassifs (entre autres) échappent à ces détecteurs. Des projets d'interféromètres spatiaux, non soumis aux vibrations sismiques, pourront les étudier, tels que LISA, prévu à l'horizon de 2030, et dont un prototype LISA Pathfinder a été mis en orbite en décembre 2015. La découverte des équipes de LIGO et Virgo n'est que la toute première étape d'une nouvelle ère de l'astronomie, qui sondera les objets les plus étonnants du cosmos et même de l'Univers primordial.

« Avec les ondes gravitationnelles, nous verrons l'Univers comme nous ne l'avons jamais vu »

La détection d'ondes gravitationnelles par les deux interféromètres d'Advanced LIGO est un grand succès technique et scientifique : elle permettra d'étudier des objets cosmiques étonnants et inaccessibles aux télescopes.



Benoît MOURS est directeur de recherche au CNRS au LAPP à Annecy, et responsable scientifique français de Virgo.

Entretien avec Benoît Mours

En février 2016, les collaborations LIGO et Virgo ont annoncé la confirmation directe d'une prédiction d'Einstein.

Les ondes gravitationnelles. Leur détection marque aussi le début d'une nouvelle ère pour l'astrophysique. Grâce à elles, les chercheurs pourront étudier des objets cosmiques jusque-là invisibles. Benoît Mours, responsable scientifique français de l'expérience franco-italienne Virgo, nous éclaire sur le défi que représente la détection et les nouvelles perspectives qu'elle offre à la science.

POUR LA SCIENCE

La détection d'ondes gravitationnelles, survenue le 14 septembre 2015, était une prouesse technique. Pourquoi ?

BENOÎT MOURS : Capturer le signal extrêmement évanouissant constitué par les ondes gravitationnelles, ces vibrations de l'espace-temps prédites par la théorie de la relativité générale, était un défi technique. Il a fallu plusieurs décennies de recherche et le développement pour améliorer nos instruments.

Donnons une idée de la faiblesse du signal. Une onde gravitationnelle contracte

et dilate alternativement l'espace, c'est-à-dire les distances, sur son passage. Sur le détecteur Advanced LIGO, la variation de distance a été de l'ordre de 10^{-18} mètre, soit 100 milliardièmes de la taille d'un atome. Advanced LIGO est assez sensible pour mesurer cette infime variation, mais il faut aussi tenir compte du bruit de fond qui risque de dissimuler un tel signal.

PLS

En quoi consiste ce bruit de fond ?

B. M. : Pour comprendre le bruit de fond, il faut d'abord expliquer comment le détecteur fonctionne. Ce dispositif, un interféromètre, utilise les propriétés ondulatoires de la lumière pour mesurer les variations de longueur : un rayon laser est scindé en deux faisceaux qui effectuent une centaine d'allers-retours dans deux tunnels perpendiculaires et longs de 4 kilomètres (les bras de l'interféromètre). Lorsque les faisceaux se rejoignent à l'intersection des bras, ils interfèrent. Si aucune onde gravitationnelle n'a perturbé le détecteur, les faisceaux, déphasés, s'annulent exactement : le signal est nul. Si une onde passe, la longueur des bras varie, un signal est enregistré. Mais le capteur

enregistre aussi du bruit qui peut, s'il est trop important, noyer le signal.

Le bruit de fond a plusieurs sources. Il peut être lié aux instruments, comme les fluctuations du nombre de photons observés dues à la nature quantique de la lumière, etc. Une autre part du bruit vient de l'environnement : on parle de bruit sismique. Il fait vibrer les différents éléments de l'interféromètre. Si l'on n'y prend pas garde, il est impossible d'espérer enregistrer une variation de l'ordre de cent milliardièmes de la taille d'un atome. C'est un défi extraordinaire.

PLS

Où vient le bruit sismique ?

B. M. : Ce bruit correspond à des vibrations se propageant à la surface de la Terre. On pense tout de suite aux tremblements de terre, mais ces phénomènes sont ponctuels. Les plus problématiques pour nous – car ils sont permanents – sont d'une autre nature : les vagues des océans qui déferlent sur le rivage, le vent qui souffle sur les arbres et dont les racines transmettent ces vibrations dans le sol, les activités humaines, etc.

PLS

Comment s'en défait-on ?

B. M. : Les détecteurs sont équipés de nombreux dispositifs qui atténuent le bruit. Ces équipements ont été développés et améliorés au fil des ans, depuis la première génération d'interféromètres qui ont opéré dans les années 2000 (*TAMA300* au Japon, *GEO600* en Allemagne, les deux interféromètres de *LIGO* aux États-Unis, l'un à Hanford dans l'État de Washington et l'autre à Livingston en Louisiane, et le détecteur franco-italien *Virgo*, près de Pise). Mais aucune onde gravitationnelle n'a été détectée, car la sensibilité n'était pas suffisante. Il a donc été décidé d'interrompre les prises de données pendant plusieurs années pour améliorer *LIGO* et *Virgo*.

Advanced LIGO, opérationnel depuis septembre 2015 et *Advanced Virgo*, qui débutera à l'automne 2016, représentent la deuxième génération de détecteurs.

PLS

De quelles modifications les versions avancées de *LIGO* et *Virgo* ont-elles bénéficié ?

B. M. : Sur les deux expériences, l'infrastructure (les tunnels) est inchangée. En revanche, toute la partie optique a été améliorée. Notamment, les miroirs ont été remplacés : ils sont plus lourds et bougent ainsi moins. Leur traitement de surface est de meilleure qualité, ce qui permet de faire plus d'allers-retours dans les bras. Un miroir qui amplifie le signal a été ajouté sur *Advanced LIGO*. Il sera aussi installé sur *Advanced Virgo*, mais pas avant 2018.

La puissance du laser a été augmentée. Par ailleurs, toute une série de modifications ponctuelles ont corrigé des bruits instrumentaux. *Advanced LIGO* a aussi revu son système d'isolation du bruit sismique. Il est maintenant équivalent à celui de *Virgo*, qui était déjà très performant.

PLS

Quel a été le gain de sensibilité ?

B. M. : Les interféromètres au sol sont sensibles à une gamme de fréquences comprises entre 10 et 10 000 hertz. La sensibilité



dépend de la fréquence et est maximale à environ 100 hertz. Le gain en sensibilité est de l'ordre d'un facteur 10 en moyenne. Il est surtout important à basse fréquence, en dessous de 50 hertz.

Pour décrire plus simplement le gain en sensibilité, nous utilisons la distance moyenne (l'horizon) à laquelle le détecteur peut enregistrer la coalescence d'un système binaire d'étoiles à neutrons. Plus la sensibilité est élevée, plus on verra des binaires lointaines. Soit dit en passant, l'horizon pour des binaires de trous noirs est plus distant, car ces objets dissipent beaucoup plus d'énergie sous la forme d'ondes gravitationnelles.

Dans sa version initiale, *LIGO* avait un horizon d'environ 60 millions d'années-lumière. À terme, *Advanced LIGO* décuplera cette distance. Aujourd'hui, il n'a gagné qu'un facteur 3, en partie parce que le laser ne fonctionne pas à pleine puissance – augmenter l'énergie pose des difficultés techniques. Des phases de prise de données alterneront ainsi avec des phases d'arrêt de la machine afin de poursuivre les améliorations. On devrait atteindre le facteur 10 en 2019.

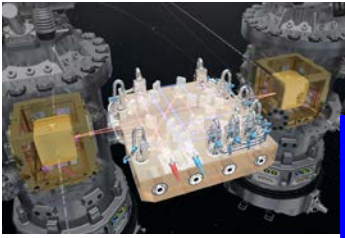
ÉCOUTER L'UNIVERS grâce aux ondes gravitationnelles est aujourd'hui possible avec des interféromètres géants, tel le détecteur franco-italien *Virgo* photographié ici, dont chacun des deux bras s'étend sur 3 kilomètres.

BIBLIOGRAPHIE

B. P. Abbott et al., Observation of gravitational waves from a binary black hole merger, *Physical Review Letters*, vol. 116, 061102, 2016.

D. Buskulic et L. Villain, L'écoute des ondes gravitationnelles, *Pour la Science*, n° 457, novembre 2015.

P. Binétruy, À la poursuite des ondes gravitationnelles, Dunod, 2015.



LISA PATHFINDER est un satellite dont l'objectif est de démontrer le bien-fondé du principe de détection des ondes gravitationnelles du futur interféromètre spatial *eLISA*. Lancé le 3 décembre 2015, le prototype a rejoint sa position prévue à 1,5 million de kilomètres de la Terre. Les tests ont commencé le 15 février. L'appareil doit montrer qu'il peut maintenir dans son enceinte deux masses en chute libre et les isoler de toute autre force que la gravité. *eLISA* utilisera trois satellites, distants de un million de kilomètres les uns des autres et contenant de telles masses, et mesurera la distance qui les sépare avec des lasers pour détecter les vibrations de l'espace-temps.

PLS

Pourquoi la détection de l'onde gravitationnelle de septembre 2015 est-elle attribuée aux équipes de *LIGO* et de *Virgo*, alors que ce dernier ne fonctionne pas encore ?

R.M. : Les équipes de *LIGO* et de *Virgo* travaillent ensemble depuis 2007. Concrètement, les prises de données de ces expériences étaient simultanées, les données mutualisées et les analyses faites en commun. Cette collaboration se poursuit avec *Advanced LIGO* et *Advanced Virgo*. *Advanced LIGO* a recueilli des données durant quatre mois en 2015, mais ce sont bien les deux équipes qui les ont analysées. La détection de septembre 2015 est donc à mettre au crédit des deux.

Advanced LIGO est actuellement dans une phase d'arrêt technique, jusqu'à l'automne prochain. Du côté d'*Advanced Virgo*, nous prévoyons encore deux mois pour installer les derniers éléments. Puis nous entamerons une phase de réglage. Les deux expériences prendront des données simultanément à l'automne.

PLS

Comment s'est déroulée la découverte du signal du 14 septembre 2015 ?

R.M. : Ce jour-là, une onde gravitationnelle a traversé la Terre et a laissé un signal dans l'interféromètre *LIGO* à Livingston puis quasiment le même, 7 millisecondes plus tard, dans l'interféromètre *LIGO* à Hanford, distant de 3 000 kilomètres.

La coïncidence d'un signal, aussi fort et net, sur les deux détecteurs nous a très vite convaincus qu'il s'agissait d'un vrai signal. Mais avant de l'annoncer, nous avons pris le temps – plusieurs mois – de vérifier qu'il n'y avait pas d'erreur et d'analyser les caractéristiques de la source qui a émis ces ondes.

PLS

Comment a-t-on déterminé la nature de cette source ?

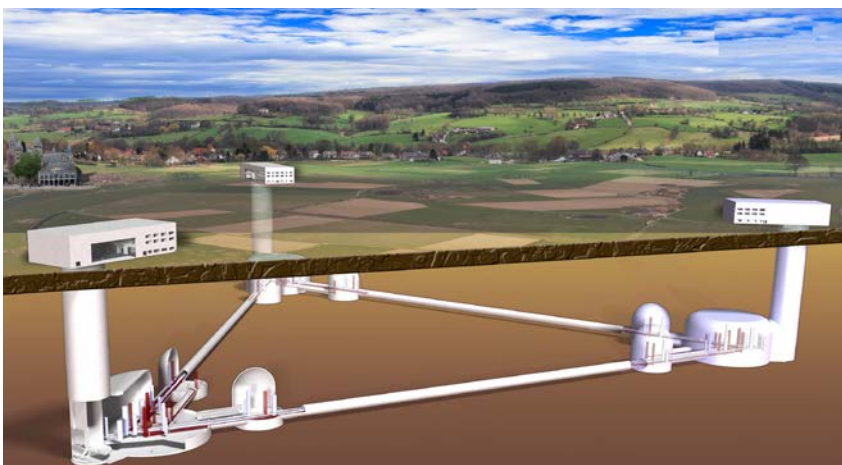
R.M. : Les objets en mouvement (plus exactement, s'ils sont accélérés), s'ils ne sont pas trop symétriques, émettent des ondes gravitationnelles. Les plus intéressants pour nous sont les systèmes binaires d'objets compacts (trous noirs, étoiles à neutrons), les supernovæ, etc. La forme du signal permet d'identifier le type d'objet. Dans le cas du signal du 14 septembre 2015, il s'agit d'un système binaire de deux trous noirs de 29 et 36 masses solaires qui ont fusionné pour donner un trou noir de 62 masses solaires. Les ondes que nous avons observées ont été émises pendant la dernière seconde de la coalescence des deux astres.

L'énergie libérée par ce système et l'intensité du signal mesuré nous ont permis d'estimer la distance à laquelle il se situe : environ un milliard d'années-lumière. Nous avons aussi délimité une zone où il se trouverait dans le ciel de l'hémisphère sud. Les estimations de la position et de la distance sont entachées d'incertitudes assez importantes, car nous n'avions que les deux détecteurs d'*Advanced LIGO*. Si *Advanced Virgo* avait été opérationnel, donc avec trois détecteurs, ces mesures auraient été plus précises, d'un facteur 10 à 100. Cela montre tout l'intérêt qu'il y a à travailler ensemble.

PLS

D'autres interféromètres sont-ils à l'étude ?

R.M. : *Advanced LIGO* et *Advanced Virgo* seront rejoints d'ici à la fin de la décennie par l'interféromètre japonais *KAGRA*, qui sera installé sous terre pour limiter le bruit sismique. Par ailleurs, un accord de principe pour le financement d'un interféromètre *LIGO* en Inde vient d'être signé. Les Américains avaient d'abord prévu de construire deux interféromètres superposés à Hanford. Ils ont fabriqué les éléments nécessaires, mais comme il était finalement plus intéressant d'installer l'interféromètre supplémentaire à



LE PROJET EINSTEIN TELESCOPE préfigure la future génération de détecteurs, au moins 10 fois plus sensibles qu'aujourd'hui. La configuration est encore à l'étude. Sur cette vue d'artiste, trois interféromètres souterrains sont disposés en triangle.

grande distance, ils ont cherché un autre site pour ce troisième détecteur. L'Inde semble prête à l'accueillir. À plus longue échéance, nous réfléchissons à une nouvelle génération d'interféromètres, tel le *Einstein Telescope*. Le concept n'est toujours pas arrêté, mais avec les techniques actuelles, nous pourrions gagner encore un ordre de grandeur sur la sensibilité et donc multiplier par 1000 le nombre de sources astrophysiques potentiellement détectables.

PLS

On dit que les ondes gravitationnelles ouvrent une nouvelle fenêtre sur l'Univers. Que vont-elles révéler ?

B. M. : L'étude des ondes gravitationnelles apportera son lot de découvertes astrophysiques. D'une part, la découverte de septembre 2015 confirme l'existence de binaires de trous noirs, des systèmes que l'on n'avait jamais observés. *A priori*, ces objets n'émettent que des ondes gravitationnelles et seuls les interféromètres sont capables de les « voir ». Mais si au moins l'un des trous noirs est remplacé par une étoile à neutrons, elle sera disloquée et la coalescence s'accompagnera de fortes émissions de photons ou de neutrinos. C'est pourquoi, lorsque les interféromètres détectent un signal, l'alerte est transmise à de nombreux télescopes ainsi qu'aux expériences de neutrinos *IceCube* et *Antares*.

La complémentarité des observations permettra de mieux connaître les phénomènes qui se déroulent dans l'Univers. Par exemple, lorsqu'une étoile massive explose, elle forme une supernova, source intense de lumière et de neutrinos. Son cœur s'effondre et laisse un objet très compact, tel qu'une étoile à neutrons ou un trou noir. Mais l'évolution du cœur de l'étoile durant l'explosion, opaque à la lumière, est mal connue. Les ondes gravitationnelles émises pendant l'effondrement pourraient fournir de précieuses informations.

Nous allons aussi pouvoir étudier les étoiles à neutrons. Celles-ci ont un champ gravitationnel si intense qu'elles sont parfaitement sphériques, mais elles pourraient malgré tout présenter des « montagnes » de quelques millimètres. Cette asymétrie serait source d'ondes gravitationnelles.

Pour en revenir aux binaires de trous noirs, ces systèmes sont invisibles avec les télescopes, et les ondes gravitationnelles sont



UNE ÉTOILE À NEUTRONS

est si dense que sa gravité lui impose une forme sphérique quasi parfaite. Si une « montagne » haute de quelques millimètres était présente à sa surface, cet astre en rotation rapide émettrait des ondes gravitationnelles détectables.

donc le seul moyen d'estimer leur nombre dans l'Univers. Par ailleurs, nous serons aussi en mesure d'analyser la composition des étoiles et de l'environnement qui ont engendré ces trous noirs. Par exemple, dans le système détecté en septembre, les trous noirs sont plutôt massifs ; les étoiles qui les ont produits ont donc perdu une quantité limitée de matière, le reste ayant formé les trous noirs. D'après les modèles théoriques, ce scénario n'est possible que si la métallicité des étoiles (la concentration en éléments lourds) était très faible.

Grâce à *Advanced LIGO* et *Advanced Virgo*, nous verrons l'Univers comme nous ne l'avons jamais vu et récolterons des données qui aideront à affiner les modèles théoriques.

PLS

D'autres objets sont des sources intéressantes d'ondes gravitationnelles. Pourra-t-on, par exemple, étudier les trous noirs supermassifs ?

B. M. : Les trous noirs supermassifs, tels ceux tapis au centre des galaxies, peuvent former des systèmes binaires, mais ils ne tournent pas au rythme d'une centaine de tours par seconde comme les binaires de trous noirs stellaires en coalescence. La fréquence des ondes gravitationnelles émises est donc beaucoup plus faible. Or les

interféromètres au sol se heurtent au bruit ambiant, trop important dans cette gamme de fréquences. Il faut donc s'éloigner de la Terre et s'installer dans l'espace. C'est l'idée du projet *eLISA* : trois satellites formeront un triangle équilatéral d'un million de kilomètres de côté. Le principe est le même que les interféromètres au sol – mesurer les distances entre les satellites –, mais les problématiques et les techniques à mettre en œuvre sont très différentes.

Un démonstrateur du principe d'*eLISA*, *LISA Pathfinder*, a été envoyé il y a quelques mois dans l'espace. Si tout va bien, le décollage d'*eLISA* est prévu pour 2034.

eLISA suivra aussi les systèmes binaires d'étoiles à neutrons ou de trous noirs qui sont encore loin de la coalescence et dont les orbites décrivent un tour par heure, par exemple. Le signal serait assez faible, mais il pourra être suivi sur une longue durée.

Pour être complet, les interféromètres ne sont pas le seul moyen d'étudier les ondes gravitationnelles. Des projets utilisent les pulsars, des étoiles à neutrons qui émettent un signal périodique extrêmement régulier. On peut donc établir un réseau de pulsars qui, lors du passage d'une onde gravitationnelle, avance ou retarde leurs signaux périodiques. Ces projets sont également à suivre de près. ■

ronos recueillis par Sean BAILL

Quand nos horloges biologiques se dérèglent

Keith Summa et Fred Turek

Les fonctions du foie, du pancréas et d'autres tissus se synchronisent avec l'horloge centrale de l'organisme grâce à l'action de certains gènes. Le dérèglement de ces horloges périphériques augmente le risque d'obésité, de diabète, de dépression...

L'effet d'un décalage horaire ne vous est probablement pas inconnu. Si vous avez voyagé en avion pendant plusieurs heures vers l'est ou vers l'ouest, vous avez déjà ressenti ce qui se produit lorsque l'horloge interne de l'organisme n'est pas en phase avec le fuseau horaire où vous vous trouvez. Il faut parfois plus d'une semaine pour se remettre du décalage horaire (*jetlag* en anglais), selon l'avance ou le retard que doit prendre l'horloge centrale, au cœur du cerveau, pour synchroniser avec la tombée de la nuit le moment où l'organisme et le cerveau ont besoin de dormir.

Ces dernières années, cependant, des biologistes ont montré que l'horloge centrale n'est pas le seul élément de notre horloge interne. Le fonctionnement de l'organisme dépend de plusieurs autres horloges localisées dans le foie, le pancréas et d'autres organes, ainsi que dans le tissu adipeux – les cellules qui stockent des graisses. Si l'une ou l'autre de ces horloges périphériques se désynchronise de l'horloge centrale, le désordre qui en résulte favorise le développement de l'obésité, du diabète, de la dépression ou d'autres troubles complexes.

L'ESSENTIEL

Dans le cerveau, une horloge centrale régule les cycles de nombreux processus biologiques.

Dans le foie, le pancréas et divers organes et tissus, d'autres horloges synchronisent le fonctionnement de ces différentes parties avec l'horloge centrale.

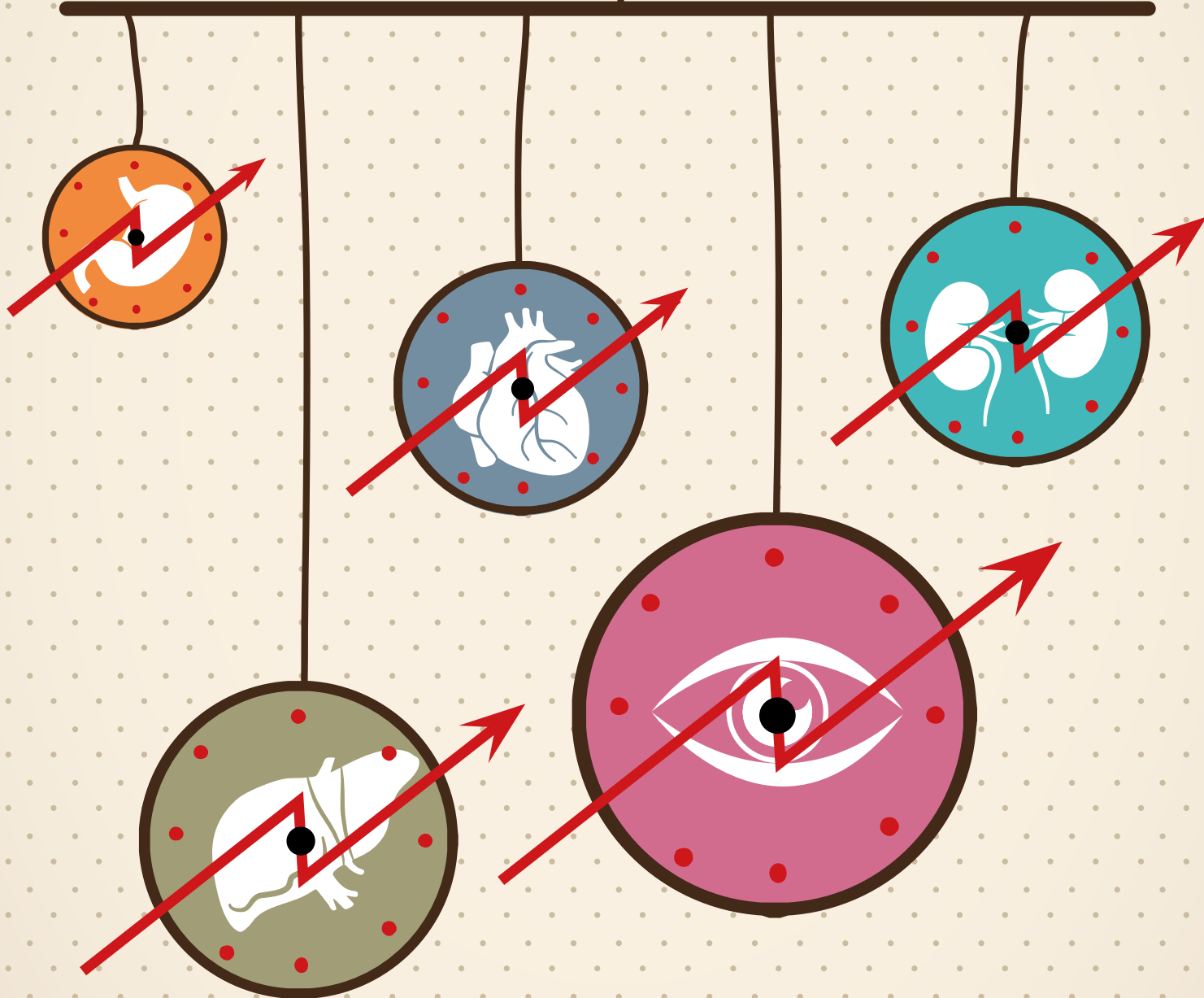
Manger ou dormir de façon répétée aux mauvais moments désynchronise ces horloges.

Ces perturbations prédisposent au développement de l'obésité, du diabète, de la dépression et d'autres maladies.

Nous nous sommes tous deux consacrés à l'exploration du mode de fonctionnement de ces horloges périphériques et à l'identification des gènes qui régulent leur activité – rassemblés sous le nom de gènes d'horloge. Le premier a été isolé chez la mouche du vinaigre en 1984. L'un de nous (Fred Turek) faisait partie de l'équipe qui, en 1997, a découvert le premier gène impliqué chez les mammifères. Depuis, des chercheurs du monde entier ont identifié des dizaines de gènes jouant un rôle dans la synchronisation de l'organisme, auxquels ils ont donné des noms évocateurs tels que *Clock* (pour horloge), *Per* (pour période) ou *Tim* (pour timeless ou intemporel).

Dans notre laboratoire, les études ont porté sur des souris, mais une étonnante variété d'organismes vivants, allant de bactéries aux mouches du vinaigre et à l'homme, présentent des gènes d'horloge. Beaucoup de ces gènes semblent similaires chez de nombreuses espèces, signe qu'ils ont été essentiels à la survie au fil de l'évolution.

L'avancée la plus importante à ce jour est la compréhension du rôle des horloges dans les troubles du métabolisme. Le métabolisme



est l'ensemble des processus par lesquels l'organisme transforme les aliments en énergie et en réserves énergétiques pour une utilisation ultérieure. Parmi les découvertes les plus étonnantes, le moment des repas s'est révélé aussi important, pour contrôler la prise de poids, que la nature des aliments consommés. Les rythmes biologiques n'expliquent bien sûr pas tous les aspects des maladies métaboliques, mais les ignorer met nos vies en danger. Des progrès rapides dans leur connaissance pourraient changer radicalement le diagnostic et le traitement de ces maladies, et améliorer la capacité de chacun à préserver sa santé.

Même les cyanobactéries

Des organismes les plus complexes aux plus simples, toute vie sur Terre est gouvernée par des rythmes circadiens, correspondant à la journée de 24 heures. Des rythmes circadiens existent même chez les formes de vie les plus primitives : les cyanobactéries, des algues unicellulaires bleu-vert, aujourd'hui largement répandues dans divers habitats. Ces organismes tirent leur énergie du Soleil, par photosynthèse, en utilisant la lumière pour produire des molécules organiques et de l'oxygène à partir de dioxyde de carbone et d'eau.

Dans chaque cyanobactérie, une horloge interne commande la mise en route de la machinerie photosynthétique avant le lever du soleil. Les cyanobactéries récoltent ainsi de l'énergie dès que la lumière paraît, ce qui leur confère un avantage par rapport aux organismes cellulaires réagissant simplement à la lumière. De même, l'horloge des cyanobactéries déclenche l'arrêt de la photosynthèse lorsque le soleil se couche. Les ressources énergétiques sont ainsi réorientées vers les réactions plus adaptées à la nuit, telles que la réplication et la réparation de l'ADN (de jour, ces processus ont plus de risque d'être perturbés à cause du pouvoir ionisant des rayons solaires), tandis que d'autres fonctions se mettent en sommeil.

Chez les cyanobactéries, la période de l'horloge interne est inscrite dans les gènes d'horloge. En mutant certains de ces gènes, les biologistes ont montré que, dans les

LES AUTEURS



Keith C. SUMMA effectue une thèse de doctorat en médecine à la faculté de médecine Feinberg de l'université Northwestern, aux États-Unis.



Fred W. TUREK dirige le Centre du sommeil et de biologie circadienne à l'université Northwestern.

ouches bactériennes obtenues, les cycles habituels d'activation et d'inactivation des gènes, de 24 heures, se muèrent parfois en périodes ou « durées d'horloge » de 20, 22 ou même 30 heures. Et, en 1998, Carl Johnson et ses collègues de l'université Vanderbilt, aux États-Unis, ont mis en évidence l'importance de l'adéquation entre ces cycles et celui de la lumière environnante.

En regroupant les cellules en fonction de la durée de leur cycle, ils ont observé que les cyanobactéries dont la durée d'horloge correspondait au cycle de la lumière étaient plus performantes que les autres. Par exemple, au cours d'un cycle jour-nuit de 24 heures, les cyanobactéries normales se développaient plus vite et se divisaient avec plus de succès que des mutants ayant une durée d'horloge de 22 heures. Cependant, lorsque l'équipe de Carl Johnson fixait artificiellement le cycle jour-nuit à 22 heures, ces mêmes mutants survivaient mieux que les bactéries normales. Ces expériences ont montré, pour la première fois, qu'une bonne coordination des rythmes métaboliques internes et des cycles de l'environnement augmente les chances de survie.

Des horloges dans les cellules

Bien que l'horloge interne humaine dépende de gènes différents de ceux des cyanobactéries, notre machinerie circadienne présente de nombreuses similitudes avec celle de ces bactéries. Cela suggère que les deux processus sont apparus séparément au fil de l'évolution et ont répondu aux mêmes besoins et fonctions biologiques.

Les chercheurs ont d'abord supposé qu'une seule horloge agissait comme un métronome et régulait une multitude de processus biologiques dans l'ensemble de l'organisme. Dans les années 1970, ils localisaient cette horloge hypothétique dans les noyaux suprachiasmatiques du cerveau, juste au-dessus du chiasma optique, la région où les deux nerfs optiques se croisent. Toutefois, il y a environ quinze ans, on a commencé à trouver des signes de l'existence de mécanismes secondaires dans d'autres organes ou tissus, et même dans des cellules individuelles. Des biologistes ont ensuite montré que les gènes d'horloge actifs dans le cerveau étaient aussi

Notre machinerie circadienne présente de nombreuses similitudes avec celle des cyanobactéries

UNE MULTITUDE D'HORLOGES CELLULAIRES

La vie sur Terre est soumise aux rythmes d'une journée de 24 heures. Chez l'homme, une horloge centrale située dans le cerveau synchronise des horloges secondaires localisées dans différentes cellules de l'organisme. En particulier, certains gènes commandent, à différents moments de la journée, la production de protéines qui ralentissent ou inhibent des processus biologiques. Des problèmes de santé peuvent survenir si ces horloges sont désynchronisées.

Cerveau

Un groupe de cellules nerveuses, les noyaux suprachiasmatiques, constitue l'horloge centrale. Synchronisé par divers signaux issus de l'environnement, notamment la lumière, il contrôle les horloges secondaires, lesquelles lui envoient des signaux en retour.

Cœur

Les gènes d'horloge signalent au cœur avant l'aube qu'il doit se préparer aux exigences de l'état d'éveil. Ce rappel quotidien est peut-être l'une des raisons pour lesquelles tant de crises cardiaques surviennent tôt le matin.

Foie

Une horloge périphérique donnée peut réguler plus d'un processus. C'est le cas de l'horloge du foie, qui orchestre à la fois la production de molécules de sucre (glucose) et celle d'acides gras, ainsi que leur libération dans le sang.

Tissu adipeux

La perturbation du fonctionnement normal des gènes d'horloge dans les couches adipeuses de l'organisme peut entraîner la libération d'acides gras au « mauvais » moment de la journée.

Pancréas

Les effets des horloges de différents tissus s'équilibrent parfois. Ainsi, l'insuline sécrétée sous le contrôle de l'horloge du pancréas module la quantité de glucose produit sous le contrôle de l'horloge du foie et à partir des aliments ingérés.

Reins

La rétention et la libération de substances telles que le sodium, le potassium et les ions chlorures (qui aident à réguler la pression artérielle) sont contrôlées par des gènes d'horloge s'exprimant dans les reins.

Quand manger ?

En obligeant des souris à ne se nourrir que durant leur phase de repos (le jour), diverses équipes ont observé dans les années 2000 que ce changement de comportement alimentaire perturbait leur métabolisme, entraînant notamment l'expression aberrante de gènes d'horloges périphériques.

L'horloge centrale, en revanche, n'était pas affectée. Résultat : les horloges périphériques se sont désynchronisées de l'horloge centrale. Les souris ont développé des maladies telles que l'obésité, le diabète ou un syndrome métabolique – des pathologies que l'on retrouve chez les travailleurs postés. D'où l'importance de se nourrir pendant sa phase d'activité...

périodiquement activés et désactivés dans les cellules du foie, des reins, du pancréas, du cœur et d'autres tissus. Ces horloges cellulaires, nous le savons désormais, régulent l'activité de 3 à 10 % – voire 50 % dans certains cas – des gènes dans divers tissus.

À la même époque, plusieurs scientifiques se sont demandé si les rythmes circadiens jouaient un rôle dans le vieillissement. Fred Turek a demandé à Amy Easton, alors doctorante à l'université Northwestern, près de Chicago, de réaliser quelques expériences sur des souris porteuses de mutations sur le gène *Clock*, impliqué dans la régulation des rythmes circadiens. En observant le comportement quotidien de souris âgées, elle s'est aperçue que celles-ci avaient tendance à être grasses et à avoir des difficultés à grimper dans la roue d'exercice de leur cage. Cela nous a incités à nous intéresser aux relations entre métabolisme et rythmes circadiens. En 2005, dans une série de tests, nous avons ainsi mis en évidence un lien entre des altérations du gène *Clock*, d'une part, et le développement de l'obésité et du syndrome métabolique, d'autre part.

Le syndrome métabolique est un ensemble d'anomalies physiologiques qui entraînent une augmentation du risque de maladie cardiovasculaire et de diabète. Pour poser un diagnostic de syndrome métabolique chez une personne, cette dernière doit souffrir d'au moins trois des troubles suivants : un excès de graisse dans la région abdominale et non au niveau des hanches, une concentration élevée de triglycérides

par rapport au jour solaire. Des études antérieures avaient montré qu'ils ont un risque accru de développer, entre autres, des maladies métaboliques, cardiovasculaires et gastro-intestinales. Toutefois, les travailleurs postés présentent souvent d'autres comportements maladiques, tels qu'un manque de sommeil, une mauvaise alimentation et un manque d'exercice, et les médecins avaient du mal à distinguer les causes des effets. En apportant une preuve génétique du lien entre horloge interne et santé métabolique, les souris à gène *Clock* muté ont propulsé l'étude des rythmes circadiens, alors surtout épidémiologique, à l'échelle moléculaire.

Une horloge du glucose dans le foie

Peu après la mise en évidence de l'implication des rythmes circadiens dans la régulation du métabolisme, les biologistes se sont intéressés à l'horloge périphérique découverte dans le foie, qui joue un rôle essentiel dans le métabolisme.

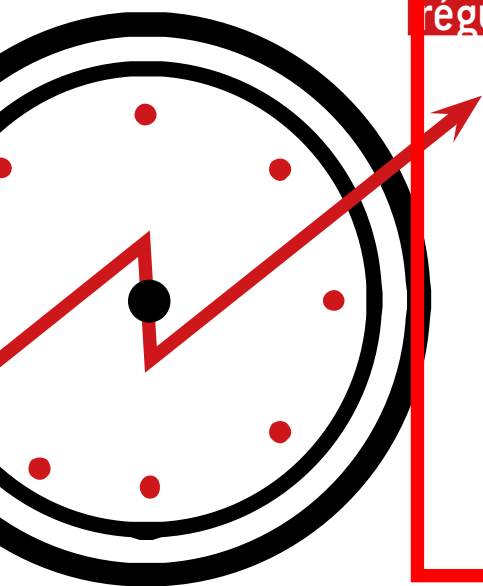
En 2008, à la faculté de médecine de l'université Harvard, Katja Lamia, Kai-Florian Storch et Charles Weitz ont mené des expériences chez des souris dont un gène clé de l'horloge circadienne avait été supprimé dans les cellules hépatiques. Contrairement aux humains, les souris sont surtout actives la nuit et dorment le jour, mais le cycle veille-sommeil est régulé de façon similaire. Par construction, le foie de ces souris était dépourvu d'horloge, alors que leurs autres horloges périphériques fonctionnaient normalement. Pendant leur période de repos diurne (quand les souris ne mangent pas beaucoup), elles ont eu de longues crises d'hypoglycémie (faible concentration de sucre dans le sang). Ces chutes de la glycémie sont dangereuses, car le cerveau peut cesser de fonctionner en quelques minutes s'il ne reçoit pas assez de glucose.

D'autres expériences ont montré que ces crises survenaient parce que les rythmes qui contrôlent habituellement le moment où le foie produit et sécrète du sucre dans le sang avaient disparu. L'horloge du foie contribue donc au maintien d'une concentration normale de glucose dans le sang tout au long de la journée, assurant une source d'énergie constante et adéquate pour le fonctionnement continu du cerveau et du reste de l'organisme.

Les horloges des cellules régulent l'activité de 3 à 10 % (voire 50 %) des gènes dans divers tissus

dans le sang, une faible concentration de HDL (lipoprotéines de haute densité, les complexes qui transportent le cholestérol dans le sang, surnommés le « bon cholestérol »), une pression artérielle élevée et de fortes concentrations de glucose dans le sang (indiquant une difficulté à transformer le sucre).

Ces travaux ont suscité un fort intérêt pour les effets des rythmes circadiens sur le métabolisme, en particulier chez les ouvriers effectuant un travail posté. Avec leurs horaires de travail décalés, leur horloge interne est en permanence désynchronisée



Horloges biologiques et cancer

Dans le traitement du cancer, le moment où l'on donne les médicaments semble jouer un rôle clé dans leur tolérance et leur efficacité. Chez la souris.

en fonction de l'heure d'administration.

Cette découverte, Francis Lévi et son équipe de l'hôpital Paul Brousse de Villejuif l'ont faite en 2009. Mais l'oncologue, aujourd'hui entre Villejuif et l'université de Warwick, au Royaume-Uni, étudie depuis plus de vingt ans le potentiel de la chronothérapie – l'administration des médicaments à certains moments du rythme circadien – dans le traitement du cancer.

Depuis les années 1960, on sait que l'horloge circadienne des cellules cancéreuses tend à se désynchroniser de celle des cellules saines, et Francis Lévi et ses collègues creusent cette idée. Entre 1994 et 2006, ils ont ainsi conduit trois essais afin d'établir l'effet, chez des patients atteints d'un cancer colorectal métastatique, de l'administration à une heure optimisée de deux médicaments, le fluorouracile et l'oxaliplatine, par rapport à une administration classique. La toxicité des médicaments a considérablement diminué, et la survie des hommes s'est améliorée, mais pas celle des femmes.

Ces résultats étaient encourageants, mais les effets de la chronothérapie sur les gènes d'horloge restaient inconnus. Surtout, une question demeurait : le dérèglement des rythmes circadiens des cellules cancéreuses était-il une cause ou un effet du cancer ? Depuis une dizaine d'années, cependant, un nombre croissant d'études suggèrent que le dérèglement de l'horloge circadienne contribuerait au développement de cancers et à leur progression.

D'une part, plusieurs gènes d'horloge modulent des fonctions cellulaires jouant un rôle important dans la régulation de

la prolifération des cellules et de leur mort programmée, telles que le métabolisme cellulaire, la réparation de l'ADN, le vieillissement, la signalisation extracellulaire... Si l'horloge circadienne se dérègle, l'expression de ces gènes est perturbée et la prolifération n'est plus régulée correctement – une caractéristique des cellules tumorales.

D'autre part, diverses études épidémiologiques ont montré que les travailleurs postés (en rotation) ont un risque accru de développer des cancers, en particulier du sein et de la prostate. L'exposition à la lumière pendant la nuit perturbe le fonctionnement de l'horloge centrale, ce qui modifie des processus en aval impliqués dans le développement de cancers, tels que l'activité de gènes d'horloge et la production de mélatonine, une hormone jouant un rôle essentiel dans la synchronisation de l'horloge circadienne.

La mélatonine n'est sécrétée que la nuit, en l'absence de lumière. Chez les travailleurs de nuit, sa production nocturne diminue. Or chez des rats à qui l'on injecte un agent cancérigène, la mélatonine peut empêcher la transformation cancéreuse en neutralisant les dommages causés. À l'inverse, chez des rats à qui l'on a greffé des cellules humaines de cancer du sein, une exposition constante à la lumière dérègle la production de mélatonine, et les tumeurs grossissent plus que chez des rats ayant gardé le rythme jour-nuit.

D'autres études montrent que l'expression et l'activité de plusieurs gènes d'horloge sont perturbées dans de nombreuses

tumeurs. Pour certains chercheurs, tel Benedetto Grimaldi, à Milan, ces perturbations favoriseraient la survie des cellules cancéreuses, et stopper leur horloge à l'aide de molécules spécifiques de ces cellules les fragiliserait.

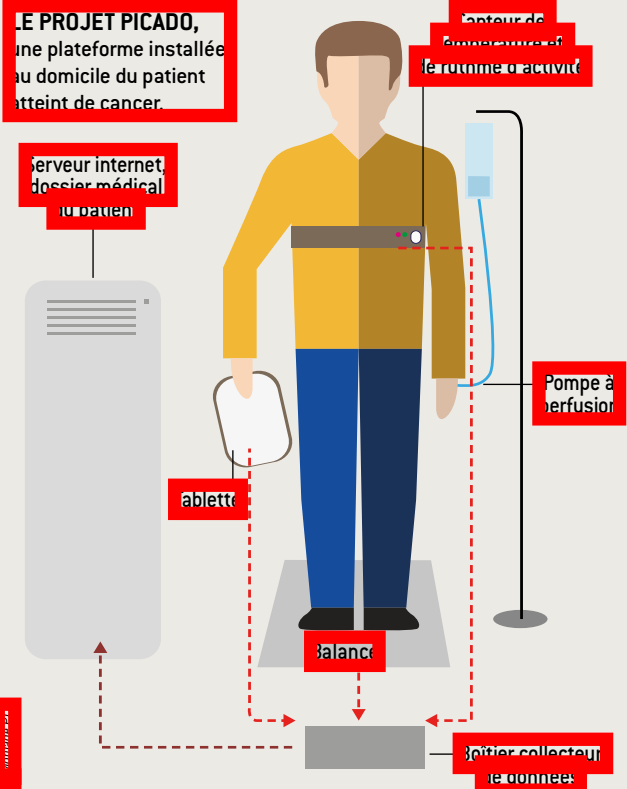
Les études renforcent l'idée que la chronothérapie peut améliorer les traitements anticancéreux actuels. Francis Lévi est ainsi peu à peu rejoint dans la démarche par d'autres, telle Marina Antoch, de l'institut du cancer Roswell Park de Buffalo, aux États-Unis, qui cherche un moyen de réinitialiser l'horloge des cellules tumorales afin de faciliter l'administration des médicaments, ou Yosef Yarden, de l'institut Weizmann en Israël, qui optimise les thérapies ciblées contre les récepteurs d'un facteur de croissance (EGF) impliqués dans la prolifération cancéreuse.

Francis Lévi et ses collègues poursuivent plus que jamais

leurs recherches. En 2013, ils ont conçu et validé chez des rongeurs un modèle mathématique permettant de prévoir l'heure de tolérance optimale d'un médicament utilisé dans le traitement du cancer du côlon et du pancréas, l'irinotécane, à partir de la mesure du rythme d'expression de deux gènes de l'horloge du foie. Ils travaillent aussi sur une plateforme à domicile permettant de mesurer les paramètres physiologiques d'un patient au cours du temps, afin d'adapter au mieux la chronothérapie à chacun (voir la figure). Et en 2016 débute un nouvel essai clinique qui étudiera les rythmes circadiens et les symptômes de patients atteints d'un cancer et recevant une chronothérapie à domicile. Ces recherches centrées sur les horloges biologiques des patients dans leur environnement rencontrent un écho croissant parmi les médecins.

Marie-Neige Cordonnier

LE PROJET PICADO, une plateforme installée au domicile du patient atteint de cancer.



Le foie n'est pas seul à réguler la glycémie au fil de la journée. Un système de contre-régulation empêche, à l'inverse, une augmentation excessive du glucose sanguin en réaction à la prise de nourriture. La principale hormone responsable de cette régulation est l'insuline, produite par les cellules dites bêta, localisées dans le pancréas. Après un repas, du glucose passe dans le sang, ce qui déclenche la sécrétion d'insuline. En retour, cette hormone freine l'augmentation de la glycémie en favorisant l'élimination du glucose du sang et son stockage dans les muscles, le foie et d'autres tissus.

Billie Marcheiva et Joseph Bass (un membre originel, avec Fred Turek, de l'équipe de l'université Northwestern) ont mené une série d'études à partir de 2010 pour déterminer le rôle de l'horloge biologique du pancréas. Ils ont découvert que cette horloge est cruciale pour maintenir la glycémie et que sa perturbation compromet gravement la fonction du pancréas, ce qui

entraîne le développement d'un diabète. Le diabète est un trouble métabolique dans lequel l'organisme ne produit pas suffisamment d'insuline ou y est insensible. En excès, le sucre finit par être rejeté des cellules dans le sang.

Billie Marcheiva et Joseph Bass ont commencé par étudier du tissu pancréatique prélevé sur des souris portant des mutations sur des gènes d'horloge. Ils ont constaté que la quantité d'insuline sécrétée en réponse à une stimulation par le glucose était considérablement réduite. Ils ont ensuite produit des souris chez lesquelles l'horloge était supprimée uniquement dans le pancréas. Les animaux ont développé un diabète très tôt au cours de leur vie et leur pancréas sécrétait beaucoup moins d'insuline que celui des souris normales.

Ainsi, les horloges jouent parfois des rôles extrêmement différents d'un tissu à l'autre. Dans le cas du foie et du pancréas, par exemple, elles régulent même des processus physiologiques opposés. Cependant,

intégrées dans un système fonctionnel, ces horloges tissulaires synchronisent avec précision leurs actions, maintenant ainsi l'équilibre de l'organisme, ou son homéostasie. En d'autres termes, elles assurent la stabilité des concentrations de molécules clés face aux conditions changeantes de l'environnement. L'horloge centrale, elle, est en quelque sorte le chef d'orchestre qui maintient les tissus périphériques (les instruments) synchronisés les uns par rapport aux autres et par rapport à l'environnement, optimisant ainsi le fonctionnement du système.

Les découvertes ne se sont pas arrêtées là. On s'est aussi aperçu que l'horloge d'un tissu donné régule plus d'un processus dans ce tissu. L'horloge du foie, par exemple, était connue pour orchestrer des réseaux entiers de gènes nécessaires à la production et au métabolisme du glucose. En 2011, Mitch Lazar, de l'université de Pennsylvanie, et ses collègues ont montré qu'elle détermine aussi la quantité de graisse qui s'accumule dans les cellules hépatiques.

Troubles des rythmes et maladies neurodégénératives : effet et cause ?

Des maladies neurodégénératives – notamment les maladies d'Alzheimer, de Parkinson et de Huntington – ont des effets délétères sur les cycles veille-sommeil et ces effets contribuent à l'évolution de ces maladies.

Les troubles des rythmes veille-sommeil apparaissent parfois bien avant les symptômes plus classiques, principalement cognitifs (Alzheimer) ou moteurs (Parkinson et Huntington) des maladies. Ces troubles pourraient engendrer un cercle vicieux si, comme le suggèrent de nombreux indices, des perturbations de l'horloge centrale aggravent sinon déclenchent certaines formes de neurodégénérescence.

Pour l'instant, les plus convaincants proviennent de modèles animaux. Chez diverses espèces, on a montré que l'horloge contrôle les mécanismes de résistance au stress oxydatif. Ce stress oxydatif est un paramètre majeur du vieillissement, en particulier cérébral.

Chez la mouche drosophile, par exemple, une mutation qui la rend arythmique diminue la résistance au stress oxydatif et accélère la neurodégénérescence.

Par ailleurs, chez des souris exprimant un gène humain impliqué dans la maladie de Huntington, le renforcement pharmacologique des rythmes veille-sommeil permet de freiner, voire d'inverser le déclin cognitif.

Une fonction du sommeil serait d'accélérer le flux du liquide céphalorachidien, et de contribuer ainsi à « rincer » le cerveau. Grâce à ce flux, pendant le sommeil, le peptide β -amyloïde, impliqué dans la maladie d'Alzheimer, est éliminé du cerveau de souris transgéniques qui le produisent.

La maladie de Parkinson

Elle implique la disparition progressive de neurones qui utilisent un neurotransmetteur particulier, la dopamine. Les symptômes, compris moteurs, présentent des fluctuations journalières. Elles pourraient refléter le rôle important que joue la dopamine dans le système circadien, notamment dans le contrôle de l'éveil. La dopamine intervient dans le fonctionnement de la rétine, et donc potentiellement dans la synchronisation de l'horloge centrale par la lumière. Par ce biais, son absence contribuerait donc aussi aux interactions entre rythmes et maladie de Parkinson. La L-DOPA, précurseur de la dopamine utilisé pour traiter cette maladie, aggrave d'ailleurs parfois les perturbations des rythmes circadiens.

Ainsi, même s'il est difficile de prouver avec certitude que les perturbations des rythmes aggravent les pathologies neurodégénératives humaines, elles apparaissent de plus en plus

comme une dimension majeure de ces pathologies, encore trop peu étudiée. Une piste thérapeutique des plus prometteuses est la lumino- ou photothérapie. On expose les patients à un environnement dont la luminosité se rapproche de celle d'une journée ensoleillée, afin de renforcer leurs rythmes. Il faudrait cependant des études de grande ampleur pour évaluer son efficacité et, surtout, en préciser les indications et modalités optimales (heures, intensité, voire composition spectrale) selon les pathologies concernées.

La prise de nourriture à heures fixes est aussi un facteur de renforcement des rythmes circadiens, bien établi chez l'animal. Elle est déjà pratiquée dans les institutions de santé humaine et d'autres collectivités, pour des raisons non thérapeutiques. Mais à aussi, il reste à en déterminer les horaires optimaux.

– André Klarsfeld
Laboratoire Plasticité du cerveau,
ESPCI ParisTech/CNRS

Chez la souris, ils ont mis en évidence qu'un gène d'horloge nommé *Rev-erba* agit comme un minuteur pour une enzyme qui contrôle l'accès aux instructions génétiques contenues dans la molécule d'ADN. L'enzyme cible, l'histone désacétylase 3 (HDAC3), modifie la façon dont la double hélice d'ADN s'enroule sur elle-même. Ce faisant, elle module l'accès des molécules chargées de transcrire les gènes. Mitchell Lazar et son équipe ont montré que le blocage du gène d'horloge *Rev-erba* et l'inactivation de l'enzyme HDAC3 qui en résulte conduisent au développement d'une maladie nommée stéatose hépatique, ou dégénérescence graisseuse du foie.

Stocker de l'énergie au bon moment

Une fonction de l'enzyme HDAC3 est d'empêcher, pendant la nuit (lorsque les souris sont actives et utilisent leurs réserves de graisse pour produire de l'énergie), l'expression de plusieurs gènes impliqués dans la production d'acides gras. La neutralisation du gène d'horloge empêche le recrutement de l'enzyme HDAC3 sur le génome. L'enzyme ne peut donc plus moduler l'expression des gènes responsables de la synthèse de graisses dans le foie, et celle-ci a lieu de jour comme de nuit. Cette hyperactivité entraîne une accumulation anormale de graisse dans les cellules du foie, un processus qui perturbe la fonction hépatique et accompagne souvent l'obésité et le diabète.

Des gènes d'horloge fonctionnent aussi dans le tissu adipeux, d'où ils modulent de nombreux processus métaboliques. Outre sa fonction de stockage d'énergie sous forme de graisse, ce tissu sécrète dans le sang diverses molécules – une hormone, la leptine, et un type d'acides gras (des acides gras insaturés à longue chaîne) –, qui informent le système nerveux central sur la quantité d'énergie stockée. En arrivant dans le système nerveux central, la leptine déclenche une augmentation des dépenses énergétiques et une sensation de satiété. Les acides gras, quant à eux, entraînent une réponse neuronale qui inhibe la prise de nourriture.

En 2012, Georgios Paschos et Garret FitzGerald, alors tous deux à l'université de Pennsylvanie, et leurs collègues ont montré que l'horloge du tissu adipeux contrôle la libération des acides gras insaturés dans le sang au cours du temps (mais pas celle de la leptine).

Les biologistes ont créé par génie génétique des souris dont les cellules du tissu adipeux – les adipocytes – étaient dépourvues d'horloge. Les acides gras insaturés ont circulé dans le sang au « mauvais » moment de la journée, perturbant la capacité du cerveau de réguler l'heure des repas et la quantité de nourriture avalée. Les souris ont décalé

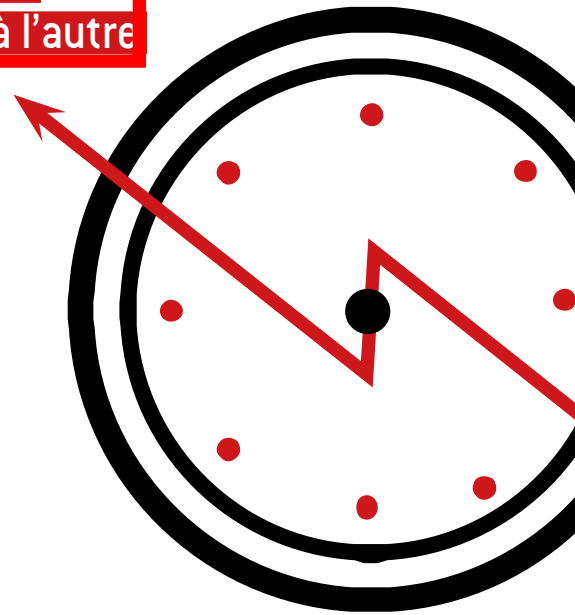
Les horloges jouent parfois des rôles extrêmement différents d'un tissu à l'autre

leurs prises de nourriture vers le jour et sont devenues obèses. Ce changement de comportement alimentaire semble spécifique des animaux dont le tissu adipeux est dépourvu d'horloge, car il ne se produit pas chez des souris dont les horloges pancréatique ou hépatique ont été supprimées.

Ces observations corroborent des études antérieures qui avaient montré que le moment de la prise de nourriture a un effet sur l'efficacité du stockage de l'énergie dans l'organisme et de son utilisation. De fait, en 2009, Deanna Arble, alors étudiante de troisième cycle travaillant avec nous à l'université Northwestern, a rapporté que des souris n'ayant accès à un régime riche en graisses qu'au « mauvais » moment de la journée (pendant le jour) prenaient plus de poids que celles soumises au même régime alimentaire, mais seulement pendant la nuit. Ces différences de poids persistaient malgré un apport calorique et une activité physique similaires dans chaque groupe.

Plus récemment, Satchidananda Panda et son équipe à l'institut Salk d'études biologiques à La Jolla, en Californie, ont précisé ces résultats en délimitant le « bon » moment pour que les souris mangent des aliments riches en graisse. Les biologistes ont montré qu'en n'autorisant les repas riches en graisses que sur une fenêtre de huit heures durant la période normale d'alimentation (la nuit), ils protégeaient les souris contre l'obésité et les troubles métaboliques, sans pour autant réduire leur apport calorique. Les souris présentaient des profils de santé métabolique similaires à ceux de souris qui ne consommaient que des aliments pauvres en graisses. Le bénéfice semble résulter d'une meilleure coordination des cycles métaboliques du foie et d'autres tissus.

Ces expériences aideront peut-être à mieux comprendre le syndrome



SUR LE WEB

**Chronobiologie, les 24 heures
du chrono de l'organisme**
Un dossier complet de l'Inserm
réalisé avec Claude Gronfier,
neurobiologiste à l'institut
Cellule souche et cerveau,
Inserm U846, Lyon.
<http://bit.ly/1QsqDXc>

l'alimentation nocturne – un trouble caractérisé par une consommation de calories en surabondance pendant la nuit, conduisant à l'obésité, à un syndrome métabolique ou à une combinaison des deux pathologies. Cette maladie pourrait être due en partie à un défaut de régulation du rythme circadien de la faim. L'asynchronisme prédisposerait les patients à la prise de poids et à une mauvaise régulation de leurs processus métaboliques.

Récemment, une étude de Marta Garaulet, de l'université de Murcie, en Espagne, et Frank Scheer, de l'université Harvard, menée chez des personnes suivant un régime, a indiqué un lien entre le moment du déjeuner et la perte de poids. Les sujets qui prenaient le déjeuner plus tôt perdaient davantage de poids durant le régime que ceux qui mangeaient plus tard. Des recherches cliniques complémentaires sont nécessaires pour déterminer si les heures des repas influent sur le développement de l'obésité, du diabète et des maladies associées, mais ces résultats suggèrent que des stratégies alimentaires circadiennes servent peut-être un jour de compléments non pharmacologiques, entièrement nouveaux, à des régimes thérapeutiques standards.

Vers une médecine circadienne

D'autres travaux menés chez l'homme suggèrent que l'étude détaillée des rythmes circadiens des personnes aidera à mieux comprendre leurs troubles métaboliques et à leur donner des traitements plus appropriés. Par exemple, en étudiant les rythmes de sommeil de milliers de personnes dans le monde, Till Roenneberg et ses collègues de l'université Ludwig Maximilian de Munich ont décrit une forme courante de perturbation circadienne chronique, qu'ils ont nommée « décalage horaire social ».

Entre la semaine de travail (ou d'école) et le week-end, les cycles de sommeil varient parfois de plusieurs heures et, ainsi, chaque semaine, la perturbation de l'horloge interne équivaut à un décalage horaire, parfois de plusieurs heures. Une personne qui se lève à 6 heures en semaine et dort jusqu'à 9 ou 10 heures le week-end soumet son horloge interne à l'équivalent d'une traversée de trois

La perturbation des rythmes de sommeil

serait chez certains un facteur de dépression sévère et pas seulement une conséquence

ou quatre fuseaux horaires. Les chercheurs ont mis en évidence un lien entre l'ampleur du décalage horaire social et l'indice de masse corporelle, une grandeur calculée en fonction de la taille et de la masse et utilisée pour estimer la corpulence. Ce lien suggère que la perturbation des rythmes circadiens contribue à la prise de poids.

Les rythmes circadiens ont aussi été récemment associés à de nombreuses autres maladies.

Diverses équipes ont établi des liens entre perturbation circadienne et des pathologies du cœur et de l'estomac, mais aussi divers cancers, des maladies neurologiques et neurodégénératives et des troubles psychiatriques, entre autres. Plusieurs études suggèrent que, dans certains cas, la perturbation des rythmes de sommeil serait un facteur de dépression sévère, et non pas seulement une conséquence, chez des personnes déjà sujettes à la maladie.

De même, des expériences réalisées chez des souris et des hamsters au cours des cinq dernières années ont montré que les maladies ressemblant à un décalage horaire chronique gênent l'apprentissage et la mémoire et perturbent les structures neuronales dans certaines régions du cerveau.

Nous sommes à l'aube d'une nouvelle médecine – la médecine circadienne – qui pourrait révolutionner les approches actuelles. L'idée est de prendre en compte les connaissances sur le fonctionnement optimal des horloges internes, par exemple sur le meilleur moment de la journée pour activer ou désactiver la production de glucose, dans l'établissement des diagnostics et des traitements. Et il y a fort à parier que les médecins qui intégreront le plus efficacement les informations sur les rythmes circadiens et les rythmes de sommeil à leurs diagnostics et traitements seront les plus à même d'améliorer la santé, de prévenir les maladies et de maximiser les bénéfices des thérapies.

Le décalage horaire des cellules existe et peut causer des dégâts bien plus graves que les troubles passagers du voyageur occasionnel. Alors, tout comme vous vous prévoyez un petit temps d'adaptation après un voyage, n'oubliez pas de ménager vos horloges de vos organes, à défaut de pouvoir les remettre à l'heure...

BIBLIOGRAPHIE

J. Grontier (entretien), « L'hygiène lumineuse est essentielle, au même titre que l'hygiène alimentaire », *Pour la Science*, n° 450, pp. 16-18, avril 2015.

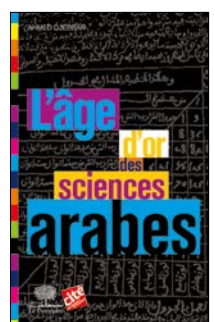
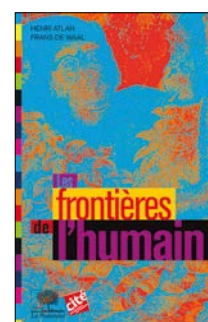
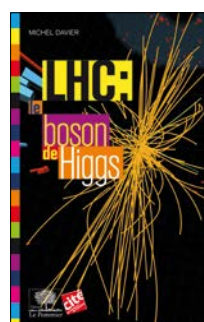
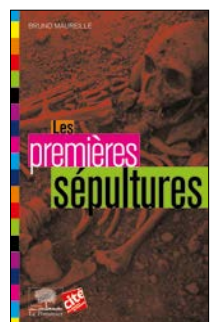
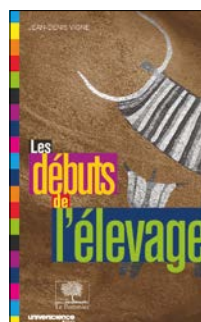
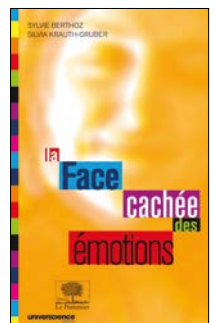
K. C. Summa et F. W. Turek, *Chronobiology and obesity: Interactions between circadian rhythms and energy regulation*, *Advances in Nutrition*, vol. 5, pp. 312S-319S, 2014.

P. Bourgin et al., *Au rythme du jour et des saisons*, *Pour la Science*, n° 397, pp. 108-114, novembre 2010.

A. Goldbeter et J.-C. Leloup, *La modélisation des rythmes du vivant*, *Pour la Science*, n° 314, pp. 20-26, décembre 2003.

Les chercheurs d'aujourd'hui nous livrent l'état de leurs savoirs.

Une coédition
Le Pommier / Cité des sciences



Retrouvez toutes nos nouveautés www.editions-lepommier.fr
et le catalogue d'Universcience universcience.fr/editions



UNE CONSEILLERE de Marie Stopes International, une ONG, explique à des femmes réunies dans un hôpital de Rabai, au Kenya, les options de planning familial, notamment la contraception d'urgence.



6 milliards d'Africains ?

Robert Engelman

Les projections démographiques pour l'Afrique sont alarmantes. Pour les démentir, il faudra donner aux femmes plus de droits et d'autonomie.

L'ESSENTIEL

En 2100, l'Afrique pourrait compter 3 milliards à 6,1 milliards d'habitants, contre 1,2 milliard aujourd'hui.

Cette augmentation pèsera lourdement sur les ressources, déjà fragiles en Afrique et ailleurs dans le monde.

La fécondité ne diminuera de façon significative que si les femmes acquièrent de l'autonomie, sur les plans éducatif, économique, social et politique.

Elles doivent aussi avoir facilement accès à la contraception.

Plus les habitants de la planète sont nombreux, plus la compétition pour exploiter ses ressources est intense. Bien que la population humaine continue

à augmenter, les progrès constatés ces dernières décennies sont encourageants. À l'échelle mondiale, une femme donne aujourd'hui naissance à 2,5 enfants en moyenne, soit moitié moins qu'au début des années 1950. Dans 40 % des pays du monde, le taux de fécondité – le nombre d'enfants nés vivants au cours de la vie d'une femme – est inférieur ou égal au taux de « remplacement » de 2,1 enfants par femme, chiffre pour lequel la progéniture remplace simplement ses parents.

En Afrique, cependant, les femmes donnent naissance en moyenne à 4,7 enfants chacune. La population y augmente près de trois fois plus vite que dans le reste du monde. Le taux de fécondité reste élevé dans la plupart des 54 pays africains.

Les Africains ont toujours privilégié les familles nombreuses, pour une question de statut social, pour avoir de la main-d'œuvre familiale à même de travailler les terres, pour contrebalancer des taux de mortalité élevés chez les jeunes enfants. Toutefois, un nombre de bébés plus élevé que jamais survivent et deviennent parents à leur tour. Plus de la moitié des 1,2 milliard d'individus qui peuplent ce continent sont des enfants ou des adolescents, ce qui promet un rythme d'expansion que l'humanité n'a jamais connu. À la fin de ce siècle, selon les projections des démographes, le nombre d'habitants en Afrique aura triplé ou quadruplé.

Des années durant, on estimait généralement à environ 2 milliards la population africaine en 2100. Les modèles démographiques supposaient que les taux de fécondité allaient chuter assez rapidement et régulièrement. Or ces taux ont baissé lentement et par à-coups. Les Nations unies prévoient maintenant entre 3 milliards et 6,1 milliards d'Africains – des chiffres vertigineux. Même selon les estimations basses, comme celles de l'IIASA (*International Institute for Applied Systems Analysis*, organisation qui a son siège en Autriche), l'Afrique aura plus de 2,6 milliards d'habitants. Ces dernières années, les Nations unies ont sans cesse revu à la hausse leur projection moyenne pour la population

L'AUTEUR



Robert ENGELMAN dirige des recherches sur les liens entre planning familial et développement durable à l'institut

Worldwatch, une organisation de recherche environnementale basée aux États-Unis, dont il est un ancien président.

mondiale en 2100, l'estimation étant passée de 9,1 milliards en 2004 à 11,2 milliards aujourd'hui. La quasi-totalité de l'accroissement non prévu vient de l'Afrique.

Une croissance démographique aussi forte menace le développement et la stabilité de l'Afrique. Une grande partie des Africains vivent dans des pays qui ne sont pas particulièrement bien dotés en sols fertiles, en eau ou en régimes politiques stables. Une compétition accrue pour la nourriture et les emplois risque d'engendrer des conflits dans toute la région et, par suite, d'exercer une pression significative sur la nourriture, l'eau et les ressources naturelles à travers le monde, en particulier si les Africains quittent leurs pays de façon massive – ce qui est déjà en train de se produire : 37 % des jeunes adultes en Afrique subsaharienne déclarent vouloir émigrer vers un autre pays, essentiellement en raison du manque d'emplois.

L'Afrique a besoin d'une nouvelle approche pour ralentir sa croissance démographique, préserver la paix et la sécurité, améliorer le développement économique et œuvrer en faveur d'un environnement durable. Entre les années 1960 et les années 1990, les fondations internationales et les organismes d'aide ont exhorté les gouvernements africains à agir contre l'accélération de la croissance démographique. Cela se réduisait généralement à investir dans des programmes de planning familial mais sans les intégrer à d'autres services de soins médicaux, et à émettre des communiqués gouvernementaux affirmant que « plus petit, c'est mieux » pour ce qui est de

la taille de la famille.

À partir du milieu des années 1990, cependant, le silence s'est abattu. Dire que l'accroissement de la population constitue un problème était considéré comme culturellement indélicat et politiquement controversé. Les donateurs internationaux déplacèrent alors leurs objectifs pour promouvoir une réforme générale des soins médicaux – dont la lutte contre le sida et les autres maladies graves.

Un sens de l'urgence est à réveiller. Il faut surmonter notre crainte des mots tabous et relancer des mesures coordonnées qui puissent abaisser la trajectoire démographique. Les recherches montrent que, au-delà

La croissance démographique

est près de trois fois plus rapide que dans le reste du monde

du fait de s'assurer que les femmes aient accès à des moyens contraceptifs efficaces et aux connaissances requises pour les utiliser, les meilleures mesures sont celles qui font sens pour d'autres raisons louables : donner une instruction aux jeunes filles et aux femmes, et rendre leur statut social et juridique égal à celui des hommes. Bien que quelques pays aient pris isolément certaines de ces mesures, une approche bien plus efficace

serait d'intégrer les actions en faveur des femmes sur les plans éducatif, économique, social et politique.

De nombreux indicateurs confirment que la situation de l'Afrique est déjà inquiétante. En dépit de progrès économiques et d'avancées démocratiques, ce continent présente de faibles espérances de vie, un rythme de développement lent et des niveaux élevés de pauvreté et de malnutrition.

Le rendement agricole est parmi les plus faibles au monde. Au sud du Sahara, le surpâturage par les animaux domestiques favorise l'avancée du désert, poussant les éleveurs nomades dans le territoire des agriculteurs, tandis que la population des deux groupes augmente. Des frictions sont apparues entre l'Égypte et l'Éthiopie à propos des eaux du Nil, autrefois partagées sans heurts à la suite d'un accord entre les 11 pays du bassin du Nil. Et une étude de 2010 a montré que les 4 pays du monde les moins sûrs pour ce qui est de l'approvisionnement en eau se trouvent tous en Afrique.

DEMOGRAPHIE MONDIALE : L'AFRIQUE EN TÊTE

La population africaine s'accroît tellement plus rapidement que prévu que les Nations unies ont révisé fortement leur prévision moyenne de la population mondiale en 2100 : elle est passée de 9,1 milliards à 11,2 milliards. La quasi-totalité de l'accroissement non prévu provient de l'Afrique (*en orange*), où l'on prévoit désormais une population comprise entre 3 milliards et 6,1 milliards d'individus en 2100. Bien que l'estimation moyenne pour l'Asie (*ligne rouge épaisse*) à cette époque soit toujours supérieure – environ 4,9 milliards, contre 4,4 milliards pour l'Afrique –, le total de l'Asie devrait diminuer, tandis que celui de l'Afrique devrait continuer à augmenter.

Population totale
en milliards)

14

12

10

8

6

4

2

0

1950

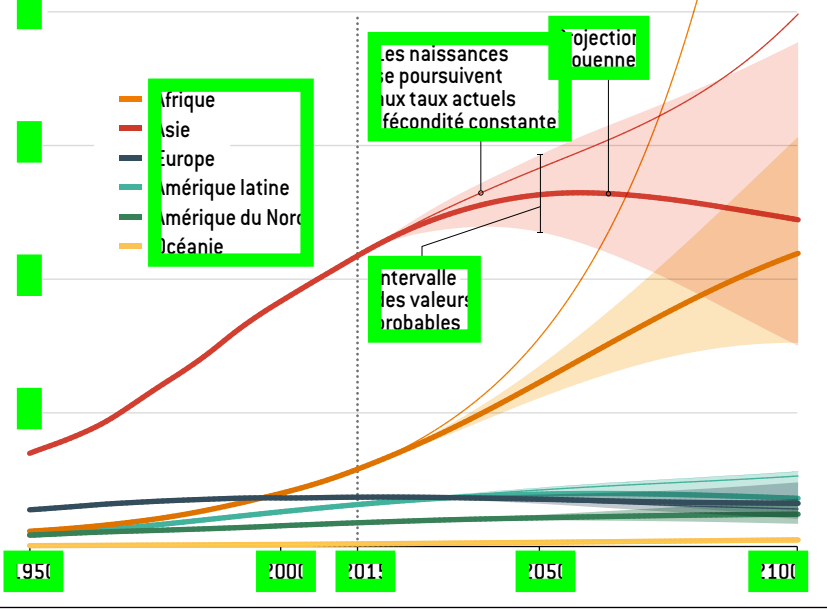
Si la natalité en Afrique reste à son niveau actuel (*fine ligne orange*), 16 milliards de personnes vivront dans ce continent en 2100 – plus du double de la population mondiale actuelle. Les démographes ne pensent pas que cela se produira, mais cette projection montre à quel point la fécondité influe sur la croissance démographique.

Afrique
Asie
Europe
Amérique latine
Amérique du Nord
Océanie

Les naissances se poursuivent aux taux actuels fécondité constante

Projection moyenne

Intervalle des valeurs probables



Des difficultés qui risquent de s'aggraver

La compétition pour des ressources de plus en plus rares contribue aux guerres civiles et au terrorisme. En juillet 2014, sur l'île kényane de Lamu, 80 personnes ont trouvé la mort lors d'affrontements entre chrétiens et musulmans pour la possession d'une terre fertile. Certains chercheurs attribuent l'essor du groupe armé islamiste Boko Haram au Nigeria, au moins en partie, au conflit opposant éleveurs et agriculteurs pour le contrôle de la brousse du Sahel. Le peu de perspectives qu'ont les adolescents et les jeunes adultes de pouvoir gagner leur vie nourrit également l'agressivité dans toute l'Afrique centrale, et crée des mouvements migratoires.

Imaginons maintenant ce à quoi pourrait ressembler l'Afrique avec 2 milliards d'habitants, sans parler de 6 milliards. L'histoire offre peu d'indices. L'Asie a dépassé 4 milliards d'habitants en 2007, mais, par rapport à l'Afrique, sa superficie est supérieure de 50 % et les niveaux de développement économique y sont considérablement plus élevés en moyenne. Pourtant, même avec ces atouts, de vastes pans de ce continent sont encore confrontés à des terres agricoles appauvries, des niveaux hydrographiques en baisse, une insécurité alimentaire et une forte pollution atmosphérique.

L'un des grands changements en Afrique sera la prolifération de villes gigantesques. Ce continent s'urbanise rapidement, la plupart des gens venant de campagnes en déshérence et s'entassant dans des bidonvilles, grappillant les abris et les ressources qu'ils peuvent. Ces grandes métropoles abritent aujourd'hui près d'un demi-milliard d'habitants ; en 2050, elles en auront plus

le 1,3 milliard, selon les projections des Nations unies. Les démographes Jean-Pierre Guengant, de l'IRD (Institut de recherche pour le développement) à Marseille, et John May, de l'université de Georgetown aux États-Unis, prédisent que la taille des plus grandes villes du continent explosera en 2050 ; Lagos, au Nigeria, passera de 11 millions d'habitants en 2010 à 40 millions ; Kinshasa, en République démocratique du Congo, de 8.4 millions à 31 millions. Si l'on

se fonde sur les projections actuelles, il y aura au milieu du siècle des centaines de mégavilles africaines regroupant chacune des centaines de milliers de personnes.

La perspective d'un continent bondé, urbain, en situation de confrontation permanente, commence à inquiéter les dirigeants des États africains, dont la plupart ont traditionnellement favorisé la croissance démographique. Ainsi, en 2012, les premiers ministres de l'Éthiopie et du Rwanda ont

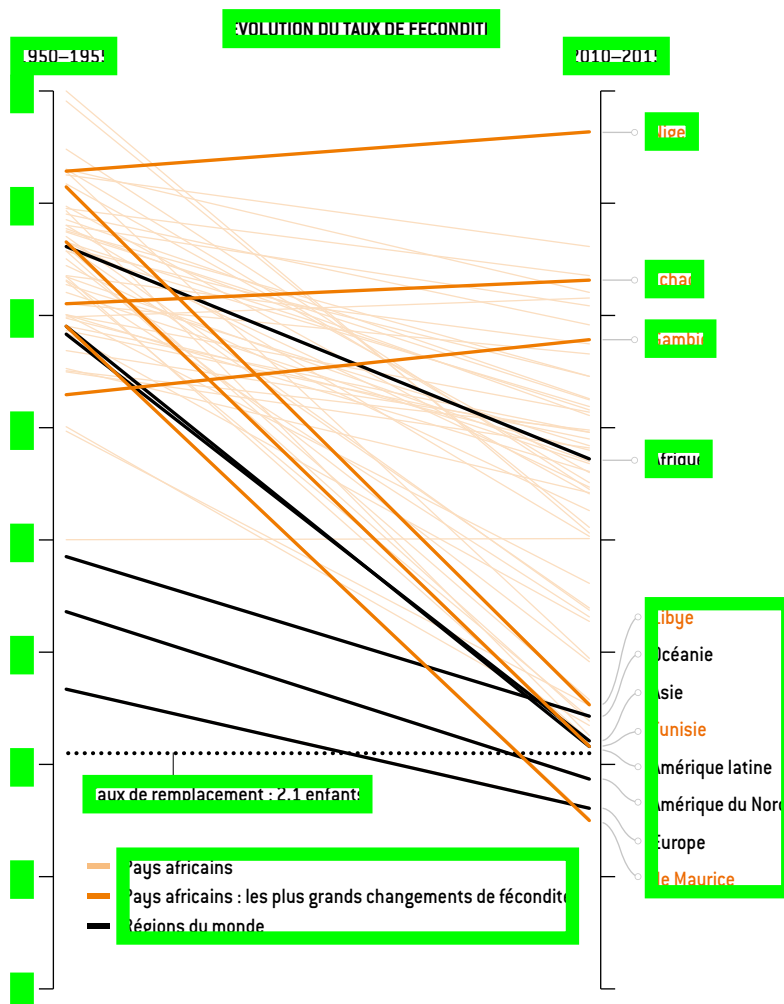
appelé à de nouveaux efforts pour étendre le recours au planning familial afin de «réduire la pauvreté et la faim, préserver les ressources naturelles et s'adapter aux conséquences du réchauffement climatique et de la dégradation de l'environnement».

Il n'est pas surprenant que l'accès au planning familial soit l'une des mesures recevant une attention renouvelée. Aujourd'hui, seules 29 % des femmes africaines mariées et en âge de procréer utilisent une contraception moderne. Sur tous les autres continents, la proportion dépasse largement 50 %. Des études montrent aussi que plus d'un tiers des grossesses en Afrique sont non désirées ; dans l'Afrique subsaharienne, 68 % des femmes âgées de 15 à 49 ans qui sont sexuellement actives, mais qui ne désirent pas être enceintes, n'utilisent aucun moyen moderne de contraception.

Toute transition vers la prospérité nécessite une baisse significative de la fécondité. Mais cela «ne peut être réalisé que si la "couverture contraceptive" augmente très nettement, depuis les faibles niveaux actuels jusqu'à des taux d'environ 60 % en 2050», notaient en 2013 Jean-Pierre Guengant et John May. La tâche s'annonce difficile...

LES TAUX DE FECONDITE DOIVENT BAISSER

Le nombre moyen d'enfants par femme, ou taux de fécondité, a baissé depuis le début des années 1950 en Afrique, mais il a atteint des valeurs bien plus basses que dans toutes les autres régions du monde (en noir). La fécondité en Afrique est encore de 4,7 enfants environ ; dans aucune autre région elle ne dépasse 2,5. Dans certains pays africains (en orange), elle reste obstinément élevée : 7,6 au Niger, 6,3 au Tchad, 5,8 en Gambie. Ces pays devraient tirer des leçons de l'île Maurice, où la fécondité a baissé de 6 à 1,5, et de la Tunisie, passée de 6,6 à 2,2. Pour que la population se stabilise en Afrique et dans le reste du monde, la fécondité moyenne doit atteindre le taux de remplacement, soit 2,1 environ - le chiffre pour lequel la progéniture remplace simplement ses parents.



Premiers succès

L'urbanisation peut, à elle seule, réduire quelque peu la taille moyenne des familles. En ville, élever des enfants coûte plus cher, l'apport des enfants au revenu de leurs parents est moindre, et ces derniers deviennent plus perméables au planning familial et à l'idée d'une famille plus restreinte. Certes, mais cela ne suffit pas.

Certains pays africains ont fortement réduit leurs taux de fécondité et ont des leçons à donner. La plus importante est le bénéfice obtenu en alliant accès au planning familial et efforts visant à donner aux femmes plus de contrôle sur leur vie et sur leur famille.

Dans les pays du Maghreb et en Afrique du Sud et ses pays voisins, les taux de fécondité ont baissé jusqu'à 3 enfants ou moins par femme, se rapprochant de ceux observés dans le reste du monde. Par contraste, en Afrique de l'Est, centrale et de l'Ouest, les taux de fécondité vont de 4 à 7, voire plus.

Les «bons éléments» ont commencé leur travail il y a de nombreuses années. Dans la demi-douzaine de petits États insulaires d'Afrique, les familles sont parmi les plus



LES PERSONNELS DE SANTE appartenant à la communauté sont souvent les plus aptes à y faire changer les mentalités. Ci-dessus, une travailleuse locale à Shompole, au Kenya, apprend à de jeunes mères Maasai à utiliser des préservatifs. Ci-contre, une conseillère à Laniar, au Sénégal, explique comment fonctionne un stérilet.

petites du continent. L'une des baisses de la fécondité les plus rapides de l'histoire s'est produite à l'île Maurice, à l'est de Madagascar. La moyenne est tombée de plus de 6 enfants par femme dans les années 1960 à 2,3 deux décennies plus tard. Aujourd'hui, le taux est d'environ 1,5, comparable à celui de l'Europe et du Japon. La chute la plus brutale s'est produite dans les années 1960 et au début des années 1970, en l'absence de toute croissance économique. Les Mauriciens étaient relativement bien éduqués, les femmes aussi bien que les hommes. Et au début des années 1960, le gouvernement a triomphé de l'opposition provenant de divers groupes, dont des catholiques et des musulmans, pour promouvoir avec succès le planning familial. Au bout de deux décennies, 1 femme sur 5 en âge de procréer utilisaient un moyen de contraception.

En Tunisie, Habib Bourguiba, le premier président, commença en 1957 à bouleverser le statut juridique et la santé reproductive des femmes, ce qui est difficile à imaginer dans un pays à très forte majorité musulmane.

Bourguiba a garanti aux femmes des droits civiques complets, dont le droit de vote et celui de ne pas porter le voile. Il a mis en place un enseignement moderne. L'école est devenue publique et gratuite, pour les filles comme pour les garçons. Bourguiba a banni la polygamie, augmenté l'âge minimum du mariage et accordé aux femmes le droit de divorcer. Il a légalisé la contraception, puis a subventionné les avortements pour les femmes ayant de nombreux enfants. Au milieu des années 1960, des dispensaires mobiles de planning familial distribuaient des contraceptifs oraux dans tout le pays. Bourguiba était loin d'être un démocrate, mais ses réformes sociales sont restées en place après sa destitution en 1987. Le taux de fécondité de la Tunisie est tombé de 7 enfants par femme à 2 au début des années 2000 (bien qu'il ait légèrement remonté depuis). Des exemples un peu moins spectaculaires et plus récents d'initiatives présidentielles ont permis de réduire la fécondité au Kenya, au Ghana et en Afrique du Sud.

L'île Maurice et la Tunisie montrent que la clé pour réduire la taille des familles réside dans des efforts constants visant à améliorer la vie des femmes. Cela inclut les possibilités économiques et les garanties juridiques, qui doivent être aussi proches que possible de celles des hommes. Contrairement à une idée répandue, la croissance économique nationale à elle seule ne permet pas d'abaisser fortement la fécondité.

Une stratégie intégrée

Comment le reste de l'Afrique peut-il reproduire de tels succès ? La première étape est de reconnaître que ce sont les femmes et les couples, et non les gouvernements, qui doivent décider combien d'enfants ils auront. Les femmes considérées comme égales des hommes par le gouvernement et la société tendent davantage à décider elles-mêmes si elles seront enceintes et quand, le résultat net étant en général une famille plus petite.

L'instruction, en particulier à l'école secondaire, favorise cette prise de



UNE VISITE A DOMICILE d'une conseillère de planning familial dans le village de Mbale, en Ouganda. De tels services, ici assurés avec le soutien de la fondation William et Flora Hewlett, sont vitaux pour informer les habitants de villages lointains ou isolés.

BIBLIOGRAPHIE

H. Leridon, *Afrique subsaharienne : une inquiétante évolution démographique*, *Pour la Science* n° 452, novembre 2015

J. B. Casterline et L. U. El-Zein, *Unmet need and fertility decline : A comparative perspective on prospects in sub-Saharan Africa*, *Studies in Family Planning*, vol. 45(2), pp. 227-245, 2014.

J.-P. Guengant et J. F. May, *African demography*, *Global Journal of Emerging Market Economies*, vol. 5(3), pp. 215-267, 2013.

L. Sippel *et al.*, *Africa's demographic challenges : how a young population can make development possible*, Berlin Institute for Population and Development, 2011 (<http://bit.ly/1T8Yit0>).

SUR LE WEB

World Population Prospects, the 2015 Revision, Nations unies, Département des affaires économiques et sociales : <http://esa.un.org/unpd/wpp/Publications/>

responsabilité. Bien entendu, l'instruction offre aux filles et aux jeunes femmes des connaissances sur la nutrition, la médecine et la vaccination. Mais elle leur ouvre aussi tout un champ de possibilités – économiques, sociales, civiques, politiques et artistiques. L'instruction pousse les jeunes à recourir aux contraceptifs et à planifier des familles plus petites, à mesure qu'ils apprennent à connaître le monde, leur corps et leur potentiel à choisir leur propre destinée.

Le rôle clé de l'éducation

Ainsi, selon l'IIASA, les femmes africaines dépourvues d'éducation ont, en moyenne, 5,4 enfants. Celles ayant suivi l'école primaire ont, en moyenne, 4,3 enfants. Une forte baisse, jusqu'à 2,7, est corrélée avec l'achèvement des études secondaires. Pour les femmes ayant fait des études supérieures, la fécondité est de 2,2.

Une meilleure éducation des jeunes hommes est aussi vitale. Chez les jeunes des deux sexes qui ont suivi des cours complets d'éducation sexuelle, l'âge des premiers rapports sexuels tend à être plus tardif, ce qui réduit le nombre de grossesses précoces et non désirées. La pandémie de sida a favorisé la mise en place de cours d'éducation sexuelle, au moins dans le sud et l'est de l'Afrique. Mais cette éducation est de qualité inégale, et elle est totalement absente dans une grande partie du continent. En outre, l'éducation sexuelle et un plus haut niveau d'instruction des femmes perdent leur impact si le planning familial n'est pas soutenu par les gouvernements et la société.

Les dirigeants africains semblent le reconnaître peu à peu. Yoweri Museveni, président de l'Ouganda, longtemps opposé au planning familial, a accueilli en juillet 2014 une conférence panafricaine consacrée à la nécessité de le rendre plus largement disponible.

Des programmes accordant des bons de prestation financés par le gouvernement, au Kenya et en Ouganda, et des soins médicaux subventionnés pour les mères et les enfants, au Zimbabwe, encouragent les individus et les couples à faibles revenus à se rendre dans les dispensaires. Beaucoup en ressortent avec une méthode de contraception qui leur permet d'éviter les grossesses non désirées et d'espacer les autres.

Au Malawi, des transferts d'argent d'un programme expérimental à des écolières et à leurs parents ou tuteurs ont encouragé la fréquentation scolaire, contribuant à un meilleur niveau d'éducation, à une activité sexuelle et un mariage plus tardifs, et ont ainsi réduit le nombre de grossesses chez les adolescentes.

En Ethiopie, le gouvernement a récemment recruté 38 000 travailleurs de la santé, leur a donné une formation et du matériel, et les a envoyés dans les zones rurales, où vivent 80 % des habitants du pays. Pédalant sur des bicyclettes fournies par les États-Unis pour se rendre dans les villages éloignés, ces travailleurs de la santé fournissent aux femmes et, quand ils se montrent coopératifs, aux maris, des informations sur le planning familial et la contraception. Sur une période récente de 3 ans, la fécondité a baissé de 4,8 à 4,1. De même, de fortes baisses ont été obtenues dans différentes communautés au Kenya et au Ghana, et même dans la mégapole de Kinshasa.

Dans de nombreux endroits, cependant, l'évolution des dirigeants est bien timide. Les présidents africains, hommes pour la plupart, semblent encore penser que le nombre fait la force et que les femmes ne sont pas les égales des hommes.

De fait, la vie des femmes dépend beaucoup des hommes. Aider les femmes à planifier leurs familles à l'insu de leurs maris est malheureusement souvent nécessaire, car de nombreux partenaires masculins pensent que la décision d'avoir des enfants est de leur seul ressort. Et ils tendent aussi à désirer plus d'enfants que leurs épouses.

Les différences d'attitude entre hommes et femmes s'expriment parfois de façon mordante. Une femme qui marque un intérêt pour les contraceptifs ou les utilise peut

subir des abus de la part de son partenaire. Une étude nigériane présentée lors d'une conférence en 2011 montre que 30 % des femmes qui sont ou ont été mariées rapportent un certain degré de « violence du partenaire » – sexuelle, physique ou émotionnelle. Les utilisatrices de contraceptifs et les femmes qui ont suivi une scolarité primaire subissent davantage ce type d'abus que les femmes non utilisatrices et celles qui n'ont suivi aucune scolarité. Même au Rwanda, qui porte toute son attention à la responsabilisation des femmes, 31 % des femmes ont rapporté en 2010 qu'elles avaient subi des violences de la part de leur mari ou de leur partenaire.

Changer l'attitude des hommes

Cette attitude peut changer. Des hommes interrogés au cours de mes séjours en Afrique n'ont parlé avec nostalgie de l'époque où il y avait moins de monde et plus de forêts, et ont parfois exprimé un soutien au planning familial comme moyen de ralentir ces tendances décourageantes. Certains d'entre eux ont également exprimé du respect pour les femmes en tant que collègues. « Les femmes du Conseil [de la ville] voient les choses de façons différentes et proposent des idées auxquelles aucun parmi nous n'aurait pensé », me dit un membre du Conseil en Tanzanie. « Nous ne voudrions pas les perdre maintenant. »

Sa déclaration reflète une vérité plus vaste : la fécondité peut baisser en partie grâce à ce que les sociologues nomment un « changement dénotationnel » – l'acceptation progressive de concepts qui étaient autrefois considérés comme radicaux, voire odieux. La Tanzanie, par exemple, réfléchit à un projet de constitution qui garantirait aux femmes un statut égal à celui des hommes en ce qui concerne le droit de propriété, l'héritage et d'autres droits juridiques.

En outre, les Africaines sont en train d'accéder en force à des postes de responsabilité importants. Aujourd'hui, le Rwanda a une ministre du genre et de la promotion de la famille et un parlement comptant la plus forte proportion de femmes au monde – presque les deux tiers. Joyce Banda a été présidente du Malawi de 2012 à 2014. L'actuelle

présidente du Liberia est Ellen Johnson Sirleaf. Ngozi Okonjo-Iweala a été ministre des Affaires étrangères et ministre des Finances du Nigeria, la première femme à occuper ces deux postes. La Commission de l'Union africaine est présidée par Nkosazana Dlamini Zuma, une femme d'Afrique du Sud. Quand des jeunes filles voient des femmes occuper de tels postes, leurs propres choix peuvent en être modifiés.

Le cas du Niger, en Afrique de l'Ouest, illustre pourquoi une stratégie intégrée de réduction de la croissance démographique, combinée avec une forte implication du gouvernement, est si importante. Là, dans l'un des pays les plus pauvres du monde, la fécondité moyenne est de 7,5 enfants par femme, et elle a à peine baissé depuis que les premières statistiques sont disponibles (1950). Pour les femmes et les hommes interrogés, la famille idéale est encore plus grande.

Les démographes sont un peu désarçonnés : pourquoi ce grand nombre d'enfants ? Plusieurs facteurs sont probablement en jeu : croyances religieuses, taux de mortalité

enfants est partagée, note le démographe John Casterline, de l'université d'État de l'Ohio, ce qui allège le fardeau – et donc facilite la décision des parents d'avoir un autre enfant.

Une stratégie portant sur des fronts multiples nécessite un engagement fort du gouvernement, une implication de l'ensemble de la communauté et de l'argent, dit Jean-Pierre Guengant. Mais souvent, souligne-t-il, les gouvernements n'arrivent pas à tenir leurs promesses. Une incitation est nécessaire, et en Afrique elle fait défaut.

À l'exception de la Chine, où la nouvelle politique des deux enfants par foyer limite toujours la liberté d'avoir des enfants, personne ne propose d'imposer des limites à la taille de la famille. Selon Jean-Pierre Guengant, les dirigeants doivent oser mettre en place des débats publics et politiques sur la croissance démographique. Il s'agit de réduire cette croissance non pas en essayant d'obtenir directement ce résultat, mais en créant les conditions grâce auxquelles il se produira naturellement.

Les cultures et les comportements peuvent évoluer assez vite, comme le montre la chute des taux de fécondité en Tunisie et à l'île Maurice. Les efforts investis pour assurer aux femmes la possibilité d'éviter les grossesses non désirées, sans coercition ni pression, sont primordiaux. Ils montrent la seule voie éthique et réaliste vers le ralentissement, puis l'arrêt, de la croissance démographique en Afrique.

Donner du pouvoir aux femmes n'a pas besoin de justification démographique. Mais il se trouve que les femmes capables de gérer leur propre existence décident aussi d'avoir moins d'enfants. De toute façon, l'avenir de l'Afrique et du monde serait meilleur si toutes les filles et femmes d'Afrique étaient en bonne santé et bien éduquées, si elles étaient libres de réaliser leurs rêves, de refuser quand elles le veulent les avances des hommes, et d'avoir un enfant seulement quand et avec qui elles le souhaitent.

L'Afrique finira-t-elle le siècle avec plusieurs milliards d'habitants, ou avec un nombre plus proche de ses 1,2 milliards actuels ? La réponse déterminera son développement, sa prospérité et sa capacité à affronter les futurs défis. ■



Un chemin d'étoiles pour les défunts

Sarah Symons et Elizabeth Taske

Il y a 4 000 ans, les Égyptiens ont peint des tables astronomiques au revers des couvercles de certains cercueils. À quoi servaient-elles ? Peut-être à orienter les morts dans leur voyage vers l'au-delà.

Mallawi est une ville d'Égypte située à 400 kilomètres au nord de Louxor et ses temples, bien à l'écart des circuits touristiques. En 2012, avec son collègue Robert Cockcroft, Sarah Symons (l'une d'entre nous) y est allée découvrir ce qui est sans doute la plus ancienne table astronomique du monde.

Quand, après des dizaines d'heures de voyage, les deux chercheurs arrivent enfin au musée de Mallawi devant le cercueil qu'ils sont venus voir, ils remarquent la latte de bois qui renforce son couvercle. Elle est couverte de noms d'étoiles inscrits en hiéroglyphes. Manifestement, cette latte a fait partie d'une autre table astronomique que celle peinte sur le couvercle du cercueil... Sarah et Robert vont pouvoir enrichir le corpus des tables astronomiques égyptiennes d'un nouvel élément !

L'historienne des sciences qu'est Sarah s'intéresse depuis vingt ans aux anciennes tables astronomiques égyptiennes. À ce jour, seules vingt-sept tables ont été découvertes, dont une sur le plafond d'un temple ; toutes les autres proviennent de cercueils. La plupart datent d'environ 2100 avant

L'ESSENTIEL

Les astronomes de l'Égypte ancienne notaient les mouvements des étoiles.

Des tables astronomiques ont été peintes à l'intérieur des cercueils vieux de 4 000 ans.

Les chercheurs ont longtemps pensé avoir affaire à des horloges fondées sur les étoiles. D'autres interprétations sont aujourd'hui envisagées.

En particulier, il pourrait s'agir de guides pour orienter les défunts censés, comme les pharaons, devenir les étoiles du firmament.

notre ère, donc de la Première Période intermédiaire égyptienne (environ 2181 à 2022 avant notre ère) et du Moyen Empire (environ 2022 à 1700 avant notre ère).

Afin de les interpréter, Sarah Symons s'aide d'un logiciel de planétarium, c'est-à-dire l'un de ces puissants programmes capables de simuler numériquement la route céleste que l'on voyait à diverses époques. Cette approche l'a conduite à remettre en cause l'idée dominante selon laquelle les anciennes tables astronomiques égyptiennes seraient des horloges stellaires.

C'est dans les années 1890, au cours des fouilles du complexe funéraire d'Assiout, importante ville de Haute-Égypte sur la rive occidentale du Nil, que l'on a découvert de premières tables astronomiques peintes au revers de cercueils de notables. Plusieurs couvercles de cercueils présentaient sur leur face interne des tableaux peints de symboles et autres hiéroglyphes. Habituellement, à cet endroit du couvercle d'un cercueil, on ne trouve que du bois nu ou, à la rigueur, des « Textes des sarpophages », formules magiques censées



DETAIL D'UNE TABLE ASTRONOMIQUE peinte il y a quelque quatre mille ans sur le couvercle d'un cercueil découvert à Mallawi, au centre de l'Égypte. Elle liste les étoiles notées par les astronomes pour chacune des semaines de l'année (*colonnes*) accompagnée de représentations de divinités (*grandes images*) et de mentions d'offrandes aux dieux (*bande horizontale centrale*).

protéger le défunt lors de son voyage dans l'au-delà. Très vite, on comprit que ces tableaux de symboles étaient des listes de noms d'étoiles.

Toutefois, la première interprétation de ces tables astronomiques n'est apparue que quelque 70 ans plus tard, avec l'ouvrage magistral *Egyptian astronomical Texts III* (1969) de l'historien des sciences d'origine autrichienne Otto Neugebauer et de l'égyptologue américain Richard Parker.

Un découpage du temps

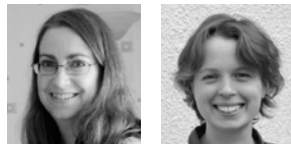
nocturne ?

Les deux savants, analysant les 13 tables connues alors, avançaient que les tables indiquent l'ordre dans lequel certains astres – des étoiles ou de petits amas stellaires – se lèvent à l'est au-dessus de l'horizon chaque nuit. Ils ont aussi émis l'idée que les tables constituent des horloges stellaires. Les levers successifs dans le ciel oriental des astres cités indiquent en effet des durées écoulées depuis le coucher du soleil de plus en plus longues, de sorte qu'elles peuvent servir à découper la nuit en heures « stellaires ». Cette idée est, depuis, restée l'interprétation dominante des tables astronomiques du revers de cercueils.

L'idée, simple, serait plausible, si du moins l'on pouvait consulter ces tables ailleurs que sur la face cachée de couvercles de cercueils... À supposer qu'elles aient existé, de telles horloges n'ont pu que jouer un grand rôle religieux. Selon la mythologie égyptienne en effet, le Soleil effectue un dangereux voyage la nuit, durant lequel il doit surmonter des obstacles. Pour l'y aider, les prêtres accomplissaient des rituels aux moments clés de son voyage nocturne. Il leur fallait donc allonger la nuit pour restituer le difficile parcours solaire.

La proposition de Neugebauer et de Parker est logique si les tables astronomiques étaient bien des horloges stellaires. Elles sont en effet divisées en quatre parties par une bande horizontale et une bande verticale. Tandis que la première contient la mention d'offrandes à des dieux, la bande verticale est ornée d'images de quatre de ces dieux. Ce sont cette constatation

LES AUTEURES



Sarah SYMONS, historienne des sciences, dirige le planétarium William J. McCallion dans l'Ontario, au Canada, et est maître de conférences à l'université McMaster.

Elizabeth TASKER est astrophysicienne et maître de conférences à l'université de Hokkaido, au Japon.

Les tables astronomiques

ont longtemps été assimilées à des horloges stellaires

et la présence, dans la partie haute des tables, du calendrier nilotique (de l'Égypte antique) qui ont conduit Neugebauer et Parker à leur idée d'horloge (voir l'encadré pages 60-61).

Expliquons la structure de ce calendrier, afin de décrire celle des tables astronomiques dans l'hypothèse de Neugebauer et Parker. Le calendrier nilotique est découpé en 12 mois, eux-mêmes divisés en 3 décades, c'est-à-dire en 3 semaines de 10 jours. Les 12 mois sont suivis des 5 jours supplémentaires nécessaires à la complétion d'une année de 365 jours.

Une table stellaire, lue de droite à gauche, est composée de 40 colonnes (voir le schéma pages 60-61). Les 36 premières colonnes représentent chacune une décade (« semaine » de 10 jours). Les trois colonnes suivantes sont une liste des 36 étoiles utilisées pour ces décades. La 40^e colonne est une liste de 12 étoiles utilisées pour la demi-décade (5 jours) qui complète l'année. Comme le haut de chaque colonne correspondant à une décade est occupé par une étoile différente, les étoiles sont nommées « décans ».

Chaque colonne décadaire comporte 12 décans. Pendant la décade considérée, ils se succèdent dans leur ordre d'apparition la nuit au-dessus de l'horizon. Le premier décan de la colonne est ainsi l'étoile qui apparaît à l'est peu après le coucher de soleil. Cette étoile va se déplacer d'est en ouest sur la voûte céleste nocturne. Les 11 décans suivants se succèdent au cours de la nuit dans l'ordre indiqué par la colonne.

Lors de la décade suivante, le ciel nocturne a changé : le premier décan est remplacé par le deuxième décan de la décade qui le précède, les 10 suivants sont les mêmes que précédemment et dans le même ordre, et un 12^e décan est introduit. Et ainsi de suite : d'une colonne à la suivante, tout se reproduit à l'identique, à un décalage d'une étoile près dans l'ordre prescrit des 36 étoiles.

Cette structure implique que les tables sont traversées de diagonales remplies du même décan, car chaque décan se retrouve décalé d'une case vers la gauche et d'une case vers le haut lorsqu'on passe d'une colonne ou décade à la suivante.

Sur le plan astronomique, ce phénomène traduit le fait que l'étoile en question se lève de plus en plus tôt au cours de l'année, jusqu'à ne plus se lever du tout jusqu'à l'année suivante.

Si l'année avait 360 jours, le motif des tables stellaires formerait un cycle continu de 36 décans. Après le lever du 36^e décan dans le ciel nocturne, le 1^{er} décan réapparaîtrait derrière lui à la décade suivante. Toutefois, une demi-décade de cinq jours se glisse à la fin de l'année, ce qui empêche ce cycle.

Pour résoudre la difficulté, estimaient Neugebauer et Parker, les anciens Égyptiens observaient les mouvements d'une série terminale de décans. Ces derniers remontaient en diagonale dans la table, formant à la fin un triangle de décans terminaux à la gauche de la table. Pour cette raison, les chercheurs nomment « décans

du triangle » ces décans terminaux ; ils les étiquettent par des lettres plutôt que par des numéros.

Les tables de revers de couvercle de cercueils ne donnent aucune indication sur la façon dont les anciens Égyptiens considéraient les décans du triangle. Étaient-ils plus ou moins importants que les autres décans ? D'autres tables astronomiques, peintes dans des temples ou au plafond de tombeaux, sont probablement contemporaines des tables de revers de couvercle de cercueils. On constate qu'une distinction y est faite entre les deux types de décans.

Ces observations ont alimenté des débats entre égyptologues : le modèle d'une année à 36 décades est-il apparu en premier ou les anciens Égyptiens sont-ils au contraire partis de leurs observations des étoiles qui se levaient réellement à l'est

chaque nuit et seulement de cela ? Quoi qu'il en soit, la complication apportée par les décans du triangle prouve que les tables ne traduisent pas seulement une volonté d'idéalisation du cosmos, mais aussi le résultat d'observations astronomiques concrètes.

La théorie de Neugebauer et Parker est séduisante, mais ne résout pas plusieurs questions incontournables.

L'une des difficultés – et Neugebauer et Parker l'ont reconnu eux-mêmes dans les années 1960 – est que les tables stellaires du corpus dont ils disposaient n'étaient pas toutes semblables. À l'œil non exercé, elles semblent identiques, puisqu'elles présentent les mêmes colonnes remplies en grande partie des mêmes noms de décans. Un examen plus poussé amène toutefois à distinguer deux groupes principaux de tables, entre lesquels les décans sont décalés de plusieurs colonnes.

Pour l'expliquer, Neugebauer et Parker ont suggéré que le désaccord entre les deux groupes découlait de l'absence de prise en compte des années bissextiles dans le calendrier. Si, ignorant devoir ajouter un quart de jour chaque année, les anciens astronomes réalisaient leurs tables à 40 ans d'écart, alors deux tables seraient décalées d'une décade, c'est-à-dire de 40 fois un quart de jour. Neugebauer et Parker supposaient que la découverte de nouvelles tables astronomiques livrerait de nouvelles dispositions, intermédiaires.

Une autre interprétation possible

Dr Sarah Symons, après avoir examiné de près l'ensemble des tables stellaires connues, notamment les dernières découvertes dans les années 1960, remet en doute cette interprétation. Toutes, sans exception, font partie de l'un des deux groupes acceptés par les égyptologues. Aucune ne présente un autre motif de décans. De plus, la séparation entre décans de même espèce d'une colonne à l'autre varie, alors qu'une prise en compte des années bissextiles décalerait les décans ensemble sans rien changer à leurs espacements.

Neugebauer et Parker ne pouvaient pas non plus être certains que les tables décrivent vraiment le lever des étoiles sur l'horizon. D'autres interprétations sont possibles, puisque les différences entre tables vont au-delà de simples décalages du même ordre



AU MUSÉE DE L'UNIVERSITÉ DE TUBINGEN, la table astronomique dont un détail est reproduit au début de cet article est accrochée au mur, au-dessus du cercueil qu'elle décorait

autre hypothèse. Selon elle, ces tables, dont la plupart ont été trouvées au revers de couvercles de cercueils, étaient censées aider les défunts à trouver leur chemin vers une nouvelle demeure dans le ciel. Le schéma idéalisé ci-dessous montre comment se lit une telle table astronomique, qui recense les levers d'étoiles au-dessus de l'horizon pour chaque période de dix jours.

CHACUNE DES TROIS SAISONS
(Akhet, Peret et Chemou) est divisée
en quatre mois de trois décades.

Bande intérieure : représentations de divinités

○

1

DEFINITIONS DU TRIANGLE

Des tables de couchers ?

Les logiciels de planétarium peuvent aussi servir à éliminer des interprétations qui ne tiennent pas la route. Selon l'une des explications proposées aux différences entre les deux groupes de tables, les étoiles étaient observées depuis deux sites différents en Égypte. La comparaison des simulations pour différentes latitudes avec les tables suggère fortement que ce

DANS CHAQUE DECADE,
le premier décan est
le deuxième de la décade
précédente. Un nouveau décan
apparaît en 12^e position. Les
décanes identiques forment ainsi
les diagonales dans la table

Plein est ? A moins de cinq degrés de l'est ? À moins de dix degrés ? Une étoile brillante et familière mais mal placée dans le ciel serait-elle préférée par un astronome à un astre moins brillant mais bien placé ?

Si nous savions précisément quelles étoiles étaient utilisées, nous pourrions en déduire par quelles procédures elles étaient observées ; à l'inverse, si nous savions quelles étaient les procédures d'observation, nous pourrions savoir de quelles étoiles il s'agissait. Ne connaissant ni les unes ni les autres, nous en sommes réduits aux conjectures.

La question de l'usage des tables reste posée

Malgré les clarifications apportées par les programmes de planétarium, la question de l'usage qu'avaient les tables stellaires reste fondamentale. Les horloges qu'envisageaient Neugebauer et Parker impliquent un système apparenté aux conceptions modernes de mesure du temps, ce qui ferait des tables des instruments de découpage du temps. Or cette vision ne s'accorde pas avec la conception du temps des anciens Égyptiens.

Au XXI^e siècle, nous voyons le temps comme un écoulement régulier. Il en allait bien autrement chez les anciens Égyptiens. Pour eux, des événements tels que les mouvements célestes du Soleil ou des étoiles déterminaient l'heure du jour ou de la nuit. Minuit ou l'aube, par exemple, étaient les périodes où certaines étoiles étaient visibles, ou bien où le Soleil était dans une région donnée du ciel, et non un instant unique bien défini.

Cet aspect de la culture égyptienne antique contredit l'idée que les tables étaient des chronomètres. Il semble plus approprié de les considérer comme des « tables stellaires » plutôt que comme des « horloges stellaires ». Qui plus est, les logiciels de planétarium montrent que le ciel antique ne présentait pas toujours une étoile brillante exactement à l'endroit et au moment où elle aurait été nécessaire pour prendre un repère temporel. En outre, une étoile ne peut être aperçue que lorsque le ciel est assez sombre.

Ainsi, en somme, les « heures » sonnées par une horloge stellaire auraient probablement été assez irrégulières. En l'état actuel des connaissances, Sarah Symons est d'avis que ces tables étaient plutôt des

BIBLIOGRAPHIE

S. Ikram, Cultural heritage in times of crisis : The view from Egypt, *Journal of Eastern Mediterranean Archaeology and Heritage Studies*, vol. 1(4), pp. 365-370. 2013.

S. Symons, A star's year : the annual cycle in the ancient Egyptian sky, *Calendars and Years : Astronomy and Time in the Ancient Near East*, J. M. Steele (dir.), Oxford Books. 2002.

J. E. Neugebauer et R. A. Parker, *Egyptian Astronomical Texts, II : Decans, Planets, Constellations and Zodiacs*, Brown University Press. 1969.

almanachs ou des cartes consignait l'état du ciel au fil du temps et non des horloges.

Reste la question la plus évidente : pourquoi peignait-on de telles tables au revers de couvercles de cercueils ? Pourquoi les morts auraient-ils eu besoin de connaître l'heure ? Du de savoir comment le ciel bougeait ?

La réponse ne peut que découler des conceptions égyptiennes sur l'au-delà. Les temples, les tombeaux et même les cercueils étaient des mondes modèles dans lesquels le plafond ou le couvercle intérieur représentaient le ciel. Or les écrits religieux égyptiens, notamment les *Textes des Pyramides*, vieux de plus de 4500 ans (les plus anciens connus) expriment l'idée que les âmes peuvent renaître sous forme d'étoiles. Après la mort, pensait-on, un pharaon rejoignait et intégrait la cohorte des étoiles circumpolaires dont la proximité au pôle Nord céleste signifie qu'elles ne se lèvent ni ne se couchent jamais ; ce sont des étoiles immortelles.

Cette vision s'appliquait sans doute aussi, mais dans une moindre mesure, aux notables de la région d'Assiout et à d'autres individus de haut rang. Leurs âmes étaient peut-être censées pouvoir devenir des étoiles de moindre importance, celles dont les trajectoires descendent sous l'horizon à différents moments de l'année. Si tel était bien le cas, alors les défunts avaient besoin d'aide pour aller prendre leur place céleste. Les tables étaient là pour les orienter parmi les nombreux mouvements stellaires...

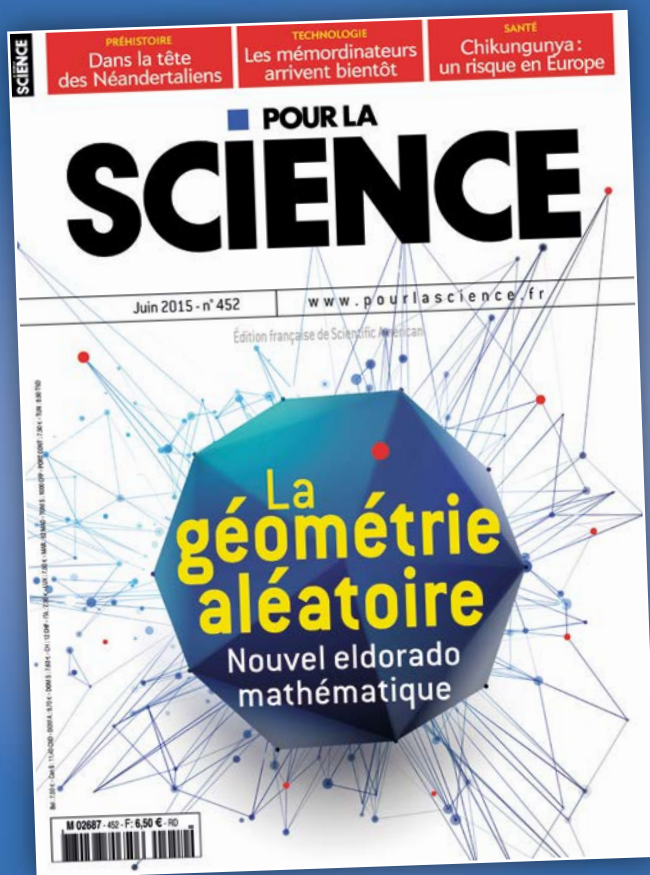
Menace sur les tables astronomiques

Afin de faciliter la recherche sur l'astronomie égyptienne ancienne, Sarah Symons a créé une base de données en ligne contenant le corpus entier des tables connues. Les fouilles se poursuivant toujours en Égypte, nous pouvons nous attendre à ce que ce corpus soit bientôt augmenté.

Malheureusement, les tables de la liste actuelle ne sont pas toujours en sécurité. Ainsi, quelques semaines seulement après la visite de Sarah Symons et de Robert Cockcroft, pendant les émeutes de 2013, le musée de Mallawi a été pillé. Même si beaucoup des objets volés ont été retrouvés, la situation des tables stellaires du musée est inconnue à ce jour. Il faut continuer à numériser les tables stellaires égyptiennes. L'avenir des recherches sur l'astronomie de l'Égypte ancienne en dépend. ■

OFFRE DÉCOUVERTE

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE



1 AN - 12 N°
59€

24%

2 ANS - 24 N°
110€

29%

3 ANS - 36 N°
159€

32%

BULLETIN D'ABONNEMENT

POUR LA SCIENCE

À RENVoyer accompagnée de votre règlement à : Pour la Science - Service abonnements - 9 rue de la Harpe - BP 91053 - 67 402 Illkirch cedex

☒ **OUI, je m'abonne à Pour la Science.**

- ☐ 1 an • 12 numéros • **59€** au lieu de 78,50€ (D1A59€)
- ☐ 2 ans • 24 numéros • **110€** au lieu de 157€ (D2A110€)
- ☐ 3 ans • 36 numéros • **159€** au lieu de 235,50€ (D3A159€)

J'indique mes coordonnées

Nom : _____
Prénom : _____
Adresse : _____

CP : _____ Ville : _____
tél : _____

Je choisis mon mode de règlement

- ☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science
- ☐ Par carte bancaire

Numéro de carte : _____

Date d'expiration : _____

Signature obligatoire : _____



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

En face à votre email nous pourrions vous contacter si besoin pour le suivi de votre abonnement. À réception de votre bulletin, comptez 5 semaines pour recevoir votre n° d'abonné. Passe ce délai, merci d'en faire la demande à pourlascience@adopress.fr.

J'accuse de recevoir les informations de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON et de ses partenaires ☐ OUI ☐ NON

Le prix de livraison dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 30/04/16 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site www.pourlascience.fr. Conformément à la loi "Informatique et Libertés" du 6 janvier 1978, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification aux données vous concernant en adressant un courrier à Pour la Science.



Vivre connecté, un atout pour l'animal

Lee Alan Dugatkin
et Matthew Hasenlage

Chez de nombreuses espèces
animales, la survie et le succès
des individus dépendent
de la qualité et de l'intensité
de leurs liens sociaux

N

ous sommes une espèce foncièrement sociale. Les individus dont est constitué notre réseau social jouent un rôle capital dans notre vie. Qu'il s'agisse de membres de notre famille élargie, d'amis d'amis, de collègues ou de connaissances de leurs connaissances, nous influencent nos choix de lecture, nos opinions politiques, nos recherches d'emploi et nous fournissent en informations. Or des réseaux sociaux déterminent aussi la (sur)vie de nombreux animaux.

La complexité sociale des chimpanzés et des autres primates est connue depuis longtemps. Des recherches récentes ont mis en évidence des activités d'oiseaux, de dauphins et d'autres animaux, qui ne s'interprètent que dans un contexte social. Leur étude pourrait avoir des répercussions non seulement sur la préservation des autres espèces, mais aussi sur la compréhension de la nôtre.

En particulier, la recherche éthologique a rejoint la sociologie dans ses techniques d'analyse des réseaux sociaux, de sorte qu'elle influencera sans doute, voire orientera, les recherches que nous ferons sur nous-mêmes.

L'éthologie devenue une sociologie animale

Il a fallu du temps pour que les éthologues prennent conscience de l'importance des réseaux sociaux chez les animaux. Dans les années 1930, le pionnier de l'étude du comportement animal, l'Autrichien Konrad Lorenz, publiait ses célèbres recherches sur l'imprégnation chez les oies cendrées, c'est-à-dire sur l'attachement instinctif que ressent une oie venant de naître envers ceux qui prennent soin d'elle durant la phase initiale et critique de son développement. L'idée que la plupart des animaux seraient en quelque sorte des robots dont le comportement est programmé par les

L'ESSENTIEL

De nombreux animaux évoluent au sein de réseaux complexes, qui déterminent leur comportement et celui de leur groupe.

Ces réseaux animaux s'analysent par les mêmes techniques que celles qui ont été mises au point pour étudier les groupes humains.

La structure du réseau auquel appartient un individu influe sur son succès reproductif, sur l'expérience dont il bénéficie et sur les risques de contracter une maladie infectieuse.

Certains individus jouent un rôle clé dans le maintien du bien-être général d'une communauté animale.

gènes s'est ensuite imposée au point d'en devenir un dogme.

Très vite, cependant, les éthologues ont constaté que des facteurs extérieurs jouent aussi un rôle dans l'expression du génome. En plus de l'inné (ce qui est inscrit dans les gènes), l'acquis (l'expérience vécue) pilote le comportement animal. Belle formule, très complète... mais qui n'est pas très utile. En effet, les seules influences concevables sur le comportement animal ne peuvent résulter que de l'inné ou de l'acquis!

Pour dépasser le dogme du tout génétique, les chercheurs ont commencé à étudier la façon dont l'apprentissage par tâtonnements façonne le comportement animal. Les expériences menées en laboratoire ainsi que les observations faites dans la nature ont amené les éthologues à reconnaître aux animaux une intelligence bien plus grande que celle qu'on leur attribuait jusque-là. Ainsi, on sait aujourd'hui que les chimpanzés et les corbeaux fabriquent et emploient des outils; que les perroquets résolvent des problèmes de logique; que les éléphants détruisent les clôtures électriques en les ouvrant de blocs de pierre...

C'est en étudiant cette évidente intelligence animale que les chercheurs ont remarqué que certains animaux sociaux apprennent par imitation; et qu'il arrive qu'un individu particulier du groupe se sache observé par d'autres en quête d'information.

Comme le savent bien les physiiciens, au-delà de deux corps, décrire des interactions multiples devient ardu. Sans doute est-ce pourquoi les premières tentatives d'étude des interactions au sein d'un groupe animal ont été restreintes sur deux ou trois individus. De multiples travaux ont porté sur la tendance de tel ou tel animal à imiter la stratégie d'accouplement d'un congénère ou à observer de près les qualités combatives d'un adversaire potentiel, sur les tactiques employées par les tricheurs pour voler de la nourriture aux individus plus habiles qu'eux...

Mais plus les éthologues étudiaient ce type de comportements, plus ils comprenaient que les relations au sein d'un sous-groupe ne représentent qu'une petite partie du réseau des interactions au sein d'un groupe.

LES AUTEURS



Lee Alan DUGATKIN est professeur de biologie à l'université de Louisville, dans le Kentucky aux États-Unis.

Matthew HASENJAGER est doctorant dans le laboratoire de Lee Alan Dugatkin, sa thèse portant sur les réseaux sociaux animaux.

Pour mieux appréhender la vie sociale animale, il fallait donc admettre que, comme les hommes, de nombreux animaux sont intégrés au sein de réseaux sociaux complexes, où chacun est lié à chacun.

Ce nouveau paradigme a commencé à se répandre il y a une quinzaine d'années, lorsque les éthologues se sont mis à adapter librement les méthodes mises au point par les sociologues pour analyser les réseaux sociaux humains, qu'ils soient professionnels, de voisinage ou encore virtuels, tels Facebook et Twitter.

Une grande variété de réseaux

Dans le monde animal, les réseaux sociaux vont de l'association de quelques individus – un petit banc de poissons par exemple – à des interactions hautement complexes, comme chez les babouins, où les individus sont partie prenante de systèmes compliqués d'affiliations – accouplement, toilettage, hiérarchie... –, qui ont une influence directe ou indirecte sur chaque membre du groupe. L'étude d'un réseau social est par ailleurs compliquée par le fait qu'il change souvent en fonction des déplacements de ses membres, de leur santé, de leurs échanges et des expériences qu'ils font.

Dans les sociétés animales, qu'elles soient simples ou complexes, les interactions des individus ont un impact significatif sur la survie et la reproduction. La pertinence des informations échangées à propos des ressources alimentaires, des prédateurs, des partenaires sexuels, etc., et la vitesse à laquelle elles circulent au sein du groupe en dépendent. Les réponses à des questions telles que : Qui joue avec qui ? Qui se bat avec qui ? Qui aide qui ? en dépendent aussi. Par ailleurs, la structure du réseau influe sur la santé de ses membres, puisque pathogènes et parasites se propagent directement ou indirectement d'un individu à l'autre.

Les éthologues ont identifié plusieurs caractéristiques des réseaux animaux : la présence d'individus « clés de voûte », dont les relations sont assez nombreuses pour que leurs interruptions perturbent l'ensemble du réseau; les nœuds (en fait

Dans les sociétés animales, les interactions

Les individus ont un impact significatif sur la survie et la reproduction



UN RESEAU SOCIAL ETENDU avantage fortement l'individu qui l'a établi. C'est le cas par exemple pour les mâles des manakins fastueux

(ci-dessus à gauche) ou encore chez les macaques, où le toilettage joue un rôle social considérable (ci-dessus).

ous les individus appartenant au réseau); la densité du réseau, c'est-à-dire le rapport entre le nombre réel de liens et le nombre de liens possibles; la cohésion, c'est-à-dire le nombre moyen de liens qu'a un individu avec les autres; l'étendue du réseau, c'est-à-dire le nombre d'amis d'amis d'un individu; et enfin la centralité d'un individu donné, c'est-à-dire le pourcentage de liens sociaux qui incluent cet individu. Donnons un exemple qui illustre cette dernière notion: la centralité d'un Français est généralement faible à l'échelle de la France, mais celle de leur président est proche de 100% puisque les citoyens qui sont tous reliés par l'intermédiaire de leurs députés...

Afin d'appréhender l'impact des réseaux sociaux animaux sur la nature et la façon dont ils déterminent le comportement des membres d'une espèce sociale, examinons de plus près les vies pas si privées de trois espèces: des macaques, des passereaux d'Amérique centrale et des dauphins.

Les macaques à queue de cochon (*Macaca nemestrina*) créent de multiples réseaux dont les membres sont par exemple des partenaires de jeu ou de toilettage. Ces réseaux varient en taille, et tel ou tel singe peut avoir des partenaires favoris différents dans ses différents cercles. Il pourra aussi jouer un rôle plus important dans un réseau que dans un autre. Toutefois, tous les réseaux de macaques ont en commun de fonctionner sous la surveillance de quelques faiseurs de paix. Ces individus, qui sont issus des plus hauts rangs de la hiérarchie des mâles, forment une sorte de « police macaque ». Ils investissent du temps et de l'énergie

à maintenir la paix en interrompant les bagarres entre les membres de leurs réseaux sociaux.

Au début des années 2000, Jessica Flack, de l'institut Santa Fe, et ses collègues – dont le célèbre primatologue Frans de Waal – ont étudié la mission de la police macaque au sein d'un groupe de 84 macaques du centre de recherche national Yerkes, à Atlanta en Géorgie. Ils se sont inspirés pour ce faire de la méthode de l'invalidation génique, qui consiste à désactiver un gène afin d'observer les conséquences de son absence. L'équipe de Jessica Flack a procédé de façon analogue: elle a soustrait trois des policiers mâles du groupe, puis a observé les effets de cette absence.

La police macaque favorise la paix et le toilettage

La perte d'un nœud du réseau a peu d'incidence sur son fonctionnement, sauf si ce nœud joue un rôle central. L'absence des représentants de l'ordre a conduit à une recrudescence des agressions entre macaques et à une diminution des démarches de réconciliation qui suivent le plus souvent les bagarres. Les chercheurs s'y attendaient, mais ils ont été surpris de constater que l'absence de policiers a entraîné la réorganisation des réseaux de jeu ou de toilettage.

En particulier, ils ont constaté que les macaques jouent et se toilettent moins souvent en l'absence de policiers. Il s'avère aussi que le degré de cohésion de leurs réseaux de jeux et de toilettage diminue

ostensiblement, ainsi que l'étendue des réseaux des singes qui y participent. La cohésion de la société macaque dans son ensemble s'est aussi affaiblie: le groupe s'est divisé en sous-groupes plus cohérents, certes, mais où l'on interagit moins avec des individus extérieurs au sous-groupe. Ces observations ont conduit Jessica Flack et ses collègues à postuler que la présence d'une police macaque rend le réseau social de ces singes plus dense et plus sain, et incite ses membres à avoir davantage de contacts plus amicaux.

Ce type d'expérience met en évidence l'influence bénéfique de certains individus sur la structure du réseau social. Il suggère qu'une meilleure compréhension des sociétés animales sera utile en biologie de la conservation. Prenons l'exemple des orques (*Orcinus orca*). Au sein de cette espèce, ce sont de petits groupes de jeunes femelles ou de jeunes femelles isolées qui transmettent l'information relative à la quête de nourriture et à divers aspects de la vie marine. Toute activité humaine perturbant ces individus clés ou la circulation de l'information au sein du groupe d'orques – chasse, pollution marine, barrières entravant les déplacements, etc. – peut fortement désorganiser le groupe d'orques et réduire ses chances de survie. *A minima*, une meilleure compréhension de ce type de processus devrait inspirer les politiques de conservation mises en place pour réduire l'impact humain sur les orques.

Les populations d'oiseaux entretenant des réseaux sociaux ont aussi été l'objet d'observations. L'une des espèces étudiées est le manakin fastueux (*Chiroxiphia linearis*), un passereau d'Amérique centrale dont les

QUAND DAUPHINS ET HUMAINS S'ALLIENT POUR MIEUX PÊCHER

Dans la région de Laguna, au sud du Brésil, certains individus d'une population de dauphins s'allient aux petits pêcheurs locaux afin d'attraper des mulets.

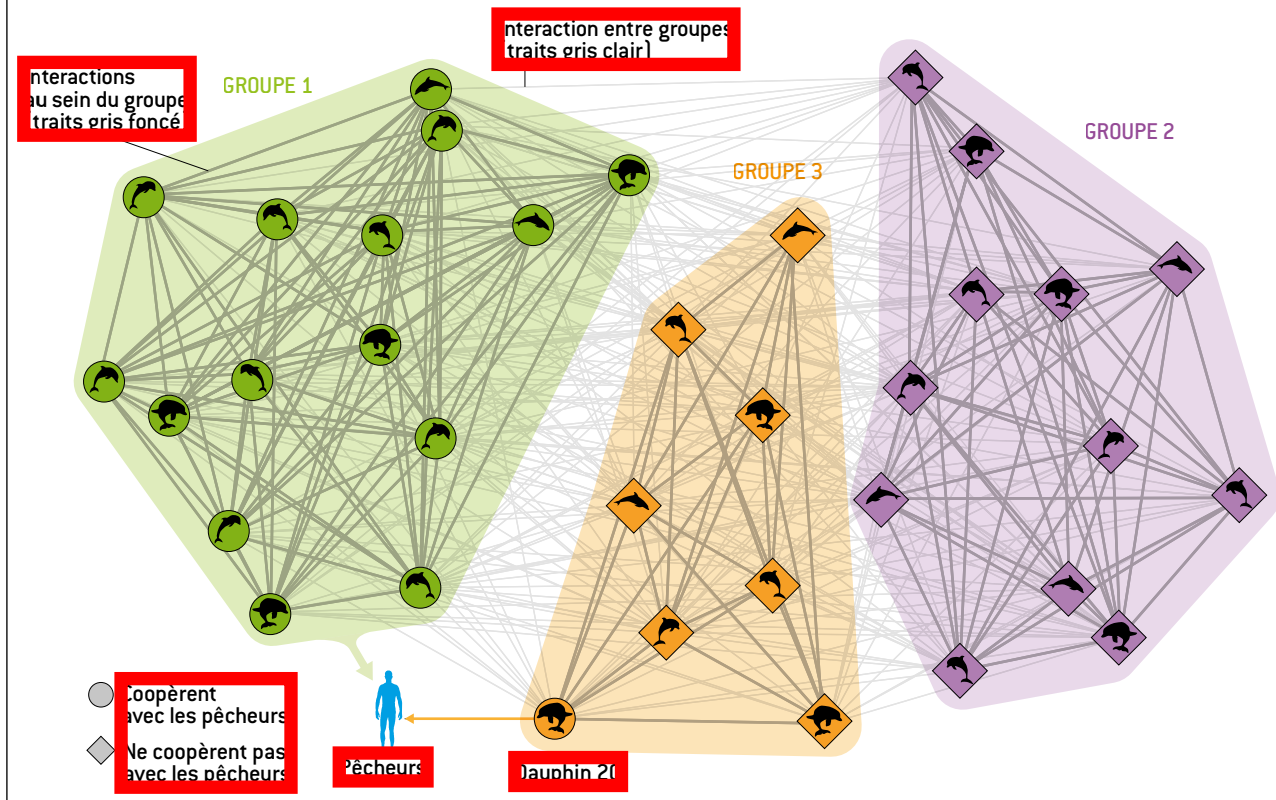
La population de dauphins se répartit en trois groupes, qui ont des « cultures » différentes. Dans le premier (en vert), les dauphins ont appris à coopérer intensément entre eux (traits reliant les individus) et avec les pêcheurs (cercles). Quant aux membres du groupe 2 (en

bleu), ils interagissent moins (traits carrés) en comparaison avec les membres du groupe 1, et ils n'ont aucun contact avec les pêcheurs. Les dauphins du groupe 3 (en orange) ne s'intéressent pas non plus aux pêcheurs, à l'exception d'un seul, le dauphin

numéroté 20 (cercle orange). Ce dernier est capable d'aider les pêcheurs et il entretient aussi des relations entre son groupe et le groupe 1 qui coopère intensément avec les pêcheurs. Il est possible qu'il soit en train d'apprendre aux membres de son groupe à collaborer avec les pêcheurs.

Comme l'eau de la lagune est trouble, localiser les bancs de mulets dans l'eau est

difficile pour les pêcheurs ; la tâche est plus facile pour les dauphins, grâce à leur système d'écholocalisation. Par ailleurs, l'affolement des mulets provoqué par la chute des filets sur l'eau facilite la capture des poissons par les dauphins. Ainsi, la collaboration entre dauphins et humains augmente la quantité de mulets capturés par chacune des deux espèces.



Les mâles sont particulièrement beaux : ornés de plumes dorsales indigo, ils portent une sorte de casquette rouge vif et arborent une longue et étroite queue. Si vous voyez un jour une paire de mâles perchés sur une branche, vous assisterez à tout un spectacle de chant et de danse. Pendant la saison des amours, les femelles manakins observent ces spectacles et jaugent la qualité des performances afin de se choisir un partenaire. Dès lors, la possibilité d'entrer en représentation sur un perchoir est vitale pour les mâles. La compétition pour faire partie d'un duo est donc rude, voire agressive.

David McDonald, de l'université du Wyoming, a passé plus de dix ans au Costa Rica à observer ces oiseaux. Il a consacré 9 288 heures au total à décrypter leurs réseaux sociaux. Il a ainsi découvert que les mâles ayant eu dans leur jeune âge le plus grand nombre de relations sociales sont aussi les plus susceptibles de parvenir à obtenir une place de perchoir afin de se donner en spectacle lors des « karaokés » de leur espèce.

Comme dans tout combat dansé, le manège des manakins est compliqué. *Grossomodo*, il se déroule ainsi : huit à quinze mâles séjournent dans une « zone de perchoirs »,

où se trouvent plusieurs des branches sur lesquelles les oiseaux paraden. Hors de la saison des amours, qui s'étend de fin février à début septembre, tout oiseau mâle faisant partie du groupe aura le droit de venir chanter et danser sur un perchoir, mais à condition qu'il n'y ait aucune femelle dans les environs. Si, en revanche, des femelles sont présentes, seuls les mâles dominants – les mâles alpha et bêta – peuvent entrer en représentation. Le duo d'artistes donnant spectacle pendant la saison des amours est en quelque sorte formé de videurs qui rejettent violemment tout mâle concurrent hors de la boîte de nuit !

Dans une zone de perchoir, le mâle alpha remporte presque tous les accouplements. Le mâle bêta a, lui, le privilège de pouvoir lui succéder à sa mort, accédant ainsi à la première place tant convoitée. Ce système avantage énormément les mâles alpha et bêta, à qui il confère un monopole sexuel quasi exclusif.

Quand les jeunes oiseaux ont entre un et six ans d'âge, ils passent souvent d'une zone de perchoirs à l'autre, créant ainsi des liens avec beaucoup d'autres mâles. L'âge moyen le plus propice à la reproduction est de dix ans, ce qui signifie que tout mâle a largement eu le temps, auparavant, d'établir un réseau social étendu. Au cours de ses presque 10 000 heures d'observation sur le terrain, David McDonald a cherché à savoir quels étaient les mâles qui avaient entretenu les liens pendant dix années de suite. Chaque année, il a donc collecté les données nécessaires pour cartographier les réseaux sociaux du manakin fastueux, afin d'identifier quels mâles accèdent à la scène de spectacle.

Les données recueillies décrivent à la fois les liens directs et les liens indirects d'un individu (« Je ne connais pas Bernard personnellement, mais je connais Julien, qui connaît Sébastien, lequel connaît Bernard »). David McDonald parvint ainsi à la conclusion que le secret du succès des mâles réside dans leur degré de centralité : ceux qui ont acquis un haut degré sont plus susceptibles de s'élever dans la hiérarchie de la reproduction que ceux qui sont moins connectés. Ce sont eux qui atteignent parfois le statut d'alpha et de bêta et accèdent ainsi à un perchoir pendant la saison reproductive.

À ce stade, soulignons que les recherches de ce type visent avant tout à identifier les structures de réseau dans l'espoir de pouvoir les associer à un type de comportement observé. On y suppose donc qu'il existe un lien causal entre la structure d'un réseau social et le comportement individuel. Mais cela reste à prouver. Il se pourrait que les mâles alpha et bêta acquièrent leur situation non pas grâce à leurs connexions, mais plutôt grâce à des traits individuels.

Comme nous l'avons mentionné, de nombreux outils de la théorie des réseaux émanent des sciences sociales. Il n'est donc pas surprenant que, parmi les premiers sujets d'analyse détaillée de réseaux sociaux animaux, figurent ceux des grands dauphins (*Tursiops truncatus*). On sait en effet depuis des années que ces mammifères marins dotés d'un gros cerveau sont intelligents et très sociaux, comme nous, du moins dans nos bons jours...

Un long suivi de grands dauphins

À la fin des années 1990, le jeune Dijonnais David Lusseau s'est passionné pour les grands dauphins évoluant dans les eaux du magnifique fjord de Doubtful Sound, au sud de la Nouvelle-Zélande. L'endroit est à plus de 320 kilomètres à l'ouest de l'université d'Otago, où le jeune doctorant travaillait sa thèse. Pendant sept ans, David Lusseau a étudié ces superbes mammifères marins. Il les a photographiés, ce qui lui a permis d'identifier méthodiquement les



Palais DÉCOUVERTE

les conférences

au Palais de la découverte Entrée libre dans la limite des places disponibles

À quoi rêvent les scientifiques ?

Les jeudis à 19h

31 mars
L'intelligence artificielle, enfin à notre portée ?
Avec Jean-Paul Delahaye, informaticien

14 avril
Prévoir les tempêtes solaires pour éviter le black-out
Avec Mathieu Barthelemy, astrophysicien.

14 avril
Ressusciter les mammoths, pour quoi faire ?
Avec Régis Debruyne, paléogénéticien

programme complet sur palais-decouverte.fr

VER LE SOUTIEN À LA SCIENCE

marques naturelles caractérisant chacun des 64 dauphins de Doubtful Sound et le bien les suivre.

Après avoir observé plus de 1000 sous-groupes de différentes tailles, représentant les sous-ensembles de ces 64 individus, il en a déduit qu'un vaste réseau social reliait presque tous les dauphins. Il a découvert que les membres du groupe préféraient nettement la compagnie de certains individus, mais il en ignorait la raison. À quoi sert ce réseau et quel type d'informations ou d'avantages en retirent ses membres ?

Afin de pousser plus loin ses investigations, David Lusseau, qui enseigne aujourd'hui à l'université d'Aberdeen en Écosse, a joint ses efforts à ceux de Paulo Simões-Lopes, du laboratoire d'étude des mammifères marins de l'université fédérale de Santa Catarina, au Brésil. Ensemble, les deux éthologues ont étudié une population de 55 grands dauphins qui a développé une extraordinaire collaboration avec des pêcheurs.

Chaque printemps, entre avril et juin, les habitants de la région de Laguna, ville située sur le littoral de l'État de Santa Catarina, pêchent à l'épervier, c'est-à-dire qu'ils lancent à la main des filets circulaires sur l'eau pour attraper les poissons de passage. À Laguna, il s'agit de capturer des mullets (*Mugil platanus*) qui remontent par bancs entiers depuis les fraîches eaux argentines.

Or depuis quelques années, ils bénéficient régulièrement de l'aide de certains des grands dauphins de la lagune. Ces individus poussent les bancs de mullets en direction des pêcheurs, puis, au moment opportun, frappent l'eau d'un coup de tête ou de queue. Ces gestes indiquent aux pêcheurs où jeter le filet, et affolent les mullets : les dauphins en profitent pour en attraper. Ainsi, pêcheurs et dauphins capturent plus de poissons qu'ils ne l'auraient fait sans coopération.

Le groupe de dauphins qui coopère avec les pêcheurs est le plus lié

S'appuyant sur l'expérience néozélandaise de David Lusseau avec les dauphins, les chercheurs ont travaillé à analyser le réseau social à l'origine de ce comportement. Entre 2007 et 2009, ils ont parcouru la lagune munis de photographies des dauphins afin d'identifier ceux qui nagent ensemble. Ils sont ainsi parvenus à suivre 35 des 55 individus de la population. Bien qu'incomplet, cet ensemble de données a clairement montré l'existence d'un réseau social structuré.

Une analyse statistique a révélé que les dauphins de Laguna se répartissent en trois groupes au sein desquels les individus passent la majeure partie de leur temps.

Bien que les dauphins entretiennent des liens ténus avec les membres des autres groupes, ils nagent et interagissent surtout au sein de leur propre groupe. Le tissu d'étroites relations établi y facilite la communication.

Quinze dauphins constituent le groupe 1, dont tous les membres coopèrent avec les pêcheurs. Les chercheurs ont constaté qu'ils sont très connectés : ils interagissent les uns avec les autres tout au long de l'année, notamment pendant la pêche automnale au mullet. La circulation de l'information est donc bonne dans leur groupe, qui tire aussi profit de ses liens avec les pêcheurs.

En revanche, dans le groupe 2, aucun dauphin ne coopère avec les pêcheurs. Bien que les membres de ce groupe aient souvent été vus ensemble pendant la saison de pêche ou en dehors de celle-ci, leurs relations sociales sont plus distendues qu'au sein du groupe 1.

Parmi les 8 dauphins du groupe 3, 7 n'ont jamais coopéré avec les pêcheurs. Un seul – le dauphin numéroté 20 – l'a fait. Cet individu est aussi celui qui, de tous les dauphins de la lagune, a passé le plus de temps à interagir avec les membres des autres groupes. Ainsi, le dauphin 20 a établi un lien entre son groupe et le groupe 1, celui qui coopère avec les pêcheurs (voir l'encadré page 68). Ces observations suggèrent que le réseau très connecté du



LES GRANDS DAUPHINS sont des animaux grégaires capables de beaucoup de coopération, y compris avec l'homme quand un bénéfice mutuel existe.

© ILLUSTRATION DE DAVID LUSSEAU

Le meilleur ami de l'homme est, comme lui, un animal en réseau

La plus belle application des réseaux sociaux se trouve dans la domestication du chien. Son ancêtre, le loup, est un chasseur coopératif de gros gibier et

avons associé deux réseaux sociaux qui se trouvaient déjà au faite de la socialité dans le monde vivant.

L'étude éthologique du chien montre qu'il est en réalité un loup demeuré immature : en sélectionnant les louveteaux puis les chiots, l'homme a obtenu un animal qui obéit à son maître toute sa vie, alors que le jeune loup n'obéit au meneur de la meute que tant qu'il n'est pas adulte.

L'homme est parvenu à cette transformation du loup il y a 30 000 (ordre de grandeur des premiers fossiles de chien) à 50 000 ans. Il est donc clair que le loup est, de loin, le premier animal à avoir été domestiqué.

Les premiers loups qui ont donné le chien étaient-ils des loups commensaux qui suivaient l'homme préhistorique et se nourrissaient de ses restes de chasse, ou plutôt des louveteaux capturés par les chasseurs à la tanière avant

qu'ils ouvrent les yeux ? Je penche pour la deuxième solution, qui implique une plus grande intimité avec l'animal : il s'intègre automatiquement au clan humain de par le phénomène d'imprégnation sociale, bien connu en éthologie et qui explique les photos du célèbre cofondateur de l'éthologie Konrad Lorenz (1903-1989) suivi de ses oies. Les vertébrés qui vivent en groupe social permanent ne connaissent pas leur espèce d'une manière innée et les jeunes considèrent comme leurs parents les êtres vivants qu'ils voient en premier. Dans la nature, c'est leur espèce, mais il est facile de se substituer à elle et de se les attacher.

Ainsi, le chien est bien un loup « dénaturé », en ce sens que la domestication en a fait un éternel adolescent, facile à

soumettre et à intégrer dans le réseau des interactions d'un groupe humain. Une fois élevé, il y travaillera comme chacun, devenant gardien, guide, guerrier, compagnon, etc.

Cette utilité considérable des chiens est bien ce qui explique leur intégration aux clans d'hommes préhistoriques. L'aide à la chasse est sans doute le plus ancien des services rendus par le loup imprégné à l'homme. Étant donné son ouïe et son flair bien supérieur à celui des hommes, un loup intégré à un groupe humain augmentait aussi considérablement sa sécurité, lui évitant d'être surpris par un prédateur ou une bande rivale.

Il devait même, et c'est une découverte que j'ai faite involontairement en élevant une louve, s'engager spontanément pour défendre ce qu'il considérait comme sa horde. Vous pouvez voir sur le site qui porte mon nom en un seul mot une vidéo de notre louve devenue adulte, où elle « sauve » mon épouse qui se baigne en rivière et la ramène sur la berge plusieurs fois de suite !

J'ai aussi pu observer un loup imprégné à l'homme qui défendait son maître contre l'attaque simulée par une tierce personne.

Ainsi, il semble bien que ce soit la tendance instinctive à l'entraide de *Canis lupus* (le loup) qui ait induit sa capacité à « aider » l'homme et, partant, la grande capacité des chiens actuels à travailler pour nous autres humains.

Afin de mieux comprendre ce phénomène familier au point que nous ne voyons plus à quel point le chien est spectaculaire, il importe d'étudier de près l'entraide entre loups. Pour le moment, cela n'a pas été fait ; on n'a pas encore observé dans la nature des cas d'entraide, hormis les séances de chasse collective durant lesquelles les loups agissent en équipe. Gageons que cela ne va pas tarder, de sorte que nous en saurons bientôt plus sur un altruisme animal si puissant qu'il a été capable de passer la barrière des espèces !

– Pierre Jouventin
Directeur de recherche
émérite au CNRS

groupe 1 rend ses membres capables de résoudre un problème qu'ils n'auraient jamais surmonté seuls : communiquer avec des membres d'une autre espèce !

Un dauphin enseignant ?

Paulo Simões-Lopes et David Lusseau ne savent pas encore si des dauphins du groupe 1 – peut-être les plus vieux et les plus expérimentés – enseignent aux autres comment coopérer avec les pêcheurs. Sachant que l'apprentissage de comportements alimentaires complexes existe chez les dauphins, il est vraisemblable qu'il peut s'étendre à une coopération avec des humains. De telles traditions apprises socialement sont à la base de la culture animale et les réseaux sociaux en facilitent grandement la diffusion.

BIBLIOGRAPHIE

A. J. Edelman et D. B. McDonald, Structure of male cooperation networks at long-tailed manakin leks, *Animal Behavior*, vol. 92, pp. 125-133, 2014.

G. Daura-Jorge et al., The structure of a bottlenose dolphin society is coupled to a unique foraging cooperation with artisanal fishermen, *Biology Letters*, vol. 8(5), pp. 702-705, 2012.

J. C. Flack et al., Policing stabilizes construction of social niches in Primates, *Nature*, vol. 439, pp. 426-429, 2006.

Notre attitude à l'égard des animaux a beaucoup évolué depuis l'époque où l'on considérait nos « amis les bêtes » seulement comme des robots ou des automates ne faisant qu'exécuter un programme génétique. On sait aujourd'hui que beaucoup d'animaux sont plus intelligents, plus flexibles dans leur comportement et bien plus capables d'apprentissage qu'on ne le pensait dans le passé.

Selon nous, l'étude des réseaux animaux et un partage accru de ses résultats feront encore évoluer notre regard. Loin d'être des automates programmés, de très nombreux animaux passent leur vie au sein de milieux sociaux complexes, où les interactions directes et indirectes avec les autres produisent de denses réseaux de relations, qui déterminent la survie et la réussite de chacun. Comme pour nous !

ÉMILE DUCLAUX

physicien, pastorien
et dreyfusard

Christine Moissinac

Dans le sillage de Pasteur, un jeune Auvergnat, physicien et chimiste, devient à la fin du XIX^e siècle un pilier de la microbiologie naissante. Fort de son autorité en sciences, il s'implique en tant que citoyen pour défendre la vérité, la justice, l'accès au savoir et l'hygiène sociale.

L'ESSENTIEL

Elève de Louis Pasteur à l'Ecole normale supérieure, Émile Duclaux devient l'un de ses plus proches collaborateurs.

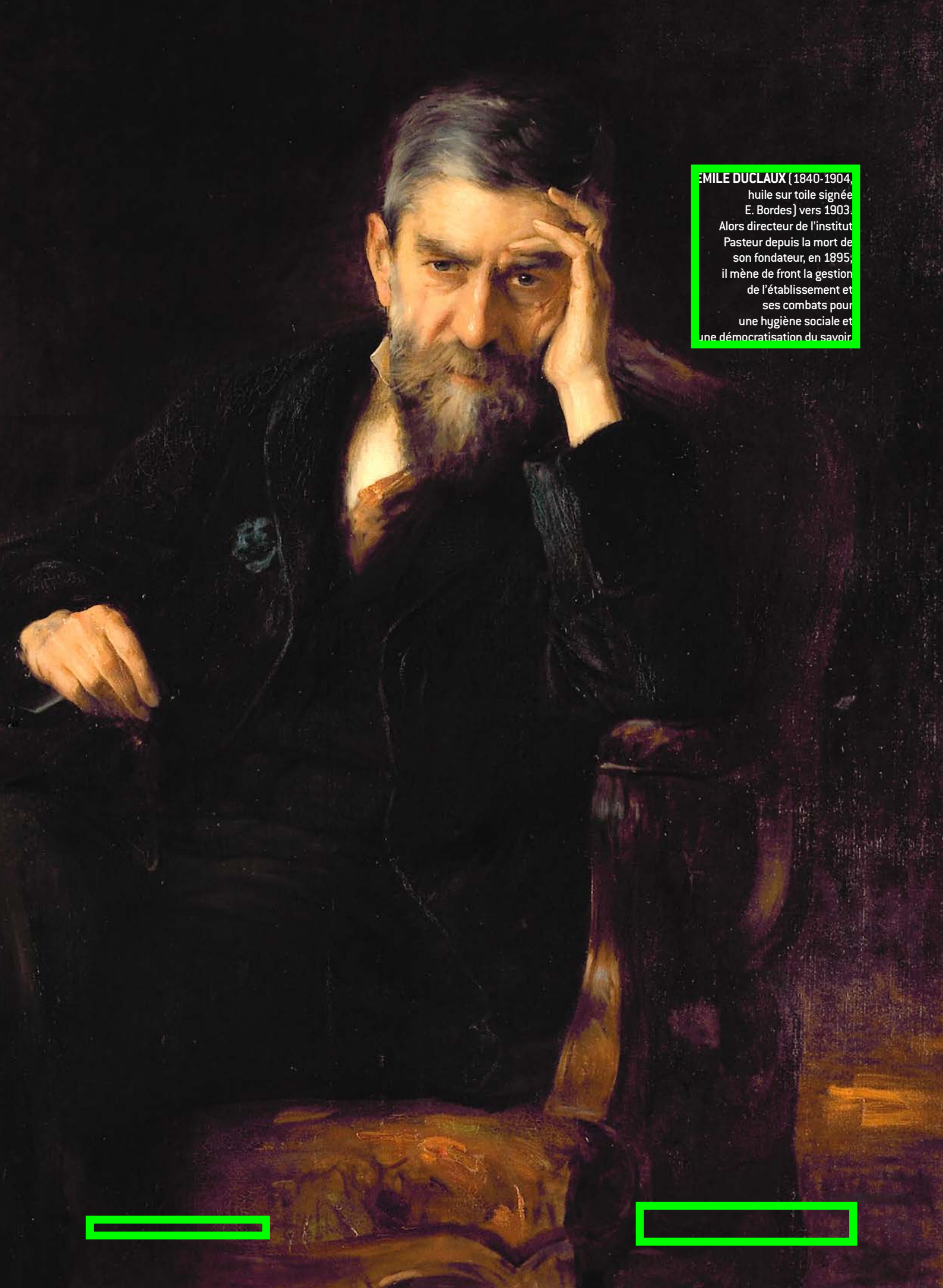
Avec Pasteur, il se prend de passion pour l'étude des microbes – la toute nouvelle microbiologie – et fonde l'institut Pasteur.

Reconnu et apprécié de ses pairs, il s'engage publiquement pour défendre les droits de l'homme et une hygiène sociale fondée sur la prévention et l'éducation.

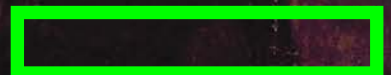
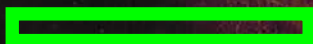
Je reste intellectuel. Ainsi se termine le manifeste publié par Emile Duclaux en réponse à une attaque violente du journaliste Ferdinand Brunotière, parue le 15 mars 1898 dans le très anti-dreyfusard *Revue des deux Mondes*. Le journaliste y accuse savants, linguistes, juristes et autres gens de laboratoire ou de plume de s'immiscer dans des débats politiques sans en avoir la compétence. Le 19 mars, Duclaux signe dans le quotidien dreyfusard *Le Siècle* un vibrant plaidoyer pour leur défense, rappelant leur rôle de veilleurs, chacun des membres de la société civile ayant le droit de s'engager en conscience et de prendre part aux débats qui l'agitent. Il en profite pour donner une leçon de méthode, de vérité et de démocratie à celui qui accuse les intellectuels d'inciter à l'individualisme personnel et au désordre social.

Rien jusque-là ne laissait penser que Duclaux s'impliquerait dans des questions de politique et de société. Physicien et chimiste auvergnat dans l'ombre de Louis Pasteur, Duclaux avait pour seule ambition, comme lui, de servir la science et son pays, les honneurs ne l'intéressant que s'ils pouvaient faciliter le travail de son équipe. Mais si l'on creuse son histoire, on s'aperçoit que l'homme fut bien plus que le fidèle disciple de Pasteur, et que toute sa vie, le savant et le citoyen n'ont jamais été très éloignés l'un de l'autre.

Accueillie avec enthousiasme dans les milieux dreyfusards et spécialement par l'élite scientifique, la prise de position de Duclaux en mars 1898 le fait



EMILE DUCLAUX (1840-1904,
huile sur toile signée
E. Bordes) vers 1903.
Alors directeur de l'institut
Pasteur depuis la mort de
son fondateur, en 1895,
il mène de front la gestion
de l'établissement et
ses combats pour
une hygiène sociale et
une démocratisation du savoir.



apparaître comme l'un des porte-parole les plus en vue de cette force nouvelle que sont les intellectuels. Le terme est apparu quelques semaines auparavant sous la plume de Georges Clemenceau, alors rédacteur au quotidien *L'Aurore*. Le 13 janvier, dans le même journal, Émile Zola avait dénoncé par son fameux « J'accuse » toutes les irrégularités entachant la condamnation du capitaine Dreyfus. Au lendemain du procès que les autorités militaires avaient intenté contre l'écrivain, accusé d'atteinte à l'ordre public, Clemenceau, indigné, avait pris appui sur la réaction des « intellectuels » : « N'est-ce pas un signe, tous ces intellectuels, venus de tous les coins de l'horizon, qui se groupent sur une idée et s'y tiennent inébranlables ? »

La science au secours de Dreyfus

De fait, depuis quelques mois, la presse et la société civile s'étaient enflammées : s'affrontaient l'« honneur de la patrie », que défendaient les militaires, et la vérité judiciaire appelée par les « intellectuels ». Fin 1897, ce qui deviendrait l'Affaire avait connu un rebondissement provoqué par la découverte du capitaine Picquart, chef des renseignements militaires : il avait obtenu la preuve que les pièces ayant servi en 1894 à l'accusation de Dreyfus avaient été falsifiées. Déjà, certaines autorités civiles, sous l'influence de la famille et de plusieurs journalistes, avaient des doutes. Parmi elles, Auguste Scheurer-Kestner, vice-président du Sénat, était convaincu de l'innocence du condamné. Il avait alerté le président de la République, puis le ministre de la Guerre, mais n'ayant été entendu ni de l'un ni de l'autre, il avait décidé, en janvier 1898, de porter le débat dans d'autres milieux, hors du monde politique et à l'écart des autorités militaires. Il voulait mobiliser une personnalité scientifique incontournable. Ayant demandé conseil à Paul Appell, alors doyen de la faculté des sciences de Paris, il avait choisi de s'adresser à Duclaux.

Ce dernier occupait en effet une place centrale dans cet univers de la science, à plusieurs titres. Dans le sillage de Pasteur, il avait participé activement à la création de l'institut du même nom. Il en était à présent le directeur reconnu et apprécié :

L'AUTEURE



Christine MOISSINAC, historienne de formation, effectue des recherches en histoire des sciences et des techniques.

« C'est précisément parce que la science

n'est sûre de rien qu'elle avance »

Émile Duclaux

en même temps, titulaire de la chaire de chimie biologique à la faculté, il assurait un cours de météorologie dans le jeune Institut agronomique au sein duquel il dirigeait un laboratoire renommé ; publiant des ouvrages de référence, il était devenu le héraut de la microbiologie, cette nouvelle science dont il était l'un des acteurs les plus avertis, car ces jeunes scientifiques, médecins, chimistes ou biologistes, venus à l'institut Pasteur, puis partis en Europe ou dans d'autres continents, restaient en étroite liaison avec lui. Membre de l'Académie des sciences et de l'Académie de médecine, Duclaux était écouté aussi bien de ses pairs que de ses élèves et ses correspondants. C'était donc au savant que Scheurer-Kestner s'était adressé, et c'était à ce titre que Duclaux lui avait répondu le 8 janvier :

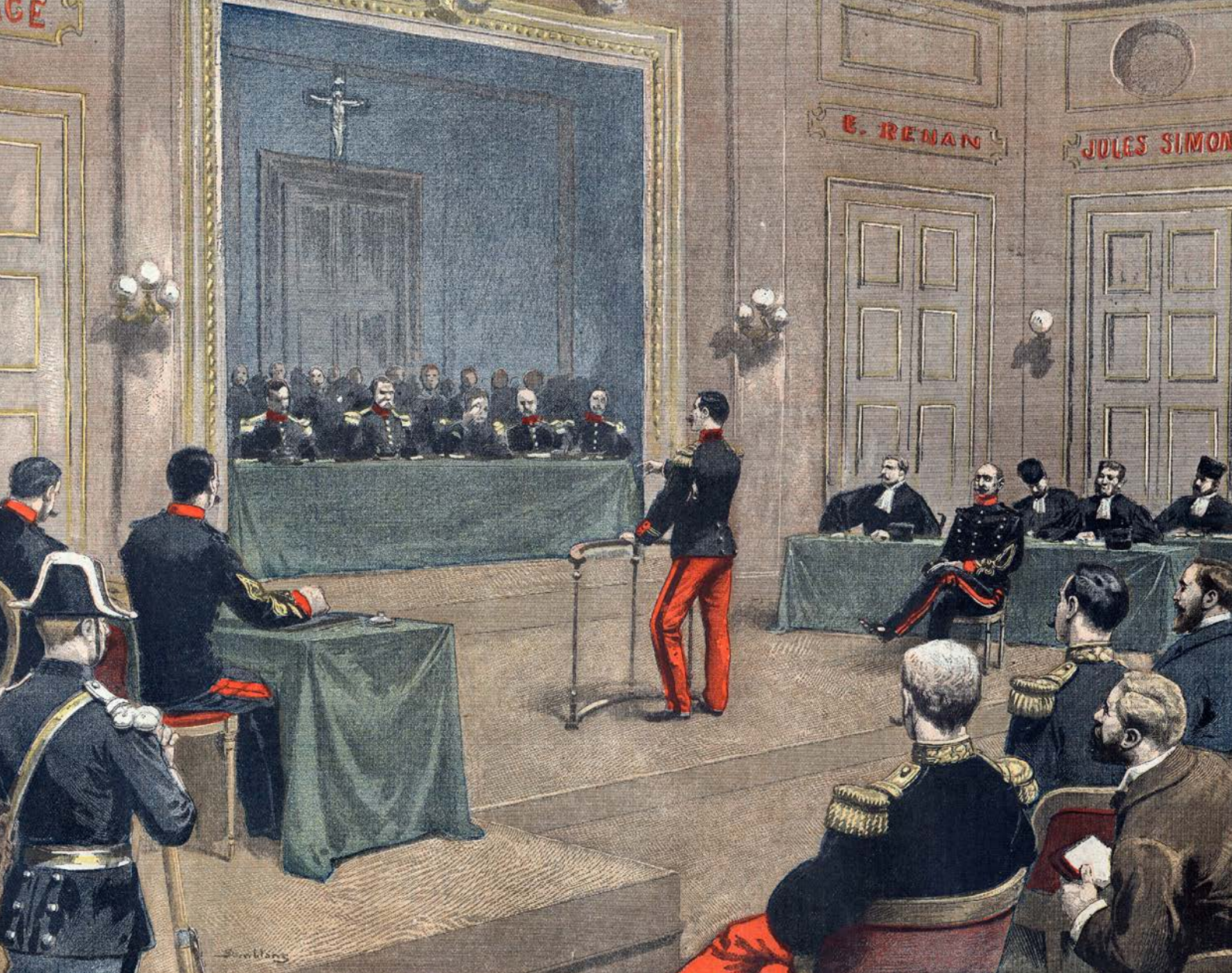
Vous avez bien voulu me demander ce que je pense, comme savant, de l'acte d'accusation porté contre le capitaine Dreyfus, tel qu'il a paru hier dans les journaux. Je pense tout simplement que si, dans les questions scientifiques que nous avons à résoudre, nous dirigeons notre instruction comme elle semble l'avoir été dans cette affaire, ce serait bien par hasard que nous arriverions à la vérité.

Dans cette lettre comme dans les articles qu'il avait publiés les jours suivants, Duclaux avait dénoncé avec son ironie habituelle ce qu'il considérait comme des imprudences, des approximations et des fautes de procédure :

Nous avons des règles tout autres, qui nous viennent de Bacon et de Descartes : garder notre sang-froid, ne pas nous mettre dans une cave pour y voir plus clair, croire que les probabilités ne comptent pas et que cent incertitudes ne valent pas une certitude.

Ce texte, largement diffusé, plaça Duclaux au cœur des débats du moment et le fit entrer, lui qui avait mené jusqu'alors une vie sévère et studieuse de savant et d'enseignant, dans un univers nouveau où la parole publique devenait acte de citoyenneté.

Revenons en effet sur son passé. Voilà un jeune Aurillacois, né en 1840, dont le père a été commerçant en Espagne. Ses études ont été suffisamment brillantes pour l'amener à Paris préparer des grandes écoles. Reçu deux ans après à l'École polytechnique et à l'École normale supérieure, il a choisi cette dernière.



Grâce au directeur de la pension qui l'a hébergé, Émile a déjà côtoyé Louis Pasteur, alors l'intransigent directeur des études à l'École normale. Cette rencontre est décisive. Dix-huit ans séparent les deux hommes, mais leur profil est le même : venus d'une lointaine province, ils ont été élevés avec les mêmes valeurs – l'attachement à la famille et le respect de l'effort, de la constance, du travail et de la science – et leurs pères se sont investis dans leurs études.

Très jeune, Duclaux s'est senti attiré par la recherche ; il a raconté avec émotion comment, grâce à un professeur, Émile Appert, il avait vu s'enrichir le modeste cabinet de physique du collège d'Aurillac, avec l'arrivée de deux caisses de ballons et de pipettes. Aussi, quand Pasteur lui ouvre son petit et malcommode laboratoire au sein de l'École normale, pendant les trois années d'études qui le mènent à l'agrégation puis à la thèse, consacrée à la chimie

de la fermentation alcoolique, il suit avec passion les travaux de celui qu'il considère dorénavant comme son maître.

En 1862, il devient l'un des cinq préparateurs de Pasteur. Le titre et le poste sont nouveaux, inventés par ce dernier qui voulait retarder le départ en province des jeunes thésards intéressés par la recherche, mais obligés d'aller enseigner loin de Paris. De cette époque, Duclaux garde un souvenir ému, évoquant souvent cette « bienheureuse préparation ». Ces années de travail intensif et d'apprentissage des méthodes d'expérimentation sont fondatrices pour lui : il connaît les exigences et les joies de la recherche.

Mais après sa soutenance de thèse, en 1865, Duclaux est nommé professeur de physique dans un collège à Tours. Déçu, il obtient six mois plus tard un poste à la faculté des sciences de Clermont-Ferrand, mais seulement comme suppléant. Cependant,

LE CAPITAINE DREYFUS eut droit à un second procès en août 1899, qui atténua sa condamnation à dix ans de prison. Une bien piètre consolation pour Émile Zola, Émile Duclaux et les autres dreyfusards. Dreyfus ne fut innocenté qu'en 1906, deux ans après la mort de Duclaux.

es rapports avec celui qu'il supplée ne sont pas simples. Pharmacien et chimiste, Hector Aubergier a mis au point un antidouleur et un sédatif dont la commercialisation lui apporte de grandes facilités financières. Il a créé de ses propres deniers la faculté des sciences de la ville, ce qui, pense-t-il, lui donne le droit de ne pas ménager son suppléant. S'ensuivent altercations orales et écrites qui déstabilisent Duclaux.

Heureusement, Pasteur, averti des difficultés de son ancien préparateur, le débâche pour le faire participer à plusieurs de ses travaux. Pasteur est un savant atypique. D'abord parce qu'il s'est intéressé à la cristallographie, un sujet considéré comme particulièrement difficile. Ensuite parce qu'il est parvenu, en 1863, à clore le débat sur la génération spontanée (l'idée que la vie naît de la matière inanimée) en mettant en évidence les « infiniment petits » à l'origine des fermentations. Enfin parce qu'il s'intéresse toujours, depuis son passage à la faculté de Lille et ses expériences pour maintenir la qualité des bières locales, aux

applications possibles des recherches qu'il mène. Toute sa vie, il aura cette volonté de rapprocher science pure et effets pratiques, et Duclaux a la même attitude.

En campagne avec Pasteur

Le dernier est alors entraîné dans différentes campagnes. Les premières, de l'été 1863 et jusqu'en 1865, ont lieu à Arbois, la patrie de Pasteur et le fief du vin jaune du Jura. Installée dans un ancien café, l'équipe vit dans des conditions précaires. Pour contrôler la fermentation du vin et assurer sa qualité, Pasteur préconise un léger réchauffement – le terme de pasteurisation apparaît pour la première fois –, mais l'idée laisse les vignerons dubitatifs. De 1866 à 1870, d'autres campagnes, dans le Gard cette fois, visent à lutter contre les deux épidémies qui déciment les vers à soie, la pébrine et la flacherie. Pourtant, ni Pasteur ni Duclaux ne connaissent le sujet. Décelant le caractère épidémique, les deux hommes concluent à la nécessité d'assurer

à tous les vers un isolement strict et d'analyser chaque femelle, afin de décider de la conservation ou non de sa ponte.

En 1870, la défaite de la France, puis la Commune laissent Pasteur désespéré. Duclaux l'accueille alors à Clermont-Ferrand et tous deux s'attachent à améliorer la bière d'une brasserie voisine que Pasteur, par patriotisme, nomme la bière de la Revanche. Enfin, à nouveau dans les départements du sud, Duclaux participe à une campagne sur la maladie de la vigne provoquée par le phylloxera, un insecte parasite. Dans ces dernières campagnes, il se révèle beaucoup plus qu'un simple assistant. L'analyse des cahiers d'expériences montre qu'il a joué un rôle moteur.

En même temps, entraîné par l'exemple et le goût du terrain, il ouvre un nouveau champ de recherche sur le lait et les maladies des fromages. C'est une façon aussi de renouer avec ses origines rurales : chaque été, à partir de 1877, et jusqu'en 1890, il travaille d'arrache-pied dans un modeste laboratoire de campagne près d'Aurillac, que lui finance

Toutes les archives

- Pour la Science
- Dossier Pour la Science

depuis

1996



Disponibles sur www.pourlascience.fr*

Peu de moyens et beaucoup de patience

■ tant donné un fromage quelconque, comment trouver

■ et séparer les espèces vivantes qui y sont présentes ?

■ Pour Émile Duclaux, il était évident que les ferments

et identifier les êtres microscopiques impliqués était une priorité.

Il mit donc une méthode au point dans sa petite station laitière

du Cantal, qu'il consigna ainsi dans un article paru en 1880 :

« On commence par préparer un certain nombre de matras en vases de verre à col long et [étroit] renfermant le lait naturel ou mélangé d'un peu de carbonate de chaux de façon à lui assurer au besoin une alcalinité permanente. Ces matras dont le col a été étiré et fermé à la lampe sont portés avec leur contenu à 100 °C pour être débarrassés de tous les germes qu'ils pourraient renfermer.

Les choses étant ainsi disposées, on prend le fromage qu'il s'agit d'étudier et à l'aide d'un couteau dont la lame a été

récemment flambée, on enlève une tranche mince parallèle à la surface, puis aussitôt après, on fait une section perpendiculaire à cette surface. Dans le milieu de la tranche ainsi obtenue, on enfonce à l'aide d'une pince un fil de platine dont on a rendu la surface un peu rugueuse au moyen de quelques coups de lime et qu'on vient de flamber.

Ce fil enlève quand on le retire de petits fragments de matière. On l'introduit aussitôt dans un des matras dont on a coupé le cou après avoir chauffé la surface où on applique le trait

de la lame. On referme immédiatement l'ouverture avec un caoutchouc sortant de l'eau bouillante que l'on coiffe avec un tube de verre ouvert par ses deux bouts, renfermant un échantillon d'ouate et récemment porté à une température suffisante pour le débarrasser de tous ses germes vivants. On met le matras à l'étude et on attend.

Généralement, les quelques particules de fromage que le fil de platine a apportées dans le matras renferment plusieurs germes qui se développent mais à des vitesses différentes, dépendant pour chacune des conditions de milieu et de température. L'un d'eux est presque toujours en avance sur les autres, et dès lors, en prélevant dans ce premier milieu de culture une prise d'essai pour l'ensemencer dans un autre matras placé dans les mêmes

conditions que le premier, et en recommençant une troisième, une quatrième fois l'opération, on peut arriver à séparer l'espèce qui se développe le plus facilement.

On ne pourra toutefois la considérer comme pure que lorsqu'elle se reproduira identique à elle-même dans une série de cultures conduites comme je viens de le dire avec cette condition nouvelle qu'on prélèvera les semences non plus dans les matras récemment ensemencés mais dans des fermentations touchant à leur fin. S'il y avait mélange des espèces, c'est en opérant ainsi qu'il serait le plus facile de s'en apercevoir. »

Des matras, un couteau, un fil de platine, une pince, de l'ouate, une source de chaleur...

et beaucoup de patience !

C. M.

le ministère de l'Agriculture. De ces travaux, il tire un livre de référence qu'il complète les années suivantes.

Duclaux a en effet le sens de l'écriture et de la synthèse. Durant toutes ces années 1866-1878, à Clermont-Ferrand puis à Lyon à partir de 1873, cette fois comme titulaire de la chaire de physique-chimie, il écrit et ses publications font date. Elles portent principalement sur les fermentations, les épidémies et tous ces organismes — bactéries, bactériodites, protozoaires... — dont la dénomination n'est pas fixée, mais rassemblés sous le nom de « microbes » en 1878 à la suite d'une communication du médecin militaire Charles Sédillot à l'Académie des sciences.

Le triomphe de la microbiologie

Le retour à Paris en 1878 se fait alors en deux étapes. Sur concours, Duclaux obtient la charge d'un premier cours sur la météorologie à l'Institut national agronomique. Quelques semaines plus tard, on lui confie à la faculté des sciences un cours sur les fermentations. En principe provisoire, il

lui permet pourtant d'obtenir un poste de maître de conférences en 1879 et de devenir titulaire de chaire six ans après.

Depuis son retour à Paris, Duclaux suit quotidiennement les travaux de Pasteur et de son équipe. Il participe même activement à certains, telle la recherche sur le choléra des poules. Les travaux de Pasteur et des jeunes scientifiques dont il s'est entouré ont abouti à une conclusion brève, mais au potentiel révolutionnaire : « Toute maladie infectieuse est causée par un germe et à chacune correspond un germe particulier. » Leurs premiers résultats suscitent admiration et enthousiasme, car ils permettent de protéger le bétail, que décime une épidémie de charbon : en cultivant le germe de la maladie dans des conditions atténuant sa virulence, l'équipe produit un vaccin qui éradique presque complètement la mortalité des troupeaux de bovins. Et en 1885, Pasteur sauve un enfant mordu par un chien enragé en appliquant une méthode similaire. C'est l'apothéose, entraînant une demande exponentielle de vaccination et justifiant le projet d'un institut consacré à l'application de ces recherches, auquel Pasteur pense depuis plusieurs années. D'autant que d'autres

chercheurs dans des conditions d'asepsie et de propreté rigoureuses, relève d'une conception très nouvelle pour l'époque.

Rien ne pouvait, pensait-il, troubler sa vie de grand travailleur, consacrée à ses nombreuses tâches et à ses deux enfants, dont il a la charge depuis le décès de sa femme en 1880... Jusqu'au jour où le séisme de l'affaire Dreyfus l'entraîne dans une société qu'il a peu fréquentée, celle des hommes de lettres, juristes, journalistes, avocats. Les six mois de janvier à juin 1898 bouleversent sa vie.

Pour une hygiène sociale

Le déclencheur est sa réponse à Scheurer-Kestner, le 8 janvier 1898. Quelques jours plus tard, le 19, avec Zola et Anatole France, Duclaux signe une pétition qui portera son nom, adressée aux milieux universitaires et scientifiques. Appelé comme témoin au procès Zola, Duclaux assiste à la condamnation de l'écrivain. Il se lance alors dans une série d'articles où il dénonce à son tour les dysfonctionnements de la justice. L'avocat Zola l'appelle pour créer une association de défense des droits de l'homme et du citoyen. Le 6 juin 1898, ils sont dix à se réunir. Après avoir lu la Déclaration des droits de l'homme et du citoyen de 1789, dans une ambiance enthousiaste, la Ligue est créée et Duclaux en est élu vice-président.

À lire tous les témoignages, la mouvance dont Duclaux fait désormais partie est animée d'une volonté de justice et d'un esprit citoyen; active, solidaire et chaleureuse, elle le conduit à renouveler son investissement dans ce qui a toujours été au centre de sa vie, le partage des savoirs. Dès les premiers jours, il rejoint le grand mouvement des universités populaires, né en 1898, participe à la vie de celle sise rue Mouffetard, à Paris, et défend la Ligue lors de séances nocturnes ouvertes au public. Plus étonnant encore, il devient directeur d'une institution, l'École des hautes études sociales fondée par Dick May, une dreyfusarde convaincue qui convie enseignants, formateurs, journalistes, artistes et toutes autres bonnes volontés à aborder librement les problèmes de la société.

En 1900, l'institut Pasteur fonctionnant au mieux, Duclaux s'intéresse aux maladies qu'il qualifie de « sociales », définies comme largement répandues et souvent de très longue durée, telles la tuberculose, la syphilis et une maladie professionnelle des mineurs. Difficiles à identifier, elles

sont aussi difficiles à juguler. Au moment où la loi sur les accidents de travail vient d'être enfin promulguée en 1898 – celle sur les maladies professionnelles ne le sera qu'en 1919 –, cette hygiène « sociale » déborde largement l'hygiène publique traditionnelle, un ensemble de règles établies pour protéger la santé de tous, dont l'État est le seul ordonnateur et le gardien. L'hygiène sociale de Duclaux s'appuie principalement sur deux idées révolutionnaires pour l'époque: d'un côté la prévention systématique des risques auxquels sont exposés un groupe social ou une population spécifique et, de l'autre, l'éducation, l'information et l'appel aux plus directement concernés, pour trouver avec eux des solutions applicables et acceptables.

Une dernière campagne, enfin: appelé par les municipalités de Paris et d'Aurillac à propos des eaux offertes à la consommation, Duclaux préconise un programme à la fois de prévention municipale, avec des investissements à la clé, et une large information des habitants. Ce sont là ses derniers travaux, sa mort survenant brutalement le 2 mai 1904.

Ne voir en Duclaux que le fidèle disciple de Pasteur est réducteur. Universitaire engagé avec ferveur dans ses tâches d'enseignant et de chercheur participant à l'exploration de la microbiologie, il a été l'un des piliers de la création de l'institut Pasteur, puis l'âme appréciée de la communauté scientifique qui s'est construite autour. Interpellé lors de l'Affaire Dreyfus, il a pris parti, comme il l'a toujours fait, pour une recherche rigoureuse de la vérité. Projeté en pleine lumière, cet intellectuel revendiquant fièrement ce statut a montré la force de la méthode scientifique et le pouvoir du savoir. Citoyen militant, il s'est investi pour l'accès à la science du plus grand nombre et a préconisé une hygiène sociale respectueuse de la parole des malades.

Duclaux, une figure du passé? Non, bien au contraire, une figure d'actualité dans la mesure où son combat en faveur de l'hygiène sociale, qu'il place moins sur le terrain médical que sur le terrain social et politique, rejoint nos débats sur l'environnement, la pollution, la détection et la lutte contre les maladies transmissibles. Sa façon très nouvelle pour l'époque de mettre à priorité sur la prévention reste une des règles intangibles de notre temps, de même que l'information de tous et l'appel aux responsabilités de chacun. ■

À ÉCOUTER

Le jeudi 7 avril 2016, de 16 h à 17 h, Christine Moissinac reviendra sur la vie d'Émile Duclaux dans l'émission **La marche des sciences**, sur France Culture. www.franceculture.com

BIBLIOGRAPHIE

C. Moissinac, *Émile Duclaux. De Pasteur à Dreyfus*, Hermann, 2015.

Pasteur, microbes et controverses, *Les Génies de la Science*, n° 33, novembre 2007.

Adoucir son comportement ou le durcir

Les simulations des diverses stratégies qu'il est possible d'adopter dans le « dilemme itéré du prisonnier » indiquent que, dans les grands ensembles sociaux, il est préférable d'être coopératif, surtout au début.

Jean-Paul DELAHAYE et Philippe MATHIEU

Le « dilemme itéré du prisonnier » est un modèle mathématique permettant d'évaluer les choix stratégiques envisageables dans le monde social, politique ou économique.

Nous conseillons sur l'attitude à adopter face à un éventuel associé susceptible de comportements soit coopératifs [organiser un covoiturage, mener des travaux en commun, s'échanger des outils, etc.], soit agressifs [se bousculer pour passer le premier, exercer une concurrence commerciale, se disputer un bien, etc.].

Trop simple pour modéliser toute la complexité des interactions entre associés, ce dilemme autorise cependant une étude par simulation informatique, qui enrichit notre compréhension et dont les résultats contredisent souvent l'intuition. Une conclusion tirée des simulations de grands ensembles d'individus jouant à ce jeu est qu'il vaut mieux être coopératif qu'agressif. C'est un peu vague et, d'ailleurs, ce n'est pas vrai de façon absolue : la stratégie la plus coopérative ne réussit pas très bien. Une analyse plus fine est nécessaire pour savoir quand et comment la coopération est souhaitable.

La méthode que nous avons utilisée est celle des « transformations d'ensembles massifs de stratégies ». Elle consiste à définir des procédés généraux qui modifient légèrement tous les éléments d'un grand ensemble de stratégies en les rendant plus coopératives ou plus agressives. Puis nous mesurons l'effet de ces transformations à l'aide de confrontations généralisées entre stratégies dans des arènes évolutives

variées. Les résultats obtenus sont étonnamment stables et indiquent les transformations bénéfiques ou pénalisantes.

Pour commencer, explicitons ce qu'est le dilemme du prisonnier. Deux entités sont soumises à ce « jeu » si chacune doit choisir entre coopérer (c) et trahir (t). Elles sont rétribuées par R points si chacune joue c, par P points si chacune joue t, et reçoivent respectivement T et S points si l'une joue t et l'autre c. On écrit cela : $[c, c] \rightarrow R+R$, $[t, t] \rightarrow P+P$ et $[t, c] \rightarrow T+S$. Les valeurs classiques sont $T=5$, $R=3$, $P=1$, $S=0$.

Coopérer ou trahir ?

L'expression « dilemme du prisonnier » se rapporte à un récit imaginaire. On arrête deux suspects armés devant une banque. Un interrogateur essaie d'établir qu'ils étaient sur le point de mener une attaque. Si l'un avoue, c'est-à-dire trahit son complice, et l'autre n'avoue pas et ne dénonce pas son complice, la situation notée $[t, c]$, celui qui avoue est libéré (rétribution de $T=5$ années de remise de peine), celui qui n'a pas avoué va en prison 5 ans (rétribution nulle, $S=0$, il écope du maximum prévu pour le délit). Si les deux

complices restent solidaires, $[c, c]$, ils vont 2 ans en prison chacun pour port illégal d'armes (remise de $R=3$ années de liberté par rapport aux 5 ans du pire cas). Si les deux bandits avouent, $[t, t]$, ils vont chacun 4 ans en prison (remise de peine d'une année pour les remerciements de leurs aveux, $P=1$).

Un comportement rationnel conduit à la trahison, qui produit un meilleur résultat que la coopération. En effet, si l'autre entité coopère, j'obtiens 5 points en trahissant (t) et seulement 3 points en coopérant (c) ; si l'autre entité trahit, j'obtiens 1 point en trahissant (t) et 0 en coopérant (c). Autrement dit, le choix t est toujours meilleur que le choix c. On parle de dilemme, car les complices emportent à eux deux 6 points en jouant $[c, c]$ alors qu'ils en gagnent moins en jouant $[c, t]$ et encore moins en jouant $[t, t]$. L'intérêt collectif est de jouer $[c, c]$, mais une analyse individuelle conduit à $[t, t]$ qui est, collectivement, le pire cas !

Le dilemme est dit itéré quand la situation du choix est répétée. Jouer consiste alors à choisir une stratégie qui, compte tenu du passé, indique comment jouer le coup suivant. La méthode la plus simple pour comparer des stratégies consiste à organiser des tournois. Chaque stratégie qui y participe rencontre chaque autre (par exemple dans un face-à-face comportant 10 étapes) et cumule les points gagnés à chaque étape lors de chaque rencontre. On classe alors les stratégies ayant participé en fonction du total des points récoltés (voir les encadrés pages 81 et 82-83).

À côté du classement des stratégies par les tournois, il existe des méthodes de tests



plus subtiles auxquelles ne réussissent que les stratégies robustes. Les « compétitions écologiques » consistent ainsi à mettre plusieurs exemplaires de chaque stratégie à tester dans une arène virtuelle où l'on organise un tournoi. Selon les points gagnés dans ce tournoi, on fait évoluer les effectifs des stratégies, ce qui définit une seconde génération : le nouvel effectif d'une stratégie est proportionnel à la fois à l'effectif initial et au nombre de points gagnés dans le tournoi par chaque exemplaire de la stratégie. Par la même méthode, on obtient une troisième génération, et ainsi de suite. On maintient l'effectif total constant.

Les stratégies gagnantes sont celles dont les effectifs deviennent les plus grands. Leurs bons classements ont donc une signification plus profonde que celui tiré d'un simple tournoi. Les conclusions classiques sur le dilemme itéré sont les suivantes :

— Il n'y a pas de stratégies surclassant toutes les autres, mais certaines sont mauvaises dans pratiquement tous les environnements possibles (aussi bien en tournoi qu'en compétition écologique), alors que d'autres réussissent assez bien dans des environnements variés. C'est le cas de la célèbre stratégie *Donnant-donnant* qui coopère au premier coup, puis choisit au coup n ce qu'a choisi son adversaire au coup $n - 1$.

— Les stratégies efficaces ont souvent des caractéristiques suivantes : a) elles sont réactives : elles répondent quand on les trahit, comme le fait *Donnant-donnant* ; b) elles ne prennent pas le risque de trahir : elles commencent par coopérer et, face à un adversaire qui coopère, elles ne trahissent pas ; c) elles savent être indulgentes : après une trahison de l'adversaire, elles finissent par pardonner pour renouer la coopération.

Les compétitions écologiques confirment fréquemment les résultats obtenus en tournoi, mais en amplifient les contrastes. On y observe de plus un phénomène étonnant : sauf dans de très rares cas, l'arène initiale ne contient que des stratégies qui ne prennent jamais l'initiative de trahir. Après quelques générations, l'arène est donc occupée par des stratégies qui ne jouent entre elles que des coups [c, c]. L'arène se trouve alors dans un état de

Face-à-face, tournoi, compétition écologique

FACE-À-FACE. La stratégie *Donnant-donnant* commence par coopérer, puis joue au coup n ce que l'adversaire a joué au coup $n - 1$. La stratégie *Per-cct* joue périodiquement c, c, t, c, c, t... (c = coopère, t = trahit).

Leur face-à-face dans une rencontre en 10 étapes donne :

<i>Donnant-donnant</i>	c c c t c c t c c t
Points gagnés	3 3 0 5 3 0 5 3 0 5 → 27
<i>Per-cct</i>	c c t c c t c c t c
Points gagnés	3 3 5 0 3 5 0 3 5 0 → 27

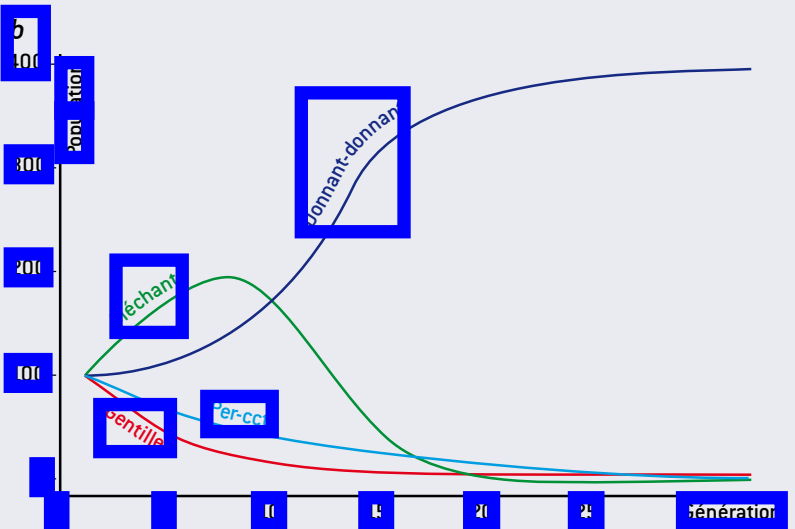
À la première étape, *Donnant-donnant* et *Per-cct* coopèrent, [c, c], et chacune gagne 3 points d'après les règles de rétribution [c, c] → 3 + 3, [t, t] → 1 + 1, [t, c] → 5 + 0. À la seconde étape est à nouveau [c, c], à la troisième [c, t], etc., ce qui conduit, après 10 étapes de face-à-face, à 27 points pour *Donnant-donnant* et autant pour *Per-cct*.

TOURNOI. Dans cette situation, chaque stratégie joue contre chaque autre, y compris elle-même, et on compte les points gagnés. On en tire un classement (a). La stratégie *Méchante* (qui trahit à chaque coup) est gagnante. La moins

bonne est *Gentille* (qui coopère toujours).

COMPÉTITION ÉCOLOGIQUE. Partant d'une arène de 100 exemplaires de chaque stratégie (100 *Gentille*, 100 *Méchante*, etc.), arène appelée génération 1, on calcule une génération 2 en fixant pour chaque stratégie un effectif proportionnel au nombre de points qu'elle a gagnés lors d'un tournoi entre les stratégies de la génération 1 : les meilleures stratégies ont le plus grandes « descendances ». Le total des effectifs est maintenu à 400. On calcule de la même façon une génération 3 à partir de la génération 2, etc. On observe sur les courbes d'effectifs (b) que *Donnant-donnant* s'impose magistralement alors que *Méchante* (gagnante du tournoi), après une période de croissance, se fait éliminer. *Donnant-donnant* est la meilleure des quatre stratégies : elle est la seule à survivre avec un petit nombre de *Gentille*. Pour gagner à long terme, être vainqueur du tournoi ne suffit pas ; si votre force provient de l'exploitation des faibles, dès qu'ils seront éliminés, vous perdrez.

	<i>Gentille</i>	<i>Méchante</i>	<i>Donnant-d</i>	<i>Per-cct</i>	Total ligne
<i>Gentille</i>	30	0	30	21	81
<i>Méchante</i>	50	5	14	38	107
<i>Donnant-d</i>	30	30	30	27	96
<i>Per-cct</i>	38	30	27	22	90



Rendez-vous

stratégies à la fois SA et SC, par exemple la stratégie *Périodique-cct*.

Que découvre-t-on en considérant les 17 stratégies de l'encadré ci-dessous ? La simulation se fait avec des rencontres en face-à-face de 1 000 étapes et en utilisant les valeurs classiques $T=5, R=3, P=1, S=0$. Lors de la rencontre en tournoi, les stratégies SA gagnent en moyenne ; viennent ensuite les SC, puis les IA et, enfin, les IC : $SA > SC > IA > IC$.

Cet ordre suggère que coopérer initialement n'est pas une bonne idée. Cependant, la méthode du tournoi autorise une stratégie agressive, telle *Méchante*, à exploiter les stratégies coopératives et non réactives comme *Gentille* (voir l'encadré page 81). Or dans une arène évolutive, les *Gentille* se font rapidement éliminer, ce qui entraîne l'élimination des *Méchante* qui les exploitaient.

Le classement obtenu lors de la compétition écologique met cela en évidence. Avec

les 17 stratégies de l'encadré ci-dessous, il est le suivant : $IC > SC > SA = IA$.

L'élimination des stratégies exploitées par des stratégies agressives a pour conséquence ultime le recul de ces dernières : n'ayant plus de stratégies naïvement coopératives à ponctionner, leurs gains diminuent et donc leurs descendance se raréfient. Pour réussir dans une compétition écologique, il faut être efficace (c'est-à-dire accumuler des points) face aux stratégies efficaces

« initialement coopératives » (IC), qui ne prennent jamais l'initiative de trahir ; il y a celles qui, à l'opposé, prennent cette initiative et sont « spontanément agressives » (SA) ; il y a celles qui sont « initialement agressives » (IA), elles trahissent aussi longtemps que l'autre n'a pas coopéré ; enfin, il y a celles qui, à l'opposé, sont spontanément coopératives (SC).

En tournoi, les moyennes par sous-classe donnent ainsi :

$SA > SC > IA > IC$.

Le résultat de la compétition

écologique est différent :

$IC > SC > SA = IA$.

Plus précisément (le nombre

de stratégies par sous-classe est indiqué entre parenthèses)

Moyenne des IC (10) = 170 ;

moyenne des SC (13) = 130 ;

moyenne des SA (7) = 0 ;

moyenne des IA (4) = 0.

En tournoi, l'agressivité est un peu favorisée. En revanche,

dans les compétitions

écologiques, il faut rester

performant, même quand

les plus faibles ont disparu

par la sélection naturelle.

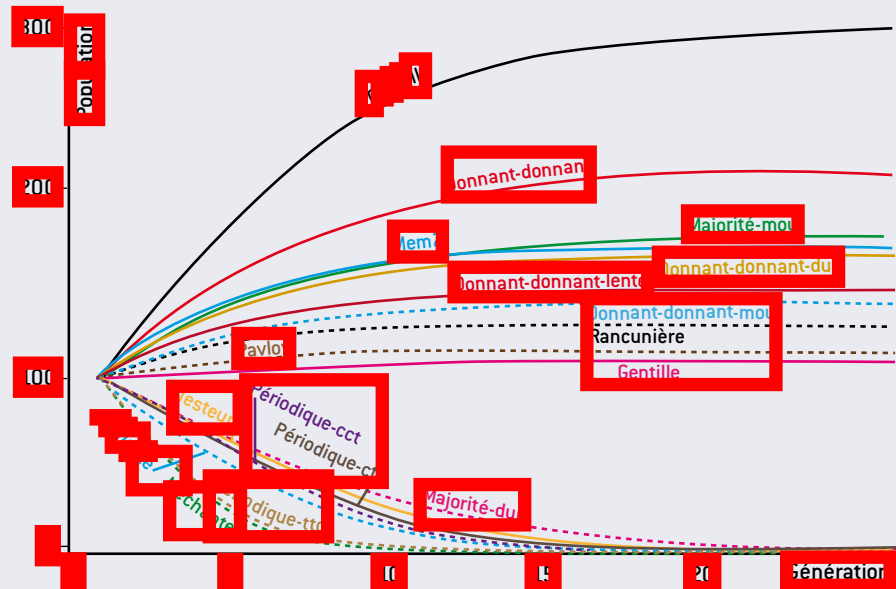
Il vaut mieux alors coopérer

en début de face-à-face (IC)

et surtout ne pas attendre que

l'autre le fasse (IA).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	3000	0	3000	3000	3000	2997	999	2001	2997	1500	3000	3000	3000	3000	3000	6	3000
2	5000	1000	1004	1004	1004	1000	2332	3668	1000	3000	3000	1008	1008	1008	1008	1008	1004
3	3000	999	3000	3000	3000	2500	1998	2667	2500	2498	3000	3000	3000	3000	3000	2999	3000
4	3000	999	3000	3000	3000	1003	2331	3663	1003	2997	3000	3000	3000	3000	3000	1007	3000
5	3000	999	3000	3000	3000	2500	2331	2001	2500	1500	3000	3000	3000	3000	3000	2999	3000
6	3002	1000	2500	1003	2500	1000	2332	2003	1000	2500	2999	3002	2999	3002	3001	2501	1007
7	4334	667	2003	671	671	667	1666	3335	1999	2500	3002	3335	675	675	752	2006	671
8	3666	333	2667	343	3666	3663	1665	2334	2664	2000	2003	3666	1671	3666	491	2664	350
9	3002	1000	2500	1003	2500	1000	1999	2669	1000	2500	2003	3002	1008	3002	3001	3000	1008
10	4000	500	2503	507	4000	2500	1665	2835	2500	2000	2250	4000	507	4000	615	2503	507
11	3000	500	3000	3000	3000	504	1332	2833	1998	2250	3000	3000	3000	3000	3000	2003	3000
12	3000	998	3000	3000	3000	2997	1665	2001	2997	1500	3000	3000	3000	3000	3000	1001	3000
13	3000	998	3000	3000	3000	2999	2330	3331	1008	2997	3000	3000	3000	3000	3000	1008	3000
14	3000	998	3000	3000	3000	2997	2330	2001	2997	1500	3000	3000	3000	3000	3000	1001	3000
15	3000	983	3000	3000	3000	2996	2302	3596	2996	2955	3000	3000	3000	3000	3000	2999	3000
16	4996	998	2999	1002	2999	2496	1996	2669	2995	2498	1998	1016	1008	1016	2999	1004	2999
17	3000	999	3000	3000	3000	1012	2331	3660	1008	2997	3000	3000	3000	3000	3000	2999	3000



La méthode des transformations

Partant d'une famille de stratégies *C*, on transforme chaque stratégie *Str* en l'adoucissant ou en la durcissant, de façon à ce que l'on obtienne une nouvelle stratégie *Str'* et donc un nouveau classement.

La transformation opérée est une amélioration. Quatre transformations ont été envisagées.

1) Adoucissement-1: *Str'* coopère avec toutes les variantes 85 stratégies. On fait alors les moyennes des résultats (pour le tournoi et la compétition écologique).

2) Endurcissement-1: *Str'* trahit son adversaire si son adversaire n'a pas coopéré, ensuite elle joue comme *Str*.

3) Adoucissement-2: *Str'* joue comme *Str* si l'adversaire a trahi au dernier coup et coopère sinon. Dit autrement, *Str'* fait comme *Str*, sauf qu'elle renonce à trahir si l'autre a coopéré au dernier coup. *Str'* est une version indulgente de *Str*, prête à n'importe quel moment à pardonner un adversaire coopératif.

4) Endurcissement-2: *Str'* joue comme *Str* si l'adversaire a coopéré au dernier coup et trahit sinon. *Str'* est une version sévère de *Str*, qui à n'importe quel moment durcit ses réactions face à un adversaire qui refuse de coopérer.

A. Avec les 17 stratégies de base
Partant des 17 stratégies de l'endurci pages 82-83, on obtient

avec toutes les variantes 85 stratégies. On fait alors les moyennes des résultats (pour le tournoi et la compétition écologique) des normales (les 17 de départ), des 17 adoucies par Adoucissement-1, des 17 endurcies par Endurcissement-1, etc. En tournoi comme en compétition écologique, on obtient :

Adou-1 > Adou-2 > Normal > Endur-2 > Endur-1
Les deux transformations adoucissantes produisent des familles meilleures que la famille initiale, la première méthode d'adoucissement produisant une amélioration plus forte que la seconde.

B. Avec Mémoire (1, 1)
Les 32 stratégies de la famille Mémoire (1, 1) conduisent à un ensemble de 160 stratégies qui donnent en tournoi :

Endur-2 > Adou-1 > Normal > Endur-1 > Adou-2. En compétition écologique, on a :
Adou-1 > Endur-2 > Adou-2 >

Normal > Endur-1.

En tournoi, certaines formes de durcissement semblent présenter de l'intérêt, mais c'est pour l'essentiel une illusion, car en compétition écologique on retrouve le classement précédent avec juste un léger mieux pour Endur-2.

C. Avec Mémoire (1, 2)

En tournoi, on obtient :

Adou-1 > Normal > Endur-2 > Adou-2 > Endur-1.

En compétition écologique, le classement est :

Adou-1 > Adou-2 > Endur-2 >

Normal > Endur-1, ce qui est presque le même classement que précédemment avec une perte d'une position pour Endur-2 qui se révèle assez souvent avoir de l'intérêt.

À nouveau l'adoucissement-1 est gagnant et c'est, des quatre méthodes de transformation, la meilleure. L'adoucissement-2 et l'endurcissement-2 font mieux que ne rien faire. La conclusion est claire : l'adoucissement-1 (en début de face-à-face) est souhaitable d'une manière générale et plus intéressant que l'adoucissement-2, qui reste cependant presque toujours intéressant. L'endurcissement-2 (tout le long du

face-à-face) est assez souvent bénéfique, alors que l'endurcissement-1 (en début de face-à-face) est toujours mauvais.

Il faut noter que l'adoucissement-2 est conditionnel : on est indulgent avec ceux qui sont coopératifs dont on oublie plus facilement le manque de coopération passé. Il est comparable avec l'endurcissement-2, qui consiste à changer son comportement pour le rendre plus agressif dès lors que l'adversaire refuse de coopérer.

Enfin, on observe que parmi les quatre transformations envisagées, le plus souvent, trois d'entre elles sont intéressantes : l'adoucissement en début de face-à-face et au cours du face-à-face et l'endurcissement au cours du face-à-face. Seul l'endurcissement en début de face-à-face est invariablement mauvais.

On pourrait traduire cela par : abordez toujours un éventuel collaborateur avec indulgence, soyez tolérant à propos de son comportement passé ; s'il se met à coopérer, renforcez vos réactions punitives s'il se montre agressif, mais surtout ne commencez jamais par trop de sévérité et d'exigences.

dans tous les types d'environnements et ne pas se contenter de profiter des faibles. Il faut aussi bien jouer contre soi-même. Les compétitions écologiques sont plus réalistes que les tournois : le meilleur type de comportement est la coopération initiale, le pire l'agressivité initiale.

Pour s'assurer de la robustesse de cette conclusion, nous avons refait la même expérience avec d'autres classes de stratégies. En particulier, nous avons considéré une classe de 1 024 stratégies choisies de façon systématique sans aucun biais (un tel biais

peut-être inconscient, ne pouvait être exclu avec les 17 envisagées de la première expérience). Nous avons donc pris toutes les stratégies *Strat* dont le comportement dépend du dernier coup de *Strat* et des deux derniers coups joués par l'adversaire. Cette classe de stratégies se nomme Mémoire [1, 2] ; elle correspond à toutes les façons possibles dont peut jouer une stratégie se souvenant uniquement de son dernier coup et des deux derniers coups de l'adversaire.

La classe Mémoire [1, 2] en tournoi donne $C > SC > SA > IA$. En compétition écologique.

le classement devient $IC > SC > SA = IA$, qui confirme les résultats obtenus avec les 17.

Plus aucun doute : l'environnement objectif prouve définitivement qu'un comportement initialement coopératif doit être recommandé. Si cette méthode directe d'analyse est concluante, elle ne permet pas d'affiner les conclusions sur l'intérêt des comportements coopératifs ou agressifs qui peuvent être de différentes natures et ne pas concerner seulement les débuts de parties. C'est pourquoi nous avons introduit la « méthode des transformations ».

L'idée de la méthode est de partir d'une classe de stratégies intéressantes C et d'opérer une transformation systématique de toutes les stratégies de la classe, ce qui donne une classe C' . Nous avons introduit deux méthodes d'adoucissement et deux méthodes d'endurcissement. Quand on applique une méthode d'adoucissement à une stratégie Str , on obtient une stratégie identique à Str ou moins agressive. De même, appliquer une méthode d'endurcissement conduit à des stratégies inchangées ou plus agressives.

L'adoucissement-1 consiste à partir d'une stratégie Str et à définir la stratégie transformée Str' suivante : au premier coup, Str' coopère, et elle continue de coopérer tant que l'adversaire n'a pas trahi ; dès que l'adversaire a trahi, Str' se met à jouer comme Str aurait joué. La stratégie Str' a donc un comportement identique à celui de Str , sauf qu'elle ne l'applique que lorsque l'adversaire a pris l'initiative de trahir. Bien sûr, si on part d'une stratégie Str initialement coopérative, Str' lui est identique.

La méthode d'endurcissement-1 est symétrique de la méthode d'adoucissement-1 : Str' trahit tant que l'autre n'a pas coopéré, et se met à jouer comme Str dès que l'autre a coopéré. Cette transformation rend initialement agressives les stratégies Str qui ne le sont pas, et ne change pas celles qui le sont.

L'adoucissement-2 permet d'explorer une autre façon de rendre plus coopérative une stratégie quelconque. Quand on l'applique à une stratégie Str , on obtient une stratégie Str' qui se comporte comme Str à la nuance près que si au coup $n-1$ l'adversaire a coopéré, Str' choisit toujours de coopérer. En clair, même quand Str veut trahir, Str' renonce et coopère à la condition que l'adversaire ait accepté de coopérer au coup $n-1$. Str' est une version indulgente de Str , elle est prête à pardonner (sur la base du coup $n-1$) à tout adversaire qui se montre coopératif, et ce quel que soit le passé des interactions. On définit symétriquement l'endurcissement-2.

Si l'on reprend les 17 stratégies de l'encadré pages 82-83, l'application des deux méthodes d'adoucissement et des deux méthodes d'endurcissement produit un total de $5 \times 17 = 85$ stratégies. L'encadré page ci-contre indique les résultats : a) s'adoucir est une bonne idée, qui améliore l'efficacité

moyenne des stratégies ; b) s'endurcir donne parfois un meilleur résultat immédiat (c'est-à-dire en tournoi), mais, si cela permet une certaine réussite en début d'évolution, c'est nuisible sur le long terme ; c) l'endurcissement 1 est, de toutes les transformations envisagées, la plus catastrophique.

Pour les longues rencontres où agit une forme de sélection naturelle, pratiquer l'adoucissement-1 (cela concerne le début des face-à-face) et même l'adoucissement-2 (qui, lui, produit des effets tout le long des face-à-face) est bénéfique. Il ne faut pas durcir votre comportement, et surtout pas au début.

Pour conforter cette analyse, on a souhaité faire des simulations avec des ensembles de stratégies constitués de façon systématique et ne pouvant donc être sujet d'aucun biais subjectif. Une expérience impliquant 5 120 stratégies a été menée. On fait jouer les unes contre les autres les 1 024 stratégies de la classe Mémoire [1, 2], et leurs versions modifiées par les quatre transformations précédemment citées. Les résultats sont indiqués dans l'encadré page ci-contre.

Après trente ans d'études, une conclusion claire

D'autres expériences confirment que dans un monde où l'évolution joue son rôle en renforçant les effectifs des stratégies qui réussissent aux dépens de celles qui obtiennent des scores médiocres, alors les comportements coopératifs sont indubitablement les meilleurs. Il est particulièrement important de bien débiter les interactions, en coopérant aussi systématiquement que possible dans les premiers échanges d'un face-à-face. De plus, dans le déroulement d'une interaction, savoir être indulgent est globalement payant. Un renforcement de la sévérité, à condition qu'il ne s'applique pas aux débuts des face-à-face est parfois utile, mais moins pauvant que l'adoucissement.

Il est remarquable qu'après plus de trente ans d'études et la mise au point d'outils de simulations massives, un jeu à la définition aussi simple que le dilemme itéré du prisonnier produise encore des résultats nouveaux, clairs et précis sur la façon dont il faut aborder les problèmes de la coopération.

LES AUTEURS



Jean-Paul DELAHAYE et Philippe MATHIEU sont professeurs à l'université de Lille et chercheurs au laboratoire CRISTAL (Centre de recherche en informatique, signal et automatique de Lille).

BIBLIOGRAPHIE

2. Mathieu et J.-P. Delahaye, New winning strategies for the iterated prisoner's dilemma, *Proc. of the 2015 Int. Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, 2015 (<https://hal.inria.fr/hal-01199149>)

J.-P. Delahaye, Le dilemme du prisonnier et l'illusion de l'extorsion, *Pour la Science*, n° 435, pp. 78-83 janvier 2014.

J. Hilbe et al., Evolution of extortion on Iterated Prisoner's Dilemma games, *PNAS*, vol. 110(12), pp. 6913-6918, 2013.

V. Press et F. Dyson, Iterated Prisoner's Dilemma contains strategies that dominate any evolutionary opponent, *PNAS*, vol. 109(26), pp. 10409-10413, 2012.

3. Beaufils et al., Our meeting with gradual, A good strategy for the iterated prisoner's dilemma, *Artificial Life V*, L.G. Langton et K. Shimohara (eds.), pp. 202-209, MIT Press/Bradford Books, 1996.



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

SCIENCE & FICTION

Antman, petit mais costaud !

Réduire sa taille à volonté, faire des bonds spectaculaires, communiquer avec les fourmis, Antman peut-il réaliser de tels exploits en respectant les lois du monde atomique et de la physique quantique ?

Roland LEHOUCO et Jean-Sébastien STEYER Illustration : Marc BOULAY

Un nouveau superhéros a débarqué sur nos écrans. Son pouvoir ? La capacité de rétrécir à la taille d'une fourmi grâce à une combinaison spéciale et une « formule » mises au point par le scientifique Hank Pym. Dans *Antman* (2015), Marvel Studios s'écarte de ses superhéros classiques pour mettre en scène un ancien cambrioleur, Scott Lang, qui, voulant récupérer le droit de voir sa fille, se retrouve embarqué dans une folle aventure. L'idée de raconter les aventures d'un humain rétréci n'est pas récente, à l'image des romans *Les voyages de Gulliver*, de Jonathan Swift (1726), et *L'homme qui rétrécit*, de Richard Matheson (1956).

Le cinéma n'est évidemment pas en reste. En 1966, Richard Fleischer réalise *Le voyage fantastique*, qui relate les aventures d'une équipe de chirurgiens envoyés, à bord d'un sous-marin microscopique, dans le sang d'un patient afin de mener dans son cerveau une opération impossible à réaliser de l'extérieur. Plus près de nous, le film *Chérie, j'ai rétréci les gosses !* (1989) narre les aventures d'un inventeur excentrique dont les enfants font les frais de sa machine à rétrécir les objets.

Les superhéros ont, eux aussi, eu le droit de visiter le monde microscopique dès 1940 avec Atom. Il sera rejoint plus tard par Antman et Wasp (la Guêpe).

Dans tous les cas, l'exploration du monde microscopique donne lieu à des aventures extraordinaires et il est assez plaisant de



ANTMAN DEFIE LES LOIS de la physique. Grâce à sa combinaison, il réduit sa taille à celle d'un insecte et chevauche une fourmi ailée qui lui sert de destrier.

se mettre à la place de personnages aux prises avec un univers surdimensionné. Mais que se passerait-il vraiment si nous devenions subitement aussi petits qu'une fourmi ? La physique et la biologie peuvent répondre à cette question.

Le concepteur du costume d'Antman, Hank Pym, explique le principe de son invention par une diminution de l'espace entre les atomes. Un atome mesure quelques dixièmes de milliardième de mètre, mais son noyau est 100 000 fois plus petit ! Ainsi, l'idée de Pym semble bonne : réduire la taille d'un atome, dont le volume est essentiellement vide, devrait permettre de réduire la taille d'un objet.

Mais l'argument de Pym ne tient pas. La taille d'un atome n'est pas arbitraire, elle résulte d'un équilibre physique subtil entre les électrons et le noyau atomique. Hank Pym semble oublier une règle de la physique quantique : un électron confiné est d'autant plus agité que le volume de confinement est petit. Pourquoi l'électron ne se rapproche-t-il pas plus du noyau ? Parce que cela reviendrait à le confiner dans un volume de plus en plus restreint, donc à augmenter sa vitesse.

Plus précisément, la vitesse de l'électron étant inversement proportionnelle à la taille de la « boîte atomique », son énergie de mouvement, qui varie comme le carré de la vitesse, sera inversement proportionnelle au carré de cette taille. Dans le même temps, pour maintenir la cohésion de l'atome, l'énergie de liaison électrostatique entre le noyau



DANS UN UNIVERS KAFKAÏEN, si Antman était issu d'un croisement entre un homme et une fourmi, ressemblerait-il à cette créature qui rappelle le personnage incarné par Jeff Goldblum dans le film *La Mouche* (1986, D. Cronenberg) ?

et l'électron varie en proportion inverse de la taille de l'atome. Bilan : lorsque l'on rétrécit l'atome, l'énergie de mouvement croît plus vite que l'énergie d'interaction.

La plus grande de ces deux énergies dicte sa loi : si le mouvement est trop rapide, l'atome éclate, si l'énergie de liaison est trop forte, l'atome s'effondre. La configuration d'équilibre est celle qui minimise l'énergie totale, somme des énergies de mouvement et de liaison électrique. Cette condition aboutit à une taille de l'ordre de quelques dixièmes de nanomètre.

Dense comme une étoile

Le processus invoqué pour expliquer la réduction d'Antman implique aussi qu'elle se fait à masse constante. Mais diminuer la taille d'un humain d'un facteur 100 tout en conservant sa masse implique une augmentation considérable de sa masse volumique, d'un facteur un million environ ! Celle d'Antman atteindrait alors une tonne par centimètre cube, soit, en gros, celle d'une étoile de type naine blanche. Dans de tels astres petits et massifs, la matière est comprimée par l'importante gravité de l'astre. Notons aussi que si Antman conserve sa masse, on voit mal comment il peut voyager à dos de fourmi volante.

Admettons malgré tout que le processus de miniaturisation fonctionne et essayons d'imaginer quelles conséquences cela aurait pour notre héros. Ce dernier est capable de

faire des bonds prodigieux. Hank Pym attribue ces performances à la miniaturisation et les compare à celles d'une fourmi, capable de soulever plus de 100 fois sa masse.

Cet argument est correct ! En effet, la force que développent les membres est proportionnelle à l'aire de leur section (celle-ci reflète le nombre de fibres musculaires dans le membre). Comme elle croît ainsi dans deux dimensions, elle est proportionnelle au carré de la taille (linéaire) du corps. En revanche, la masse du corps est proportionnelle à son volume, lequel augmente dans les trois dimensions ; la masse est donc proportionnelle au cube de la taille caractéristique du corps. Il s'ensuit que la force physique croît proportionnellement à la puissance $2/3$ de la masse corporelle.

En vertu de cette loi, on comprend qu'Antman puisse faire des efforts qui, rapportés à sa masse, sont extraordinaires. Mais le super-héros n'égale jamais les fourmis, revêtues d'un squelette très résistant à base de chitine, alors que les os de son squelette interne sont en phosphate de calcium, plus fragile.

Une autre conséquence de ce jeu entre surface et volume porte sur les échanges thermiques. Les animaux à sang chaud (dits homéothermes) perdent de l'énergie, car ils sont souvent plus chauds que le milieu où ils évoluent. Ces pertes se faisant par la surface externe du corps, elles sont proportionnelles à l'aire de ce dernier. Scott Lang perd donc plus d'énergie qu'Antman, environ 100×100 fois plus si leur rapport de taille

est de l'ordre de 100. Par ailleurs, l'énergie nécessaire à maintenir la température interne est produite par une activité métabolique qui se déroule dans le volume du corps, 100^3 fois plus important chez Scott que chez Antman. Finalement, le rapport entre la perte d'énergie par la surface et sa production dans le volume est 100 fois plus faible chez Scott que chez son alter ego miniature.

Autrement dit, le rapport entre surface et volume est défavorable aux organismes de petite taille, qui doivent compenser leur plus grande perte d'énergie par une nourriture proportionnellement plus abondante. C'est ce que l'on constate entre la musaraigne étrusque, le plus petit mammifère du monde, et l'éléphant. Dans le cas d'Antman, s'il veut éviter de passer son temps à se nourrir, il faut que son costume assure une isolation thermique très performante !

Dernière caractéristique de notre super-héros : Pym a prévu un casque qui envoie des signaux chimiques pour communiquer et diriger les fourmis : si c'est bien par phéromones que les fourmis communiquent, les diriger toutes est illusoire car les fourmis n'ont ni chef ni hiérarchie. Leur organisation réside dans les connexions multiples entre individus qui agissent uniquement pour le bien commun du groupe. Un modèle dont les humains sont bien éloignés.

Roland LEHOUCQ est astrophysicien au CEA, à Saclay. J.-Sébastien STEYER est paléontologue au CNRS-MNHN, à Paris. Marc BOULAY est sculpteur numérique.

ART & SCIENCE

L'art-chéologie

Le passé de l'archéologie se confronte au présent de l'art contemporain à travers plusieurs œuvres. L'idée commune à ces deux disciplines ? Rendre visible ce qui ne l'était pas, ou ne l'était plus.

Loïc MANGIN

juillet 2015. Les équipes de l'université d'Oxford, en Grande-Bretagne, s'affairent sur le chantier de fouilles du site romain (occupé entre 100 avant notre ère et 45 de notre ère) de Dorchester-on-Thames, au centre de l'Angleterre. Là, derrière des archéologues, une femme épie le moindre de leurs gestes, comme hypnotisée par leur précision, leur répétition, parfois leur apparente absurdité. Cette espionne est Nathalie Joffre, une artiste fascinée par tous ces mouvements ! À partir de ses observations, elle a conçu une sorte de chorégraphie archéologique présentée dans une vidéo intitulée *Apparitions*. Des mimes y reproduisent et interprètent les gestes des archéologues, sortis de leur contexte, leur performance étant multipliée par un jeu d'ombre (*ci-contre, a*).

Cette œuvre est visible au Centquatre-Paris, dans le cadre de l'exposition collective *Matérialité de l'invisible, l'archéologie des sens*. Organisée sous la direction artistique de José-Manuel Gonçalves, la manifestation est le fruit de la collaboration de l'Institut national de recherches archéologiques préventives (l'Inrap) et de l'ensemble des acteurs du projet NEARCH. Financé notamment par la Commission européenne, ce projet piloté par l'Inrap réunit des instituts de recherche, des universités et des institutions culturelles de onze pays européens. L'objectif est d'explorer et de renforcer les liens entre les citoyens européens, l'archéologie et leur patrimoine culturel.

Dans ce cadre, le Centquatre-Paris a accueilli plusieurs artistes en résidence et en a

également invité d'autres, par exemple Anish Kapoor. L'idée est ici de mettre en avant les relations qu'entretiennent l'archéologie et l'art contemporain face aux questions du temps, de la mémoire, du patrimoine... En voici quelques morceaux choisis.

A travers ses photographies d'éléments osseux, humains ou non (*b*), Julie Ramage revisite les facettes multiples de l'histoire de l'os à Saint-Denis. De fait, la cité des tombeaux des rois de France abrite aussi un artisanat – moins connu – d'objets en os. Avec l'unité de l'archéologie de Saint-Denis, l'artiste a ainsi noué l'imaginaire anthropologique (religieux, éthique et culturel) qui entoure le squelette.

**le lent gonflement
de pois chiches dans l'eau
permet au *Tractochiche*
de se déplacer**

Agapanthe, un duo formé de Florent Konné et d'Alice Mulliez, a collaboré avec des archéologues de l'Inrap (à La Courneuve et en Guadeloupe). *Amas*, l'une de leurs œuvres présentées, est une installation sculpturale confectionnée à partir de déchets, telles des bouteilles de plastique, enveloppés dans une gangue cristalline de sucre (*c*). Cette dernière symbolise selon les artistes la trace des objets, la même qu'ils auraient dans la terre, et la rendent palpable. Qui plus est, les déchets collectés représentent notre trace actuelle, celle d'une époque désormais reconnue (l'Anthropo-

cène) que d'éventuels archéologues du futur pourraient découvrir dans quelques milliers d'années. Enfin, le choix du sucre n'est pas anodin : il est lui aussi un matériau chargé d'histoire, notamment géopolitique.

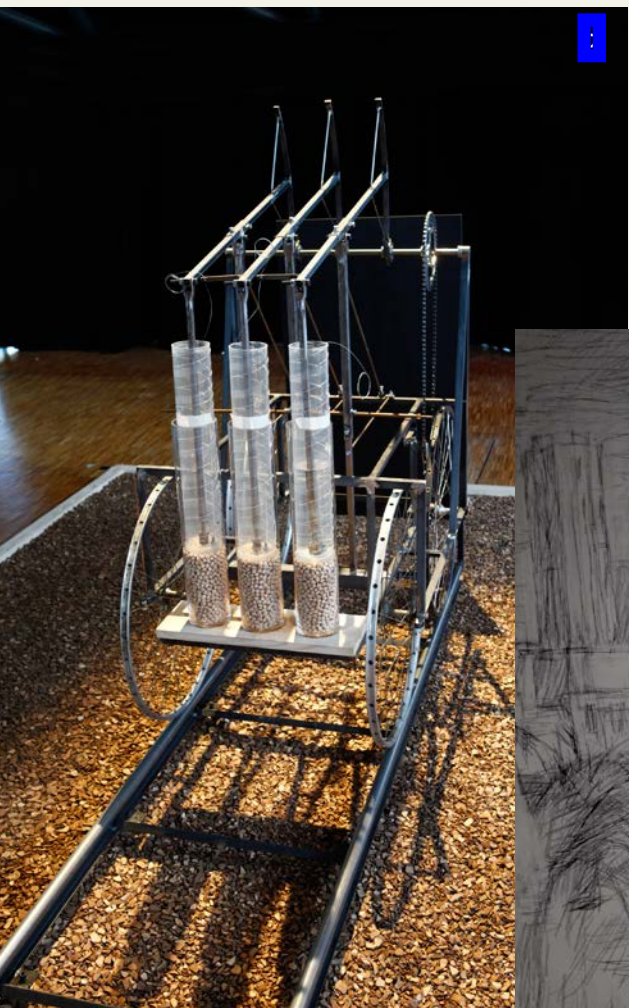
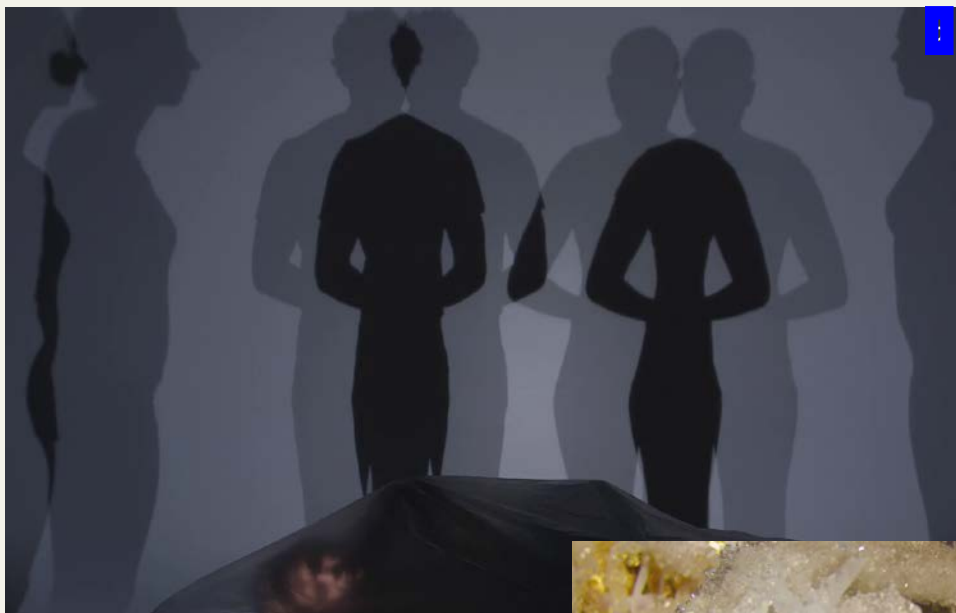
Pendant sa résidence NEARCH, Miranda Creswell s'est intéressée à l'évolution des espaces verts en milieux urbains, ceux de Harlow, en Grande-Bretagne, et le parc des Buttes-Chaumont, à Paris. Dans les deux cas, les lieux ont abrité un temple romain et ont sans cesse été remodelés à travers les siècles. Par exemple, le parc parisien fut successivement une carrière de gypse, une décharge, une artillerie avant de devenir le parc actuel. Grâce à ses dessins (*e*), l'artiste rend visible l'histoire de ces paysages.

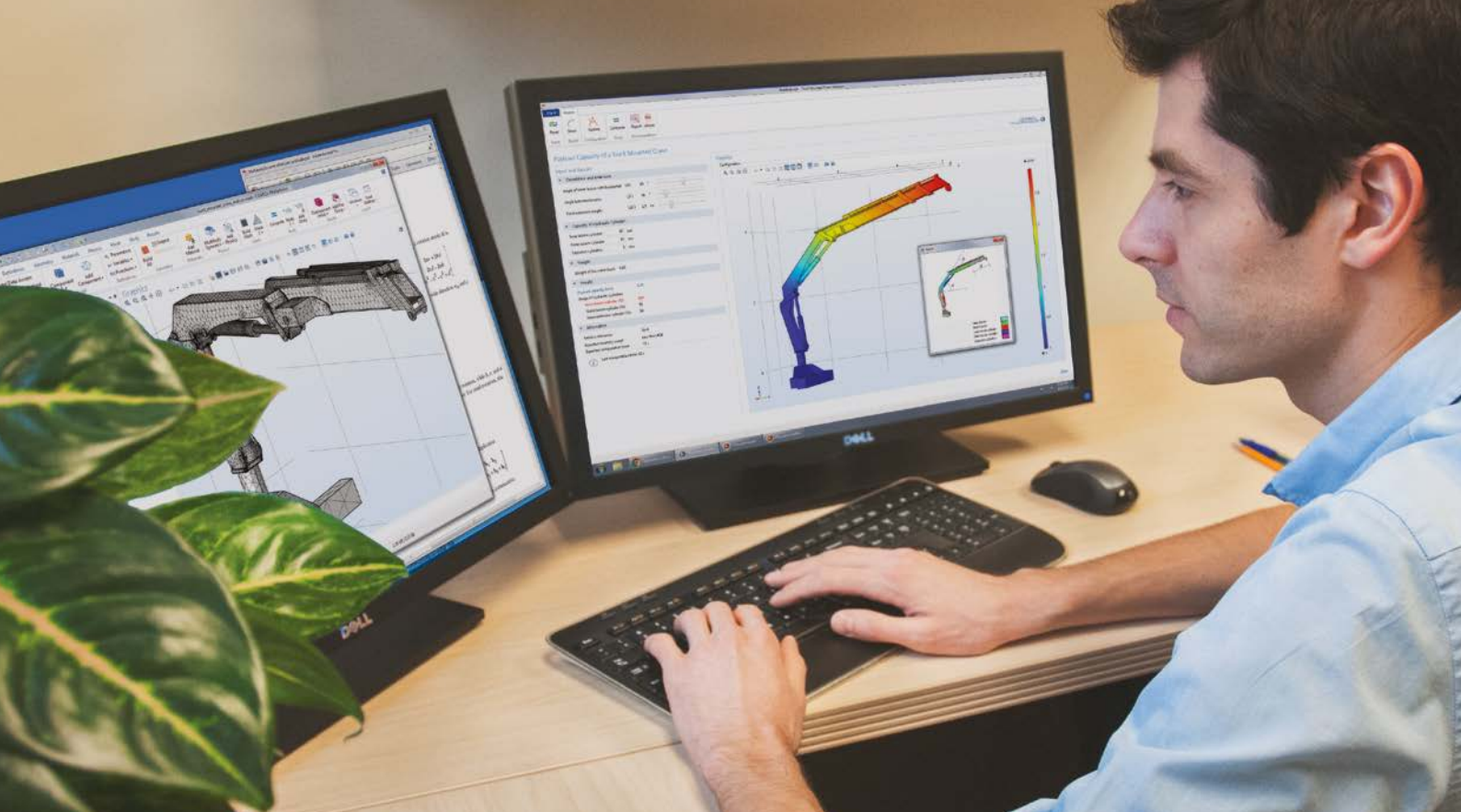
Enfin, l'artiste issu du monde du cirque Johann Le Guillerm nous invite à revoir notre notion du temps avec trois machines aux mouvements imperceptibles. Chacune utilise une énergie propre. Par exemple, le *Tractochiche* exploite le gonflement de pois chiches dans l'eau, qui anime des pistons (*d*).

On sort de l'exposition avec l'envie de regarder avec plus d'acuité le monde qui nous entoure. La sensation de l'environnement et du temps qui passe n'est plus la même. On est alors dans l'état d'esprit des archéologues, c'est-à-dire prêt à trouver quelque chose auquel on ne s'attend pas.

Matérialité de l'invisible, l'archéologie des sens, Centquatre-Paris, 5 rue Curial, 75019 Paris, du 13 février au 30 avril 2016 (www.104.fr)

Rendez-vous





LA MULTIPHYSIQUE POUR TOUS

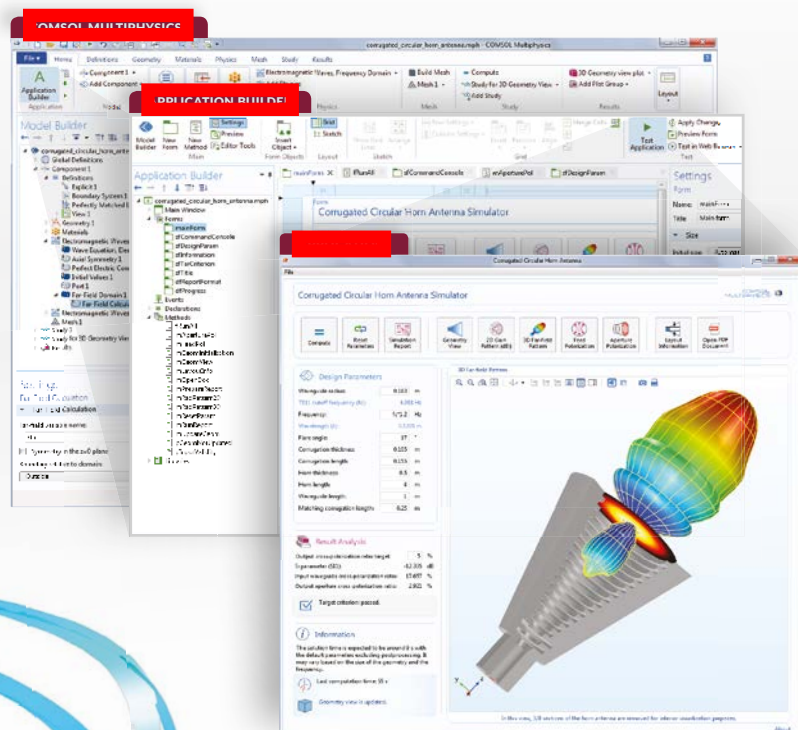
L'évolution des outils de simulation numérique vient de franchir un cap majeur.

Des applis spécialisées sont désormais développées par les spécialistes en simulation avec l'application Builder de COMSOL Multiphysics®.

Une installation locale de COMSOL Server™, permet de diffuser les applis dans votre organisme et dans le monde entier.

Faites bénéficier à plein votre organisme de la puissance de l'outil numérique.

comsol.fr/application-builder



IDEE DE PHYSIQUE

Un poisson-coffre dans la voiture

Les performances hydrodynamiques du poisson-coffre ont inspiré les concepteurs d'automobiles. Même si ces performances gardent une part de mystère !

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Difficile d'imaginer moins aérodynamique qu'un cube. C'est pourtant la forme de poissons qui réalisent des virages à 180 degrés sur place, se faufilent avec aisance dans leur milieu naturel et sont capables de jolies pointes de vitesse. De qui s'agit-il ? Des poissons-coffres, bien sûr !

Ces espèces tropicales, souvent joliment colorées, n'ont pas manqué d'intriguer les physiiciens depuis une quinzaine d'années et même d'inspirer les ingénieurs, emportés par la vague du biomimétisme. Ainsi, un modèle de voiture en a adopté la forme (voir l'illustration ci-contre). Cependant, des études un peu contradictoires montrent que l'on n'est toujours pas sûr de ce qui rend ces poissons si bon nageurs.

Un modèle vivant pour l'industrie automobile

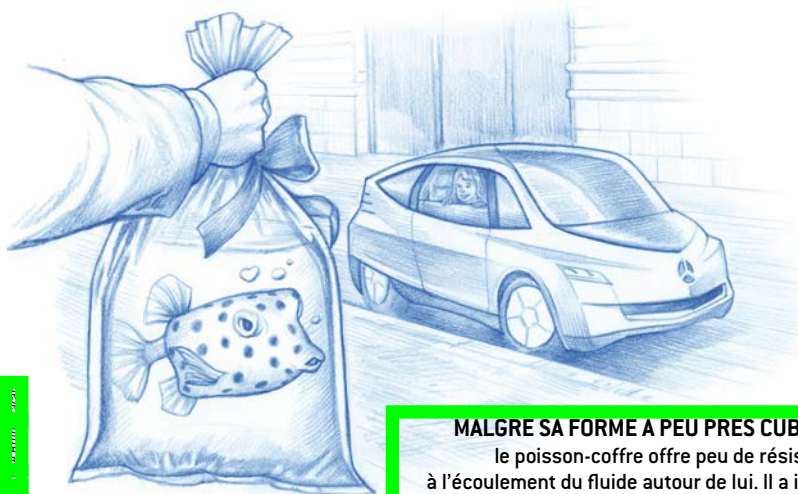
L'histoire débute en 1996. Les ingénieurs de Mercedes, peinant à imaginer ce que pourrait être un véhicule biomimétique, reçoivent une suggestion de leurs voisins ichtyologues de l'université de Stuttgart. « Abandonnez requins et autres thons, souples et effilés, mais bien trop aplatis pour loger conducteur et passagers : calquez plutôt votre véhicule sur le poisson-coffre ! » Étrange proposition que de s'inspirer d'un poisson d'un beau volume parfois presque cubique et doté d'une carapace osseuse et anéleuse...

L'idée des ichtyologues n'est pourtant pas fantaisiste : dans le monde exigu des coraux, cet animal à la forme rigide manœuvre aussi bien, voire mieux, que ses cousins qui ondulent avec grâce. Il pivote sur place, parcourt en une seconde jusqu'à cinq fois sa taille et, cerise sur le gâteau, sa traînée hydrodynamique est étonnamment faible.

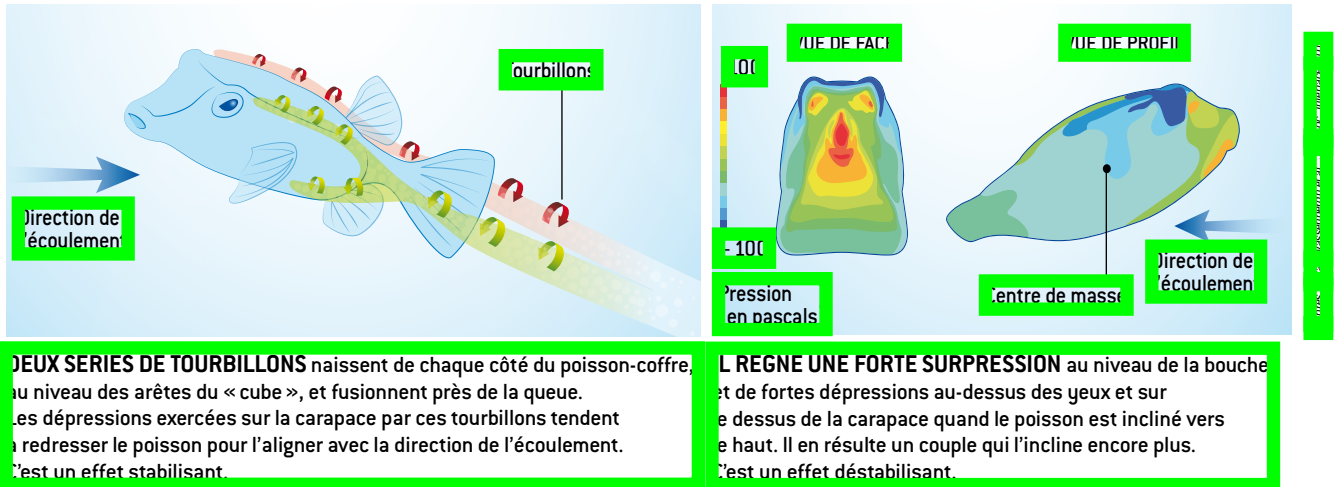
Des études menées entre 2002 et 2005 sous l'impulsion de l'armée américaine l'ont confirmé. Comme les poissons-coffres ne se montraient guère coopératifs, il a fallu les congeler et les passer au scanner 3D pour réaliser des modèles (sans nageoires) en résine, truffés de capteurs de pression et de forces, et mesurer l'écoulement grâce à des techniques de vélocimétrie laser.

Première constatation : le coefficient de traînée, qui caractérise la résistance à l'avancement dans un fluide, est effectivement très faible. Noté C_x , ce nombre est le double du rapport entre la force de résistance et le produit de la masse volumique du fluide (ici l'eau), de la superficie frontale de l'objet en mouvement et du carré de sa vitesse.

Lorsque l'écoulement présente de la turbulence au niveau du sillage, mais pas à la surface de l'objet, ce coefficient est à peu près constant. Il est de l'ordre de 0,5 pour une sphère, inférieur à 0,1 pour un objet bien profilé et supérieur à 1 pour un cube ou un cylindre court ! Les mesures sur plusieurs poissons-coffres donnent



MALGRÉ SA FORME À PEU PRES CUBIQUE, le poisson-coffre offre peu de résistance à l'écoulement du fluide autour de lui. Il a inspiré les ingénieurs de Mercedes avec leur modèle Bionic.



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.idohus.fr>



Retrouvez la rubrique Idées de physique sur www.pourlascience.fr

environ 0,28 pour *Ostracion meleagris*, dont la forme est parallélépipédique, et 0,15 pour *Actophrys triqueter*, de section triangulaire.

Seconde constatation : ce poisson est stable. Pourtant, d'après notre intuition, la moindre perturbation du fluide devrait le faire basculer afin qu'il présente à l'écoulement une arête anguleuse (où se soudent les plaques de sa carapace), mieux profilée.

Ce paradoxe a été résolu à l'aide de maquettes diversement inclinées par rapport à la direction horizontale de l'écoulement. Les chercheurs ont observé des tourbillons sur chacune des arêtes (voir la figure ci-dessus), comme sur les bords d'attaque des avions à ailes en delta. Ces tourbillons deviennent de plus en plus forts à mesure que l'inclinaison augmente.

Or, tout comme les tornades qui aspirent les toits, ces tourbillons créent des dépressions au niveau de la carapace, surtout aux endroits où ils en sont proches. Comme ils apparaissent plutôt à l'arrière du poisson (et de chaque côté), cette succion sur la carapace a le même effet qu'une traction vers l'arrière exercée par des cordes attachées aux mêmes endroits : on obtient un couple par rapport au centre de masse qui redresse le poisson vers l'horizontale. Puisque les mêmes phénomènes surgissent pour les embarcées (les mouvements vers la gauche ou la droite), il faut en déduire que, par sa forme anguleuse, le poisson-coffre est muni d'un dispositif passif et permanent de stabilisation de trajectoire.

Avec de telles conclusions, rien d'étonnant à ce que les ingénieurs de Mercedes aient été au bout de leur labeur avec leur modèle Bionic, inspiré de l'espèce *Ostracion cubicus*. Cette berline a, malgré son vaste espace intérieur, un fabuleux coefficient de traînée : 0.19.

Reste une difficulté : comment se fait-il que ces mécanismes de stabilisation ne gênent pas le poisson-coffre dans ses manœuvres ? Car plus un mobile est stable, moins il est maniable. Les avions à aile delta, par exemple, sont maniables, mais intrinsèquement instables. Pour élucider ce paradoxe, profitant des évolutions techniques, l'impression 3D de haute précision notamment, des équipes euro-américaines ont repris les études, à partir de spécimens prêtés par les musées et en y ajoutant des simulations hydrodynamiques pour mieux évaluer les champs de pression et de vitesse de l'écoulement.

Un paradoxe qui a la peau dure

Hélas, loin de corroborer la précédente étude, les auteurs de la seconde ne sont pas loin de conclure le contraire. D'abord, les coefficients de traînée sont notablement plus élevés : près de 0,3 pour *L. triqueter* et 0,2 pour *O. cubicus*. Ensuite, il n'y a pas d'autostabilisation due à la forme, mais bien plus une amplification des écarts de trajectoire. Par exemple, lorsque la maquette de *O. cubicus* est inclinée vers le haut, on observe une forte

suppression au niveau de la bouche et une zone de fortes dépressions au-dessus des yeux et sur le dessus de la carapace (voir la figure page ci-contre) ; compte tenu de l'anatomie du poisson, cela engendre un couple qui l'incline encore plus. Tout compte fait, ces contributions déstabilisantes l'emportent sur l'effet stabilisant des tourbillons, lequel se voit (ouf!) maleré tout confirmé.

Mais pourquoi ces différences entre les deux études ? Les capteurs de pression de la première étude étaient-ils mal disposés ? Les détails anatomiques des espèces ont-ils joué ? Et comment les ingénieurs de Mercedes ont-ils conçu un véhicule particulièrement stable et aérodynamique à partir de conclusions fausses ?

En premier lieu, tous s'accordent à dire que les nageoires doivent jouer un rôle essentiel dans la nage du poisson-coffre. Si la queue (nageoire caudale) et les nageoires pectorales

jouent le rôle de gouvernes, les nageoires dorsales et anales agissent comme des hélices propulsives. Des mesures sur des poissons bien vivants ont montré que ces dernières engendrent leurs propres tourbillons, d'intensité similaire à ceux de la carapace, de même sens ou de sens contraire. Le poisson peut donc, à volonté, soit affaiblir l'effet de stabilisation, soit le renforcer, et cela sans compter la contribution des couples liés à la portance sur ses gouvernes.

Ensuite, si l'allure générale de la voiture, son arrière et la formation des tourbillons s'inspirent du poisson-coffre, il en va tout autrement du nez du véhicule, très arrondi, au contraire du museau pointu et anguleux du poisson. Une différence qui améliore considérablement la pénétration dans l'air et élimine les effets aérodynamiques déstabilisants. Moralité : de la nature tu t'inspireras, mais tu ne la copieras point ! ■

BIBLIOGRAPHIE

S. Van Wassenbergh *et al.*, Boxfish swimming paradox resolved : Forces by the flow of water around the body promote manoeuvrability, *J. R. Soc. Interface*, vol. 12, 2014, 1146, 2015.

S. C. Farina et A. P. Summers, Biomechanics : Boxed up and ready to go, *Nature*, vol. 512, pp. 274-275, 2015.

K. Bartol *et al.*, Body-induced vortical flows : A common mechanism for self-corrective trimming control in boxfishes, *The Journal of Experimental Biology*, vol. 208, pp. 327-344, 2005.

Dans l'interêt de la science

mathieu vidard | la tête au carré 14:05-15:00

Intervenez
www.franceinter.fr

SCIENCE & GASTRONOMIE

Rattraper la sauce hollandaise

On rate parfois cette sauce, qui peut tourner.

En fait, il est facile de la rattraper, juste avec de l'eau.

Même si les mécanismes physicochimiques sont à éclaircir

Hervé THIS

La sauce hollandaise ? Une belle découverte de la cuisine, puisqu'il y a la puissance du goût du jaune d'œuf, la petite acidité du jus de citron ou du vinaigre réduits, la longueur en bouche du beurre fondu, parfois le piquant des poivres, du cayenne... Elle accompagne à merveille le poisson, par exemple. Son seul inconvénient : elle rate parfois. Comment éviter cet écueil ? Le problème n'est pas tant de ne pas rater que de savoir rattraper une sauce ratée. En fait, pourvu que l'on dispose d'un protocole approprié, la sauce hollandaise est inratable !

Depuis environ le XVI^e siècle, on voit des sauces hollandaises variées : avec ou sans œuf, avec jus de citron ou vinaigre, avec de l'eau... Quoi de commun ? Le beurre, et le fait que ce beurre soit clairement émulsionné.

Utilisons du « bon » beurre. « Bon » ne signifie pas qu'on l'aime, mais que la matière grasse qui le constitue dissout des composés odorants, sapides ou à action trigéminal (les piquants, les frais...). Et si le goût du beurre n'est pas perdu lors de la cuisson, il se retrouve dans la sauce achevée.

Certes, les recettes proposent au choix eau, jus de citron, vinaigre, vin, bouillon, etc., mais il s'agit toujours de solutions aqueuses. Pourquoi peut-on faire une sauce avec seulement de l'eau et du beurre ? Parce que l'eau est à « phase continue » où les gouttelettes de beurre fondu viennent s'émulsionner, entourées par les protéines présentes dans le beurre. En pratique, il est donc simple de mettre de l'eau dans une casserole, d'ajouter du beurre et de fouetter en chauffant. Le goût ? Celui que

l'on veut : les composés hydrosolubles, qui se dissolvent dans la phase aqueuse, sont souvent sapides, tandis que le beurre pourra dissoudre des composés hydrophobes odorants. Par exemple, si l'on ajoute une branche de thym dans la sauce que l'on prépare, on récupérera – après filtration, bien sûr – une sauce où le goût de thym sera présent, les branches ayant laissé échapper des composés tels que le thymol, l'eugénol, etc.

Le jus de citron ou le vinaigre ? Ils apportent de l'acidité, par l'acide citrique ou l'acide acétique qu'ils contiennent. Le jaune d'œuf ? Il apporte beaucoup de goût, mais aussi un peu d'eau et des protéines. Certaines de ces dernières contiennent des résidus d'acides aminés soufrés susceptibles de coaguler, qui sont donc importants pour la question du ratage.

La principale cause de ratage, pour ce qui concerne les émulsions, est la quantité insuffisante d'eau, laquelle s'évapore lors de la production de la sauce. Il faut au minimum 15 % d'eau. C'est d'ailleurs une solution que les cuisiniers ont empiriquement trouvée : dans son *Traité pratique de cuisine bourgeoise*, le cuisinier français Auguste Colombié écrit, en 1893 : « Au cas où elle tournerait, on peut la ramener en ajoutant une cuiller à café d'eau fraîche ».

Nous avons testé ce précepte en préparant des sauces hollandaises selon une recette utilisée dans l'enseignement culinaire français actuel. La sauce a été préparée, puis nous l'avons chauffée excessivement afin de la faire tourner, ce qui est arrivé. Lorsque nous avons ajouté une cuillerée d'eau, rien ne s'est produit, même quand nous avons



bien fouetté la sauce. En revanche, avec deux cuillerées d'eau supplémentaires, la sauce s'est à nouveau liée, comme si de rien n'était. Nous avons alors décidé de faire tourner une deuxième fois cette sauce rattrapée ; après avoir chauffé un certain temps, la sauce a tourné à nouveau. Nous l'avons à nouveau rattrapée avec des cuillerées d'eau. Et ainsi de suite trois fois, quatre fois.

La cinquième fois, ayant ainsi battu le record du monde de sauce hollandaise ratée et rattrapée, nous avons voulu pousser le ratage jusqu'à la cuisson du beurre. Nous avons ainsi chauffé jusqu'à produire un beurre noisette. Quelques cuillerées d'eau ont conduit la sauce à se réémulsionner.

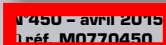
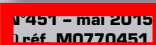
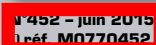
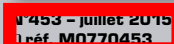
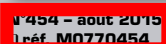
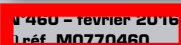
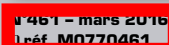
Comment est-ce possible ? Si les protéines coagulent, il est possible que les autres composés tensioactifs du jaune d'œuf prennent le relais pour l'émulsion. En tout cas, l'eau est le paramètre essentiel de réussite. La sauce hollandaise est inratable et, mieux, la compréhension de sa constitution physicochimique permet de varier son goût à l'infini. La gourmandise en sort grandie !



Hervé THIS, physicochimiste, est directeur du Centre international de gastronomie moléculaire AgroParisTech et directeur scientifique de la fondation Science & culture alimentaire Académie des sciences.



Retrouvez la rubrique science & gastronomie sur www.boullascience.fr



**Complétez votre collection
dès maintenant!**

5,50€ dès le 2^e numéro **acheté**

A découper ou à photocopier et à retourner accompagné de votre règlement à : Groupe Pour la Science • 628 avenue du Grain d'Orge • 41135 U Vineuil • e-mail : pourlasciencevnc@daudin.fr

☐ Oui, je commande des numéros de *Pour la Science* au tarif unitaire de 5.50€ dès le 2^e acheté.

Je reporte ci-dessous les références à 8 chiffres correspondant aux numéros commandés et au format : XXXXXX XXXX :

1 ^{er} per		X 5,50 €	
2 ^e per		X 5,50 €	
3 ^e per		X 5,50 €	
4 ^e per		X 5,50 €	
5 ^e per		X 5,50 €	
6 ^e per		X 5,50 €	
7 ^e per		X 5,50 €	
Frais port 14,90 € France - 12 € étranger		+	

Je commande la reliure **Pour la Science**
capacité 12 n^{os})
au prix de **14 €**

TOTAL A REGLER

J'indique mes coordonnées

Nom: _____

Prénom: _____

Adresse: _____

N° : _____ Ville : _____
 Pays : _____ Tél. : _____
 Pour le suivi client facultatif

Mon e-mail pour recevoir la newsletter *Pour la Science*

a remplir en majuscules

Je choisis mon mode de règlement

par chèque à l'ordre de *Pour la Science*

par carte bancaire

N°

Date d'expiration

Code de sécurité

1. Introduction 2. Methodology 3. Results 4. Discussion 5. Conclusion	6. References 7. Appendix 8. Notes 9. Tables 10. Figures
---	--

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 la case ci-contre.**

TOUTES LES ARCHIVES
DEPUIS 1996 SUR

www.pourlascience.fr

PSYCHOLOGIE

Comment transformer votre vie avec les thérapies courtes

Cécile Wyler Roulet

Favre, 2015
[240 pages, 19 euros].

Toutes les psychothérapies ne s'étendent pas sur de longues durées. Il existe des thérapies courtes, qui visent à soulager vite, en une séance ou en tout cas en moins de quinze.

Comme ce sous-domaine de la pratique psychologique fonctionne, l'auteur propose de nous guider. Elle présente neuf thérapies brèves avec des exemples de séances, qui illustrent que toutes les thérapies brèves soulagent lorsqu'elles sont appliquées séparément, et peuvent tout à fait être combinées entre elles pour plus d'efficacité.

Les thérapies brèves suscitent aussi un intérêt scientifique. Les psychologues mènent par exemple les études contrôlées démontrant l'efficacité des thérapies comportementales et cognitives (TCC) pour soulager de multiples troubles. Les neuroscientifiques, eux, étudient beaucoup l'hypnose pour comprendre comment elle change les perceptions de notre cerveau.



Le lecteur ressort de l'ouvrage moins intimidé par les acronymes obscurs désignant les styles de thérapies brèves, tels PNL, programmation neurolinguistique, EFT (Emotional Freedom Technique, soit technique de la liberté émotionnelle), EMDR (Eye Movement Desensitization and Reprocessing, soit désensibilisation et retraitement par les mouvements oculaires), etc. Les transcriptions de séances démystifient ce jargon technique.

Martine Meunier
CNRS, CNRS, Lyon

BIOLOGIE

Conflits intérieurs

Éric Baptiste

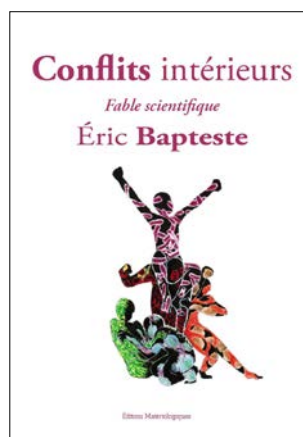
Matériologiques, 2015
[268 pages, 15 euros].

La sélection naturelle ne peut produire aucune modification dans une espèce exclusivement composée d'organismes qui ne profitent d'aucun avantage. Cela annihilerait la théorie. Ces lignes de Darwin n'ont guère encouragé les évolutionnistes à étudier les coopérations, où des organismes interagissent avec bénéfices réciproques : le darwinisme est longtemps resté exclusivement la théorie de la compétition entre organismes. Cependant, dès le XIX^e siècle, d'autres biologistes décrivent des coopérations : ainsi, nos cellules contiennent et nourrissent des bactéries qui les aident à respirer, les mitochondries.

La vision d'une évolution fondée sur la coopération a donc émergé en marge du courant évolutionniste majeur : en 1970, l'une des vedettes de la coopération, Lynn Margulis, considère le travail de Darwin comme « anthropomorphique et d'un intérêt limité » ! Cette opposition quant aux mécanismes maîtres de l'évolution

forme la trame de *Conflits intérieurs*, un conte philosophique bien troussé d'un chercheur en évolution formé à la philosophie des sciences. Un texte fluide et prenant (je l'ai lu d'un trait !), richement nourri des découvertes récentes (tous les faits évoqués sont directement issus des travaux de chercheurs). Et ce n'est pas le moindre mérite du texte : que de dresser, en lignes alertes et captivantes, une image moderne des interactions biologiques.

Sur cette toile de fond, l'intrigue oppose deux chercheurs canadiens fictifs, Robert Beaubien,



un tenant de la coopération un peu déprimé au début de l'histoire, et John Hatch, un tenant de la compétition à qui tout semble réussir. Je ne vous raconte pas le livre, où fait irruption une jeune chercheuse envisageant le monde physique et biologique comme un réseau d'interactions fluctuantes. Bref, des gens qui envisagent moins les organismes que les liens qui les unissent – et qui de plus sont tous candidats au prix Crafoord, l'équivalent du Nobel en évolution. Leurs approches respectives du succès évolutif les aideront-elles ?

Le conte croque aussi les activités du microcosme scientifique. Mais ce n'est pas tout ! Il fait émerger l'importance du

monde microbien par les faits et un lent rebondissement qui... (j'ai dit que je ne raconterai pas le livre : lisez-le, après tout).

Marc-André Selosse
Université de Montpellier

ANTHROPOLOGIE

Révolution dans nos origines

Jean-François Dortier (dir.)

Sciences Humaines, 2015
[416 pages, 19 euros].

À la fin de l'année dernière est paru un livre qui, comme son titre l'indique, est révolutionnaire pour l'importance qu'il

donne à l'homme cultivé, même s'il est passé inaperçu de la plupart...

L'histoire naturelle de l'humanité est en train d'être réécrite sous le coup des découvertes qui se succèdent chaque mois en génétique, préhistoire, paléontologie, paléanthropologie, écologie, éthologie... Rappelons qu'il est maintenant certain qu'à l'époque des artistes de la grotte Chauvet, plus de cinq formes humaines différentes cohabitaient sur Terre ; que chez nos ancêtres, la taille du cerveau a été multipliée par trois ; que notre patrimoine génétique est en partie néandertalien...

Ce volumineux ouvrage collectif, peu onéreux, réunit les écrits de trente-six spécialistes et fait le bilan des connaissances actuelles dans les domaines de la culture animale, de l'émergence de l'esprit humain, de l'apparition du langage, de l'évolution des techniques, de la naissance de l'art, des premiers mythes et religions, des sources de la morale, de nos modes de vie préhistoriques, de la polygamie et de la domination masculine, de l'évolution du sexe...

Prenons par exemple la question de l'origine de la guerre qui

oppose deux préhistoriens bien connus dans notre pays. Jean Guilaine estime que la guerre a toujours existé, alors que Marylène Patou-Mathis considère que, si la violence a toujours existé, la guerre apparaît avec le Néolithique. Alain Testart, lui, défendait l'idée que l'accumulation de biens, qui s'est produite lors de la sédentarisation des premiers agriculteurs vers 10000 ans avant notre ère, explique les raids, les rivalités territoriales et donc les guerres préhistoriques.

Aux points de vue de ces trois chercheurs s'ajoutent ceux de deux préhistoriens nord-américains. Lawrence Keeley avance que les guerres préhistoriques étaient plus meurtrières que les guerres modernes. Quant à Brian Hayden, spécialiste des sociétés dites transégaliennes, il les considère comme une étape entre les sociétés de chasseurs-cueilleurs, dites égalitaires et nos sociétés. Sur les rivages poissonneux, ces sociétés ont probablement constitué les premiers gros villages sédentaires où des chefferies sont apparues. Il prolonge ainsi les interrogations sur la violence en recherchant les origines des inégalités sociales.

Bref, cette science en marche enrachine l'homme et lui donne

une lisibilité que les sciences humaines réclamaient.

Pierre Jouventin
CNRS (émér.), Montvillie

ÉCOLOGIE-GENÉTIQUE

Empreinte du vivant

Dominique Joly, Denis Faure et Sylvie Salamitou (dir.)

Le Cherche-Midi/CNRS, 2015

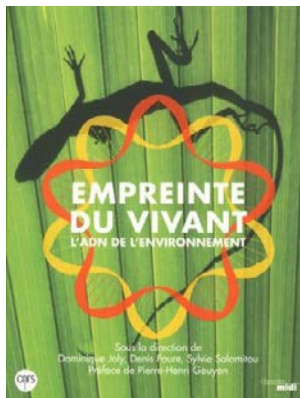
Cet ouvrage collectif a l'ambition de faire découvrir la génomique environnementale, comment le séquençage de génomes, de génomes, d'ensembles de génomes (métagénomes) et des ARN correspondants trouvés dans des échantillons de terre, d'eau, d'air ou de milieux biologiques permet d'étudier les écosystèmes et les organismes, souvent inconnus, qui y vivent.

Les auteurs ont choisi de multiplier les exemples pour démontrer la puissance de l'approche génomique. Les textes sont courts, émaillés de « focus » et richement illustrés de photographies. On se promène avec plaisir de la détection d'espèces exotiques invasives à l'analyse des ADN anciens, en passant par la découverte des microorganismes symbiotes des hermites. De quoi alimenter dissertations et cours, ou méditer sur les adaptations du vivant.

Il apparaît ainsi comment la génomique renouvelle l'inventaire de la biodiversité et la classification des organismes tout en éclairant leurs facultés d'adaptation. Elle est la seule technique à révéler l'empreinte d'ADN ou d'ARN laissée par tous les organismes se trouvant dans un milieu donné.

Elle apporte des connaissances qui contribueront, peut-être, à relever les défis du réchauffement climatique, de l'épuisement des sols, des pollutions ou de l'érosion de la biodiversité...

Souvent, la génomique environnementale permet d'affiner les connaissances : par exemple que les plantes réagissent chimiquement aux attaques des phytophages. On pourrait la qualifier d'avantage de « champ technique à recherches multiples » que de discipline scientifique de même rang que la microbiologie ou l'écologie. Une question primordiale est de savoir quoi faire de la masse de données informatisées produites, dont le stockage commence d'ail-



leurs à poser problème. Comment les écologues, climatologues, microbiologistes, etc. parviendront-ils à organiser et interpréter ces données éparpillées pour mieux comprendre les écosystèmes et les évolutions environnementales en cours ? Un travail de longue haleine et l'occasion, peut-être, d'un autre livre...

Jean-Jacques Perrier
journaliste scientifique, Paris



Rollon

Pierre Bouet

Ballandier, 2016

224 pages, 19,90 euros

A partir du VIII^e siècle, l'Europe subit les assauts des barbares du sud – les Maures – et de ceux du nord – les Vikings. D'abord pirates-marchands, les derniers se commueront en conquérants-pillards, puis en pillards installés. L'auteur nous fait très bien ressentir comment Rollon, le chef des Vikings installés dans la vallée de Seine, est parvenu à transformer une bande indisciplinée de pillards en colons-sujets intégrés au sein du bout de France qu'il a reçu en apanage en 911.

Pour la sociologie



Bernard Lahire

La Découverte, 2016

(170 pages, 13,50 euros).

La sociologie – l'étude scientifique des comportements sociaux – est une science, pas une idéologie ! Ce cri du cœur d'un sociologue transparaît dans sa féroce mise en évidence des intentions idéologiques des détracteurs, peu scientifiques mais souvent très politiciens, de sa science. La sociologie gêne parce que la complexité des déterminismes sociologiques empêche de juger facilement des gens et met en évidence la domination d'autres gens. Toutefois, comprendre les phénomènes sociaux n'est pas les excuser ou les dénoncer, rappelle-t-il ; en revanche, les comprendre est nécessaire pour donner à la démocratie une chance de les maîtriser.

La postmodernité à l'heure du numérique



M. Maffesoli et H. Fischer

Bayard, 2016

(136 pages, 20 euros).

Depuis que l'âge de l'information a succédé à l'âge du feu (énergie), nous sommes passés de la modernité à la postmodernité, définissent les auteurs. Puis, à la faveur d'une brillante conversation, ils posent nombre de questions sur le nouvel âge et y répondent : quel rapport établir entre numérique et politique ? Comment penser la synergie de l'ultramoderne technique et de l'archaïque social qu'il fait revenir en force, notamment par les tribus numériques ? Que va devenir le monde dans une génération ?



Retrouvez l'intégralité de votre magazine et plus d'informations sur www.pourlascience.fr



LE THÉOREME DE PYTHAGORE EST MORT

On vient de découvrir un triangle rectangle gigantesque, inconnu jusqu'à présent (les longueurs de ses côtés et de son hypoténuse s'expriment à l'aide de nombres ayant plus de cent mille chiffres), et qui, quoique appartenant à la géométrie euclidienne, ne vérifie pas le théorème de Pythagore.

D'ores et déjà, les spécialistes du monde entier sont au travail pour trouver l'erreur entachant chacune des centaines de démonstrations différentes – toutes fausses, donc – qui avaient été proposées pour ce théorème.



LA DÉCOUVERTE DE LA LUNE

De quelqu'un qui prend une vieillerie pour une nouveauté, on dit qu'il découvre la Lune. Il pourrait retourner cette maxime en compliment et entendre qu'on le crédite d'avoir réussi à porter un regard neuf sur un objet archiconnu.

La Lune reste à découvrir, car chaque société la perçoit à sa façon. En Égypte ancienne, elle figurait l'œil gauche du dieu Horus ; en Chine, l'œil droit du géant Pangu. Les Grecs l'ont personnifiée sous les traits de la déesse Séléné. Plus tard, de Lucien de Samosate à Jules Verne, en passant par Cyrano de Bergerac, la Lune est devenue un but de voyages imaginaires, qui pouvaient constituer une occasion de critiquer les hommes.



Le XX^e siècle a fait d'elle un but de voyages réels. Le rêve d'exploiter ses éventuelles ressources a supplanté celui de rencontrer des Sélénites. Les siècles futurs sauront aussi, n'en doutons pas, que découvrir la Lune, c'est-à-dire établir avec elle une relation inédite.

Pour les Grecs, la Lune était blanche. Mais la perception des couleurs ne va pas sans subjectivité ni biais culturels. Dans *La Prisonnière*, le narrateur d'*À la recherche du temps perdu* se plaît à rappeler que la Lune était argentée chez les auteurs d'autrefois, bleue chez Chateaubriand, jaune et métallique chez Baudelaire, d'or dans *Booz endormi*.

Comptons sur les Français actuels pour ne pas demeurer en reste. Dans leur ébrétilé cocardière, ils vont découvrir que la Lune s'est drapée de tricolore et qu'elle est bleu-blanc-rouge.

ERREURS HONORIFIQUES ET ERREURS MAGISTRALES

Un mathématicien resté célèbre uniquement pour avoir commis quelque bourde magistrale ? Je n'en vois pas. En revanche, nombreux sont les mathématiciens illustres pour leurs contributions correctes, dont le nom est attaché en outre à une erreur. La profession ne saurait garantir que Cauchy ou Lebesgue n'en ont jamais fait qu'une. Pourtant, les expressions « l'erreur de Cauchy » et « l'erreur de Lebesgue » y sont recues, et chacune désigne une erreur

précisément répertoriée. Par contre, Euler, ayant été prolixe en ce domaine comme en tous, l'expression « l'erreur d'Euler » serait équivoque.

Loin d'amoindrir leur réputation, les erreurs des mathématiciens éminents la grandissent, car on ne retient d'eux que celles qualifiées de fécondes. Fermat est assez riche pour qu'on lui prête : les commentateurs actuels conjecturent que, dans la démonstration (perdue) de son fameux théorème, il a cru, à tort, qu'un certain anneau était « principal ». Erreur géniale pour son époque, ajoutent-ils, et digne de cet esprit de premier plan.

En mathématiques, donc, donner son nom à une erreur est une distinction enviable. Je ne sais ce qu'il en est dans d'autres disciplines, où la notion d'erreur est parfois moins nette. En physique, même Einstein n'a pas réussi à s'en attribuer une à sa mesure. Ce qu'il a considéré comme la plus grosse erreur de sa vie (l'introduction d'une « constante cosmologique » dans les équations de la relativité générale) semble n'avoir pas été aussi inapproprié qu'il l'a cru.

Mais y eut-il jamais erreur plus glorieuse que celle faite en 1492. loin des



mathématiques ? Croyant avoir rejoint la côte orientale des Indes, son auteur a été puni : au lieu de porter son nom, la terre qu'il a découverte porte le prénom d'un autre explorateur. Dommage. Si l'Amérique s'était appelée « Erreur de Colomb », la face du monde en eût été changée. Pour le mieux, n'en doutons pas.

30

30 ans
Cité

MENTAL DÉSORDRE



MENTAL DÉSORDRE

Changez de regard sur les troubles psychiques

Exposition du 5 avril au 28 août 2016 M Porte de la Villette



en co-production avec



PAVILHÃO DO
CONHECIMENTO
CIÊNCIA VIVA

avec la collaboration de



avec le soutien de



en partenariat avec



SACRÉE SCIENCE!

16 FÉVRIER > 16 AOÛT 2016

Une exposition étonnante
pleine d'expériences...

QUAI
DES SAVOIRS

39, allées Jules-Guesde Toulouse

www.quaidessavoirs.fr

Tél. : 05 67 73 84 84

Du mardi au dimanche de 10:00 à 18:00

toulouse
métropole

MUSÉUM
DU DÉPARTEMENT
NEUCHÂTEL



l'Usine
culture et sciences



Toulouse en grand !