

■ POUR LA

SCIENCE

Février 2017 - n° 472

www.pourlascience.fr

Édition française de Scientific American

Désinformation et réseaux sociaux

Ce que révèlent les statistiques

CANCER

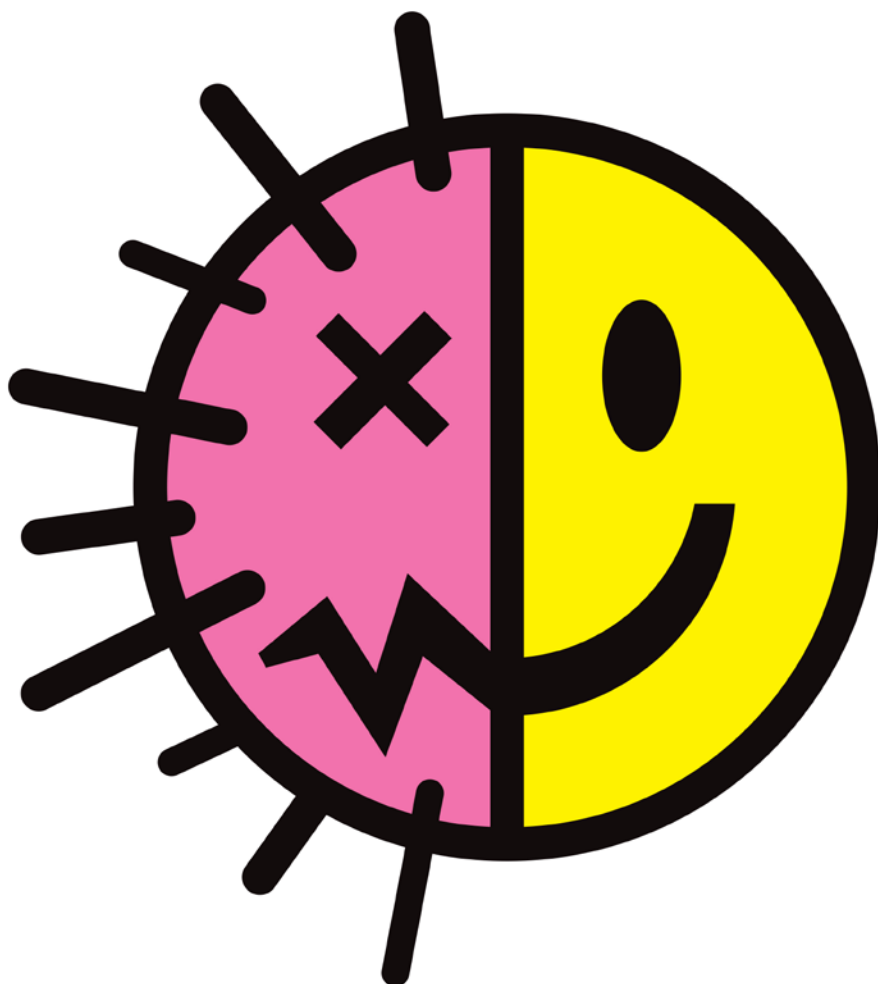
LES NOUVELLES PISTES DE L'IMMUNOTHÉRAPIE



#Cviral



80 ans
Palais



EMBARQUEZ-VOUS

Du microbe au fou rire, tout s'attrape

VIRAL

Exposition > 18.10.16 > 27.08.17

M Champs-Élysées Clemenceau **M** Franklin Roosevelt

EN CO-PRODUCTION AVEC

PAVILHÃO DO
CONHECIMENTO
CIÊNCIA VIVA



EN PARTENARIAT AVEC

Direct Matin

SCIENCE

Le Monde

Télérama

Society

SO FOOT

franceinfo:



POUR LA SCIENCE

www.pourlascience.fr

8 rue Férou - 75278 Paris Cedex 06
01 55 42 84 00

Groupe POUR LA SCIENCE

Directrice des rédactions : Cécile Lestienne

Pour la Science

Rédacteur en chef : Maurice Mashaal

Rédactrice en chef adjointe : Marie-Neige Cordonnier

Rédacteurs : François Savatier, Philippe Ribeau-Gésippe, 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 Jouble

Marketing & diffusion : Laurence Hay et Ophélie Maillet

Direction financière et direction du personnel : Marc Laumet

Fabrication : Marianne Sigogne et Olivier Lacam

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 :

Frédéric Amblard, Eric Buffetaut, Claudine Cohen,

Hélène Courtois, René Cuillierier, Serge Gauthier, Hélène Gélot,

Céline Genevrey, Nicolas Gillet, Evelyne Host-Platret,

Alice Mastracci, Salah El Mestikawy, Lydie Morel, Patrice Pérez,

Christophe Pichon, Carlo Rizzo, Daniel Tacquenot

PRESSE ET COMMUNICATION

Susan Mackie

susan.mackie@pourlascience.fr - 01 55 42 85 05

PUBLICITÉ France

Directeur de la publicité : Jean-François Guillotin

(jf.guillotin@abopress.fr)

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

ABONNEMENTS

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

Courriel : pourlascience@abopress.fr

Téléphone : 03 67 07 98 17

Adresse postale : Service des abonnements - Pour la Science, 19 rue de l'Industrie, BP 90053, 67402 Illkirch Cedex

Tarifs d'abonnement 1 an - 12 numéros

France métropolitaine : 59 euros - Europe : 71 euros

Reste du monde : 85,25 euros

COMMANDES DE LIVRES OU DE MAGAZINES

<http://boutique.pourlascience.fr/>

DIFFUSION

Contact kiosques : À Juste Titres / Benjamin Boutonnet

Tél : 04 88 15 12 41

Information/modification de service/réassort :

www.direct-editeurs.fr

SCIENTIFIC AMERICAN

Editor in chief : Mariette DiChristina.

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

Ricky Rusting, Philip Yam, Robin Lloyd, Mark Fischetti, Seth Fletcher,

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

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

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public

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

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

revue « Scientific American », dans les livres édités par

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

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

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

duction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous

les pays. La marque et le nom commercial

« Scientific American » sont la propriété de

Scientific American, Inc. Licence accordée à

« Pour la Science S.A.R.L. ».

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

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



Maurice Mashaal
rédacteur en chef

Internet, tour de Babel du XXI^e siècle ?

O n trouve tout et n'importe quoi sur Internet. Ce n'est pas un scoop. Ce qui est plus nouveau, c'est la prise de conscience que le n'importe quoi tend à occuper une place démesurée sur la Toile et les « réseaux sociaux » tels que Facebook. Au point d'influencer l'opinion publique et de peser sur des choix cruciaux, comme l'élection présidentielle aux États-Unis ou le vote sur le Brexit.

La diffusion massive sur Internet de fausses informations et de théories conspirationnistes a attiré l'attention de nombreux sociologues et analystes de la vie publique. Les médias s'en sont fait l'écho. On connaît moins les travaux que des informaticiens, des physiciens et des mathématiciens ont consacrés à la désinformation en ligne. Pour la Science présente dans ce numéro ceux de l'équipe de Walter Quattrociocchi, en Italie, qui a passé à la moulinette de ses algorithmes une grande masse de données provenant de Facebook, et a obtenu ainsi des renseignements inédits et quantitatifs sur la propagation des théories du complot et sur le comportement de ceux qui les diffusent (voir l'article pages 20 à 29).

Un cybercommunautarisme inquiétant, favorisé par nos biais cognitifs

Ces analyses montrent notamment, chiffres à l'appui, que les internautes tendent à former sur les réseaux sociaux des communautés isolées les unes des autres, qui s'autoconfortent dans leurs opinions et leurs préjugés – un cybercommunautarisme inquiétant. Plus généralement, comme le souligne le sociologue Gérald Bronner (voir l'entretien pages 30 à 32), les libertés offertes par Internet, conjuguées avec nos biais cognitifs, ont produit un marché de l'information dérégulé, propice à la désinformation. Y remédier sans censurer est certainement l'un des plus grands défis que doivent aujourd'hui relever les sociétés démocratiques. ■

3 **Édito**

Actualités

- 6 Différenciation cellulaire : la part du hasard
- 7 Un étalon quantique pour l'ampère
- 8 La calotte groenlandaise, plus instable qu'on ne le pensait



- 11 Au cœur des secrets de Pluton
- 12 Un antidote au monoxyde de carbone ?

Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

Réflexions & débats

- 14 **Entretien**
« Si l'on ne réduit pas la pauvreté, il n'y aura pas d'avenir pour la vie sauvage »
Richard Leakey

- 18 **Homo sapiens informaticus**
Jusqu'où ira la révolution « blockchains » ?
Gilles Dowek



- 19 **Cabinet de curiosités sociologiques**
Les années 1960 et le crépuscule de l'idée de progrès
Gérald Bronner

Ce numéro comporte deux encarts d'abonnement à *Pour la Science* brochés sur la totalité du tirage.
En couverture : © chombosan / shutterstock.com

À LA UNE

20 **SCIENCES SOCIALES**

Désinformation sur les réseaux sociaux : ce que révèlent les statistiques

Walter Quattrociocchi

Les internautes diffusent massivement des informations fausses et des théories conspirationnistes farfelues. Des études statistiques portant sur les réseaux de Facebook apportent un éclairage quantitatif et inédit sur les mécanismes à l'œuvre dans cet inquiétant phénomène.

30 « Il faut réguler le marché de l'information sur Internet »

Entretien avec Gérald Bronner

Internet bouleverse la façon dont les gens s'informent et fournit une tribune commode à tout individu ou groupe qui souhaite s'exprimer. Mais ces libertés nouvelles s'accompagnent d'effets pervers tels que la diffusion massive de thèses conspirationnistes. Le sociologue Gérald Bronner commente cette situation.

34 **MÉDECINE**

Cancer : lever les freins du système immunitaire

Jedd Wolchok

Dans de nombreux cancers, les cellules tumorales verrouillent le système immunitaire. Des oncologues développent une nouvelle génération de traitements qui visent à le débloquent.

42 **MÉDECINE**

« L'immunothérapie est une arme puissante à double tranchant »

Entretien avec Emanuela Romano

Depuis une dizaine d'années, l'immunothérapie contre le cancer est en plein développement. L'idée est d'aider le système immunitaire à cibler les cellules tumorales, tout en évitant qu'il se retourne contre le patient.

44 CLIMATOLOGIE

El Niño n'explique pas tout*Emily Becker*

On accuse souvent El Niño, phénomène climatique capricieux et influent, d'être responsable d'événements météorologiques extrêmes. L'épisode le plus récent montre pourtant que d'autres phénomènes jouent aussi un rôle.



54 NEUROBIOLOGIE

Les bienfaits des toxines végétales sur le cerveau*Mark Mattson*

En provoquant un stress au sein de nos neurones, les toxines issues des plantes que nous consommons préparent notre cerveau à se défendre contre des agressions plus importantes.

60 COSMOLOGIE

Où sommes-nous dans l'Univers ?*Noam Libeskind et Brent Tully*

La Voie lactée fait partie d'un énorme superamas de galaxies qui constitue l'une des plus grandes structures connues de l'Univers. Cette découverte découle d'un effort de cartographie cosmique qui ne fait que commencer.

70 HISTOIRE DES SCIENCES

Le retour de la forêt salvatrice*G. Decocq, B. Kalaora et C. Vlassopoulos*

Au XIX^e siècle, deux lois reposant sur un discours environnemental catastrophiste ont permis à l'État d'asseoir son autorité sur les espaces ruraux... en promouvant le reboisement.

Rendez-vous

78 Logique & calcul

Je le vois, je le démontre, mais est-ce que je le comprends ?*Jean-Paul Delahaye*

Les mathématiques recèlent d'innombrables vérités à la fois assez simples et très inattendues.

84 Science & fiction

Les crocodiliens, divinités ou acteurs de séries B*J. Sébastien Steyer et Roland Lehoucq*

86 Art & science

Pleurer sans fondre en larmes*Loïc Mangin*

89 Idées de physique

Bois sec, bois humide*Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik*

92 Question aux experts

L'inversion du champ terrestre sera-t-elle une catastrophe ?*Henri-Claude Nataf*

94 Science & gastronomie

Une théorie de quenelles*Hervé This*

96 À lire

98 Bloc-notes

Les chroniques de Didier NordonPOUR LA
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 en kiosque



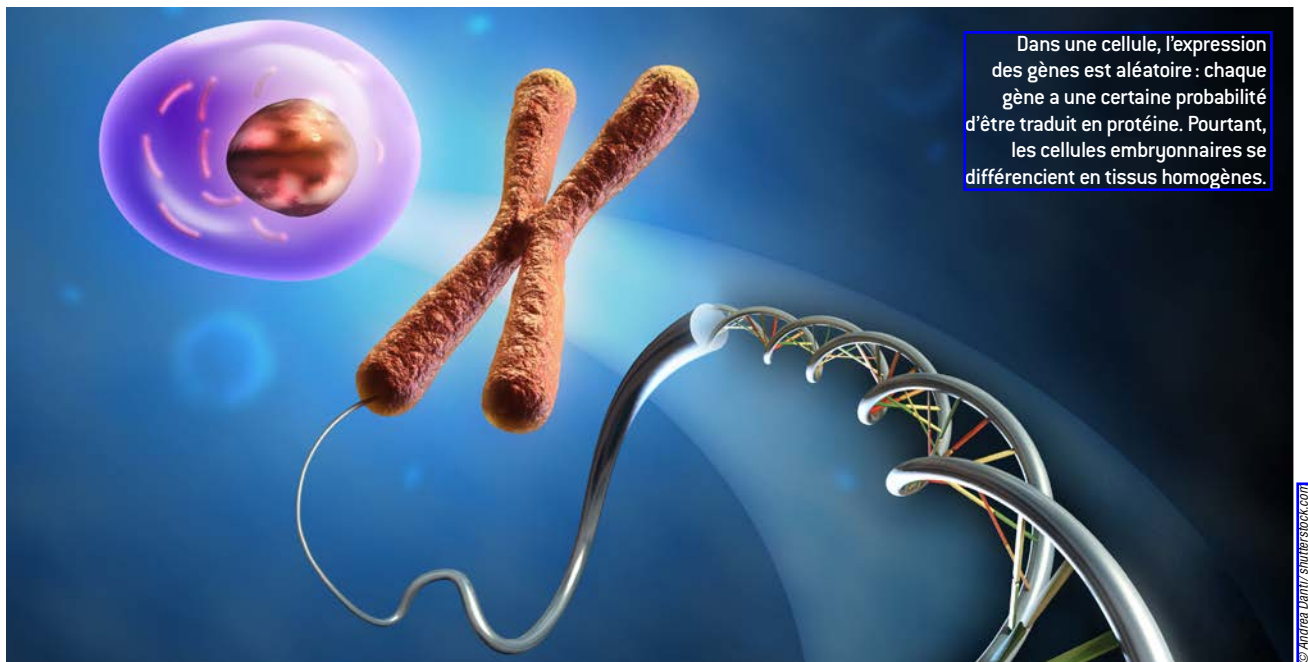
Recevez gratuitement la lettre d'information en inscrivant uniquement votre adresse mail sur www.pourlascience.fr

Actualités

Biologie

Différenciation cellulaire : la part du hasard

Au cours de la différenciation de cellules en un tissu, l'expression des gènes est d'abord de plus en plus hétérogène d'une cellule à l'autre, puis s'uniformise.



Dans une cellule, l'expression des gènes est aléatoire : chaque gène a une certaine probabilité d'être traduit en protéine. Pourtant, les cellules embryonnaires se différencient en tissus homogènes.

© Andrew Vaitir/Shutterstock.com

Par quel mécanisme une cellule se différencie-t-elle en un type cellulaire plutôt qu'un autre ? Si les biologistes ont longtemps vu cette transformation comme le fruit d'un programme génétique où une succession de régulateurs s'activeraient dans un ordre établi, ils savent aujourd'hui que les choses ne sont pas aussi simples. Depuis quelques décennies, des travaux suggèrent que l'expression des gènes est, non pas une chaîne bien huilée d'événements, mais un phénomène aléatoire. En ce qui concerne la différenciation cellulaire, cela reformule la question de la façon suivante : comment une expression aléatoire des gènes conduit-elle à des tissus homogènes de cellules différenciées ? Une équipe de biologistes, mathématiciens et bio-informaticiens codirigée par

Sandrine Gonin-Giraud et Olivier Gandrillon, du Laboratoire de biologie et modélisation de la cellule (CNRS, Inserm, université de Lyon, université Claude-Bernard), à l'École normale supérieure de Lyon, vient d'apporter des éléments de réponse en étudiant la variabilité de l'expression des gènes d'une cellule à l'autre au cours de leur différenciation.

Depuis quelques années, il est possible d'analyser l'expression des gènes dans des cellules individuelles, ce qui permet d'étudier leur diversité de façon qualitative et quantitative. Plusieurs études ont ainsi révélé un phénomène qui n'apparaissait pas lorsqu'on n'étudiait l'expression des gènes qu'à l'échelle d'une population de cellules : lors de la différenciation cellulaire de cellules souches embryonnaires, ou lorsque l'on

reprogramme des cellules en cellules souches, on observe, d'une cellule à l'autre, une hétérogénéité dans l'expression de certains gènes, qui suggère que cette variabilité joue un rôle dans la différenciation.

L'idée n'est pas nouvelle. Dès 1983, Jean-Jacques Kupiec, alors dans une unité Inserm à l'hôpital Saint-Louis, à Paris, a proposé un modèle probabiliste de différenciation cellulaire où il prédisait que celle-ci se produit en deux temps : d'abord, au gré de l'expression aléatoire des gènes, différents types cellulaires émergent, mais sont susceptibles de changer à chaque réplication. Puis, les interactions avec l'environnement proche favoriseraient un type cellulaire et une organisation, au détriment des autres. Un peu comme, au fil de l'évolution, la sélection naturelle favorise, parmi

toutes les variations apparues de façon aléatoire dans un environnement donné, celles qui donnent un avantage pour survivre dans cet environnement. Jean-Jacques Kupiec nomme d'ailleurs son modèle le darwinisme cellulaire.

Plus récemment, d'autres modèles conciliant différenciation cellulaire et expression aléatoire des gènes ont aussi été proposés. Dans l'un, le hasard dans l'expression des gènes est vu comme un bruit qui oriente la dynamique de réseaux de régulation des gènes. Dans un autre, chaque cellule en cours de différenciation est vue comme une particule se déplaçant dans un espace d'états. Dans cet espace, les stades cellulaires identifiés (différencié, répliqué...) sont des régions susceptibles d'attirer les particules – des attracteurs –, et l'on passerait d'un attracteur

à un autre grâce à une augmentation temporaire de variabilité dans l'expression des gènes.

En fait, tous ces modèles supposent que la variabilité de l'expression des gènes passe par un pic lors de la différenciation : une augmentation de l'hétérogénéité de l'expression dans la population de cellules, suivie d'une restriction de cette hétérogénéité. Et c'est bien un tel pic que Sandrine Gonin-Giraud, Olivier Gandrillon et leurs collègues ont observé en suivant l'expression de 90 gènes de cellules primaires de sang de poulet prélevées à six étapes de leur différenciation. L'intérêt de ces cellules est qu'il est possible de les maintenir en culture dans leur état d'origine, puis de déclencher leur différenciation en globules rouges au moment choisi. En mesurant l'hétérogénéité de l'expression des gènes d'une cellule à l'autre (sous la forme de l'entropie du système), les chercheurs ont montré que celle-ci augmentait pendant les huit premières heures de la différenciation, atteignant un pic entre 8 et 24 heures, puis diminuait considérablement. De plus, le pic précédait l'entrée irréversible dans la différenciation, qui se produisait entre 24 et 48 heures.

Quel déclencheur oriente alors la cellule vers le bon état différencié ? Les trois modèles proposés apportent tous des scénarios séduisants. À l'avenir, l'étude continue de l'expression des gènes dans des cellules individuelles au cours de leur différenciation aidera peut-être à affiner notre vision du mécanisme. En attendant, il n'y a plus de doute possible : la variabilité de l'expression des gènes est une composante essentielle de ce mécanisme.

Marie-Neige Cordonnier

A. Richard et al., *PLOS Biology*,
27 décembre 2016

Métrologie

Un étalon quantique pour l'ampère

Fin 2018, les métrologues redéfiniront les unités du Système international (SI) – le mètre, le kilogramme, la seconde, l'ampère, le kelvin, la candela et la mole – à partir de constantes fondamentales de la physique, afin de s'affranchir des artéfacts matériels. Mais en pratique, pourront-ils utiliser ces définitions ? Pour l'ampère, c'est désormais acquis. Une équipe du Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE), à Trappes, a mis au point un générateur de courant quantique exact à 10^{-8} près. Explications d'un de ses membres, Wilfrid Poirier.

Quel est l'étalon actuel de l'ampère ?

Wilfrid Poirier : On est toujours contraint par une définition de 1948 fondée sur la force d'Ampère, qui relève de l'électromécanique : on définit l'ampère à partir d'une force mécanique entre deux fils dans lesquels on fait circuler le courant. Le problème est qu'on ne sait pas assez bien mettre en pratique cette expérience de pensée pour réaliser l'ampère avec l'exactitude souhaitée pour les mesures électriques, c'est-à-dire à 10^{-8} près. On se fonde donc sur deux autres étalons – de tension (le volt) et de résistance (l'ohm) – que l'on sait obtenir chacun à 10^{-9} près à partir de deux effets quantiques macroscopiques de la physique du solide : l'effet Josephson pour le volt et l'effet Hall quantique pour l'ohm. Mais les techniques pour donner l'ampère appliquent la loi d'Ohm à des objets physiques – résistance à fil bobiné, référence de tension à diodes Zener – qui, bien qu'étalonnés à partir des étalons quantiques, dérivent dans le temps et limitent l'incertitude à 10^{-6} .

Ne peut-on s'affranchir de ces intermédiaires ?

W. P. : C'est l'intérêt de nos travaux : nous avons trouvé une solution qui permet de produire un circuit

quantique où l'on applique la loi d'Ohm directement aux étalons de tension et de résistance, ce qui permet de s'affranchir des résistances parasites qui les relient et de conserver leur grande exactitude.

Comment procédez-vous ?

W. P. : Nous avons multiplié les connexions entre les deux étalons et utilisé des propriétés de l'effet Hall quantique. Celui-ci se produit dans un gaz bidi-



Wilfrid Poirier, chercheur au LNE, à Trappes.

mensionnel d'électrons à basse température soumis à un fort champ magnétique. Dans ce gaz, il n'y a pas de dissipation d'énergie, et il existe donc des lignes équipotentielles. La redondance des connexions à ces lignes permet de réduire l'impact des résistances de contact. Un amplificateur cryogénique extrêmement sensible, exact à 10^{-10} près, somme alors l'ensemble des courants redondants et fournit le courant quantique de référence. Enfin, pour obtenir un courant exploitable, nous avons asservi, via

l'amplificateur, une source de courant externe sur ce courant quantifié. Notre générateur produit ainsi un courant quantifié qui peut aller de 1 microampère à 10 milliampères.

Votre approche sera-t-elle compétitive pour 2018 ?

W. P. : C'est bien parti. Dans le futur SI, l'ampère sera défini par le flux de charges élémentaires par seconde, ce que fournit notre étalon, puisque les effets quantiques y sont reliés. Une autre approche quantique existe, la pompe monoélectronique (les électrons passent un à un en cadence par effet tunnel dans un nanodispositif), mais elle livre des courants très faibles (quelques centaines de picoampères), exacts à 2×10^{-7} près. Elle n'a pas encore pu servir à étalonner un appareil commercial, contrairement à notre étalon. Celui-ci est certes encombrant – les étalons Hall et Josephson et l'amplificateur sont chacun dans un cryostat –, mais nous avons bon espoir de diminuer prochainement son incertitude d'un facteur 10 et de rassembler les effets quantiques dans un seul cryostat d'ici à dix ans. Ce qui n'empêchera pas l'étalon d'être opérationnel dès 2018.

M.-N. C.

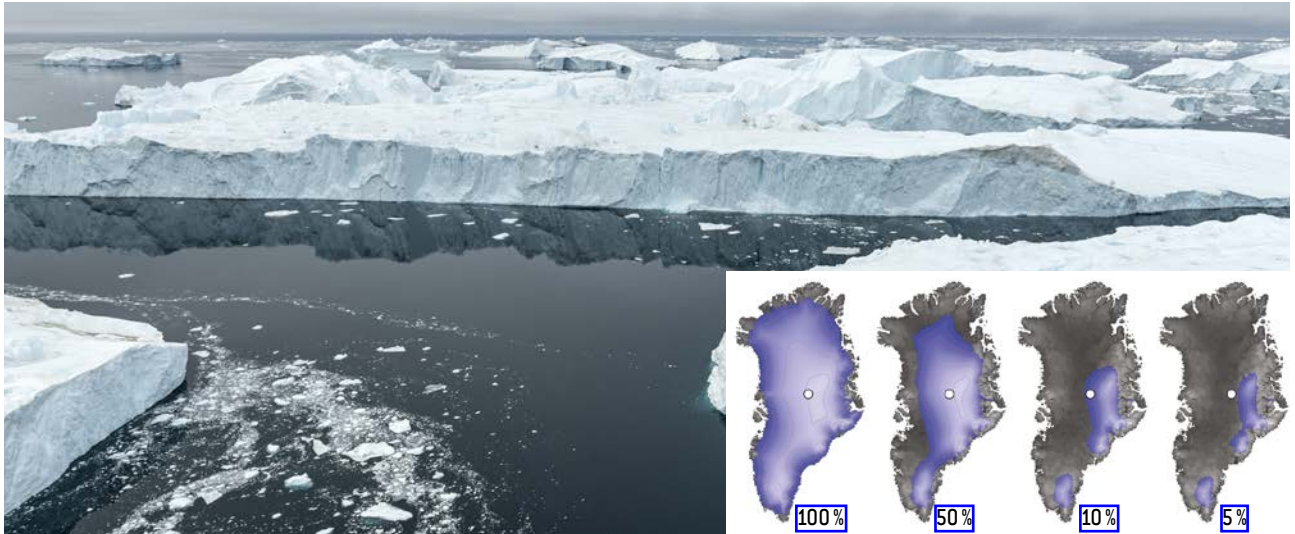
J. Brun-Picard et al., *Phys. Rev. X*,

12 décembre 2016

Climatologie

La calotte groenlandaise, plus instable qu'on ne le pensait

Au cours du dernier million d'années, la couche de plusieurs kilomètres de glace qui recouvre normalement le centre du Groenland a disparu pendant des dizaines, voire des centaines de milliers d'années, chaque fois que la température moyenne terrestre s'est stabilisée à un niveau comparable à l'actuel.



Au Groenland, les glaciers qui débouchent sur la mer transportent des sédiments boueux. L'étude de ces derniers montre que la seule partie de la calotte glaciaire restée quasi immuable recouvre les montagnes orientales.

Deux études sur le passé groenlandais intriguent : selon la première, l'est du Groenland est couvert de glace depuis des millions d'années ; selon la seconde, le centre du Groenland s'est retrouvé plusieurs fois à l'air libre au cours du dernier million d'années.

Pour parvenir à ces conclusions, les chercheurs ont mesuré dans les sédiments marins de l'est groenlandais et dans la roche sous-jacente à la calotte glaciaire d'épaisseur plurikilométrique du centre du Groenland les variations des concentrations en béryllium 10 (noté ^{10}Be) et en aluminium 26 (noté ^{26}Al).

Ces deux isotopes radioactifs sont produits par la fragmentation de noyaux de silicium et d'oxygène sous l'effet du rayonnement cosmique. Ce dernier étant divisé par deux tous les 40 centimètres de roche et tous les 120 centimètres de glace, son flux est négligeable à la base d'un épais glacier. Dans ce cas, seuls des muons, particules qui interagissent très peu, traversent

toute l'épaisseur et brisent encore quelques noyaux.

L'équipe de Paul Bierman, de l'université du Vermont aux États-Unis, a constaté que les sédiments marins transportés en mer puis relâchés par les icebergs de l'est du Groenland contiennent très peu de ^{10}Be et de ^{26}Al (environ 5000 atomes par gramme). Typiques d'un bombardement muonique, ces faibles teneurs sont maintenues sur l'épaisseur sédimentaire accumulée durant les 7,5 derniers millions d'années. On en déduit qu'au cours de cette période, la base boueuse des glaciers orientaux du Groenland se trouvait sous les glaciers.

Quant à l'équipe de Joerg Schaefer, de l'observatoire terrestre Lamont Doherty à New York, elle a mesuré les teneurs des mêmes isotopes dans un échantillon rocheux épais de 1,5 mètre et prélevé sous la calotte glaciaire du centre du Groenland. Les teneurs importantes constatées (10 000 à 25 000 atomes ^{10}Be par gramme et 55 000 à 90 000 atomes ^{26}Al) indiquent que le rayonnement

cosmique a atteint ces roches dans le passé. Combien de temps l'écran de glace est-il resté absent ? À partir des teneurs mesurées, les chercheurs estiment que cela a été le cas pendant 280 000 ans au cours du 1,1 dernier million d'années.

Chargés par la revue *Nature* de lever cette contradiction apparente, Pierre-Henri Blard et Guillaume Leduc, du CNRS, ainsi que Neil Glasser, un collègue anglais, ont pointé qu'à l'est du Groenland, une longue chaîne de montagnes atteint parfois 2000 mètres d'altitude. Lors des périodes chaudes, les glaciers ont donc pu s'y maintenir, tandis qu'ils disparaissaient au centre du Groenland. Or, au cours du dernier million d'années, la température moyenne terrestre a été comparable à deux reprises à celle d'aujourd'hui. Et que s'est-il probablement passé à chaque fois ? La glace a disparu du centre du Groenland pendant des dizaines, voire des centaines de milliers d'années tandis que l'océan mondial est monté de 7 à 10 mètres...

François Savatier

Nature, vol. 540, pp. 202-203, 252-260, 2016

7,5
millions d'années

C'est la durée pendant laquelle les montagnes de l'est du Groenland ont été constamment recouvertes de glace

Physique quantique

Une étoile à neutrons révèle un effet quantique

La physique quantique nous a appris que le vide n'est pas vraiment vide: même l'endroit le plus dénué de matière fourmille de particules dites virtuelles, qui surgissent par paires particule-antiparticule et s'annihilent aussitôt. Or Roberto Mignani, de l'Institut d'astrophysique spatiale et de physique cosmique à Milan, et son équipe ont mis en évidence l'effet sur les propriétés du vide d'un champ magnétique intense dues aux particules virtuelles.

Les théoriciens avaient prédit que lorsque des ondes lumineuses traversent un tel vide, celles dont la composante électrique est perpendiculaire au champ magnétique externe interagissent davantage que les autres avec les particules virtuelles. Elles se propagent alors plus lentement, ce qui conduit à un effet global de polarisation de la lumière. Le phénomène est nommé biréfringence magnétique du vide.

Suivant une idée proposée en 2002 par l'Israélien Nir Shaviv, l'équipe de Roberto Mignani a



Une étoile à neutrons présentant un champ magnétique intense a permis de mettre en évidence un phénomène quantique: la biréfringence magnétique du vide.

observé cet effet en analysant la lumière émise par une étoile à neutrons. De tels astres présentent un champ magnétique, de l'ordre de 10^9 teslas (à titre de comparaison, le champ magnétique terrestre est d'environ $4,7 \times 10^{-5}$ tesla).

Ces astronomes ont observé l'étoile à neutrons RXJ1856.5-3754 à l'aide de l'instrument Fors, muni d'un polarimètre et installé au VLT (*Very Large Telescope*), au Chili. Ils ont mesuré un degré de polarisation lumineuse, attribué à l'effet

de biréfringence magnétique du vide, de 16,4 %.

Des expériences de laboratoire telles que PVLAS, en Italie, et BMV, à Toulouse, tentent aussi de mettre en évidence cet effet. Le champ magnétique y est de l'ordre de la dizaine de teslas. Les physiciens utilisent alors un dispositif optique sensible à des variations infimes de polarisation dans un laser. Ils espèrent détecter l'effet d'ici à quelques années.

Sean Bailly

MNRAS, vol. 465, pp. 492-500, 2017

Du microbiote au pancréas

Dans le pancréas, les cellules bêta produisent l'insuline, une hormone qui régule la concentration de sucre dans le sang. Mais chez les personnes atteintes de diabète de type 1, ces cellules sont détruites ou endommagées. Comment favoriser le développement de ces cellules? Karen Guillemin, de l'université de l'Oregon, aux États-Unis, et son équipe ont montré que des bactéries du microbiote intestinal stimulent le développement précoce des cellules bêta chez le poisson zèbre.

Les chercheurs ont observé qu'une croissance rapide des cellules bêta coïncidait avec la colonisation du système digestif du poisson par des bactéries du genre *Aeromonas*, qui produisent une protéine notée Befa (*Beta cell expansion factor A*). Cette protéine favoriserait le développement des cellules bêta. Des protéines homologues à Befa, produites par des bactéries du microbiote humain, stimulent aussi le développement des cellules bêta chez le poisson zèbre. Qu'en est-il chez l'homme?

Neurobiologie

La molécule qui déforme le temps

Pourquoi une heure semble-t-elle si courte quand vous êtes plongé(e) dans un livre ou un jeu qui vous passionne? Parce que votre perception du temps est déterminée par votre horloge interne, à savoir des signaux électriques périodiques émis par votre cerveau. Or un afflux de dopamine ralentit la cadence de ces derniers, viennent de découvrir Sofia Soares et deux collègues du centre Champalimaud, à Lisbonne. Ainsi, lorsque vous pratiquez une activité agréable, la dopamine, que l'on sait associée au plaisir, réduirait le nombre de tics cérébraux produits pendant un temps fixé, transformant une

heure interminable en quelques « minutes neuronales ».

Pour le montrer, les chercheurs ont mesuré la perception des durées chez des souris, en leur apprenant à presser avec le nez un bouton particulier selon que l'intervalle entre deux sons était supérieur ou inférieur à 1,5 seconde. Ils ont constaté que lorsqu'on bloque, à l'aide de produits pharmaceutiques, les neurones dopaminergiques (producteurs de dopamine), les performances des animaux se dégradent, signe qu'ils ne perçoivent plus le temps de la même façon.

Pour étudier plus précisément cette influence sur le temps perçu,

les chercheurs ont ensuite activé artificiellement les neurones dopaminergiques des souris par des techniques dites d'optogénétique. Le temps a paru s'accélérer pour les animaux: un même intervalle entre deux sons était plus souvent estimé comme court (inférieur à 1,5 seconde).

Ce résultat va à l'encontre d'un certain nombre d'autres travaux, selon lesquels la dopamine tendrait plutôt à étirer le temps. La synthèse reste donc à faire. La dopamine en sera en tout cas l'un des éléments essentiels.

Guillaume Jacquemont

S. Soares et al., *Science*, vol. 354, pp. 1273-1277, 2016



L'activation de neurones producteurs de dopamine suffit pour que le temps semble soudain passer plus vite.

L'eau gèle à 105 °C...

... dans des nanotubes de carbone. C'est l'observation réalisée par l'équipe de Michael Strano, du MIT. Dans des conditions habituelles de pression et de température, l'eau gèle à 0 °C et bout à 100 °C. Il est bien connu qu'en variant un peu ces conditions, ces valeurs changent légèrement. Placer l'eau dans des tout petits volumes a aussi un effet, mais les variations sont de l'ordre d'une dizaine de degrés. Dans des nanotubes 50 000 fois plus fins qu'un cheveu, le changement est spectaculaire !

Le blob transmet son savoir

Composé d'une unique cellule, le blob, *Physarum polycephalum*, n'a pas de cerveau. Pourtant, Audrey Dussutour et David Vogel, du Centre de recherche sur la cognition animale, à Toulouse, avaient montré il y a quelques mois que le blob peut apprendre que le sel est assez inoffensif et ainsi traverser un pont couvert de cette substance pour atteindre de la nourriture. Plus fort : le blob transmet ce savoir lorsqu'il fusionne avec un autre blob. Les blobs fusionnés traversent aussi des ponts de sel. Et si, après au moins trois heures en contact, les chercheurs séparent les blobs, celui qui ne détenait pas ce savoir l'a acquis !

Du rythme neuronettoyant

Hannah Iaccarino et ses collègues du MIT ont constaté que, chez des souris dont le cerveau est envahi de plaques amyloïdes (des structures associées à la maladie d'Alzheimer), une fréquence d'activité cérébrale (de 40 hertz) est réduite lorsqu'elles réalisent des tâches d'apprentissage ou de mémorisation. Les chercheurs ont alors forcé le cerveau des rongeurs à produire cette fréquence électrique en éclairant les neurones avec des lasers pulsés. Ils ont alors vu que le cerveau des souris se vidait de ses plaques amyloïdes. Le mécanisme reste à élucider.

Paléontologie

La très longue incubation des dinosaures

Neuf mois pour un bébé humain, 45 jours pour un bébé autruche. Combien pour un bébé dinosaure ? Entre 11 et 85 jours se dit-on, puisque c'est la fourchette dans laquelle se situe la durée d'incubation d'un oisillon. Pour en avoir le cœur net, Gregory Erickson, de l'université de Floride, et des collègues ont passé au scanner à rayons X des dents fossilisées de deux dinosaures non aviens encore dans l'œuf : celles d'un embryon de *Protoceratops* – un petit herbivore de la taille d'un mouton du désert de Gobi – et celles d'un embryon d'*Hypacrosaurus* – un énorme dinosaure à bec de canard de l'Alberta au Canada.

Le comptage des stries marquant chacun des jours de la croissance de ces dents à l'intérieur

de l'œuf leur a révélé de longues durées d'incubation : presque trois mois pour le *Protoceratops*, et six mois pour l'*Hypacrosaurus*.

Ainsi, l'incubation des œufs de ces espèces non aviennes de dinosaures mobilisait leurs parents plus longtemps qu'on ne le constate chez les oiseaux modernes. Or pour devenir mature une fois la coquille brisée, un bébé dinosaure devait pouvoir rester en vie pendant plus d'une année malgré tous les dangers ; et pour croître rapidement, il lui fallait des ressources considérables. Tout compte fait, il semble que l'incubation puis la maturation d'un dinosaure non avien aient nécessité 15 à 18 mois. En comparaison, une autruche atteint sa taille adulte en 14 mois et il s'agit du plus gros des oiseaux actuels, dont la plupart

sont des passereaux matures en quelques mois...

On comprend dès lors que les dinosaures non aviens, qui ne pouvaient voler à la recherche de nourriture et devaient s'occuper pendant au moins un an de leur progéniture après avoir attendu des mois l'éclosion des œufs, aient eu plus de mal que les oiseaux à survivre au cataclysme de la chute de la météorite de Chicxulub, il y a 65 millions d'années. Dans la nature perturbée et peu productive qui a résulté de l'impact, les parents oiseaux, eux, ont pu voler loin en quête des ressources nécessaires pour nourrir des poussins, lesquels étaient rapidement capables de les imiter.

F.S.

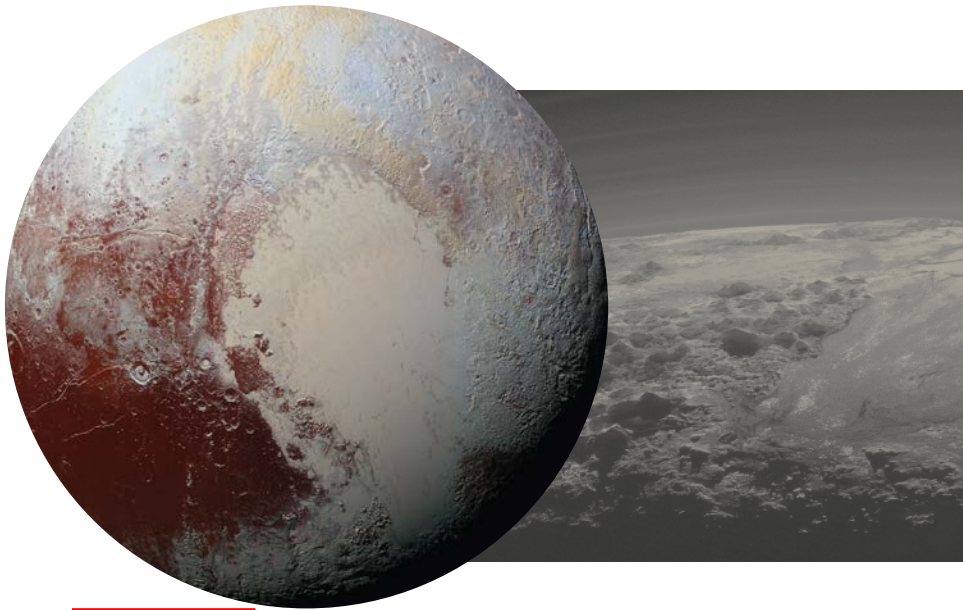
G. M. Erickson et al., PNAS, en ligne le 3 janvier 2017

Insolite

L'australopithèque qui chaussait du 42

Le site tanzanien de Laetoli, célèbre pour ses traces d'australopithèques, n'a pas encore livré tous ses secrets. Fidelis Masao, de l'université de Dar es Salam, et des collègues viennent d'y découvrir les traces d'un individu qui aurait pesé environ 48 kilogrammes pour 1,65 mètre de haut : cela en fait le plus grand australopithèque connu. Un individu masculin, pensent les chercheurs, qui aurait eu un rôle social comparable à celui d'un gorille mâle.





NEW HORIZONS / NASA

Astrophysique

Au cœur des secrets de Pluton

Sur la planète naine, la région nommée Sputnik Planitia présente une structure atypique, témoin d'une histoire géologique globale.

Lors de son passage près de Pluton en juillet 2015, la sonde *New Horizons* a révélé une zone claire en forme de cœur à la surface de la planète naine. Au sein du lobe gauche de ce cœur se niche une étonnante région nommée Sputnik Planitia. Plusieurs équipes de chercheurs, dont Tanguy Bertrand et François Forget, du Laboratoire de météorologie dynamique de l'université Pierre-et-Marie-Curie et du CNRS, se sont penchées sur cette région pour en comprendre l'origine.

Sputnik Planitia est une vaste région de 1000 kilomètres de diamètre couverte d'une glace lisse et sans cratères (ce qui indique que cette formation est jeune, âgée de moins de 10 millions d'années). Ce glacier se trouve dans une dépression probablement née de l'impact d'une météorite ayant laissé un cratère profond dans la croûte de Pluton. Tanguy Bertrand et François Forget ont étudié comment s'est formée au fond du cratère la glace, composée d'azote, de méthane et de monoxyde de carbone. Ces trois éléments sont normalement à l'état gazeux dans l'atmosphère de Pluton, où la température est d'environ 40 kelvins (-233 °C). Mais cette

région, du fait de sa position et de l'inclinaison de Pluton, est plus froide en moyenne et favorise la condensation de l'atmosphère de la planète naine (composée surtout d'azote) sous la forme de glace solide. En outre, au fond du bassin, la pression de l'atmosphère est plus forte, ce qui permet à l'azote de se condenser à une température moins basse que sur les terrains situés en dehors du bassin.

Le glacier, de plusieurs kilomètres d'épaisseur, est plus dense que la croûte de la planète naine, composée de glace d'eau. Une autre équipe suggère que le glacier aurait alors contribué à enfoncer la surface, de sorte que le fond de Sputnik Planitia occupe maintenant une dépression, située 6 à 13 kilomètres plus bas que les régions alentours.

Cette importante structure géologique a créé une anomalie dans le champ gravitationnel de Pluton, d'où une influence sur l'interaction dynamique avec son satellite Charon. Les deux corps n'étant pas parfaitement sphériques mais plutôt ovoïdes, les forces de marée ont *a priori* conduit le système Pluton-Charon dans la configuration la plus stable, celle où les grands axes des corps sont alignés. Mais la

formation de Sputnik Planitia a perturbé cet équilibre : Pluton a basculé sur son axe et cette région s'est rapprochée de l'équateur. Aujourd'hui, le système Pluton-Charon évolue de telle façon que Sputnik Planitia se trouve toujours presque aux antipodes de Charon. Par ailleurs, le basculement de Pluton a provoqué de fortes tensions et compressions à sa surface, ce qui a fracturé la croûte de glace et conduit à la formation de montagnes et de canyons.

Comment la dépression a-t-elle fait basculer la planète ? Si l'on considère le modèle géologique le plus simple de Pluton, un cœur rocheux entouré d'une croûte de glace d'eau, le basculement de Sputnik Planitia vers l'équateur ne serait possible que si l'épaisseur du glacier était de 40 kilomètres, une valeur trop grande pour être réaliste. Une autre possibilité serait que sous la glace se trouve un océan d'eau liquide, qui serait plus proche de la surface sous Sputnik Planitia. Comme Encelade ou Dioné, deux lunes de Saturne, Pluton cacherait donc un océan d'eau liquide !

S. B.

T. Bertrand et F. Forget, J. T. Keane et al., F. Nimmo et al., D. P. Hamilton et al., *Nature*, vol. 540, pp. 86-99, 2016

Pluton a été photographiée de près par la sonde *New Horizons*. L'une des images les plus étonnantes est celle de cette région claire en forme de cœur qui ressort sur cette vue en fausses couleurs (à gauche). Dans le lobe gauche se trouve la structure Sputnik Planitia. Au centre et à droite, les photographies de la sonde montrent des montagnes de glace et peut-être un cryovolcan.

L'étrange étoile de Tabby

Objets en transit, pluie de comètes ou structure extraterrestre... : comment expliquer les baisses irrégulières de luminosité de l'étoile de Tabby ? De nombreuses hypothèses ont été avancées, sans convaincre. Grâce à une étude statistique menée sur la durée et l'amplitude des variations de luminosité, Mohammed Sheikh et ses deux collègues de l'université de l'Illinois suggèrent que le phénomène est interne à l'étoile. Celle-ci serait dans un état hors équilibre et en passe de subir une transition de phase dont la nature reste à déterminer.

Nouvelle ville antique en Iraq

Chose rare depuis quelques années, des chercheurs de la direction des Antiquités de la province kurde de Dahuk et de l'université de Tübingen viennent de trouver une ville mésopotamienne de l'âge du Bronze. En fouillant un tell, c'est-à-dire une colline formée par une longue occupation humaine, ils ont identifié, près du village de Bassetki, une ville fortifiée en terre dès 2700 avant notre ère, qui est restée florissante pendant pas moins de 1200 ans ! Vers 1800 avant notre ère, des bâtiments de pierre y ont même été érigés. Ces fouilles précèdent la construction d'une autoroute.

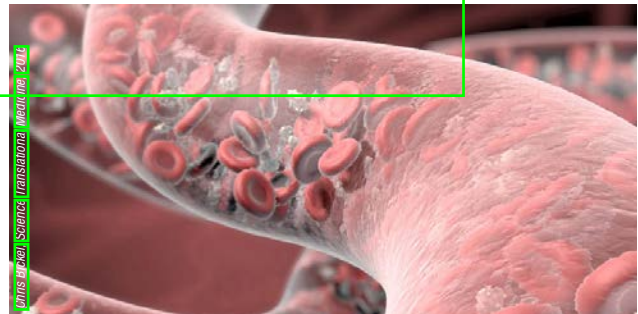
Biochimie

Un antidote au monoxyde de carbone ?

Le monoxyde de carbone est responsable d'environ 4000 intoxications par an en France, d'après l'Institut national de veille sanitaire. Alors qu'il n'existe actuellement pas d'autres soins que l'oxygénothérapie pour ce poison, Ivan Azarov, de l'université de Pittsburgh, aux États-Unis, et ses collaborateurs ont mis au point une protéine modifiée capable de piéger le monoxyde de carbone présent dans la circulation sanguine, susceptible d'être utilisé comme antidote.

Lorsqu'il est respiré, le monoxyde de carbone passe dans le sang, où il se fixe à l'hémoglobine à la place du dioxygène, formant ainsi la carboxyhémoglobine, très stable : le dioxygène ne peut alors plus être transporté, ce qui cause une hypoxie des organes, suivie de la mort de l'organisme.

Les biologistes ont mis au point la neuroglobine mutante H64Q-CCC dont l'affinité pour le monoxyde de carbone est 500 fois supérieure à celle de l'hémoglobine. Stable, et soluble dans les milieux physiologiques, elle



Des chercheurs ont développé une protéine, une neuroglobine, qui se lie au monoxyde de carbone et l'élimine de la circulation sanguine.

fixe également 10 000 fois plus le monoxyde de carbone que le dioxygène, faisant ainsi d'elle un possible antidote.

Les chercheurs ont montré *in vitro* que cette neuroglobine séquestre rapidement le monoxyde de carbone fixé sur l'hémoglobine : dans des globules rouges saturés en monoxyde de carbone, seules 25 secondes sont nécessaires pour que son taux soit réduit de moitié en présence de H64Q-CCC, contre 20 minutes lors des oxygénothérapies hyperbares employées aujourd'hui.

Lorsque des souris ont été exposées à des concentrations létales en monoxyde de carbone, l'injection de H64Q-CCC a permis la survie de 80 % d'entre elles, contre 0 à 10 % dans les deux groupes témoins. Les auteurs de cette étude estiment que si l'efficacité et la non-toxicité de H64Q-CCC se confirment sur les grands mammifères, un tel traitement pourrait être rapidement testé chez l'homme.

Martin Tiano

I. Azarov et al., *Science Translational Medicine*, vol. 8, article 368ra173, 2016

Physique des particules

Première mesure du spectre de l'antihydrogène

Au Cern, près de Genève, tout un département est dédié à l'étude de l'antimatière et à la comparaison entre particules et antiparticules. Les membres de l'expérience Alpha viennent de montrer qu'une partie du spectre des atomes d'hydrogène et d'antihydrogène est bien identique.

Ces observations relèvent de la spectroscopie, qui consiste à analyser le rayonnement émis par un atome après qu'il a été excité. En effet, d'après la physique quantique, chaque électron d'un atome occupe une orbitale, associée à une énergie définie. Lorsqu'un atome se désexcite, un électron passe d'une orbitale

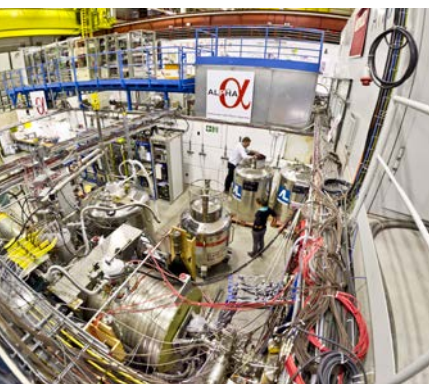
d'énergie élevée à une autre d'énergie moindre. L'atome émet alors un photon dont l'énergie correspond exactement à l'écart d'énergie entre les deux orbitales.

Le spectre de l'atome d'hydrogène a été mesuré avec une précision extraordinaire. Qu'en est-il de l'atome d'antihydrogène, constitué d'un antiproton et d'un positron ? Étudier l'antimatière est un défi, car, dans notre monde composé de matière, la moindre antiparticule produite interagit rapidement avec son environnement et s'annihile. Il faut donc isoler les antiparticules et les confiner assez longtemps si l'on veut effectuer des mesures. Dès 2010, les

membres de l'expérience Alpha avaient montré qu'il était possible de produire et piéger des atomes neutres d'antihydrogène dans un champ magnétique. Les physiciens ont ensuite amélioré le dispositif et ont réalisé récemment les premières mesures spectroscopiques de l'antihydrogène. Ils ont observé la transition entre l'état fondamental 1s (celui de plus basse énergie) et l'état suivant noté 2s. La différence d'énergie entre les deux états est identique à celle de l'hydrogène avec une excellente précision, de l'ordre de 2 pour 10 milliards.

S. B.

M. Ahmadi et al., *Nature*, en ligne le 19 décembre 2016



L'expérience Alpha, au Cern, étudie les propriétés de l'antimatière, en particulier de l'antihydrogène, dont l'atome est constitué d'un antiproton et d'un positron.

Paléontologie

Chaîne alimentaire fossile

Il y a 48 millions d'années, un serpent venait d'ingérer un iguane, qui venait d'avaler un insecte, quand il dut fuir et mourir dans le lac de Messel. Ce paléolac volcanique devait être dangereux, car il constitue l'un des plus extraordinaires pièges à fossiles connus. De très nombreux animaux s'y sont noyés avant de chuter sur le fond anoxique du lac, où ils ont été étonnamment bien conservés, souvent avec des chairs et le contenu de leur estomac. C'est ainsi qu'au sein du fossile d'un boa de un mètre de long, des chercheurs de l'institut Senckenberg, à Francfort-sur-le-Main, ont découvert un petit iguane allongé; et à l'intérieur de l'estomac de l'iguane, des fragments brillants de la cuticule d'un coléoptère. Trois niveaux de la chaîne alimentaire ont été fossilisés en même temps!

F. S.

K. T. Smith et A. Scanferla, *Palaeobio Palaeoenv.*, vol. 96, pp. 589-599, 2016

Génétique

Qui sent l'asperge ?

Lors de la digestion des asperges, l'organisme produit des métabolites, méthanthiol et S-méthyl thioesters, qui se retrouvent dans les urines et sont à l'origine d'une odeur caractéristique désagréable. Mais tout le monde ne perçoit pas ce «parfum». Lorelei Mucci, de la faculté de santé publique Harvard TH Chan, à Boston aux États-Unis, et ses collègues ont étudié l'origine de cette anosmie, l'incapacité à sentir cette odeur particulière.

Les chercheurs ont interrogé 6909 personnes et les résultats montrent que 58 % des hommes et 61,5 % des femmes sont incapables de détecter l'odeur des asperges dans les urines. L'analyse du génome des participants a permis d'identifier 871 mutations de type polymorphisme d'un seul nucléotide sur le chromosome 1 et portant sur plusieurs gènes liés aux récepteurs olfactifs OR2.

L'odorat est un des sens les plus mal compris. L'étude d'anomalies, d'hyperosmies ou d'anosmies, comme celle de l'odeur de l'asperge, permettra peut-être de mieux élucider les mécanismes de la perception des odeurs.

Marion Surinon et Ferdinand De Naurois

S. C. Markt et al., *BMJ*, en ligne le 13 décembre 2016

Physique

Les sauts du proton dans l'eau

Les transferts de protons et d'électrons entre molécules jouent un rôle central dans le transport de charges en milieu aqueux. Si le transfert d'électrons est très bien vu par l'expérience, celui des protons – le mécanisme de Grotthuss – ne l'avait jamais été. En collaboration avec des collègues américains, Matias Fagiani, Harald Knorke et Knut Asmis, de l'institut Wilhelm-Ostwald pour la chimie physique et théorique de l'université de Leipzig, viennent d'isoler l'empreinte spectroscopique du transfert d'un proton entre un ion hydronium – H_3O^+ – et une molécule d'eau.

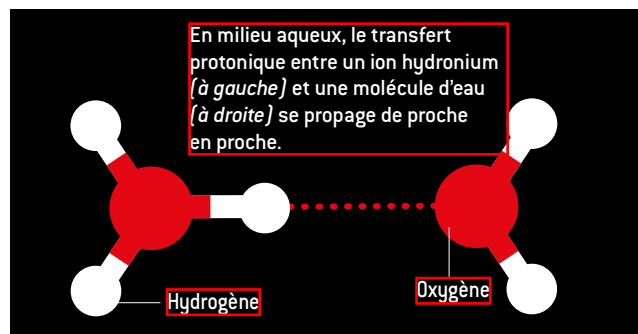
Comment ont-ils fait? Outre le transfert de protons entre ions hydronium et molécules d'eau, l'agitation thermique induit de très nombreuses déformations et vibrations moléculaires. Pour saisir, parmi tous ces mouvements, le saut du proton, c'est-à-dire sa bascule d'un ion hydronium vers une molécule d'eau, les chercheurs ont travaillé à réduire l'agitation. Ils ont préparé de

nombreux agrégats de molécules d'eau dans un piège à ions à très basse température; ils ont aussi mené l'expérience dans l'eau lourde D_2O , ce qui remplace tous les atomes d'hydrogène par du deutérium D; finalement, ils ont introduit dans le piège des espèces (D_2 , N_2 , CO , D_2O) avides de se combiner avec un proton, et donc aussi avec un deuteron D^+ , son équivalent dans l'expérience.

L'«aspiration» par ces espèces d'un deuteron appartenant à un ion D_3O^+ a provoqué dans le piège de multiples transferts d'un deuteron vers une molécule D_2O voisine et par là renforcé le signal spectroscopique. La mise en œuvre de tous ces choix dans un appareil combinant la spectrométrie infrarouge et la spectroscopie de masse a livré des spectrogrammes sur lesquels les effets du transfert protonique sur toutes les molécules à proximité sont identifiés ainsi que le saut du proton lui-même.

F. S.

Science, vol. 354, pp. 1131-1135, 2016



Cheval celtique à deux têtes

Dans le Baden-Württemberg, des fouilles viennent de livrer trois tumulus celtes du Hallstatt (VIII^e au V^e siècle avant notre ère). Bien conservées, ces tombes se trouvent à proximité de la Heuneburg, ancienne grande ville fortifiée celtique en Europe centrale. L'une d'elles contenait les restes d'un char. Une autre, une curieuse figurine de cavalier assis sur ce qui semble être un cheval à deux têtes opposées. Son style le date du VII^e ou VIII^e siècle. Il s'agirait de la poignée d'un vase ou d'un cou-vercle, brisée au cours d'un pillage.

Jet-stream de fer dans le noyau terrestre

Le champ magnétique terrestre – généré par les mouvements du noyau liquide de la planète – dérive globalement vers l'ouest. Mais deux zones où l'intensité du champ est plus intense, situées l'une sur la Russie, l'autre sur le Canada, se déplacent plus vite que l'ensemble du champ

magnétique. Grâce aux mesures plus précises des satellites *Swarm*, Philip Livermore et ses collègues confirment les résultats de précédentes études. La cause de ces observations: un courant de fer liquide large de 420 kilomètres localisé dans le noyau liquide et s'y déplaçant assez vite, à environ 40 kilomètres par an, d'est en ouest.

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

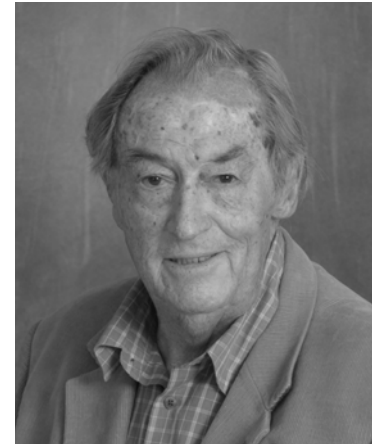


Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

ENTRETIEN

« Si l'on ne réduit pas la pauvreté, il n'y aura pas d'avenir pour la vie sauvage »

Le paléoanthropologue kényan Richard Leakey explique son combat pour arrêter le braconnage des animaux sauvages, à commencer par les éléphants et les rhinocéros. Son principal ennemi ? La corruption.



Richard LEAKEY est professeur d'anthropologie à l'université Stony Brook, à New York.

Le 30 avril 2016, le président kényan Uhuru Kenyatta mettait le feu à tout l'ivoire confisqué par son pays aux braconniers. Un brasier impressionnant : 105 tonnes d'ivoire issues du massacre de plus de 6 000 éléphants et 1,3 tonne de cornes provenant de celui de plus de 300 rhinocéros. Et un acte symbolique fort pour dénoncer un scandale majeur : inexorablement l'Afrique perd ses éléphants, rhinocéros et autres animaux emblématiques. Pas moins de 62 % des éléphants ont disparu en dix ans, les lions ont perdu 43 % de leurs effectifs en vingt ans, on ne compte plus, aujourd'hui, que 29 000 rhinocéros, alors qu'ils étaient 70 000 dans les années 1970, et 80 000 girafes, contre 140 000 à la même époque... Pour arrêter cette hécatombe, le président Kenyatta a, en avril 2015, remis Richard Leakey à la tête de l'Autorité kényane pour la faune sauvage (le Kenya Wildlife Service, ou KWS), dont le paléoanthropologue avait démissionné en 1994, après cinq années en poste, en invoquant la corruption qui sévissait parmi les fonctionnaires du gouvernement d'alors. Richard Leakey, âgé aujourd'hui de 72 ans, nous fait part de ses préoccupations et des efforts du Kenya pour la protection de son patrimoine naturel.

POUR LA SCIENCE

La famille Leakey compte des paléontologues célèbres. Comment cet héritage vous a-t-il mené à la protection des animaux ?

RICHARD LEAKEY : J'ai étudié nombre d'espèces fossiles disparues à cause d'un changement du climat ou de l'action de l'homme. Aujourd'hui, quand, dans la magnifique savane kényane, je contemple les espèces survivantes – différentes de celles du passé –, je me sens chez moi et je comprends mieux quelle est ma place dans le grand continuum de la vie. La paléontologie, c'est-à-dire l'étude de la vie sauvage passée, n'est pas déconnectée des soucis que je me fais pour la vie sauvage d'aujourd'hui : elle y contribue.

PLS

Placé à la tête du KWS en 1989, vous avez sévi contre la corruption et armés vos gardes pour combattre les chasseurs d'ivoire qui braconnaient au Kenya.

R. L. : Il nous a fallu aussi influencer le marché. J'ai pensé que ce serait une bonne idée de détruire de grandes quantités d'ivoire par de grands « feux de joie » afin de bien faire comprendre au monde que l'on tue les éléphants pour leurs défenses. Cela nous a conduits à la CITES (Convention sur

le commerce international des espèces de faune et de flore sauvages menacées d'extinction), qui interdit enfin le commerce de l'ivoire. Avec un grand impact : le nombre d'éléphants tués au Kenya est passé de plusieurs milliers par an à une centaine à la fin de 1990, un niveau maintenu pendant dix ans.

PLS

Qu'est-ce qui a relancé le braconnage ?

R. L. : Le braconnage reculait, mais d'énormes quantités d'ivoire entreposé demeuraient çà et là, et certains pays, comme l'Afrique du Sud, le Botswana et la Namibie ont voulu en tirer de l'argent. Ils ont convaincu l'organisation CITES de permettre sa commercialisation. Au Kenya, nous pensions que l'existence même d'un marché de l'ivoire ne pourrait que relancer le braconnage. C'est bien ce qui s'est passé. Très vite, de l'ivoire a été vendu dans des conditions douteuses ; les prix ont monté et les grandes mafias ont recommencé à s'intéresser à son trafic.

PLS

Cette crise vous vaut un rappel à la tête du KWS. Pourquoi avez-vous accepté ?

R. L. : Le président a promis une liberté de décision, au comité de direction et à moi-même, hors

d'atteinte des interférences politiques liées à la corruption. Quand j'ai repris l'agence, le manque de moralité y était abyssal. Nous commençons seulement à voir les bonnes personnes aux bons postes chargées d'accomplir les bonnes actions sans risquer d'être mises sous pression. Au cours des onze derniers mois, le Kenya a perdu 94 éléphants : bien moins que les centaines tués l'année précédente. Nous avons renforcé la loi kényane de protection des animaux afin de rationaliser la gestion du KWS, embauché 1 000 gardes de plus, augmenté les peines pour braconnage et nous sommes en train de recruter et d'entraîner un corps de procureurs spécialisés dans la protection de la vie sauvage. Nous logeons bien nos employés en brousse, leur assurons une protection sociale, améliorons les routes, et nous acquérons de nouveaux véhicules et équipements afin de lutter contre le braconnage.

PLS

Pour protéger la vie sauvage, il vous faut aussi l'adhésion des communautés locales. Comment vous y prenez-vous ?

R. L. : Au fil des années, *National Geographic*, la BBC et d'autres grands médias ont réalisé des documentaires sur la vie sauvage africaine destinés aux publics non africains. Aucun de ces films n'avait été projeté au Kenya. Jamais. WildlifeDirect, une ONG que j'ai fondée, a persuadé certains de ces médias de nous prêter leurs documentaires. Nous les diffusons chaque samedi à 20 heures depuis janvier 2016 et ils deviennent aussitôt les sujets les plus commentés au sein des réseaux sociaux. WildlifeDirect produit aussi pour la chaîne kényane NTV l'émission *Wild Talk*, diffusée chaque mardi soir. Il s'agit des premiers films réalisés par des Africains sur leur faune naturelle. Bientôt, la population kényane aimera autant les grands animaux sauvages que celles de Londres, de Paris ou de New York.

PLS

Les parcs nationaux africains sont censés attirer l'argent du tourisme. Est-ce aussi la logique du KWS ?

R. L. : Les Kényans sont en train de prendre conscience que la doctrine dirigeant la protection de la vie sauvage doit évoluer. Le tourisme est une composante majeure de notre futur économique,

mais c'est une ressource instable et, au mieux, de moyen terme, car l'industrie va prendre le relais à mesure que le pays se développera. Par ailleurs, beaucoup de gens comprennent que le fait d'avoir des espaces sauvages, où l'on peut venir respirer librement en jouissant de la beauté environnante, est important pour chaque pays. Et les Kényans considèrent leurs espaces naturels comme un héritage inestimable. Voilà qui est de loin bien plus important à long terme que le tourisme !

PLS

Et qu'en est-il des villages dangereusement proches des animaux sauvages ?

R. L. : La population kényane a triplé. Progressivement, les gens s'installent en des lieux peuplés d'animaux sauvages. De nombreuses personnes se font tuer par des éléphants, des buffles, des crocodiles, tandis que des récoltes sont détruites par les animaux. Tout cela engendre un certain ressentiment de la population à l'égard des animaux sauvages. C'est pourquoi je suis persuadé que la clôture des parcs nationaux, que nous

Nous empruntons à faible taux à des institutions comme la Banque mondiale et rembourserons au cours des trente années qui viennent. Ces clôtures faciliteront la lutte contre les braconniers, puisqu'ils se font souvent passer pour des bergers. Cela nous prendra de trois à cinq ans pour les installer, mais les gens, alors, nous féliciteront. Pour le moment, ils nous traitent de fous !

PLS

Au Kenya, les ruraux ne profitent guère du tourisme animalier, alors qu'en Namibie et au Botswana, les parcs gérés par les communautés villageoises bénéficient d'un important soutien local. Ne vous faut-il pas gagner le monsieur Tout le Monde kényan à la cause de la protection de la vie sauvage ?

R. L. : Bien entendu, mais faut-il le faire sur la base de bénéfices pour les locaux qui ne dureront que le temps du tourisme ? À mon avis, l'argent du tourisme doit aller au gouvernement, qui de son côté doit s'occuper de construire de meilleurs hôpitaux, de meilleures routes et une meilleure infrastructure pour la nation dans son ensemble et pas seulement pour les gens vivant autour des parcs.



UN MILITAIRE KÉNYAN surveille la destruction par le feu de nombreuses tonnes d'ivoire d'éléphant et de rhinocéros.

sommes en train d'engager, est une bonne solution : elle évitera que les animaux n'envahissent les exploitations agricoles et que les bergers ne mènent leur bétail paître dans les parcs.

PLS

Voilà une proposition radicale !

R. L. : Oui, mais ce pourrait bien être la seule solution qui fonctionne. Les techniques de clôture sont très efficaces aujourd'hui, mais chères.

PLS

Trouvez-vous problématique d'employer des fonds d'État à protéger la vie sauvage, alors que tant de Kényans sont pauvres ?

R. L. : À l'époque où j'étais secrétaire du cabinet au Kenya, tout ce qui avait été budgété par le gouvernement passait par mon bureau. Nombre de mes collègues du secteur de la protection des animaux me demandaient : « Pourrais-tu augmenter un peu notre budget ? Cela nous aiderait tellement. » Et il

En cas de changement climatique, les espèces insulaires disparaissent bien avant les espèces continentales

me fallait leur répondre : « Moralement, je ne peux pas alors qu'il y a tant de gens dont les enfants ne vont pas à l'école, qui n'ont pas d'eau, ni de maison. Non, je ne peux leur soustraire de l'argent pour le consacrer à la protection des animaux. Deux ans très difficiles à vivre !

PLS
Vous revoilà de l'autre côté de la barrière.

R. L. : Oui, mais je sais bien à quel point il est important d'aider les gens. Si l'on ne réduit pas la pauvreté, il n'y aura d'avenir ni pour les hommes, ni pour la vie sauvage et pas d'avenir politique et national ! Les parcs nationaux sont là pour le bien de chacun et l'argent qu'ils engendrent doit être employé à éduquer les populations, à leur donner de meilleures routes, de meilleures infrastructures et à les aider à vivre plus longtemps de meilleures vies.

PLS
Mombasa est sans doute le premier port exportateur d'ivoire illégal vers l'Asie. Que fait le gouvernement kényan ?

R. L. : L'ivoire qui aujourd'hui passe par Mombasa n'est pas kényan, mais tanzanien. Il provient d'Afrique centrale. Arrêter la tuerie des éléphants kényans a été mon premier objectif. Arrêter le trafic d'ivoire dans son ensemble dépasse les attributions du KWS, et beaucoup reste à faire pour cela. Les autorités portuaires de Mombasa viennent d'assainir leur personnel de la base au sommet. Le port dispose aujourd'hui de nouveaux douaniers, de nouveaux équipements d'acheminement des conteneurs, de nouveaux docks. Pour l'instant, les choses vont mieux.

PLS
La Tanzanie veut couper la plaine du Serengeti par une autoroute, qui pourrait interrompre la plus grande migration animale du monde. Vous approuvez ?

R. L. : Le Serengeti est un écosystème formidable, qui doit être préservé à tout prix. Toutefois, il faut être réaliste pour résoudre le problème. Cet espace naturel est aujourd'hui entouré de populations en

pleine expansion. Les villes qui desservent l'autoroute projetée vont bientôt devenir des mégapoles de trois millions d'habitants. Dans les dix ans à venir, la Tanzanie qui, comme nous, lorgne le commerce avec l'Afrique centrale, va se construire un deuxième grand port. D'où le besoin de nouvelles routes. Donc, oui, je soutiens l'établissement de ce corridor à travers la plaine du Serengeti, mais à la condition d'élever à 30 mètres au-dessus du sol une portion d'autoroute de 40 kilomètres afin de laisser les animaux aller et venir librement.

PLS
Quelle est aujourd'hui votre plus grande inquiétude ?

R. L. : Le changement climatique. Ses effets sont terrifiants : la croissance de la population associée à un développement anarchique autour des parcs nous a poussés à créer des îlots de vie sauvage. Or si vous examinez le registre fossile, vous vous rendez compte qu'en cas de changement climatique, les espèces insulaires disparaissent bien avant les espèces continentales, parce qu'elles n'ont nulle part où se réfugier. Aujourd'hui, en cas de sécheresse tarissant les marigots du parc, les animaux n'ont aucun endroit où aller s'abreuver. Que ferons-nous quand les pluies tomberont moins et que l'eau manquera ?

PLS
Brad Pitt va interpréter votre personnage dans un film sur votre vie. Comment le ressentez-vous ?

R. L. : J'ai toujours voulu que l'on tourne un film sur la situation critique des éléphants et des rhinocéros. Si des dizaines de millions de gens, en Chine par exemple, voient Brad Pitt lutter pour ces animaux, ils y croiront.

PLS
Et donc Brad Pitt en Richard Leakey aura plus de voix que Richard Leakey lui-même ?

R. L. : Mille fois plus !

Propos recueillis par Richard SCHIFFMAN

NDLR : A l'heure où nous mettons sous presse, la Chine vient d'annoncer son intention d'interdire le commerce de l'ivoire.

BIBLIOGRAPHIE

S. Weru, *Wildlife protection and trafficking assessment in Kenya: Drivers and trends of transnational wildlife crime in Kenya and its role as a transit point for trafficked species in East Africa*, TRAFFIC Report, mai 2016.

S. Grange, *La remarquable constance des zèbres du Serengeti*, *Pour la Science*, n° 357, 2007.

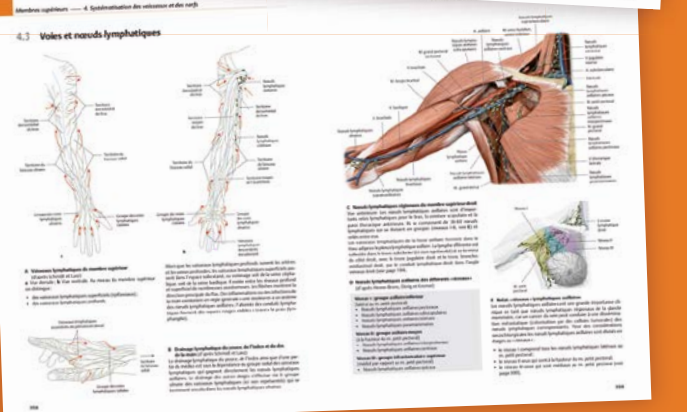
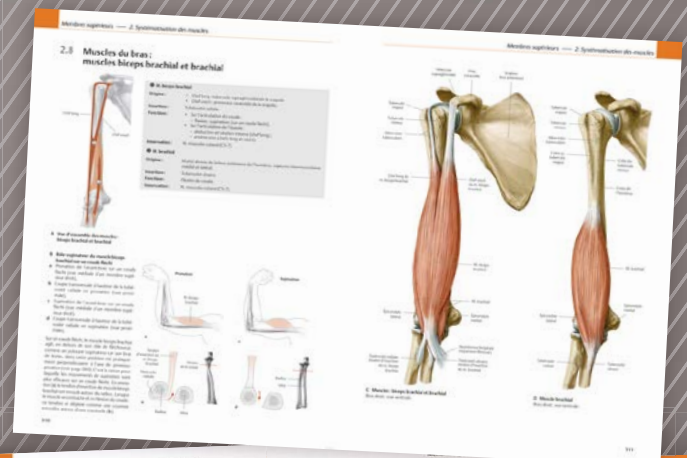
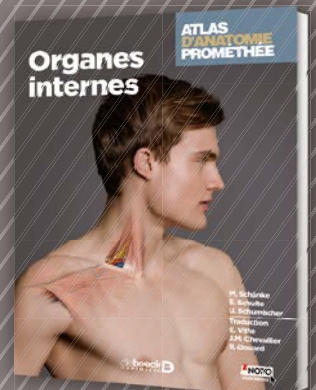
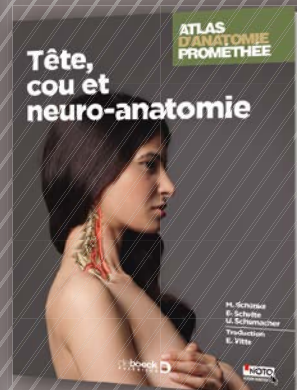
R. Leakey et V. Morell, *Wildlife Wars: My Fight to Save Africa's Natural Treasures*, Saint Martin's Press, 2001.

Tout le corps humain en 3 volumes

**ATLAS
D'ANATOMIE
PROMÉTHÉE**



DÉCOUVREZ ÉGALEMENT :



- Plus de **170 tableaux** par titre
- Près de **1800 illustrations** dans chaque tome
- Des **centaines d'exemples cliniques illustrés**
- Chaque sujet est exposé sur une **double page**, pour une **approche complète et rapide**, en un seul coup d'œil
- Des **images par ordinateur** hautes en couleur, d'une précision exceptionnelle, hyperréalistes

HOMO SAPIENS INFORMATICUS chronique de Gilles Dowek

Jusqu'où ira la révolution « blockchains » ?

Les chaînes de blocs sont un moyen nouveau de conserver de l'information de manière sécurisée. Ce système va probablement changer le monde dans lequel nous vivons...

Quand nous achetons par exemple un appartement, nous souhaitons pouvoir prouver, des années plus tard, que nous en

sommes propriétaire, au cas où Dame Belette y porterait frauduleusement ses pénates. Pour ce faire, nous utilisons un procédé qui remonte à la fin du XVII^e siècle : tous les actes de vente et d'achat sont inscrits dans un grand registre, le « fichier immobilier », conservé par un service de l'État, le service de publicité foncière, auquel les notaires communiquent, à chaque signature, les actes à conserver.

Dans ce procédé pour conserver de l'information, un site, le lieu de conservation du registre, joue un rôle particulier. Cette centralisation fragilise l'information, qui pourrait disparaître si un incendie détruisait ce registre, et elle rend difficile le passage à l'échelle : ce procédé ne fonctionnerait peut-être plus si le nombre d'actes de vente et d'achat était soudain multiplié par mille ou par un million. C'est pourquoi *Homo sapiens informaticus* lui en préfère un autre : au lieu de communiquer au service de publicité foncière les actes à conserver, chaque notaire conserve lui-même une copie du fichier immobilier et les notaires s'informent les uns les autres des actes à y inscrire. Ce procédé n'utilise pas de fichier centralisé et l'État n'y joue aucun rôle.

Il se peut cependant qu'un notaire maladroît ou malhonnête ait, dans sa copie du fichier, une information différente de ses collègues. Pour éviter ces erreurs et ces fraudes, l'information détenue par plusieurs notaires prime sur celle détenue par ce seul notaire.

Cette organisation est la base des systèmes informatiques de « chaînes de blocs » (*blockchains* en anglais), où des notaires – des programmes répartis sur de nombreux ordinateurs – tiennent des registres – des bases de données – et les synchronisent en permanence. En cas de désaccord entre deux programmes, l'information majoritaire prime.



LE BITCOIN EST UNE MONNAIE virtuelle fondée sur des registres de type chaînes de blocs.

Un tel système est relativement fiable : il faudrait une coalition d'une majorité de notaires pour organiser une fraude. Cependant, comme ces notaires ne sont que des programmes dans les chaînes de blocs, créer un notaire n'est pas difficile et un fraudeur pourrait facilement créer des milliers de notaires, afin de constituer une majorité. Pour parer de telles attaques, les chaînes de blocs font « payer » les notaires, en temps de calcul par exemple. Les notaires doivent ainsi, pour participer à une chaîne, effectuer des calculs inutiles, une activité nommée minage. Ainsi, créer des milliers de notaires

a un coût élevé en puissance de calcul, ce qui décourage les fraudeurs.

La conservation des actes de propriété n'est pas la seule activité qui serait transformée par le développement des chaînes de blocs. En effet, conserver un registre impossible à modifier frauduleusement est aussi la principale activité des bureaux de vote, des banques, des services du cadastre, etc. Bien entendu, si le contenu de certains de ces registres doit être rendu public, celui d'autres, tel le registre qui consigne quel électeur a voté pour quel candidat, doit être tenu secret.

Cet exemple des chaînes de blocs nous montre que les métiers de facteur ou de conducteur de camion ne sont pas les seuls condamnés à décliner, ou à se transformer radicalement, du fait du développement de l'informatique : les métiers de notaire et de banquier sont tout autant concernés.

Cependant cette transformation n'est peut-être pas l'effet le plus important du développement des chaînes de blocs : comme la conservation du fichier immobilier, la création d'une nouvelle monnaie était naguère un privilège des États. Mais, comme la conservation du fichier immobilier, une monnaie n'est qu'un moyen de conserver de l'information sur la durée : l'information des recettes et dépenses de chacun, ou plus précisément de leur solde. Ainsi, avec les chaînes de blocs, ce privilège de créer une monnaie échappe, lui aussi, aux États. ■

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

CABINET DE CURIOSITÉS SOCIOLOGIQUES par Gérald Bronner

Les années 1960 et le crépuscule de l'idée de progrès

L'utilisation du mot « progrès » a commencé à décliner alors que l'on était en plein dans les Trente Glorieuses. Pourquoi ?



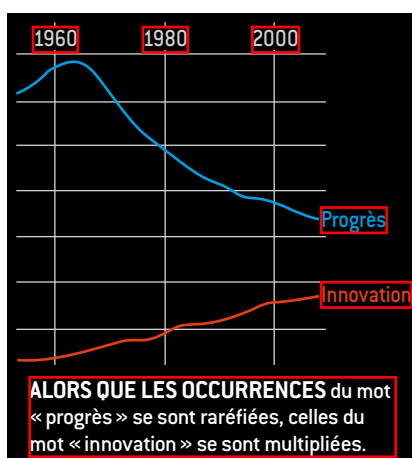
La numérisation massive des livres entreprise par Google depuis 2004 permet de mettre à disposition de tous, via l'application Ngram Viewer, des données essentielles pour répondre à bien des questions. Grâce à cette application, on peut connaître la fréquence relative de l'apparition de tel ou tel terme dans l'immense base de données ainsi constituée (plus de 15 millions d'ouvrages), et donc d'en évaluer une partie de la popularité.

Par exemple, Ngram Viewer offre la possibilité de tester la réalité de la baisse d'audience de certains termes comme celui de « progrès », dont plusieurs penseurs ont estimé qu'il était en déclin. C'est notamment le cas du philosophe français Georges Canguilhem qui, dans un article fameux de 1987 (*Revue de Métaphysique et de Morale*, vol. 92(4), pp. 437-454), proposait une analyse de la décadence du terme « progrès ».

A ce sujet, le physicien et philosophe Étienne Klein livrait récemment une intéressante réflexion : « Le mot progrès est de moins en moins fréquemment utilisé [...]. Il se trouve remplacé par un mot qui n'est pourtant pas son synonyme : innovation. »

Étienne Klein a tout à fait raison de considérer que l'un et l'autre termes ne sont pas substituables. La notion de progrès implique une forme de philosophie de l'histoire qui fait le pari que demain sera préférable à aujourd'hui. Elle constitue un principe collectif mobilisateur qui paraît, en effet, avoir été affaibli et mis en marge de notre horizon commun.

La notion d'innovation est, le plus souvent, positivement connotée, mais elle est perçue, selon Étienne Klein, comme un effort pour remonter la pente que le temps corrompateur nous ferait descendre. Cette substitution dirait donc bien quelque chose d'une mutation de nos représentations collectives. Cependant, comme nous le rappelle sagement Fontenelle : « Assurons-



nous bien du fait, avant de nous inquiéter de la cause. Il est vrai que cette méthode est bien lente pour la plupart des gens, qui courent naturellement à la cause, et passent par-dessus la vérité du fait ; mais enfin nous éviterons le ridicule d'avoir trouvé la cause de ce qui n'est point. »

C'est précisément dans ce registre que le recours à Ngram Viewer est précieux, car on imagine sans peine le temps qu'il eût fallu pour évaluer la fréquence de l'utilisation du terme « progrès » dans la littérature par

comparaison avec celui d'« innovation » et celui, plus important encore, qu'aurait nécessité une comparaison internationale. Observera-t-on la même chose en français et en anglais, en italien ou en allemand ?

Comme le montre le graphique ci-contre, on constate en langue française (et dans la littérature qui a été intégrée dans l'application proposée par Google) une nette inflexion de l'utilisation du terme « progrès » et, corrélativement, un recours non moins net à celui d'« innovation ».

Le plus fascinant est qu'on observe le même phénomène en langue anglaise, italienne, espagnole, allemande ou même russe ! Non moins fascinante est la constatation que, dans toutes les langues, cette inflexion surgit au cours des années 1960 (à l'exception du russe, où elle apparaît au début des années 1980), c'est-à-dire au cœur même des Trente Glorieuses, avant les chocs pétroliers, avant la fin du monde bipolaire ou même avant que la notion de mondialisation devienne une préoccupation généralisée (là aussi, Ngram Viewer permet de constater que le succès du terme date du début des années 1990).

Qu'a-t-il donc bien pu se produire au moment où la majorité des pays développés connaissent leur plus forte croissance économique et, d'une façon générale, une amélioration considérable de leurs conditions de vie ? Voilà bien un paradoxe que ne permettent pas de résoudre les algorithmes. ■

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

Désinformation sur Ce que révèlent les statistiques

Walter Quattrociocchi

Les internautes diffusent massivement des informations fausses et des théories conspirationnistes farfelues. Des études statistiques portant sur les réseaux de Facebook apportent un éclairage quantitatif et inédit sur les mécanismes à l'œuvre dans cet inquiétant phénomène.

Ne vous est-il jamais arrivé de dîner avec des amis ou des membres de votre famille et que la conversation tourne autour de rumeurs circulant sur Internet, par exemple sur le rôle des traînées de condensation des avions dans le réchauffement climatique ou sur les avantages de telle ou telle méthode de médecine alternative ? Ou de suivre à la télévision les commentaires de comédiens ou chanteurs célèbres, sans connaissances particulières en économie ou en politique, devenus tout à coup de fins analystes de la situation internationale ?

Qu'est-ce qui a changé dans notre façon de nous informer, et donc de nous forger une opinion ? Quel rôle les médias sociaux tels que Facebook jouent-ils dans la diffusion de fausses informations ou de thèses conspirationnistes ? Quels sont les ressorts de cette mésinformation ou désinformation ? Est-il possible d'endiguer ces phénomènes ?

Comme le montre l'actualité, tant nationale qu'internationale – le Brexit, l'élection de Donald Trump à la présidence des États-Unis, le climat-scepticisme, la radicalisation islamiste de certains jeunes Européens, etc. –, ces questions sont d'importance : elles ont une incidence directe sur

nos sociétés et les grandes orientations (économiques, politiques, etc.) qu'elles se choisissent.

On comprend donc que de nombreux sociologues se soient penchés sur les phénomènes sociaux liés à Internet et à ses médias, et notamment sur la « viralité » des informations infondées ou fausses, c'est-à-dire leur capacité à se propager vite et massivement.

Ils ne sont pas les seuls. Depuis plusieurs années, des mathématiciens, des physiciens, des chercheurs en informatique se sont aussi intéressés à ces problématiques, en apportant leurs propres outils et méthodes d'analyse. Ainsi a émergé, dans les années 2000 à peu près, un nouveau champ de recherche : les « sciences sociales computationnelles ».

Via une approche qui repose sur l'analyse de grandes masses de données, cette discipline s'attache à combiner mathématiques, statistiques, physique, sociologie et informatique, afin d'étudier les phénomènes sociaux de façon quantitative. Il s'agit d'exploiter, grâce à des techniques d'analyse adaptées, les très nombreuses traces numériques que laissent les internautes sur les différents médias sociaux tels que Facebook, Twitter, YouTube, etc. lorsqu'ils sélectionnent,

les réseaux sociaux

TRAINÉES DE CONDENSATION formées dans le ciel par le passage d'avions. Selon une théorie du complot populaire, celle des *chemtrails*, une partie au moins de ces trainées répandent, à l'insu des populations, des substances chimiques ou biologiques à des fins de manipulation.

L'ESSENTIEL

■ Sur les réseaux sociaux

tels que Facebook, de fausses informations et des théories fumeuses circulent facilement, avec parfois de graves conséquences.

■ La masse de données disponibles permet d'étudier ces phénomènes de désinformation de façon quantitative.

■ Les analyses montrent que le biais cognitif dit de confirmation joue un rôle majeur : les internautes forment des groupes solidaires qui autoentretiennent leurs opinions et préjugés.

■ Il apparaît que les tenants des thèses conspirationnistes sont réfractaires à la démystification.

STOCK/STOCK.COM

L'AUTEUR



Walter
QUATTROCCHI
coordonne
le Laboratoire
de sciences
sociales

computationnelles
à l'école IMT des hautes études
de Lucques, en Italie.

partagent ou commentent des informations. On peut ainsi étudier certains phénomènes sociaux à un niveau de précision sans précédent.

Les travaux de notre équipe, au laboratoire de sciences sociales computationnelles de l'école IMT des hautes études de Lucques, en Toscane, s'inscrivent pleinement dans cette démarche. Composé de deux physiciens (Guido Caldarelli et Antonio Scala), un statisticien (Alessandro Bessi), une mathématicienne (Michela Del Vicario) et deux informaticiens (Fabiana Zollo et moi-même), notre groupe s'intéresse aux dynamiques de contagion sociale et à l'utilisation des contenus sur les différents réseaux sociaux d'Internet. Nous étudions en particulier la viralité des informations et la façon dont se forment et se renforcent les opinions dans le cyberspace, une scène où les contenus sont mis en ligne et lus sans aucun intermédiaire ni contrôle.

Au cours des deux dernières années, nous avons ainsi obtenu plusieurs résultats quantitatifs intéressants sur la diffusion des informations et leur assimilation, sur la formation des opinions et sur la façon dont les personnes s'influencent mutuellement.

Avant de les présenter, commençons par souligner quelques traits généraux de la situation créée par Internet et ses réseaux sociaux depuis maintenant une dizaine d'années (rappelons que Facebook a été créé en 2004, Twitter en 2006).

Internet a modifié la façon dont les personnes s'informent, interagissent,

trouvent des amis, des sujets et des intérêts communs, filtrent les informations et se forment leurs propres opinions. Dans ce contexte, plusieurs facteurs contribuent au problème de la mésinformation ou de la désinformation.

L'un est l'analphabétisme fonctionnel, c'est-à-dire l'incapacité à comprendre convenablement un texte ; en France ou en Italie, cela concerne près de la moitié des personnes âgées de 16 à 65 ans, d'après les données de l'OCDE, l'Organisation de coopération et de développement économique.

Le biais de confirmation, un facteur clé

Un autre facteur est le « biais de confirmation » bien connu en psychologie sociale : chacun tend à privilégier les informations qui confirment ses opinions ou sa vision du monde, et à négliger ou ignorer celles qui les contredisent. Dans la masse d'informations de tous types véhiculées par Internet, chacun peut alors rechercher (et trouver...) ce qui le conforte dans ses préjugés et ses goûts, et délaisser le reste.

Un troisième facteur en jeu est le fait que, sur Internet, l'émission et la réception des contenus s'effectue essentiellement sans intermédiaires. N'importe qui peut publier sa version des faits et ses opinions sur n'importe quoi, sans qu'aucune personne ou autorité n'ait au préalable contrôlé la véracité, ou au moins le fondement, de ce qui a été mis en ligne.

L'explosion des médias sociaux

Les réseaux sociaux sur Internet font désormais partie intégrante de notre quotidien, avec une augmentation continue du nombre d'utilisateurs. Voici quelques chiffres qui illustrent cette situation. Ils sont tirés du rapport *Digital, Social & Mobile 2016* de l'agence internationale We Are Social.

Le nombre d'utilisateurs actifs sur Internet a dépassé 3,4 milliards, soit 46 % de la population mondiale. Pour le continent européen, le chiffre est de 616 millions d'internautes, soit 73 % de la population. Concernant les médias sociaux, les utilisateurs actifs sont aujourd'hui

plus de 2,3 milliards (31 % de la population mondiale). Leur nombre croît de 10 % par an. En France, les internautes actifs sont au nombre de 55,4 millions, ce qui représente 86 % de la population ; ce chiffre est de 92 % au Royaume-Uni, 63 % en Italie.

Si l'on considère le temps passé en ligne, il est en France de 4,6 heures par jour en moyenne (3,5 au Japon, 9,1 au Brésil), dont 1 heure via un appareil mobile et 3,6 heures via un ordinateur.

En moyenne, un usager des médias sociaux y consacre 1,3 heure par jour en France (0,3 au Japon, 3,3 au Brésil). Les plateformes principales sont, dans ce pays, Facebook (43 %), Facebook Messenger (22 %), Google + (11 %) et Twitter (11 %). Parmi les 32 millions d'utilisateurs de

Facebook en France, la moitié ont entre 20 et 40 ans. La part des 13-19 ans est de 14 %, tandis que celle des plus de 60 ans est de 8 %.

On peut aussi noter la croissance rapide de la place des téléphones mobiles dans l'utilisation d'Internet. En janvier 2016, 38,6 % des pages web consultées l'ont été via des téléphones mobiles. Ce chiffre était de 28,9 % en janvier 2014. En moyenne, le trafic de données représente 1,4 gigaoctet par mois et par téléphone.

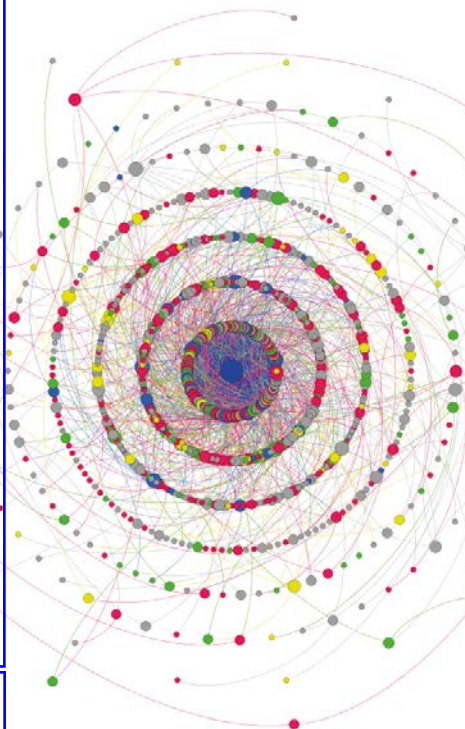
Pour ces raisons, on assiste à de véritables phénomènes de masse impliquant de la mésinformation ou de la désinformation. D'ailleurs, en 2013, le Forum économique mondial, une fondation internationale indépendante qui débat des problèmes les plus urgents de la planète, a cité la diffusion massive de fausses informations comme l'une des menaces les plus graves auxquelles nos sociétés sont confrontées.

Prolifération d'informations fausses

Et en effet, les fausses informations ou les thèses affirmant l'existence d'un complot à l'échelle internationale prolifèrent sur la Toile. Citons notamment les *chemtrails* (contraction de l'anglais *chemical trails*, «traînées chimiques»), thèse selon laquelle une partie des traînées formées par les avions dans le ciel ne seraient pas de la condensation de la vapeur d'eau, mais des produits chimiques répandus afin de modifier le climat ou de manipuler les populations.

D'autres exemples sont l'idée de l'existence d'un lien entre vaccins et autisme (ou une autre maladie grave), l'affirmation que l'homme était à l'origine frugivore et non omnivore, ou la théorie du complot sur l'«énergie libre», selon laquelle des sources d'énergie alternatives et gratuites existent, mais sont tenues secrètes par les multinationales afin de protéger leurs intérêts financiers. Sans oublier deux célèbres théories conspirationnistes, celle niant la réalité de l'alunissage d'astronautes (*Apollo 11*, en 1969) et celle prétendant que les attentats du 11-Septembre, en 2001, sont une machination (ou, au mieux, un laisser-faire délibéré) du gouvernement des États-Unis.

On fait souvent l'hypothèse que l'être humain est rationnel, mais l'étude quantitative de ces phénomènes indique plutôt le contraire. Dans un environnement où les informations ne subissent aucun filtre, l'individu prend, conformément au biais de confirmation, ce qui lui plaît le plus et ce qui est conforme à son schéma de



UN CANULAR LANCÉ PAR UN POST

sur Facebook en 2012 affirmait qu'un certain sénateur italien Cirenga (qui n'existe pas) avait proposé un projet de loi visant à débloquer 134 milliards d'euros pour aider les parlementaires italiens à trouver du travail en cas de non-réélection. Ce canular s'est diffusé massivement sur Facebook en décembre 2012. Ce graphe visualise sa propagation. Les nœuds représentent les internautes, les arêtes représentent la relation de partage du *post*. Le *post* d'origine se trouve au centre. Les couleurs indiquent la polarisation de l'utilisateur, c'est-à-dire sa préférence pour un type de contenus : en jaune les utilisateurs qui suivent les sources classiques, en vert les discussions politiques, en rouge les sources alternatives, en bleu les *trolls*.

pensée. Cela alimente les récits les plus disparates, appuyés par de piètres argumentations faisant appel davantage à des associations d'idées qu'à des raisonnements déductifs. Des récits qui, parfois, séduisent, se répandent massivement et exercent une forte influence sur la perception du public concernant des questions essentielles : santé, politique économique, géopolitique, réchauffement climatique...

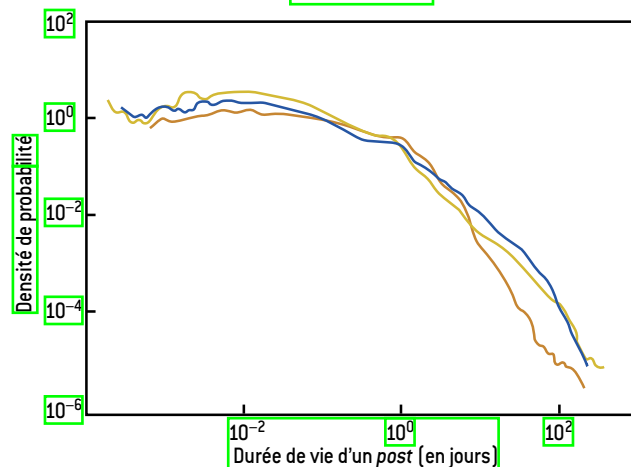
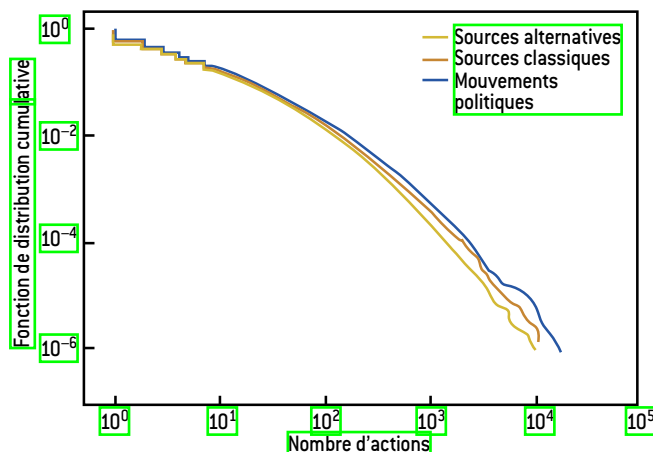
Cela a parfois d'étranges, sinon graves, conséquences. Ainsi, en 2015 aux États-Unis, un banal exercice militaire du nom de Jade Helm 15 est devenu sur Internet la preuve qu'un coup d'État imminent était orchestré par l'administration du président Barack Obama. Cette affirmation a été suivie au point que le gouverneur (républicain) du Texas, Greg Abbott, a décidé, dans le doute, d'alerter la Garde nationale de cet État.

Citons aussi un cas plus récent, le « Pizzagate » lancé par le *tweet* d'un avocat new-yorkais le 30 octobre 2016. Il faisait état d'une prétendue enquête de la police sur un grand réseau de pédophilie auquel Hillary Clinton aurait été liée. La rumeur a enflé sur Internet et a notamment mis en cause une pizzeria à Washington. Or le 4 décembre, Edgar Maddison Welch, un internaute pensant probablement faire justice lui-même, s'est rendu à cette pizzeria muni d'un fusil d'assaut, a menacé un employé et tiré dans l'établissement, heureusement sans faire de victimes, avant d'être arrêté par la police.

Des masses de données issues de Facebook

Afin de mieux comprendre ces phénomènes de désinformation, nous avons commencé par une étude, publiée en 2015, portant sur la consommation sur Internet, en Italie, d'informations qualitativement différentes : celles provenant de sources classiques, celles données par des sources alternatives et celles données par des mouvements politiques.

Les sources classiques désignent ici tous les journaux et agences qui couvrent l'information nationale italienne. Les sources alternatives sont celles qui s'autoproclament



LE COMPORTEMENT des internautes est très similaire, qu'il s'agisse de *posts* sur des pages Facebook de sources alternatives d'actualités, sur des pages de sources classiques ou sur des pages de mouvements politiques. À gauche : la «fonction de distribution cumulative» du nombre d'actions (un « J'aime », un commentaire ou un « J'aime » sur un commentaire) des usagers selon le type de pages : pour une abscisse de valeur x , l'ordonnée est la probabilité qu'un *post* ait un nombre d'actions supérieur ou égal à x . À droite : la densité de probabilité $p(x)$ que le temps écoulé entre le premier et le dernier commentaire d'un *post* soit égal à x .

promotrices de tout ce que les médias, considérés comme manipulés, cachent aux gens. La troisième catégorie de sources relève des mouvements et des groupes politiques qui utilisent Internet comme instrument de mobilisation politique.

Le travail de recensement, des sources alternatives en particulier, a été long et minutieux. Nous avons recueilli diverses indications données par des utilisateurs et des groupes actifs sur le Facebook italien dans la dénonciation de canulars, et nous les avons vérifiées manuellement.

Des lois statistiques similaires

Nous avons ainsi choisi 50 pages Facebook publiques, dont 8 sources classiques, 26 sources alternatives et 16 pages d'activisme politique. Puis nous avons téléchargé tous les messages mis en ligne (les *posts*) et les interactions de leurs utilisateurs respectifs sur une période de six mois, de septembre 2012 à février 2013, qui était une période de campagne électorale en Italie. Nous avons pris en compte les *posts* eux-mêmes, les «J'aime», les commentaires, les partages et les «J'aime» sur les commentaires. Nous avons traité ces données, qui sont publiquement disponibles, sous une forme agrégée et anonyme. Leur analyse donne un aperçu du comportement de plus de 2,3 millions d'internautes italiens.

Les résultats de cette étude montrent que, malgré leurs différences qualitatives, les trois types d'informations considérées présentent, dans leur propagation, des propriétés statistiques très similaires.

Par exemple, la loi statistique qui décrit combien il y a de *posts* qui suscitent tel ou tel nombre de réactions de la part des

usagers de Facebook (un « J'aime », un commentaire ou un « J'aime » sur un commentaire) est très similaire pour les trois types de sources (voir la figure ci-dessus).

Il en est de même des lois statistiques portant sur le nombre de *posts* en fonction de la durée de l'écho qu'ils suscitent. En particulier, pour chacune des trois catégories de sources, la durée moyenne de l'attention prêtée à un *post* est d'environ 24 heures.

Lors de cette même étude, nous avons aussi considéré le comportement vis-à-vis des *trolls* émis sur Facebook. Le terme *troll* désignait initialement un message ou un élément de discussion sur Internet dont l'objectif est de perturber cette dernière et de créer une polémique. Stimulée par l'énorme hétérogénéité des groupes et des intérêts qui ont envahi Internet, cette figure a évolué en quelque chose de plus structuré. Là où une dynamique sociale emporte les foules et conduit à des opinions extrêmes sur un sujet donné, il est fréquent qu'une contrepartie apparaisse sous forme de *troll* et en fasse la parodie. On trouve ainsi des pages qui singent le comportement des membres de mouvements politiques locaux, des pages qui publient toujours la même photo de chanteurs célèbres pour accompagner un quelconque contenu massivement diffusé sur le Web, d'autres qui mettent en ligne, en relation avec la fièvre Ebola, des photos de chatons, ou d'autres encore qui parodient l'extrémisme du végétarisme intégral, ou «véganisme».

Les théories du complot font partie des divers sujets de moquerie. On a ainsi des *trolls* qui parlent d'abolir les lois de la thermodynamique au Parlement, ou selon lesquels une récente analyse de la composition chimique des *chemtrails* prouve la

présence de citrate de sildénafil, c'est-à-dire le principe actif du Viagra...

Ces contenus parodiques et caricaturaux se sont révélés fondamentaux pour notre étude, parce qu'ils nous ont permis de mesurer les capacités de vérification de l'information (le *fact-checking* des Anglo-Saxons) des internautes italiens. Étant conçus à des fins parodiques, les *trolls* sont intentionnellement faux et véhiculent des contenus paradoxaux ; ils nous ont donc permis de mesurer jusqu'à quel point le biais de confirmation est déterminant dans le choix des contenus fait par l'internaute.

Plus précisément, nous avons d'abord classé les utilisateurs de Facebook selon le type d'informations qu'ils préfèrent, en tenant compte du pourcentage de mentions « J'aime » qu'ils donnent à chaque type d'informations. Puis nous avons mesuré comment ils réagissaient à un ensemble déterminé d'environ 2800 *trolls*.

Les conspirationnistes sont les plus crédules

Sans surprise, nous avons constaté que les internautes qui suivent les sources d'informations alternatives sont les plus enclins à réagir aux *trolls* par un « J'aime » et à les partager, exactement comme ils consomment les autres informations alternatives. Plus précisément, parmi 1 279 utilisateurs classés comme ayant une orientation bien définie, 55 % de ceux qui ont cliqué « J'aime » sur les *trolls* considérés sont des amateurs de sources alternatives, contre 23 % et 22 % respectivement pour les amateurs de sources classiques et ceux de mouvements politiques.

Ce résultat est particulièrement intéressant, car il met en évidence ce que nous avons ensuite appelé le « paradoxe de la conspiration » : les internautes les plus attentifs à la prétendue manipulation perpétrée par les médias orthodoxes sont les plus enclins à interagir avec des sources d'informations intentionnellement fausses. Par conséquent, ces personnes méfiantes vis-à-vis des médias classiques sont aussi les plus enclines à être manipulées !

Comme on l'a vu plus haut, des informations de types différents se propagent avec des lois statistiques semblables. Pour l'expliquer, on peut émettre l'hypothèse qu'il existe des groupes d'internautes dont l'intérêt se focalise sur des contenus spécifiques, mais que leur comportement est

universel, c'est-à-dire indépendant du type de contenu et du récit considérés.

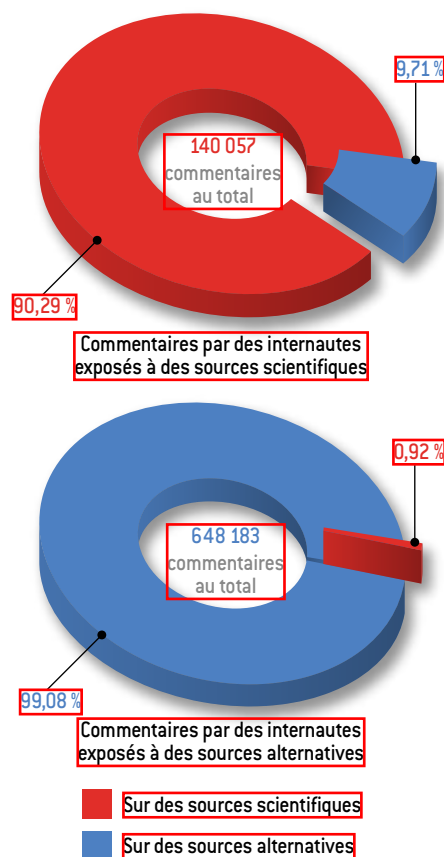
Cette hypothèse s'accorde bien avec la notion d'exposition sélective aux informations, due au biais de confirmation, et avec l'idée qu'Internet, en facilitant la connexion entre les personnes et l'accès aux contenus, accentue la formation de caisses de résonance, ou chambres d'écho, c'est-à-dire des communautés qui ont des intérêts communs, sélectionnent le même type d'informations, ne discutent qu'entre eux et renforcent leurs propres croyances autour d'un récit commun.

La deuxième étape de nos travaux a consisté à comparer le comportement d'internautes s'intéressant à des sources d'informations scientifiques avec celui d'internautes qui suivent généralement les sources d'informations alternatives et conspirationnistes.

Il s'agit de sources de types très différents. Les informations scientifiques ont notamment un auteur bien identifié, un responsable du message. L'information scientifique fait référence à des travaux généralement publiés en détail dans des revues scientifiques professionnelles, dont on connaît les auteurs, les institutions auxquelles ils appartiennent, etc. En revanche, les informations conspirationnistes font toujours référence à une quelconque machination secrète, volontairement cachée au grand public et fomentée par des individus puissants, des groupes ou des États qui ne sont en général pas clairement identifiés.

Une autre différence substantielle, indépendamment de la véracité de l'information rapportée par les deux types de sources, est que les récits sont aux antipodes. Le premier type repose sur un paradigme rationnel qui, presque toujours, recherche des preuves empiriques. Le deuxième – en reprenant la définition de Cass Sunstein, de l'université Harvard, auteur de livres de référence sur les dynamiques sociales du complot – se réfère à des croyances en des liens de causalité d'après lesquels les événements ou phénomènes considérés sont le résultat d'une intention humaine.

La pensée conspirationniste traduit une incapacité à attribuer à des effets indésirables des causes aléatoires ou complexes (un hasard lié par exemple aux lois du marché ou à la complexité des situations). Selon Martin Bauer, psychologue à l'École d'économie et de sciences politiques de Londres et spécialiste des dynamiques complotistes, c'est une façon « quasi religieuse » de penser



LES INTERNAUTES POLARISÉS sur des sources d'actualités scientifiques commentent peu (9,71 % des commentaires) les *posts* des pages Facebook d'informations « alternatives ». Les internautes polarisés sur des sources alternatives commentent encore moins (0,92 %) les *posts* publiés sur des pages d'actualités scientifiques. Ces chiffres portent sur 7 751 *posts* (dont 1 991 d'actualités scientifiques et 5 760 d'actualités conspirationnistes).

La carte représentée sur cette double page est un graphe, c'est-à-dire un ensemble d'éléments (des nœuds ou des sommets) raccordés entre eux par des liens nommés arêtes. Les graphes ont pour les scientifiques une multitude d'applications: on peut les utiliser pour représenter les relations entre plusieurs éléments, que ce soit des cellules, des personnes, des institutions, des pages d'un site internet, des gares ferroviaires ou les composants d'une voiture.

Dans ce graphe que j'ai réalisé à l'aide d'un programme de visualisation de données, j'ai cherché à représenter l'immense réseau des pages Facebook italiennes promouvant des théories conspirationnistes. Cette carte s'est diffusée massivement sur Internet en décembre 2015.

J'ai commencé par un groupe de 17 pages dont l'appartenance au monde conspirationniste et de la désinformation est difficilement contestable, comme *Stop alle scie chimiche* («Stop aux chemtrails») ou l'association COMILVA qui lutte contre la vaccination. À l'aide de quelques programmes, j'ai obtenu les noms de toutes les pages Facebook qui ont mis la mention «J'aime» à ces pages, et j'ai répété cette opération avec les résultats. Enfin, j'ai rassemblé les données récoltées afin d'obtenir ce graphe complexe qui comprend 2 612 nœuds (les pages Facebook) et 22 879 arêtes.

Chaque rond, ou nœud, représente une page sur Facebook (dont le nom est indiqué, mais l'échelle de reproduction est ici insuffisante pour le lire). Lorsque deux nœuds sont reliés par une arête, cela signifie que l'un d'eux a mis la mention «J'aime» à l'autre. Dans cette version du graphe, la direction de la relation n'est pas indiquée. Il n'est donc pas possible de savoir laquelle des deux pages a mis un «J'aime» à l'autre ou si le «J'aime» est réciproque. Les pages ayant des goûts similaires (pour ce qui est des pages «aimées») sont toutes proches. Les pages qui ont peu, voire rien, en commun sont distantes l'une de l'autre. La taille des nœuds dépend du nombre de «J'aime»

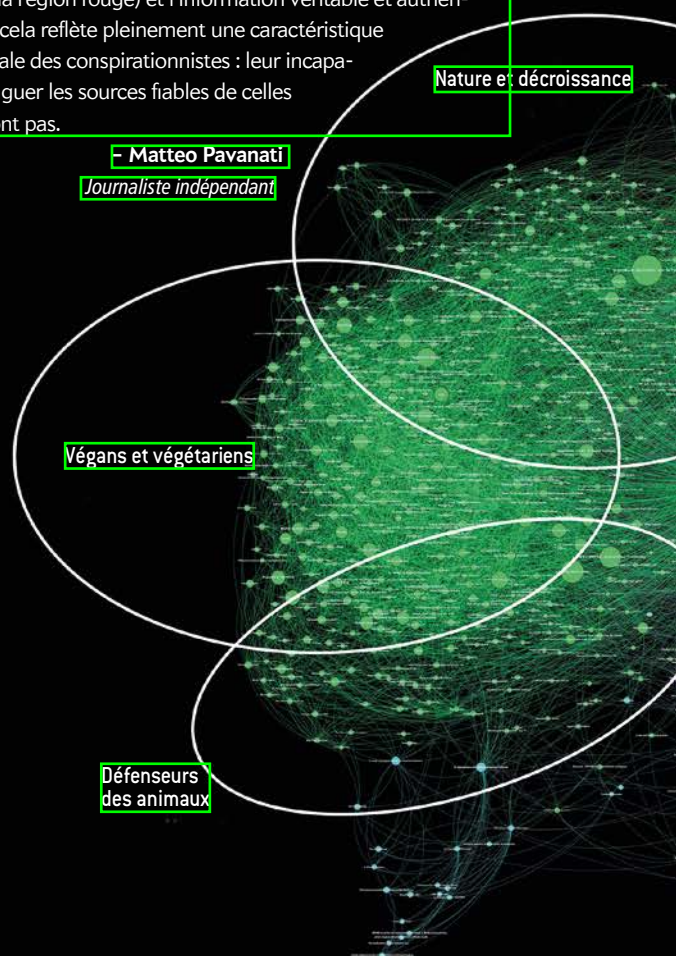
adressés par les autres pages du graphique: plus un nœud est gros, plus le nombre de «J'aime», et donc son «influence» au sein du réseau, sont grands. Enfin, les couleurs associées aux pages sont attribuées automatiquement par le programme et permettent de distinguer les amas, c'est-à-dire les groupes de pages associées à des centres d'intérêt communs.

Sur ce graphe, les pages à caractère franchement complotiste (nouvel ordre mondial, ovnis, etc.) se retrouvent presque toutes au centre, dans la région fuchsia. En s'éloignant vers l'extérieur, le lien avec les théories du complot tend à disparaître: c'est le cas de plusieurs journaux crédibles tels que *La Repubblica* ou le *Corriere della Sera* et d'organisations telles qu'*Emergency*, qui figurent sur ce graphe uniquement parce qu'ils sont suivis par d'autres pages du réseau.

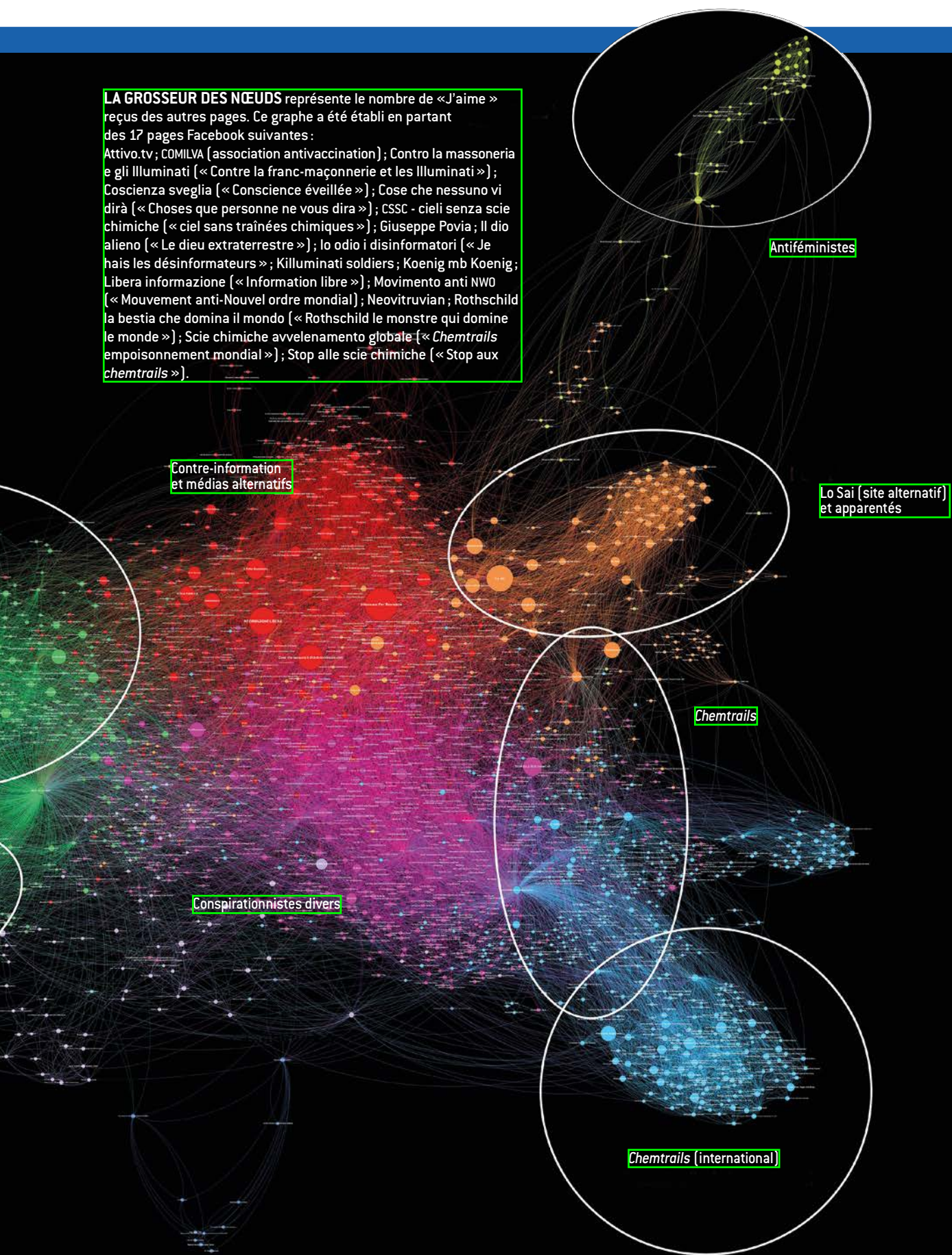
L'une des observations les plus intéressantes qui ressortent du graphe est qu'il n'existe pas de ligne de démarcation nette entre les pages dédiées aux théories du complot, les pages qui publient des canulars et de fausses et tendancieuses nouvelles (toutes concentrées dans la région rouge) et l'information véritable et authentique. Tout cela reflète pleinement une caractéristique fondamentale des conspirationnistes: leur incapacité à distinguer les sources fiables de celles qui ne le sont pas.

— Matteo Pavanati

Journaliste indépendant



LA GROSSEUR DES NŒUDS représente le nombre de « J'aime » reçus des autres pages. Ce graphe a été établi en partant des 17 pages Facebook suivantes : Attivo.tv ; COMILVA (association antivaccination) ; Contro la massoneria e gli Illuminati (« Contre la franc-maçonnerie et les Illuminati ») ; Coscienza sveglia (« Conscience éveillée ») ; Cose che nessuno vi dirà (« Choses que personne ne vous dira ») ; CSSC - cieli senza scie chimiche (« ciel sans traînées chimiques ») ; Giuseppe Povia ; Il dio alieno (« Le dieu extraterrestre ») ; lo odio i disinformatori (« Je hais les désinformateurs ») ; Killuminati soldiers ; Koenig mb Koenig ; Libera informazione (« Information libre ») ; Movimento anti NWO (« Mouvement anti-Nouvel ordre mondial ») ; Neovitruvian ; Rothschild la bestia che domina il mondo (« Rothschild le monstre qui domine le monde ») ; Scie chimiche avvelenamento globale (« Chemtrails empoisonnement mondial ») ; Stop alle scie chimiche (« Stop aux chemtrails »).



le monde. Tout comme jadis, à l'aube de l'humanité, on attribuait aux tempêtes une origine divine, les conspirationnistes font aujourd'hui de même devant la complexité des phénomènes qui les chagrinent et dont ils cherchent une explication simple.

Mais revenons à notre étude comparative des deux types d'internautes. Il nous fallait d'abord déterminer un ensemble des pages Facebook à explorer. Pour ce faire, nous avons interagi avec les différents groupes qui, sur Internet, s'efforcent de lutter contre les fausses informations en fournissant des arguments et des connaissances scientifiquement fondés. Nous avons ainsi abouti à un ensemble de 73 pages Facebook, dont 39 conspirationnistes et 34 scientifiques. Notre analyse a ainsi porté sur un total de 1,2 million d'utilisateurs italiens de Facebook sur une période de cinq ans, entre 2010 et 2014.

Des amas d'internautes polarisés

Que montrent les résultats ? Sur le Facebook italien, les utilisateurs qui suivent les sources d'informations complotistes sont trois fois plus nombreux que ceux qui suivent des sources d'informations scientifiques. De plus, les deux populations sont très polarisées : parmi les internautes concernés par l'étude, ceux qui suivent les deux types de sources sont peu nombreux (voir la figure page 25). Autrement dit, les utilisateurs se regroupent autour de récits spécifiques et sortent rarement de leur chambre d'écho.

Les informations, qu'elles soient fondées ou non, sont consommées de façon

similaire, mais mutuellement exclusive. Cette caractéristique de l'interaction sociale sur Facebook semble avoir un rôle déterminant dans la diffusion des fausses rumeurs. En examinant 4 709 informations visant à imiter parodiquement ou sarcastiquement les théories du complot et ayant un caractère manifestement absurde (Viagra dans les *chentails*, par exemple), nous avons constaté que ceux qui interagissent avec ces contenus (par un « J'aime » ou par un commentaire) sont, à 80 % environ, des utilisateurs d'informations conspirationnistes.

Autre constatation intéressante : les utilisateurs principalement centrés sur les informations complotistes ont tendance à diffuser davantage, par le partage avec leurs amis, ces informations (en comparaison avec l'autre population d'utilisateurs et leurs informations de nature scientifique).

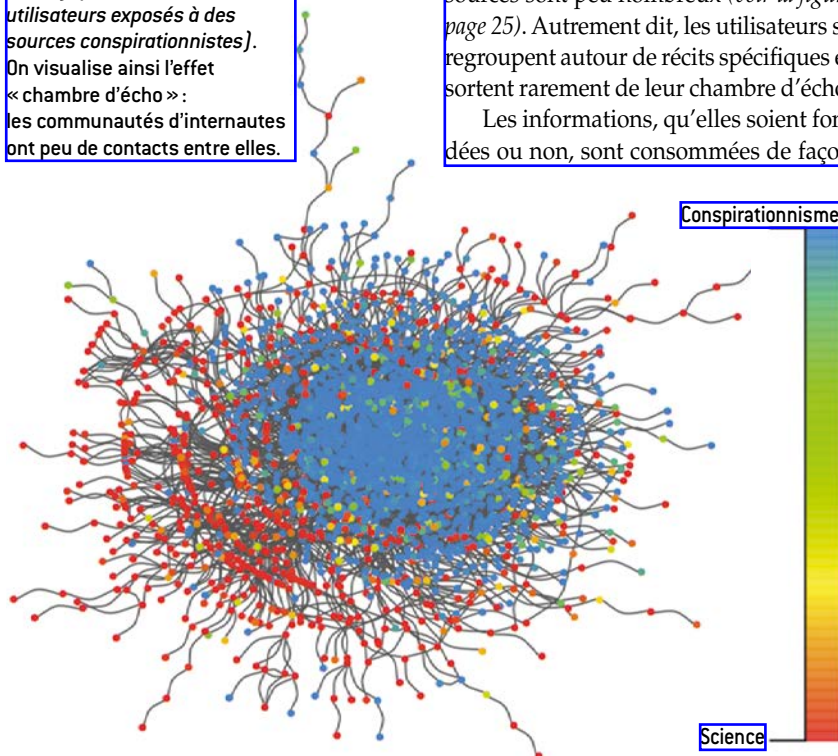
À ce stade, nous nous sommes demandé si cette forte polarisation des utilisateurs, entre ceux qui suivent les sources conspirationnistes et ceux qui suivent les sources scientifiques, se reflète aussi dans les « amitiés » virtuelles.

En étudiant de plus près ces deux chambres d'écho, nous avons reconstitué les réseaux sociaux des deux groupes et avons découvert une régularité statistique surprenante : à mesure que le nombre de « J'aime » augmente sur un type de récit spécifique, la probabilité d'avoir un réseau social virtuel composé uniquement d'« amis » ayant le même profil augmente aussi, de façon proportionnelle. Autrement dit, plus un internaute polarisé est actif, plus ses amis Facebook ont le même profil.

Cette division des réseaux sociaux en groupes homogènes selon le type de contenu consommé aide ainsi à comprendre la viralité des phénomènes constatés sur la Toile. Chaque groupe a tendance à exclure tout ce qui n'est pas en cohérence avec sa vision du monde. Il s'agit ainsi d'une structure collective qui amplifie la sélection des contenus par le biais de confirmation à l'œuvre à l'échelle de chaque individu.

Après avoir fait ces observations, nous avons poursuivi nos travaux en examinant les effets des campagnes de désintoxication visant à corriger la diffusion des fausses informations sur les médias sociaux. Nous avons ainsi comparé, parmi les utilisateurs généralement exposés à des sources conspirationnistes, ceux qui ont été exposés à des posts de démystification avec ceux qui ne

LES INTERNAUTES qui suivent habituellement les sources d'informations scientifiques ont relativement peu de liens d'« amitié » [au sens de Facebook] avec ceux qui suivent les sources conspirationnistes, comme le montre ce réseau de liens d'amitié reconstitué par l'auteur et ses collègues (en rouge, les utilisateurs plutôt exposés à des sources scientifiques, en bleu, les utilisateurs exposés à des sources conspirationnistes). On visualise ainsi l'effet « chambre d'écho » : les communautés d'internautes ont peu de contacts entre elles.



l'ont pas été. Nous avons notamment mesuré la persistance, c'est-à-dire la probabilité de continuer à accorder des «J'aime» à un type de contenu spécifique dans le temps, pour les utilisateurs exposés ou pas à des campagnes de décodage des fausses informations.

Or les résultats ont montré que pour les utilisateurs exposés à la démystification, la probabilité de continuer à interagir avec des informations conspirationnistes est d'environ 30 % plus élevée que pour les autres ! Autrement dit, essayer de convaincre un fervent défenseur de la théorie des *chemtrails* que ces derniers n'existent pas renforce ses croyances, ce qui se traduit par une plus grande interaction avec les sources d'informations de type théorie du complot.

Par ailleurs, pour vérifier qu'il n'y ait pas de particularités dues au contexte italien, nous avons réalisé une analyse similaire concernant le Facebook américain. Nous avons trouvé essentiellement les mêmes tendances.

Des discussions qui dégénèrent

Un autre résultat intéressant à signaler a été obtenu en examinant nos données au moyen d'algorithmes qui, moyennant un certain entraînement de ces derniers, sont en mesure de fournir avec une bonne approximation le sentiment exprimé par les utilisateurs dans les commentaires des *posts*. Or nous avons trouvé que plus la discussion entre les internautes est longue, plus on se dirige vers un sentiment négatif.

Cela vaut tant pour les informations conspirationnistes que pour les informations scientifiques, même si les internautes conspirationnistes ont tendance à être plus négatifs. Dans tous les cas, une discussion prolongée sur un *post* semble produire une dégénérescence négative.

Les dynamiques sociales qui émergent de nos études mettent clairement en évidence les problématiques relatives à la formation et à la propagation massive, sur les réseaux sociaux d'Internet, de récits potentiellement erronés.

La sélection des contenus par l'internaute s'effectue sous l'influence du

Tenter de convaincre un conspirationniste produit l'effet inverse de celui recherché

biais de confirmation, ce qui conduit à la formation de groupes relativement homogènes de personnes qui s'intéressent aux mêmes thèmes et aux mêmes récits.

Parallèlement au renforcement de cette focalisation, les membres de chaque groupe tendent à ignorer tout ce qui ne conforte pas leurs préjugés. Et quand discussion il y a avec des personnes ayant une opinion différente, elle dégénère dans la plupart des cas, ce qui encourage la polarisation.

Étant donné ce contexte, il devient très difficile d'informer correctement, et arrêter la propagation d'une nouvelle infondée ou fausse, telle que le canular italien relatif au sénateur imaginaire Cirenga (voir la figure page 23), devient

impossible.

Le problème de la désinformation sur les réseaux sociaux est devenu si prégnant que les opérateurs de ces réseaux sont maintenant souvent accusés de ne pas prendre leurs responsabilités et sont incités à réagir de façon à limiter la propagation des fausses rumeurs et théories. Mais comment ? La question est complexe et les réponses ne font pas encore consensus (voir l'entretien avec Gérald Bronner, pages 30 à 32).

Une partie des solutions pourrait être d'adapter les algorithmes qui gèrent les réseaux sociaux. Par exemple, Facebook a introduit pour les utilisateurs la possibilité de signaler les fausses informations, tandis que Google étudie le moyen de tenir compte de la fiabilité des pages dans le classement des résultats affichés à la suite d'une requête par mots-clés. Mais les études que nous avons menées ne nous poussent pas à être très optimistes quant à de telles solutions.

Probablement pour quelque temps encore, nos repas seront animés par des discussions enflammées sur le dernier complot mondial orchestré par les reptiliens, des extraterrestres d'apparence humaine qui seraient dissimulés parmi nous (et auxquels croient des millions d'Américains), ou sur les atouts d'un nouveau régime amaigrissant à base de café additionné de beurre et d'huile, qui fait fureur aux États-Unis. Ne faudrait-il pas cesser de parler de l'ère de l'information et parler plutôt de l'ère de la crédulité ? ■

BIBLIOGRAPHIE

M. Del Vicario *et al.*, *The spreading of misinformation online*, *PNAS*, vol. 113(3), pp. 554-559, 2016.

D. Mocanu *et al.*, *Collective attention in the age of (mis)information*, *Computers in Human Behavior*, vol. 51, pp. 1198-1204, 2015.

A. Bessi *et al.*, *Science vs conspiracy: Collective narratives in the age of misinformation*, *PLoS One*, vol. 10(2), e0118093, 2015.

A. Bessi *et al.*, *Trend of narratives in the age of misinformation*, *PLoS One*, vol. 10(8), e0134641, 2015.

A. Bessi *et al.*, *Social determinants of content selection in the age of (mis)information*, *Social Informatics, Lecture Notes in Computer Science*, vol. 8851, pp. 259-268, 2014.

« Il faut réguler le marché de l'information sur Internet »

Internet bouleverse la façon dont les gens s'informent et fournit une tribune commode à tout individu ou groupe qui souhaite s'exprimer. Mais ces libertés nouvelles s'accompagnent d'effets pervers tels que la diffusion massive de thèses conspirationnistes. Le sociologue **Gérald Bronner** commente pour nous cette situation.



Gérald BRONNER est professeur de sociologie à l'université Paris-Diderot et membre de l'Académie des technologies.

© L'Œuvre / Rencontres de l'Europe

La désinformation, qu'elle soit intentionnelle ou inconsciente, a trouvé avec Internet un puissant moyen d'amplification : des idées fausses se propagent massivement et influencent l'opinion publique, comme l'illustre en France la méfiance qui s'est installée vis-à-vis des vaccins. Le nouveau marché de l'information constitué par le Web et ses « réseaux sociaux » pose ainsi aux sociétés démocratiques un défi majeur. Il est essentiel de comprendre les rouages de ce marché si on veut l'améliorer. Mais comment ? Nous avons interrogé **Gérald Bronner**, sociologue de la croyance et des opinions, qui a notamment publié *La Pensée extrême. Comment des hommes ordinaires deviennent des fanatiques* (PUF, rééd. 2016) et *La Démocratie des crédules* (PUF, 2013).

POUR LA SCIENCE

Quelle portée ont pour la sociologie les travaux de « sciences sociales computationnelles » de l'équipe italienne de **Walter Quattrociocchi** (voir son article pages 20 à 29) ?

GERALD BRONNER : D'abord, ces analyses effectuées sur une masse impressionnante de données permettent de confirmer un certain

nombre d'études sociologiques. En particulier, elles corroborent l'amplification par Internet du biais de confirmation et l'autoenfermement cognitif qui en résulte (point souligné notamment dans mon livre *La Démocratie des crédules*). Et elles montrent que cela est valable tant pour les partisans de théories conspirationnistes que pour les autres catégories d'internautes.

Un autre aspect très intéressant des travaux de l'équipe italienne est de montrer que quand des individus se laissent prendre par une théorie du complot, ils s'attachent avec le temps aux autres théories du même type, et intègrent ainsi la nébuleuse conspirationniste. C'était depuis longtemps une intuition des sociologues de la croyance, mais la voilà confirmée.

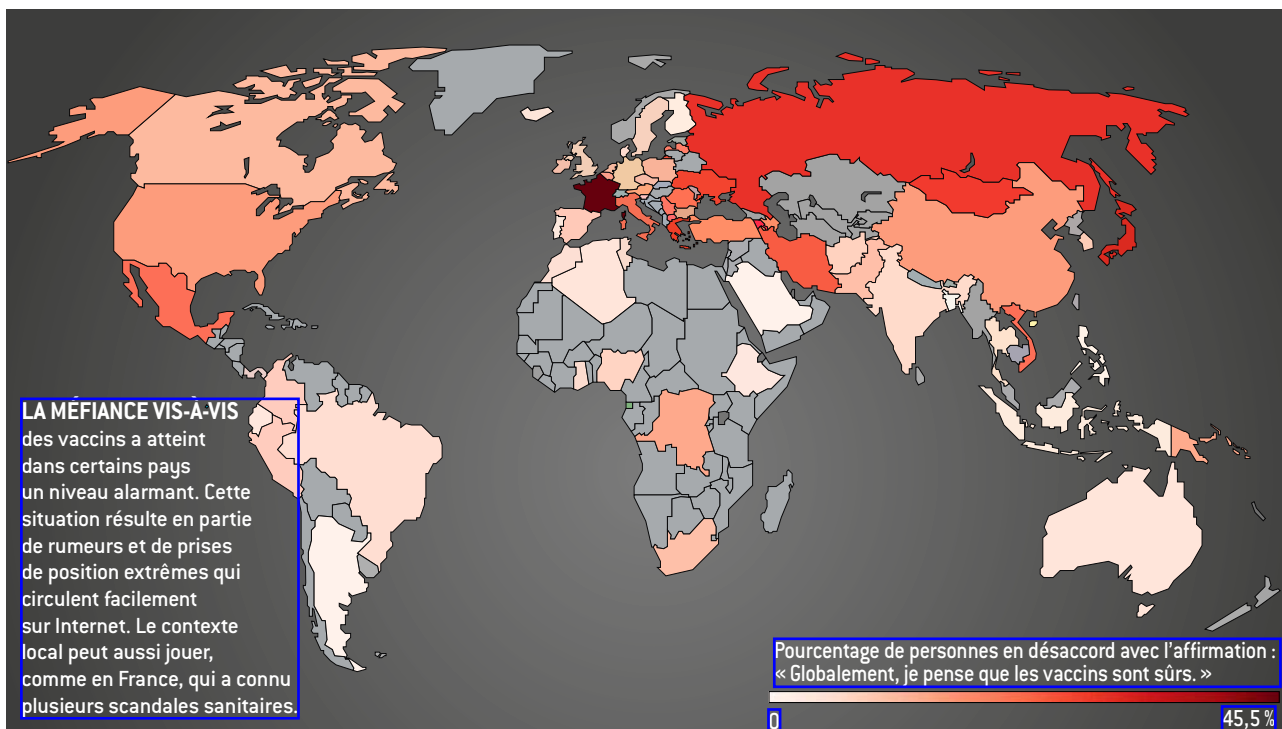
De façon plus générale, les travaux de ce type, qui analysent de nouvelles « traces sociales » disponibles en quantité, obligent les sciences sociales à discuter sur du matériel précis et tangible. Ils pourraient aussi révolutionner les sciences sociales en questionnant les catégories théoriques avec lesquelles on appréhendait généralement les acteurs sociaux. Par exemple, les catégories socioprofessionnelles se révèlent inadéquates pour étudier certains phénomènes sociaux sur Internet, ce dont témoigne la grande hétérogénéité, sur le plan socioprofessionnel, des communautés conspirationnistes.

PLS

Les travaux de **Walter Quattrociocchi** et ses collègues indiquent que les actions de démystification des théories du complot ont, auprès de ceux qui y croient, un effet contraire à celui souhaité. Faut-il alors renoncer à démentir les idées fausses qui circulent ?

G. B. : Pas du tout. Le phénomène mis en évidence est simplement l'effet rebond (ou *backfire*) bien connu en psychologie sociale. Or ce renforcement de la conviction n'est pas forcément durable. Une entreprise de démystification peut produire un résultat au bout d'un temps plus ou moins long, comme on l'a constaté avec les personnes qui parviennent à s'affranchir d'une secte. Autrement dit, la croyance peut s'effondrer sous les coups de boutoir de la réalité.

Par ailleurs, si l'on ne réagit pas aux idées fausses, les indécis ne disposeront pas de contre-arguments et se laisseront influencer encore plus facilement. D'autant que ceux qui s'expriment le plus sont généralement les plus croyants, les incrédules étant indifférents ou moins motivés. Pour la population des indécis, et notamment pour les jeunes, dont les opinions et la vision du monde sont encore malléables, et le sens critique encore faible, il est donc fondamental



d'apporter la contradiction. Même si c'est un travail de Sisyphe.

PLS

La « sociophysique » étudie des modèles plus ou moins inspirés de la physique statistique, où les individus se comportent et interagissent selon un petit nombre de règles simples. Cette démarche est-elle féconde en sociologie des opinions ?

G. B. : Je suis favorable aux approches pluridisciplinaires en sciences sociales, et d'ailleurs j'anime un séminaire avec Serge Galam, du Centre de recherches politiques de Sciences Po, qui est l'un des fondateurs de la sociophysique. Dans ces modèles dits multiagents, on dote par exemple les individus de deux ou trois traits psychologiques formalisables de façon simple, on les fait se rencontrer au hasard à deux, trois ou plus, chaque rencontre faisant émerger selon une certaine loi une opinion que vont partager tous les individus impliqués. Puis on répète plusieurs fois le processus, et l'on observe le résultat.

De tels modèles permettent de simuler – donc de décrire, mais pas forcément de comprendre, et à mon avis encore moins de prédire – des phénomènes non linéaires et banals que la sociologie classique a énormément de mal à décrire

et expliquer, tels qu'un changement rapide ou un basculement de l'opinion publique sur telle ou telle question.

PLS

Justement, Serge Galam affirme que selon son modèle de la « règle de majorité locale », l'ascension politique de Donald Trump était prévisible. Qu'en pensez-vous ?

G. B. : D'après ce modèle, que Serge Galam a appliqué au cas de Donald Trump dans une prépublication d'août 2016, les provocations du candidat conduisent dans un premier temps à une baisse des opinions favorables à son égard. Mais ces

Pour la population des indécis, il est fondamental d'apporter un démenti aux idées fausses

provocations réveillent des préjugés enfouis chez les gens, dont l'opinion commence alors à changer et à créer une dynamique favorable au provocateur.

C'est très intéressant, mais le problème, c'est que ce modèle, comme d'autres, est hypersensible aux valeurs de ses paramètres. On change

légèrement ces derniers, et le modèle conduit à un résultat complètement différent. Les valeurs des paramètres étant choisies *a priori*, le modèle n'est pas prédictif. Reste que de tels modèles sont fascinants par la description qu'ils parviennent à donner. Ils sont à explorer et à travailler pour qu'ils deviennent, un jour peut-être, prédictifs.

PLS

Pour en revenir aux théories du complot et aux fausses informations, elles ont toujours existé. Que change Internet à l'affaire ?

G. B. : Internet est une technique qui change la donne, c'est sûr. D'abord, ces points de vue marginaux existaient avant, mais ils étaient confinés dans des espaces de radicalité et étaient refoulés à l'entrée du marché de l'information, par les professionnels de ce domaine. Ce marché est devenu dérégulé, ce qui permet à tous les points de vue de s'exprimer sur la place publique. Les « coûts d'entrée » sur le marché de l'information sont devenus quasi nuls, de sorte qu'aujourd'hui n'importe quel individu peut l'alimenter, pour le meilleur ou pour le pire. Un autre point est qu'Internet permet d'accumuler des argumentaires, alors que jadis la diffusion par le

bouche-à-oreille limitait le volume d'arguments, en raison des limitations de la mémoire humaine. Cela rend plus performantes les théories du complot et autres rumeurs infondées. Les conséquences sont mesurables. Par exemple, vers 2000, environ 9 % de nos concitoyens étaient méfiants vis-à-vis des vaccins ; aujourd'hui, ils sont près de 40 % ! Même si corrélation ne signifie pas causalité, on peut difficilement douter qu'Internet fertilise l'empire des croyances.

PLS

Ne faut-il pas aussi invoquer une moindre confiance dans les autorités politiques et technocratiques ?

G. B. : Oui, évidemment, il y a avec Internet un effet de loupe qui nuit à la réputation de ces autorités. C'est ce que j'ai appelé le paradoxe de la transparence. En donnant accès à n'importe quelle information compromettante (corruption, malversations, comportements sordides, etc.), Internet confère à ce type d'information une visibilité plus grande. Ce n'est pas en soi un mal, mais, en raison d'un biais cognitif, l'individu tend à croire que plus un phénomène est visible, plus il est représentatif. Cela a assurément contribué à la défiance actuelle vis-à-vis du monde politique, des médias, de l'expertise scientifique. Comme avec les théories du complot, Internet constitue une chambre d'écho des pentes pas forcément les plus honorables de l'esprit humain.

PLS

Pourquoi, selon vous, faut-il lutter contre les théories conspirationnistes ?

G. B. : La première raison est que, comme l'ont montré récemment des chercheurs hollandais (Jan-Willem van Prooijen et ses collègues), il y a un lien fort entre la croyance aux théories du complot et la radicalité, l'extrémisme politique en particulier. On constate ainsi qu'il y a peu de terroristes djihadistes qui n'ont pas cédé aux théories conspirationnistes. De même, aux États-Unis, les tueurs de masse (*mass murderers*) sont souvent des personnes qui ont été influencées par de telles théories. Il ne faut pas minimiser l'impact de ces théories sur le comportement des gens. Elles proposent en effet une lecture totalement manichéenne du monde, dont des « méchants » tireraient les ficelles. Si l'on y croit, on a envie de retourner la table, ça se comprend ! C'est pourquoi il faut combattre ce type de théories, d'autant qu'elles peuvent facilement séduire les jeunes esprits en

formation. Il est complètement irresponsable de la part de certains collègues de critiquer cette lutte au prétexte que ce serait une entreprise de normalisation de la pensée. Cela relève tout simplement du relativisme !

PLS

Pourtant, certaines théories du complot ne méritent-elles pas considération ?

G. B. : Qu'il existe ou qu'il ait existé de réels complots est une évidence. Mais les théories conspirationnistes dont on parle, outre leurs conséquences négatives évoquées, ont des formes d'administration de la preuve totalement hétérodoxes. On est, dans le conspirationnisme plus qu'ailleurs, indifférent à la discussion rationnelle. Si l'on demandait aux tenants d'une théorie du complot, par exemple celle relative à la tuerie de *Charlie Hebdo*, ce qui les convaincrait que leur théorie est fautive, ils ne sauraient pas répondre : les conspirationnistes adoptent des positions non réfutables. En science, c'est le contraire : aucune théorie n'y survit si elle

Pour rétablir une forme d'équilibre, un point central est l'architecture des choix proposés aux internautes

n'est pas réfutable. Ce qui caractérise aussi les conspirationnistes, c'est qu'ils font des hypothèses non nécessaires et qu'ils cherchent à tout prix à trouver des anomalies pour les rendre nécessaires. Alors que les mensonges d'État finissent par s'évanouir, les complots imaginaires persistent pendant des décennies : les conspirationnistes ne lâchent jamais l'affaire et modifient leurs arguments en fonction des circonstances, de façon à défendre coûte que coûte leur croyance. C'est un mode de raisonnement très éloigné de celui de la science, le domaine le plus exigeant en matière de quête de la vérité.

PLS

Les algorithmes qui régissent les réseaux sociaux renforcent-ils la désinformation ?

G. B. : C'est certain, puisqu'ils sélectionnent en partie les informations qui parviennent à chaque internaute. Et il ne s'agit pas seulement des réseaux sociaux. Tapez par exemple les deux

mots-clés « vaccin » et « danger » sur le moteur de recherche Google : les premiers sites web de la liste fournie en réponse sont des sites très peu recommandables ! Il semble que les géants du Web ou GAFA (Google, Apple, Facebook, Amazon) aient pris conscience de ce problème et qu'ils réfléchissent à améliorer l'architecture des choix proposés à l'internaute. Cela dit, il n'y a pas que ces « bulles de filtrage » qui ont un impact sur l'autoenfermement cognitif. Chacun de nous a aussi sa part de responsabilité : ainsi, quand un « ami » sur Facebook nous contredit souvent, il y a une forte probabilité pour que nous l'éliminions du groupe de nos « amis »...

PLS

Que faudrait-il faire, selon vous, pour lutter contre la désinformation ?

G. B. : De façon générale, il faut réguler le marché de l'information, qu'Internet a déréglé. Il ne s'agit pas de censurer, ce qui serait liberticide, mais de contrebalancer le fait que les tenants de nombre de formes de crédulité s'expriment beaucoup plus que les autres et qu'ils occupent par conséquent une trop grande place. En d'autres termes, il faut rétablir une forme d'équilibre. Et pour ce faire, un point central est l'architecture des choix proposés aux internautes, point sur lequel

les géants du Web sont à même d'intervenir.

Il faudrait aussi que chacun essaie d'être responsable. Notamment, ceux qui se taisent devraient s'exprimer davantage. Enfin, nous avons besoin d'une révolution pédagogique, où l'on intégrerait aux programmes scolaires, dès que l'âge des élèves le permet, une initiation aux biais cognitifs (biais de confirmation, biais de représentativité, etc.) qui peuvent fausser notre jugement et notre perception de la réalité. Par exemple, quand on enseigne la théorie de l'évolution ou l'héliocentrisme, il faut aussi pointer le caractère contre-intuitif de ces théories et ainsi expliquer pourquoi elles ont été difficiles à accepter. Le ministère de l'Éducation nationale y réfléchit, mais il faut absolument y mettre de la méthode, en impliquant des psychologues et des sociologues. Face à Internet, le défi est que les individus soient suffisamment éclairés et critiques pour être capables de s'orienter dans le marché de l'information. ■

Propos recueillis par Maurice Mashaal

OFFRE DÉCOUVERTE

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE



1 AN - 12 Nos
59€
24% d'économie

2 ANS - 24 Nos
110€
29% d'économie

3 ANS - 36 Nos
159€
32% d'économie

BULLETIN D'ABONNEMENT

POUR LA SCIENCE

A renvoyer accompagné de votre règlement à : Pour la Science - Service abonnements - 19 rue de l'Industrie - BP 90 053 - 67 402 Illkirch cedex

☐ **OUI, je m'abonne à Pour la Science en formule Découverte :**

- ☐ 1 an • 12 numéros • **59€** au lieu de 18,50€ (D1A59E)
- ☐ 2 ans • 24 numéros • **110€** au lieu de 157€ (D2A110E)
- ☐ 3 ans • 36 numéros • **159€** au lieu de 235,50€ (D3A159E)

MES COORDONNÉES

Nom : _____
Prénom : _____
Adresse : _____

Code postal : _____
Ville : _____

Tél. : _____
Pour le suivi client (facultatif)

MON MODE DE REGLEMENT

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

N° _____
Date d'expiration _____ Clé _____

Signature obligatoire

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

Grâce 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. Passé ce délai, merci d'en faire la demande à pourlascience@abopress.fr

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 28/02/17 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.



PAS472B

CANCER

Lever les freins du système immunitaire

Jedd Wolchok

Dans de nombreux cancers, les cellules tumorales verrouillent le système immunitaire. Des oncologues développent une nouvelle génération de traitements qui visent à le débloquer.

En juin 2004, on m'a demandé d'examiner une jeune femme de 22 ans qui venait de finir ses études, était fiancée et sur le point de se marier. Durant les mois qui avaient précédé la remise de son diplôme, Shirley (le nom a été changé) avait souffert d'une toux persistante.

Une analyse par tomodensitométrie (scanographie aux rayons X) révéla de multiples masses dans ses poumons et autour. Une biopsie permit d'identifier ces masses : il s'agissait de métastases qui s'étaient propagées à partir d'un mélanome, un cancer de la peau, dont Shirley ignorait l'existence. Immédiatement, elle commença une chimiothérapie et reprogramma son mariage à la hâte.

Malheureusement, si les deux sessions de chimiothérapie et les radiothérapies qu'elle reçut durant les deux années

suivantes ralentirent la propagation des tumeurs, elles ne l'empêchèrent pas. Shirley était à court d'options. Je lui ai alors parlé d'une nouvelle étude visant à tester un nouveau médicament, conçu pour stimuler le système immunitaire du patient contre le cancer. C'était un essai randomisé, ce qui signifie que tous les participants ne recevraient pas le nouveau médicament, appelé MDX-010 à l'époque, mais Shirley fut d'accord pour y prendre part. Après quatre traitements, toute trace de mélanome avait disparu, selon une nouvelle série d'analyses par tomodensitométrie. À ce jour, Shirley est en complète rémission ; elle a deux enfants en bonne santé et, selon ses propres mots, a « retrouvé une vie normale ».

De mon côté, la transformation de Shirley a validé des années d'espoir qu'un jour

de puissantes thérapies contre le cancer fonctionneraient en orientant le système immunitaire contre les cellules tumorales. L'optimisme a gagné la communauté médicale en 2013, lorsque ce traitement et d'autres immunothérapies ont conduit à des succès similaires sur des patients à des stades avancés de leucémie et de cancers des reins et des poumons. Même si l'immunothérapie n'est en aucun cas la panacée, les récentes percées devraient nous aider à progresser davantage contre les stades avancés du cancer dans les prochaines décennies que durant les dernières.

L'idée que le système immunitaire pourrait endiguer le cancer n'est pas nouvelle. Les premières tentatives pour exploiter les défenses de l'hôte contre les tumeurs remontent à plus de cent ans, lorsque William Coley, un chirurgien au

EN THÉORIE, les lymphocytes T, des cellules du système immunitaire (en mauve), devraient apprendre à reconnaître les cellules cancéreuses (en rouge) et les détruire. Toutefois, il est fréquent que les cellules cancéreuses bloquent l'action des lymphocytes T en déclenchant l'autodestruction de ces derniers.

CRÉATION : ILLUSTRATION MEDICAL / PHOTODISC

New York Cancer Hospital (aujourd'hui le Memorial Sloan Kettering Cancer Center), essaya d'utiliser des bactéries inactivées par la chaleur. Ayant remarqué que certains patients qui avaient développé une infection après un traitement chirurgical de leur cancer semblaient vivre plus longtemps que ceux qui n'étaient pas tombés malades, Coley a émis l'hypothèse que les défenses intrinsèques mobilisées contre l'agent responsable de l'infection étaient susceptibles de perturber la tumeur.

Depuis, les biologistes ont beaucoup appris sur les cellules qui composent ce système de protection ainsi que sur les médiateurs chimiques et les interrupteurs moléculaires qui le modulent. Ils ont notamment compris comment le système immunitaire se mobilise rapidement pour détecter des agents infectieux potentiellement dangereux tels que des bactéries ou des virus. Par ailleurs, ils ont identifié les mécanismes de régulation qui, en temps normal, indiquent au système immunitaire de limiter sa réaction de manière à ne pas trop endommager le tissu sain au passage. Dans l'ensemble, ils ont acquis des connaissances détaillées sur la façon dont le système réagit au cancer et dont ce dernier le perturbe.

Plusieurs lignes de défense

La première ligne de défense contre les agents pathogènes est une réponse non spécifique contre les bactéries et les virus, coordonnée par des globules blancs nommés neutrophiles et monocytes. Ces cellules, dites de l'immunité innée, reconnaissent, à l'échelle moléculaire, certains motifs anatomiques communs à toutes les bactéries et tous les virus, tels que des éléments de leur paroi extérieure ou des particularités structurales des molécules d'ADN ou d'ARN qui les distinguent des autres organismes. Bien que ces globules blancs ne ciblent pas une espèce ou une protéine particulières, ils parviennent à détruire nombre d'envahisseurs microbiens. Ce faisant, ils produisent des fragments moléculaires, nommés antigènes, que les autres protagonistes du système immunitaire perçoivent comme étrangers.

Ces antigènes activent les cellules responsables de la deuxième ligne de défense – le système immunitaire dit adaptatif. La réponse déclenchée, bien plus ciblée que

L'ESSENTIEL

■ Tandis que les thérapies classiques contre le cancer attaquent directement les tumeurs, l'immunothérapie recrute les propres défenses de l'organisme.

■ A ce jour, la plupart des stratégies consistent à doper une réponse immunitaire existante, mais trop faible.

■ Une nouvelle approche vise à relâcher les freins qui, normalement, empêchent le système immunitaire de s'emballer.

■ Des essais cliniques ont fourni des résultats positifs durables dans des cas de mélanome métastatique et de cancer du rein ou du poumon à des stades avancés.

la première, crée, si elle l'emporte, une mémoire de l'envahisseur microbien qui facilitera l'élimination de ce dernier lors d'une nouvelle attaque. Deux différents types de globules blancs – les lymphocytes T et B – sont au cœur de cette réponse adaptative.

Plusieurs sortes de lymphocytes T existent, mais ils proviennent tous des mêmes précurseurs issus du thymus, un petit organe situé juste au-dessus du cœur, au centre de la poitrine. Les cellules B, quant à elles, sont dérivées de la moelle osseuse et produisent des anticorps à leur surface. De même que certaines protéines à la surface des cellules T, les anticorps sont des molécules qui s'arriment à des antigènes spécifiques, permettant ainsi au système immunitaire de cibler et détruire les bactéries et les cellules infectées qui présentent ces antigènes à leur surface. Lorsque le système immunitaire fonctionne de façon optimale, ses branches innée et acquise coopèrent pour identifier les agents pathogènes dangereux et les éliminer. De plus, une catégorie de cellules T garde une mémoire moléculaire à long terme de la menace initiale et neutralise ainsi plus rapidement une récurrence.

Les cancers ne sont bien sûr pas des infections. Ils apparaissent lorsque des cellules de l'organisme subissent des changements génétiques ou autres. Néanmoins, le système immunitaire devrait être capable de reconnaître les cellules cancéreuses, car elles présentent des fragments moléculaires anormaux, que les lymphocytes T et B devraient donc percevoir comme étrangers. Pourtant, souvent, pour diverses raisons, le système immunitaire ne parvient pas à combattre les tumeurs. Au fil des ans, les efforts de la médecine pour stimuler sa réponse ont fourni des résultats mitigés. Les approches récentes, plus prometteuses, explorent une piste différente. On s'est aperçu en effet que, parfois, les tumeurs cancéreuses piratent les interrupteurs du système immunitaire – les mécanismes qui régulent son activité – et, ce faisant, freinent les réponses immunitaires antitumorales. Les nouvelles approches tentent de lever ces freins.

Le traitement expérimental qui a sauvé la vie de Shirley s'inscrit dans ce nouveau modèle. Il est dérivé d'une étude sur une protéine nommée CTLA-4 présente dans de nombreux types de lymphocytes T, mais activée seulement après que certaines cellules T ont reconnu leur cible et reçu un

DEUX APPROCHES POUR DOPER LE SYSTÈME IMMUNITAIRE

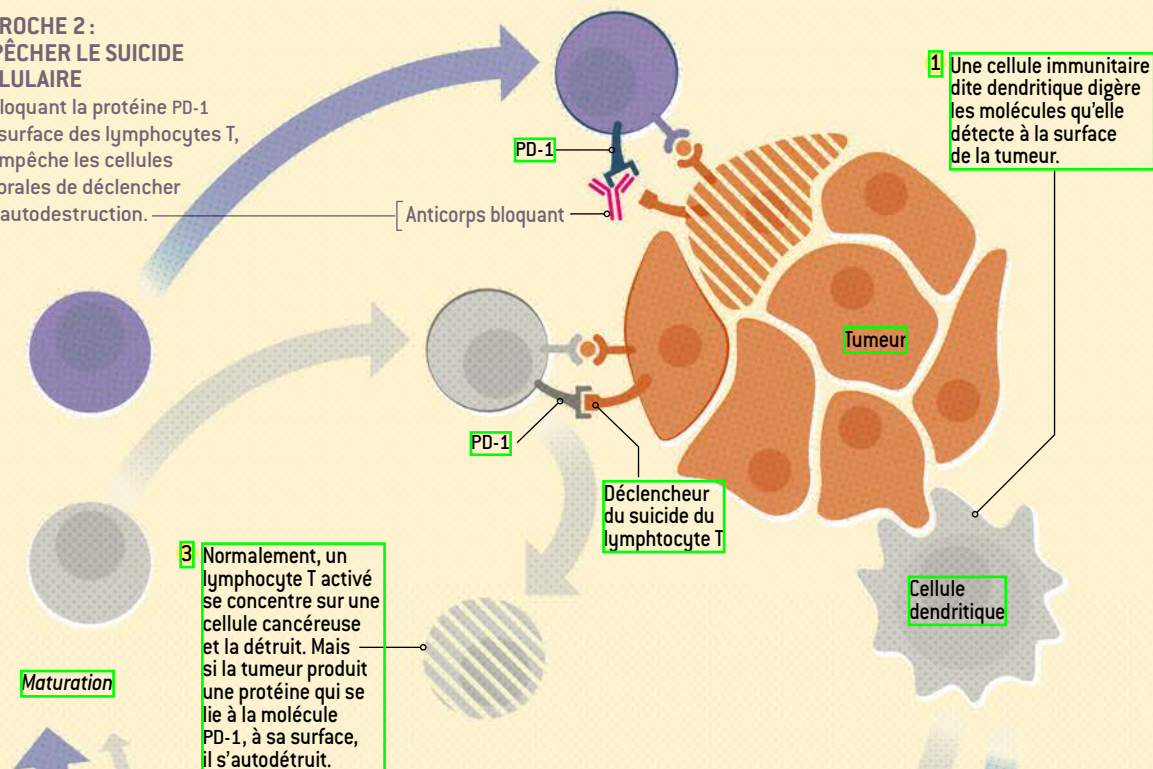
L'étude des mécanismes par lesquels le système immunitaire lutte contre le cancer – et parfois échoue (*la voie en gris ci-dessous*) a incité les chercheurs à développer deux nouvelles approches (*représentées en bleu ci-dessous*) pour doper les défenses de l'hôte contre une tumeur.

POURQUOI LA NATURE A BESOIN D'AIDE

En théorie, le système immunitaire devrait détruire les tumeurs lorsqu'il les reconnaît **1**, mais en pratique, il arrive que des freins moléculaires et des points de contrôle entravent sa capacité à les attaquer **2**, parfois sous l'action des cellules tumorales elles-mêmes **3**.

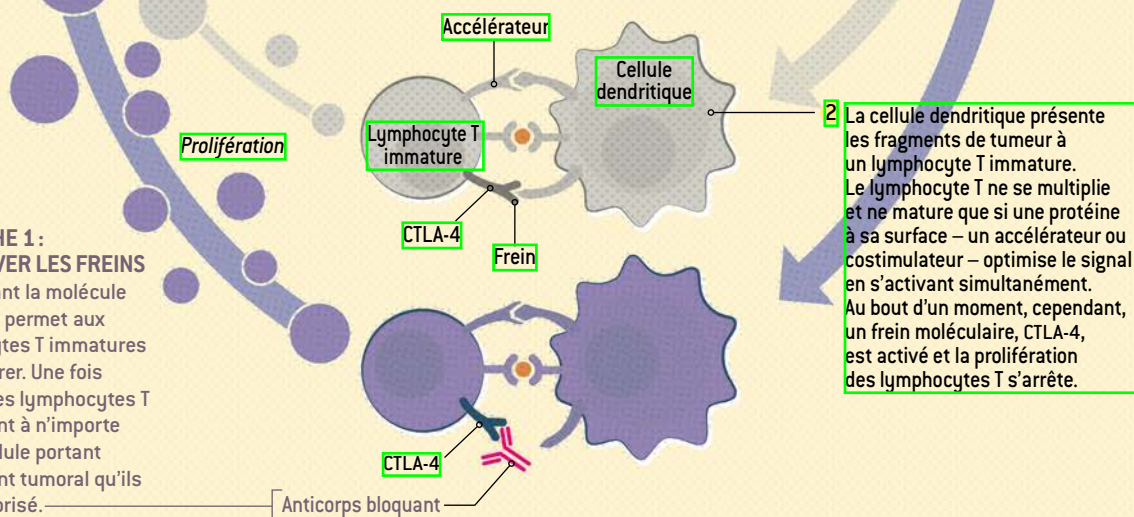
APPROCHE 2 : EMPÊCHER LE SUICIDE CELLULAIRE

En bloquant la protéine PD-1 à la surface des lymphocytes T, on empêche les cellules tumorales de déclencher leur autodestruction.



APPROCHE 1 : DÉSACTIVER LES FREINS

En bloquant la molécule CTLA-4, on permet aux lymphocytes T immatures de proliférer. Une fois activés, les lymphocytes T s'associent à n'importe quelle cellule portant le fragment tumoral qu'ils ont mémorisé.



signal d'autorisation *via* d'autres molécules. Une fois activée, la protéine CTLA-4 et de nombreuses autres fonctionnent comme une série de freins moléculaires et de points de contrôle qui évitent que le système immunitaire ne s'emballe et ne devienne trop destructeur.

On comprend la nécessité de tels moyens de contrôle en les supprimant chez l'animal. Des souris modifiées génétiquement pour ne pas exprimer la protéine CTLA-4 meurent à l'âge de trois ou quatre semaines : sans aucun frein pour arrêter l'escalade de la réponse immunitaire, les cellules T activées s'infiltrant dans tous les organes sains et les détruisent. Cette découverte, publiée en 1995, montre que l'absence permanente de cette seule molécule provoque une réponse auto-immunitaire dévastatrice.

La même année, James Allison, qui travaillait alors à l'université de Californie à Berkeley, a émis l'hypothèse que si l'on arrivait à lever temporairement le frein CTLA-4, le système immunitaire serait en mesure de lancer une attaque plus vigoureuse contre les cellules cancéreuses, qui entraînerait une régression des tumeurs. James Allison et ses collègues ont testé cette hypothèse chez la souris en injectant un anticorps de synthèse conçu pour bloquer l'activité de CTLA-4.

De fait, l'inactivation de CTLA-4 provoqua la régression de plusieurs types de tumeur – dont le cancer du colon et des sarcomes – qui avaient été greffés aux souris de laboratoire. Dans d'autres expériences, ce sont des mélanomes qui ont considérablement régressé : cette fois, James Allison et ses collègues ont traité les souris avec un anticorps bloquant CTLA-4 et un vaccin expérimental conçu pour déclencher une réponse immunitaire spécifique contre ce type de cancer (en l'occurrence, un vaccin constitué de cellules de mélanome modifiées pour qu'elles produisent des cytokines, des molécules qui stimulent le système immunitaire).

L'étape suivante consistait à tester cette approche chez l'humain. Avec la collaboration de l'entreprise biopharmaceutique Medarex, qui développa une version humaine de l'anticorps de blocage de CTLA-4 (d'abord nommé MDX-010 et maintenant connu sous le nom ipilimumab),

L'AUTEUR



Jedd D. WOLCHOK est le chef du service Mélanomes et immunothérapies au Memorial Sloan Kettering Cancer Center, à New York. Il est consultant pour les compagnies pharmaceutiques Bristol-Myers Squibb, Merck, MedImmune et EMD Serono, mais n'a aucun intérêt financier lié au succès des médicaments mentionnés dans cet article.

James Allison a commencé les essais cliniques sur des patients atteints de cancers à des stades très avancés ne répondant pas aux autres traitements. En 2009, l'entreprise Bristol-Myers Squibb a racheté Medarex et continué le développement du médicament, dont elle a obtenu l'homologation en 2011.

Des résultats parfois trompeurs

Dès les premiers essais et tout au long des expériences, les tumeurs de plusieurs patients ont considérablement régressé. Pourtant, auparavant, des tests préliminaires avaient livré de curieux résultats. Les chercheurs ont ainsi appris qu'en matière d'immunothérapie les moyens usuels pour estimer la réussite d'un traitement anticancéreux sont parfois trompeurs.

En général, les oncologues savent assez vite si un patient répond bien à un traitement anticancéreux. On utilise différentes techniques d'imagerie (tomodensitométrie, tomographie par émission de positrons, imagerie par résonance magnétique) pour mesurer la taille de la tumeur juste avant le début du traitement, puis environ six semaines plus tard. Si celle-ci a diminué, on continue le traitement. Sinon, on envisage une autre approche ou on arrête le traitement.

Prendre ce type de décision dans le cas de l'immunothérapie n'est pas aussi simple. D'abord, il faut laisser au système immunitaire le temps de s'activer. Donc, en général, on ne mesure à nouveau la taille de la tumeur que douze semaines après le début du traitement. Mais même avec ces six semaines supplémentaires de traitement et d'observation par rapport aux traitements classiques, les résultats des expériences de blocage de CTLA-4 laissaient les chercheurs perplexes. Les examens montraient clairement une amélioration chez certains patients, tandis que, chez d'autres, les tumeurs préexistantes avaient grossi et de nouvelles étaient même apparues. Pourtant, certains patients ayant des tumeurs plus grosses se sentaient mieux.

À présent, avec le recul, nous voyons deux façons d'expliquer le grossissement des tumeurs après immunothérapie : soit le

Un peu plus de 20 % des patients atteints d'un mélanome métastatique et traités avec l'ipilimumab étaient encore en vie trois ans plus tard

traitement ne fonctionne pas, soit un grand nombre de lymphocytes T et d'autres cellules du système immunitaire ont envahi la tumeur. En d'autres termes, des tumeurs plus grosses pourraient, paradoxalement, signifier que le traitement fonctionne; il faut simplement attendre un peu plus longtemps pour observer la régression des tumeurs. Comme les progrès sont difficiles à évaluer pendant une immunothérapie, les chercheurs qui testent l'ipilimumab utilisent maintenant la mesure du taux de survie des patients (leur durée de vie) comme critère principal dans leurs analyses.

Les résultats des derniers essais cliniques montrent que chez un peu plus de 20 % des patients atteints d'un mélanome métastatique et traités avec l'ipilimumab, la maladie est contrôlée sur le long terme: ils sont encore en vie plus de trois ans après le début du traitement. C'est une donnée importante, car avant le développement de nouveaux médicaments tel l'ipilimumab, l'espérance de vie moyenne en cas de mélanome métastatique était de sept à huit mois. De fait, certains des premiers

bénéficiaires, comme Shirley, sont en vie plus de cinq ans après le traitement.

Pendant ce temps, la recherche a progressé sur un autre frein du système immunitaire, une protéine nommée PD-1 parsemée à la surface de nombreux lymphocytes T. Lorsqu'elle est liée à certaines autres molécules, la protéine PD-1 conduit la cellule qui la porte à s'autodétruire – un processus normal qui, comme dans le cas de la protéine CTLA-4, contribue à modérer une réponse immunitaire en cours. Certaines cellules cancéreuses, cependant, ont développé une défense qui détourne la fonction des protéines PD-1: des molécules à leur surface trompent les protéines PD-1 des lymphocytes T, déclenchant ainsi trop tôt leur autodestruction. En conséquence, chaque lymphocyte T qui attaque la tumeur reçoit un signal pour se suicider. Ils s'agit d'un des nombreux mécanismes tumoraux qui rendent inefficace le système immunitaire.

Aujourd'hui, six sociétés – Bristol-Myers Squibb, CureTech, EMD Serono, Genentech, Merck et MedImmune – ont développé des anticorps qui empêchent

différentes tumeurs d'utiliser la voie PD-1 pour induire le suicide des lymphocytes T. Dans des essais récents, ces molécules ont octroyé à plus de 30 % des patients, atteints de mélanomes avancés, de longues périodes de rémission, parfois de plusieurs années. Plusieurs collègues du Memorial Sloan Kettering et des collaborateurs de nombreux autres centres ont utilisé ces agents bloquants de PD-1 chez des patients présentant un certain type de cancer du poumon. Plus de 20 % des participants ont obtenu une régression durable.

Efficace sur plusieurs cancers

Annoncés en 2012, les résultats sur le cancer du poumon ont marqué un tournant en immunothérapie. Les médecins sceptiques, qui n'y voyaient qu'une stratégie applicable à certaines tumeurs spécifiques telles que les mélanomes et le cancer du rein, particulièrement sensibles aux traitements immunitaires, ne peuvent plus rejeter cette approche. Aujourd'hui, elle se révèle efficace

les conférences

À la Cité des sciences et de l'industrie Entrée libre dans la limite des places disponibles

Dans le cadre de l'exposition **Quoi de neuf au Moyen Âge?** jusqu'au 6 août 2017.

les jeudis à 19h

cycle

La bataille du rationalisme au Moyen Âge

Le Moyen Âge aurait été une période de déraison? Au contraire, les sources arabes et grecques ont beaucoup contribué à l'élaboration de la rationalité scientifique.

23 février Les mathématiques arabes: socle de la rationalité

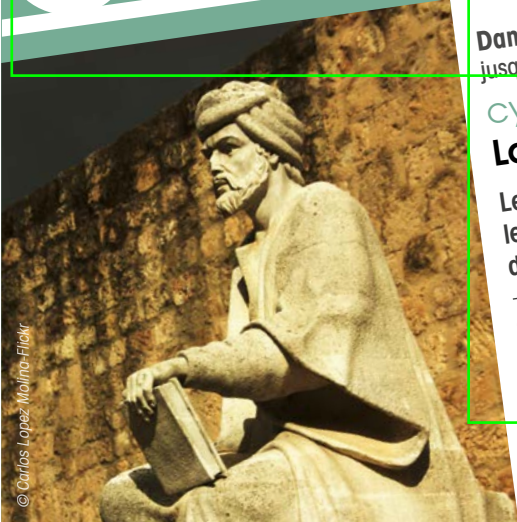
2 mars De Bagdad à Cordoue: les foyers du savoir

9 mars Averroès, fauteur de troubles

Avec le soutien de

programme complet sur cife.sciences.fr

SCIENCE culture plus



© Carlos Lopez Morino-Flores

pour un éventail plus large de cancers et devrait bientôt faire partie des traitements classiques de nombreux types de la maladie, aux côtés de la chimiothérapie et de la radiothérapie.

Certes, comme la plupart des traitements anticancéreux, ces deux formes d'immunothérapie provoquent des effets secondaires. Les médicaments anti-CTLA-4, par exemple, produisent parfois des réactions inflammatoires sur la peau et dans le gros intestin, lorsque les cellules immunitaires libèrent un excès de médiateurs chimiques inflammatoires. On traite les éruptions cutanées et les crampes et diarrhées avec des stéroïdes immunosuppresseurs tels que la prednisone.

De même, les patients qui reçoivent la thérapie bloquant PD-1 sont sujets à des inflammations – en particulier des reins, des poumons et du foie –, mais elles sont moins fréquentes et moins sévères qu'avec les traitements anti-CTLA-4. Heureusement, l'utilisation de médicaments anti-inflammatoires ne semble pas affecter l'efficacité de ces traitements sur les tumeurs.

L'inflammation peut conduire à des problèmes plus graves. Les chercheurs ont longtemps craint que la cascade excitatrice du système immunitaire entraîne une réaction auto-immune, où le système immunitaire s'attaquerait à toujours plus de tissus normaux sans que l'on puisse l'arrêter. Toutefois, contrairement aux symptômes d'une maladie auto-immune, ces effets secondaires inflammatoires semblent temporaires et, une fois traités, ne réapparaissent plus.

Combiner plusieurs immunothérapies

La question qui nous occupe actuellement concerne l'utilisation d'une combinaison des anticorps contre PD-1 et CTLA-4. Ces deux types d'anticorps stimulant la réponse immunitaire contre les tumeurs *via* des voies différentes, il est légitime de se demander si leur combinaison pourrait fournir un traitement sûr et efficace. En 2007, des expériences sur des animaux de laboratoire ayant développé un cancer du colon et un mélanome ont montré que l'association des deux traitements était plus efficace qu'un seul. Aussi, en 2010, mon groupe, en collaboration avec Mario Sznol, à l'université Yale, a mené une petite étude chez 53 patients atteints d'un mélanome métastatique sur l'innocuité de l'utilisation

conjointe de l'ipilimumab et du nivolumab, un médicament bloquant la protéine PD-1.

Les résultats, que nous avons présentés à une conférence médicale en 2013, étaient impressionnants. Chez plus de 50 % des patients traités avec ce que nous considérons comme la dose optimale de ces anticorps, les tumeurs avaient diminué de plus de la moitié de leur taille initiale. Ces réponses au traitement sont radicalement différentes de celles obtenues avec chaque agent seul. Les effets secondaires étaient aussi plus communs, et également contrôlables avec des corticoïdes.

Ce ne sont que des résultats préliminaires obtenus sur un petit nombre de patients, qui nécessitent d'être reproduits à plus grande échelle, mais nous menons actuellement une étude étendue de la combinaison des blocages par l'ipilimumab et le nivolumab chez plus de 900 patients atteints d'un mélanome. Les résultats préliminaires de cette vaste étude, publiés en 2015, ont confirmé l'efficacité du traitement combiné par rapport à une thérapie avec un seul des deux médicaments. Ces premiers résultats ont conduit à l'approbation de la combinaison aux États-Unis et en Europe, mais nous attendons encore les données sur la survie à long terme des patients de l'étude.

D'autres chercheurs étudient cette immunothérapie combinée pour traiter le cancer du poumon, du rein, de l'estomac, du sein, des voies aérodigestives supérieures et du pancréas. L'association de cette stratégie avec des attaques directes contre les tumeurs – par chimiothérapie ou radiothérapie – pourrait aussi augmenter son efficacité si les cellules cancéreuses meurent d'une façon qui déclenche la réponse immunitaire innée. On créerait une « tempête » thérapeutique parfaite pour tuer les cellules cancéreuses et doper la reconnaissance des débris par le système immunitaire. Une telle combinaison devrait aussi permettre aux lymphocytes T de se forger une mémoire des cellules cancéreuses rencontrées et, à l'avenir, de maintenir une vigilance accrue contre l'apparition d'éventuelles tumeurs longtemps après l'arrêt du traitement. Reste à savoir si ce type d'immunothérapie pourrait ou devrait être combiné à d'autres en développement – tels les vaccins contre le cancer – afin d'obtenir des résultats encore meilleurs. Les rémissions à long terme, voire les guérisons, sont en tout cas désormais des issues envisageables. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. D. Larkin *et al.*, Combined nivolumab and ipilimumab or monotherapy in untreated melanoma, *The New England Journal of Medicine*, vol. 373, pp. 23-34, 2015.

J. D. Wolchok *et al.*, Nivolumab plus ipilimumab in advanced melanoma, *The New England Journal of Medicine*, vol. 369, pp. 122-133, 2013.

R. D. Schreiber *et al.*, Cancer immunoeediting: Integrating immunity's roles in cancer immunosuppression and promotion, *Science*, vol. 331, pp. 1565-1570, 2011.

Dans l'**inter**êt de la science

mathieu
vidard

la tête au carré
14:05-15:00



**france
inter**venez
franceinter.fr

« L'immunothérapie est une arme puissante à double tranchant »

Depuis une dizaine d'années, l'immunothérapie contre le cancer est en plein développement. L'idée est d'aider le système immunitaire à cibler les cellules tumorales, tout en évitant qu'il se retourne contre le patient.



Emanuela ROMANO est médecin-chercheuse responsable du programme Immunothérapie des cancers à l'institut Curie, à Paris.

POUR LA SCIENCE

Quels sont les principaux axes de recherche en immunothérapie ?

EMANUELA ROMANO : Plusieurs voies sont explorées pour activer le système immunitaire aux différentes étapes de son intervention dans le déclenchement d'une réponse antitumorale efficace (voir la figure page ci-contre). Ces étapes sont la cible des immunothérapies en développement, en essai clinique ou approuvées aux États-Unis et en Europe dans le traitement spécifique de diverses tumeurs solides ou liquides. En particulier, l'étude des points de contrôle immunitaires a permis de définir de nouvelles cibles pour réguler le système immunitaire et induire une réponse antitumorale. Ces cibles sont des molécules à la surface des lymphocytes T, les cellules qui reconnaissent et détruisent les agents pathogènes ou les cellules tumorales. Elles modulent l'activité de ces cellules. Certaines, comme les protéines CTLA-4 ou PD-1, mais aussi d'autres telles que VISTA ou TIGIT, empêchent le système immunitaire de s'emballer et de détruire des tissus sains. D'autres, au contraire, telles les protéines OX40 et GITR, stimulent les lymphocytes T. L'idée est de concevoir, d'un côté, des anticorps qui bloquent l'action des points de contrôle inhibiteurs et, de

l'autre, des molécules qui renforcent celle des points de contrôle activateurs.

Toujours dans l'idée de lever les verrous du système immunitaire, une autre stratégie à l'étude vise à bloquer des enzymes impliquées dans ce verrouillage, telle IDO, dont l'inhibition s'est révélée efficace pour empêcher les cellules tumorales d'échapper à la réponse immunitaire.

D'autres recherches se focalisent sur les modalités de l'immunothérapie : une immunothérapie sera-t-elle plus efficace associée à une chimiothérapie ? À une radiothérapie ? À d'autres immunothérapies ? De même, faut-il plutôt donner une immunothérapie de façon systémique, dans tout l'organisme par le sang, ou cibler une seule lésion par injection afin d'obtenir une réponse locale, qui deviendra systémique ensuite *via* la circulation des lymphocytes T dans le sang ? L'approche ciblée est notamment celle que l'on essaye de développer en utilisant des vaccins antitumoraux ou des virus oncolytiques.

PLS

L'immunothérapie par voie vaccinale est-elle utilisée ?

E. R. : Oui, depuis 2010, le Sipuleucel-T est autorisé aux États-Unis dans le traitement de certains cancers de la prostate résistants

à l'hormonothérapie. Un vaccin est aussi en essai clinique de phase III sur un mélanome en association avec le pembrolizumab, un anti-PD-1. Mais il s'agit toujours de traiter des patients à un stade avancé, métastatique, de la maladie. On ne peut pas encore dire si de tels vaccins protégeront un jour d'une récurrence après l'ablation d'une tumeur. On a toutefois compris pourquoi les vaccins conçus il y a dix à quinze ans ne marchaient pas. On n'utilisait qu'un seul antigène, et les vaccins n'étaient alors pas assez puissants. Le système immunitaire se mettait à tolérer les cellules tumorales porteuses de l'antigène. Aujourd'hui, on a compris qu'il faut ajouter des adjuvants pour déclencher une réponse immunitaire efficace. De nouveaux adjuvants immunologiques sont aujourd'hui à l'étude.

PLS

Laisse-t-on de côté les premières voies envisagées, celles qui visent à activer le système immunitaire de façon non spécifique, *via* des cytokines ?

E. R. : L'interleukine 2, une des cytokines utilisées, est très efficace, surtout contre le cancer du rein et le mélanome, mais on l'utilise peu en effet, à cause de la toxicité du traitement. Celle-ci est gérable, mais nécessite une équipe soignante dédiée.

Vaccins antitumoraux ②
On injecte au patient des antigènes (sous la forme de peptides, d'ADN, de cellules dendritiques ou virus modifiés) pour stimuler une réponse antitumorale.

Virothérapie ②
On détourne des virus pour cibler les cellules tumorales et les détruire.

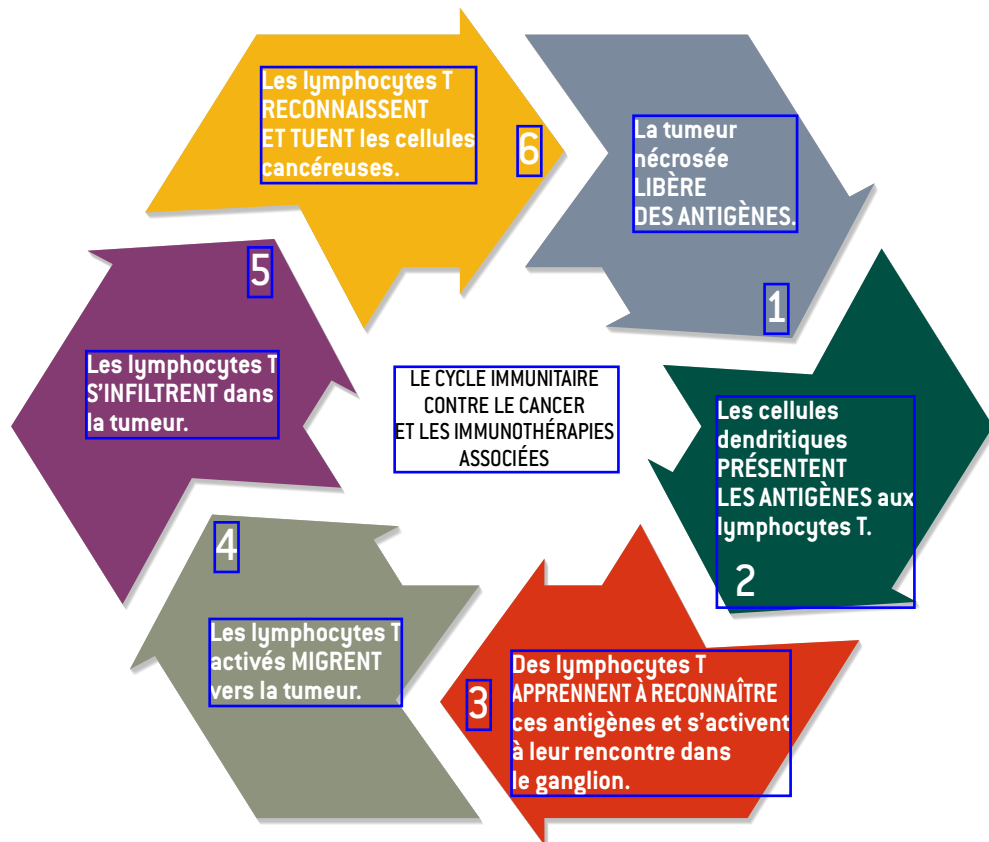
Cytokines ② ③
On injecte au patient des molécules (cytokines) telles que IL2 qui stimulent le système immunitaire.

Levée des freins immunitaires ③ ⑥
On injecte des anticorps qui débloquent les verrous du système immunitaire.

Anticorps multispécifiques ⑥
On injecte des anticorps qui reconnaissent à la fois les cellules cancéreuses et les lymphocytes T, ce qui favorise leur rencontre.

Thérapies cellulaires ③ ⑥
On modifie génétiquement des lymphocytes T prélevés au patient afin de leur faire exprimer un récepteur conçu pour reconnaître un antigène tumoral, puis on les réinjecte au patient.

Anticorps antitumoraux ⑥
On injecte des anticorps spécifiques de protéines des cellules tumorales ou du stroma (la charpente de la tumeur), afin de recruter les lymphocytes T cytotoxiques.



PLS

Les thérapies cellulaires à base de lymphocytes T modifiés sont les plus récentes. Sont-elles prometteuses ?

E.R. : Oui, certainement. Plusieurs stratégies visent à ajouter à la surface des lymphocytes T du patient des protéines qui les aideront à reconnaître les tumeurs. Mais, là aussi, le traitement nécessite des équipes spécialisées et une logistique de haute qualité, car la prise en charge de la toxicité est complexe. Avec l'immunothérapie, on joue avec le feu. C'est une arme à double tranchant. L'idée est de déclencher une réponse de l'hôte contre la tumeur, mais la tumeur fait partie de l'hôte. Et des cellules saines portent parfois les mêmes antigènes. La réponse immunitaire activée risque donc de les atteindre, surtout si elle est puissante. On prend ce risque car, le plus souvent, la tumeur est une maladie agressive.

PLS

Arrive-t-on à cibler une tumeur, pour limiter la toxicité du traitement ?

E.R. : Non, pas encore suffisamment, car les antigènes exprimés uniquement dans les cellules tumorales sont quasi inexistantes. Pour pallier le manque de sélectivité des thérapies cellulaires, on développe des sortes

d'interrupteurs qui éteindraient la réponse immunitaire en cas d'effets secondaires trop importants. Mais c'est encore exploratoire. On essaye aussi de trouver de nouvelles cibles plus spécifiques des tumeurs, mais on a souvent de mauvaises surprises. Un lymphocyte modifié pour reconnaître un antigène que l'on croyait spécifique de la tumeur peut, par malchance, interagir avec une molécule normale de l'hôte et déclencher des complications. Une approche à l'étude pour limiter la toxicité du traitement consiste à réserver les thérapies cellulaires à des patients dont la maladie est peu disséminée. Cela permettrait d'éviter de déclencher une inflammation systémique trop importante.

PLS

Vous dites que l'on essaye de tester les associations de thérapies. Peut-on espérer une médecine propre à chaque patient ?

E.R. : On n'a pas encore assez de biomarqueurs des tumeurs – de signatures moléculaires spécifiques de telle caractéristique tumorale – pour différencier les patients. On a bien des pistes, mais non validées, comme la protéine PD-L1, qui se lie à PD-1. Dans un essai récent sur des patients atteints d'un cancer du poumon avancé et traités en première ligne avec du pembrolizumab, on s'est

aperçu que, chez certains dont plus de 50 % des cellules tumorales exprimaient PD-L1, la réponse au traitement était très bonne. Mais regarder l'expression de cette protéine est insuffisant, car des patients dont la tumeur ne l'exprimait pas ont également bien répondu. Un autre facteur limitant est l'hétérogénéité de la tumeur : les cellules tumorales sont loin d'être toutes identiques. La solution viendra, je pense, d'une approche combinatoire : la recherche de PD-L1, mais aussi de marqueurs d'autres points de contrôle ou de l'expression de certains gènes d'inflammation. En effet, des signatures de l'inflammation nous informent que l'hôte a déjà produit une réponse immunitaire contre le cancer, ce qui suggère qu'il répondra bien aux immunothérapies.

L'approche combinatoire sera aussi l'avenir de l'immunothérapie. Dans quelques cas où la tumeur est infiltrée de cellules immunitaires activables (mélanome, certains types de cancer du poumon et de la vessie...), une immunothérapie peut suffire. Mais pour une tumeur avec faible infiltrat immunitaire (cancers du sein et de l'ovaire, par exemple), il faudra lui adjoindre une chimiothérapie, radiothérapie ou autre. L'été prochain, nous lançons une étude clinique dans ce sens sur le cancer du col de l'utérus. ■

Propos recueillis par Marie-Neige Cordonnier

Climatologie

El Niño n'explique pas tout

On accuse souvent El Niño, phénomène climatique capricieux et influent, d'être responsable d'événements météorologiques extrêmes. L'épisode le plus récent montre pourtant que d'autres phénomènes jouent aussi un rôle.

Emily Becker





TEL UN MONSTRE MARIN FANTASTIQUE,
le phénomène climatique El Niño déverse
sa colère sur les côtes américaines.
Dans l'imagerie populaire, il est annonciateur
de fortes pluies, en particulier en Californie.
Mais un examen des vingt derniers
épisodes El Niño, notamment celui
de 2015-2016, infirme cette idée.

Pluies diluviennes et inondations dans certaines régions, sécheresses dans d'autres... Le coupable porte souvent le nom d'El Niño, désigné ainsi par les pêcheurs sud-américains car, certaines années, il marque pour eux la fin de la saison de la pêche après les festivités de Noël (*el niño*, «l'enfant» en espagnol, faisant référence à l'Enfant Jésus). Ce phénomène climatique puissant et récurrent prend naissance dans les eaux de l'océan Pacifique et étend son influence à l'échelle du globe, avec de multiples répercussions: l'agriculture et les réserves d'eau sont perturbées, des épidémies sont parfois favorisées, etc.

Le continent américain est directement exposé aux caprices d'El Niño. La Californie, par exemple, est particulièrement sensible à ce phénomène. Cet État produit plus de 90 % des tomates, des amandes et des brocolis consommés aux États-Unis, ainsi que de nombreux autres produits agricoles. Or ces cultures nécessitent beaucoup d'eau et sont très vulnérables aux épisodes de sécheresse. Mais El Niño fait-il vraiment à lui seul la pluie et le beau temps, comme le suggèrent les médias et certains météorologues? En fait, non. D'autres phénomènes interviennent et renforcent les effets d'El Niño ou les atténuent. Aussi, deux épisodes d'El Niño d'intensité comparable peuvent avoir des conséquences météorologiques très différentes.

Par exemple, le dernier épisode El Niño, celui de 2015-2016, a été l'un des plus intenses de ces cinquante dernières années, mais il n'a apporté que très peu de pluie en Californie du Sud.

Pourtant, au printemps 2015, lorsque la NOAA – *National Oceanic and Atmospheric Administration*, l'Agence américaine d'observation des océans et de l'atmosphère – annonça qu'un épisode El Niño se préparait, tous les agriculteurs californiens furent soulagés. La sagesse populaire disait en effet qu'El Niño apportait des pluies abondantes. Or, depuis quatre années, la Californie était en situation de grave sécheresse. Les réservoirs d'eau étaient bien au-dessous de leurs capacités et les aquifères souterrains étaient trop exploités. Le manteau neigeux des montagnes, une source importante d'eau tout au long du printemps et de l'été, avait presque disparu dans de nombreuses régions. Le retour d'El Niño était donc *a priori* une bonne nouvelle, mais cet espoir a été déçu.

L'AUTEURE



Emily BECKER est chercheuse contractuelle au Centre de prévision climatique de la NOAA, l'Agence américaine d'observation des océans et de l'atmosphère, à College Park.

L'ESSENTIEL

■ On attribue souvent certains événements météorologiques extrêmes au phénomène El Niño ou La Niña.

■ La situation n'est pas aussi simple. Par exemple, le phénomène El Niño de 2015-2016 n'a pas apporté les fortes précipitations attendues en Californie du Sud.

■ L'épisode El Niño de 2015-2016 a été parmi les trois plus puissants du demi-siècle passé. Il a eu une influence planétaire, mais d'autres facteurs, tels que le réchauffement global, ont peut-être aussi joué sur les conditions météorologiques locales.

Revenons au phénomène climatique lui-même. À quoi correspond-il? El Niño est la phase chaude d'un cycle de réchauffement et de refroidissement des eaux de surface de l'océan Pacifique tropical, cycle nommé Enso (l'acronyme anglais pour *El Niño-Southern Oscillation*, El Niño-Oscillation australe). La phase froide est nommée La Niña. Ce cycle se reproduit environ tous les trois à sept ans. Quand l'un ou l'autre phénomène apparaît, il perdure pendant six mois à un an. Durant un épisode El Niño, les eaux chaudes réchauffent l'air qui les surmonte, ce qui provoque des changements dans la circulation atmosphérique, qui touchent toute la planète.

La NOAA, où j'effectue des recherches sur le climat, peut habituellement voir venir un épisode El Niño ou La Niña avant qu'il n'exerce sa plus forte influence. Mais si les prévisionnistes savent bien détecter la formation d'un épisode El Niño ou La Niña, ils ont encore du mal à prévoir les changements climatiques régionaux qui en résultent. Depuis 1950, année où la NOAA a commencé à suivre le phénomène, seuls la moitié environ des vingt épisodes El Niño survenus ont amené des précipitations supérieures à la moyenne en Californie durant sa saison des pluies (décembre, janvier et février). Dans certains cas, les effets étaient à l'opposé de ce qui était attendu.

Un El Niño en formation

Ainsi, quand les météorologues ou climatologues détectent les signes avant-coureurs d'un nouvel épisode El Niño, le défi pour eux est de répondre à plusieurs questions. Cet épisode sera-t-il puissant? Apportera-t-il l'humidité tant attendue? Par ailleurs, renforcera-t-il les ouragans dans le Pacifique? Les réduira-t-il dans l'Atlantique? Asséchera-t-il l'Australie? Provoquera-t-il un hiver doux dans le nord-est des États-Unis, comme certains épisodes El Niño l'avaient fait dans le passé?

Répondre à de telles questions aiderait grandement les agriculteurs, les autorités et le public à se préparer à des conditions climatiques extrêmes. Cependant, comme le démontre le récit du déroulement de l'épisode El Niño le plus récent, la tâche est délicate.

Les premiers signes du développement d'un phénomène El Niño apparaissent sous la surface de l'océan. Sous l'action des alizés, vents qui traversent

ANATOMIE DES PHÉNOMÈNES EL NIÑO ET LA NIÑA

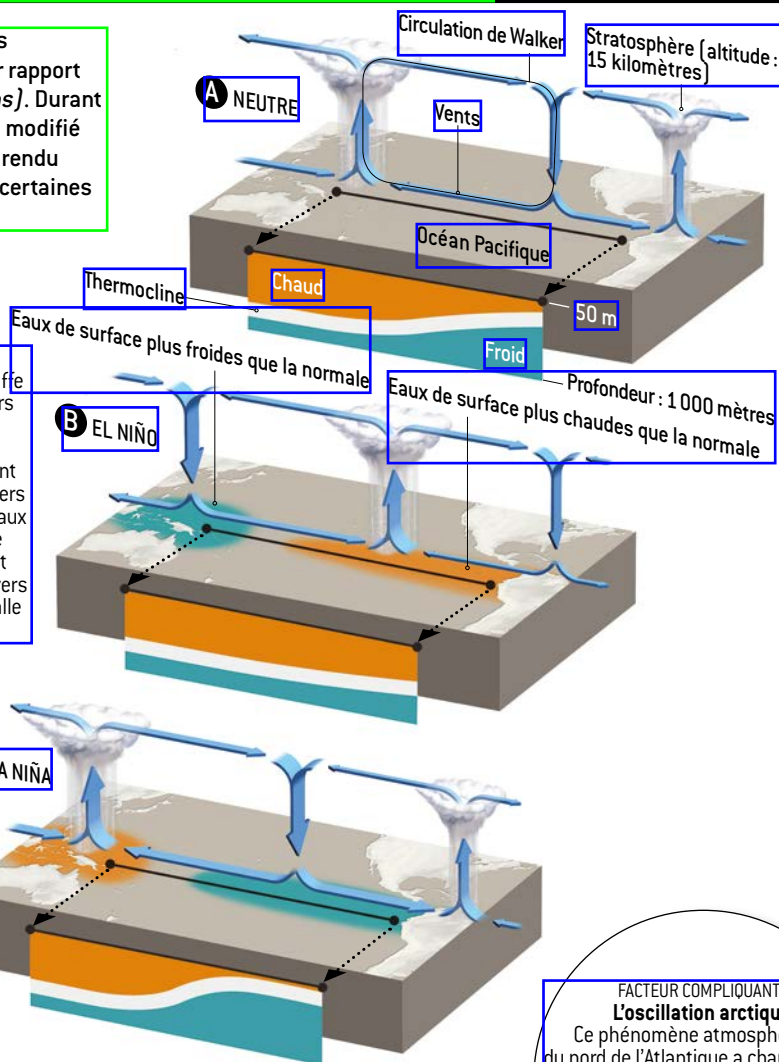
Un épisode climatique El Niño apparaît quand les températures de l'océan Pacifique changent, par rapport à des conditions « neutres » (voir les illustrations). Durant l'hiver 2015-2016, un épisode El Niño puissant a modifié la direction du jet-stream sur les États-Unis et a rendu les précipitations plus ou moins probables dans certaines régions du monde (voir la carte).

El Niño ou La Niña ?

L'eau chaude du Pacifique ouest (A), typiquement, réchauffe l'air, qui s'élève, provoque des précipitations et circule vers l'est quand il atteint la stratosphère. Cet air redescend et circule vers l'ouest, ce qui permet de « piéger » les eaux chaudes qui s'y trouvent. Si les vents de surface faiblissent pendant plusieurs mois, les eaux chaudes se déplacent vers l'est, modifiant la circulation de Walker et poussant des eaux chaudes plus en profondeur, ce qui enclenche un épisode El Niño (B). Si, au contraire, les vents de surface est-ouest se renforcent, encore plus d'eaux chaudes se déplacent vers l'ouest et deviennent plus profondes là aussi, ce qui installe un épisode La Niña (C).

Ce qui s'est passé en 2016

El Niño a apporté de l'humidité en Californie du Nord, mais pas comme attendu en Californie du Sud. Divers facteurs, autres qu'El Niño, ont probablement influé sur le climat global. Ils rendent difficiles les prévisions météorologiques.



FACTEUR COMPLIQUANT : Le réchauffement climatique

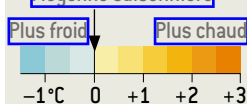
Comme l'atmosphère et les océans se réchauffent globalement, la dynamique d'El Niño et de La Niña pourrait être modifiée, ainsi que l'ampleur avec laquelle ces phénomènes toucheraient le climat local, mais les météorologues ne savent pas encore comment.

FACTEUR COMPLIQUANT : L'oscillation arctique

Ce phénomène atmosphérique du nord de l'Atlantique a changé d'état en début d'année 2016, ce qui a permis à l'air froid de l'Arctique de descendre sur le nord-est des États-Unis, rafraîchissant l'hiver chaud qui avait débuté.

Température de surface de la mer (Décembre – Février)

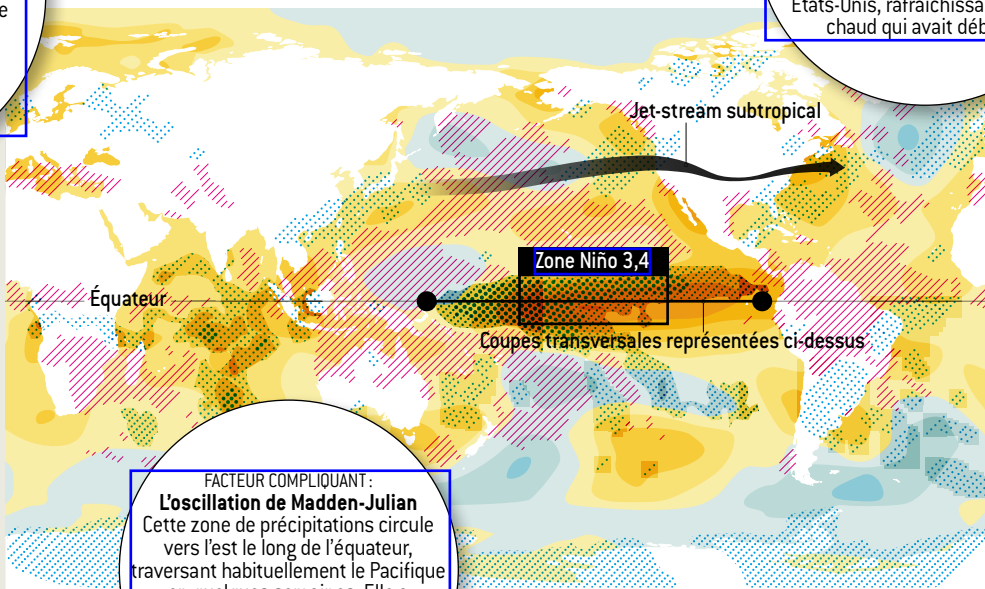
Moyenne saisonnière



Précipitations

(par rapport à la moyenne saisonnière)

Plus sec Plus pluvieux (≥ 4,6 cm)



**FACTEUR COMPLIQUANT :
L'oscillation de Madden-Julian**
Cette zone de précipitations circule vers l'est le long de l'équateur, traversant habituellement le Pacifique en quelques semaines. Elle a temporairement renforcé puis affaibli l'impact d'El Niño pendant l'hiver 2015-2016.



LES EFFETS D'EL NINO ne sont pas toujours ceux que l'on croit. Durant l'hiver 2015-2016, il n'a pas apporté le supplément de pluie espéré en Californie centrale, n'offrant aucun secours face à une sécheresse

régnant depuis plusieurs années (a). En janvier, il a augmenté les risques de chutes de neige dans les États du nord-est et a probablement contribué à la formation du blizzard qui s'est abattu sur Washington (b).

généralement le Pacifique tropical d'est en ouest, l'eau de surface du Pacifique est et central est légèrement plus fraîche que du côté ouest, vers l'Indonésie. Parfois, ces vents faiblissent et des masses d'eau plus chaudes de l'ouest se propagent alors vers l'est le long de l'équateur, vers l'Amérique du Sud, et ce pendant de nombreux mois.

Début 2015, nous avons observé un tel phénomène, avec des températures de l'océan en surface qui étaient plus élevées que la moyenne dans le Pacifique tropical, notamment dans la région notée Niño 3-4 du Pacifique central, qui nous sert d'indicateur principal.

Par ailleurs, El Niño n'est pas un phénomène uniquement océanique : il s'accompagne de changements dans la dynamique atmosphérique. En effet, du fait des gigantesques volumes d'eau mis en jeu, un océan plus chaud de quelques degrés seulement par rapport à la moyenne contient une quantité énorme de chaleur, qui réchauffe l'air au-dessus de l'océan. Durant un épisode El Niño, le réchauffement du Pacifique centre-est modifie la circulation atmosphérique de Walker (voir l'encadré page 47). Avec une importante source d'air humide s'élevant désormais plus loin à l'est, les vents de surface, qui soufflent habituellement d'est en ouest, faiblissent, voire s'inversent. Cette réaction de l'atmosphère contribue au maintien d'El Niño et à son renforcement.

En mars 2015, les effets du Pacifique tropical plus chaud étaient perceptibles : la circulation de Walker s'affaiblissait. Et des rafales de vent d'ouest soufflaient sur le Pacifique tropical, encourageant les eaux chaudes de surface à se déplacer vers l'est. Par ailleurs, dans les couches plus profondes de l'océan, la température était plus élevée que d'habitude, ce qui contribuait à augmenter l'interaction avec l'atmosphère. Tous les éléments étaient en place pour un nouvel épisode El Niño et la NOAA a donc émis un avis d'alerte.

À partir des indicateurs de la température de la surface de l'océan et de la réponse atmosphérique, la NOAA avait déterminé, en mai, qu'il y avait 80 % de chances que le phénomène se poursuive jusqu'à la fin de l'année 2015, sachant que c'est en hiver que les effets d'El Niño sur la température et la pluie sont les plus importants. Pour évaluer la puissance d'El Niño, la NOAA utilise la température moyenne sur trois mois des eaux de surface de la région Niño 3-4 et son écart par rapport à la température moyenne sur le long terme. Et tout indiquait que cet épisode serait semblable à d'autres épisodes puissants dans le passé. D'autres observations confirmaient cette hypothèse : la sécheresse et les vagues de chaleur à l'est de l'Australie s'amplifiaient (là-bas l'automne faisait déjà place à l'hiver) ; la saison des cyclones du Pacifique ouest démarrait en fanfare avec sept tempêtes répertoriées en mai, la moyenne étant de deux !

Alors que le mois de juillet commençait, El Niño était bien établi, et les prévisionnistes étaient convaincus qu'il allait devenir très puissant. On s'attendait à ce que l'indice Niño 3-4 atteigne un pic record, comparable à celui des deux épisodes El Niño précédents les plus forts jamais enregistrés, ceux de 1982-1983 et de 1997-1998.

Durant ces deux précédents épisodes, les conditions hivernales avaient apporté sur le sud de la Californie de fortes tempêtes et des pluies abondantes qui ont rempli les bassins – et provoqué des glissements de terrain le long d'une côte détrempée. Les prévisionnistes estimaient à 60 % les chances pour que, au cours de l'hiver 2015-2016, les régions du sud de la Californie ainsi que les États côtiers du golfe du Mexique voient des quantités de pluie situées dans le tiers supérieur des registres historiques. Cette prévision était réalisée en partie en surveillant attentivement plusieurs indicateurs d'El Niño et d'autres phénomènes, puis en les comparant avec les tendances passées.

Un épisode puissant...

En octobre 2015, si El Niño semblait bien parti pour rejoindre les plus importants épisodes enregistrés, nous avons commencé à observer quelque chose d'inattendu. Les vents de surface le long de l'équateur, dans le Pacifique, n'avaient pas faibli autant qu'au cours des derniers

puissants El Niño. En 1997-1998, les vents avaient tellement faibli qu'ils se sont inversés, soufflant d'ouest en est en octobre et novembre, déplaçant encore plus des eaux chaudes du Pacifique ouest lointain dans le Pacifique central et alimentant l'épisode El Niño.

En décembre 2015, l'indice Niño 3-4 a battu le record pour ce mois avec 2,32 °C au-dessus de la moyenne, contre 2,24 °C en décembre 1997; et sur trois mois, d'octobre à décembre 2015, cette anomalie a été de 2,3 °C, première *ex aequo* avec 1997.

...mais peu humide

Nous pouvions donc espérer avoir les mêmes conditions météorologiques en 2015-2016 que pendant les deux forts épisodes précédents, c'est-à-dire d'abondantes pluies sur la Californie du Sud. Mais nous ne maîtrisons jamais tous les paramètres, surtout en météorologie, où la variabilité est permanente.

Et nos registres de données illustrent parfaitement cette variabilité. Sur la côte de la Californie du Nord, une année d'un fort El Niño comporte en moyenne près de 40 jours de pluie par hiver, contre environ 26 jours pendant un hiver «non-El Niño». Pourtant, l'hiver de l'année 1965, l'un des six plus puissants El Niño recensés, a compté moins de jours de pluie que la moyenne «non-El Niño».

De la même façon, au cours de l'hiver 2015-2016, l'espoir qu'El Niño puisse sauver les agriculteurs californiens de la sécheresse s'est rapidement évanoui. Les pluies de décembre et de début janvier ont été supérieures à la moyenne en Californie du Nord, mais autour de la moyenne dans la moitié méridionale de l'État.

Quelques tempêtes venant du Pacifique sont finalement arrivées dans les trois derniers jours de janvier. Elles ont provoqué des chutes de neige sur la sierra Nevada. Cependant, comme le souligna Tom Di Liberto, un collègue de la NOAA, un mois humide n'allait pas suffire pour effacer la sécheresse de la Californie. Et il précisa : «Alors que certaines parties intérieures de la Californie et la Californie du Nord ont enregistré des précipitations supérieures à la moyenne, les régions du sud, dont le couloir côtier très peuplé s'étendant de Santa

Barbara à San Diego, ont connu des précipitations inférieures à 75 % de la normale. Des pluies torrentielles devront arriver plus souvent pour faire que cette année revienne à la normale.» Sans parler de combler les déficits de réservoirs et d'aquifères qui se sont accumulés depuis 2011.

Ainsi, un puissant épisode El Niño n'est pas une garantie de précipitations abondantes pour la Californie. Il fait juste pencher la balance en faveur d'un hiver plus humide que la moyenne dans cette région.

Ailleurs, les effets d'El Niño se sont pour la plupart produits comme prévu. Il est tombé beaucoup plus de pluie que d'habitude en Afrique de l'Est durant la petite saison des pluies (d'octobre à décembre). L'Afrique australe a continué d'avoir des conditions sèches. L'Uruguay, le sud du Brésil et le

Il est impossible
de désigner une tempête,
un coup de froid ou une vague
de chaleur, et d'affirmer :

“C'est
El Niño”

Paraguay ont aussi connu beaucoup de pluie, et le nord de l'Amérique du Sud a été sec.

En Australie, l'impact classique d'El Niño est une sécheresse sur la plus grande partie du continent de juillet à décembre à peu près. Mais en 2015 il n'y a pas eu de déficit de pluviosité marqué, sauf dans certaines parties orientales du pays. Il est possible qu'un océan Indien exceptionnellement chaud ait eu un contre-effet puissant... : il faut garder à l'esprit que le système climatique a de nombreuses composantes, et les impacts attendus d'un El Niño ne sont donc jamais garantis.

Aux États-Unis, le nord-est a connu des températures très douces, comme prévu. Cependant, El Niño n'a pas été la seule cause de cette météo inhabituelle. Un phénomène atmosphérique nommé l'oscillation arctique – incarnée par le «vortex polaire», constitué par les vents qui circulent autour de l'Arctique – était entré dans un état intense. Contrairement à certains hivers récents, où ce vortex était faible et permettait à de l'air froid de déborder sur les États-Unis, il a été puissant ces derniers mois de décembre 2015 et de janvier 2016, ce qui a bloqué l'air très froid au nord et ainsi permis à de l'air chaud venu du sud des États-Unis de remonter vers le nord.

Plusieurs autres phénomènes océaniques et atmosphériques ne relevant pas d'El Niño ont également pu influencer sur la météo dans l'une ou l'autre partie du globe. L'un d'eux est l'oscillation de Madden-Julian (OMJ), une zone de fortes précipitations au niveau de l'équateur et qui traverse le Pacifique d'ouest en est en quelques semaines. Elle peut accroître temporairement les effets d'El Niño, mais peut tout aussi bien les atténuer. Et la question de savoir comment l'OMJ et El Niño interagissent pour se renforcer ou s'affaiblir est encore débattue par les spécialistes.

Il y a ensuite l'oscillation décennale pacifique, une relation entre les températures de surface du Pacifique nord-est et celles du Pacifique nord-ouest qui prévaut souvent pendant quinze ans ou plus avant de basculer dans un état différent. Tous ces phénomènes influent les uns sur les autres. Et, bien sûr, le réchauffement climatique joue aussi probablement sur chacun de ces phénomènes, mais de façon encore non prévisible.

Les très chauds mois de novembre et décembre 2015 qu'a connus l'est de l'Amérique du Nord semblent dus à une combinaison d'El Niño, de l'air froid refoulé près de l'Arctique et d'une oscillation de Madden-Julian très active, auxquels s'ajoute une importante composante qui ne peut pas être expliquée par ces facteurs. En dépit des titres tape-à-l'œil des journaux et des déclarations péremptoires des prévisionnistes météo à la télévision, tous affirmant qu'El Niño était responsable

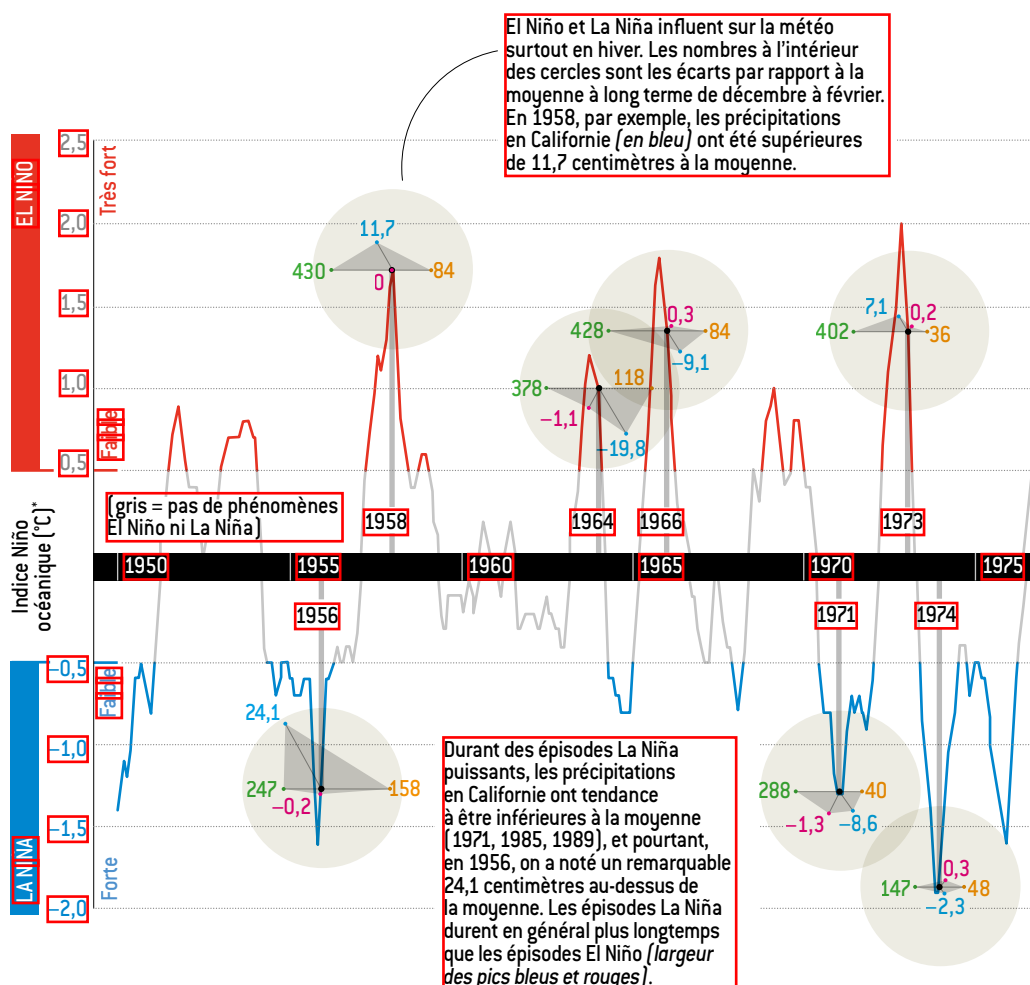
EL NIÑO EST-IL RESPONSABLE DE LA PLUIE ET DU BEAU TEMPS ?

Parfois, les phénomènes El Niño (en rouge) et La Niña (en bleu) n'engendrent pas la météo extrême à laquelle on s'attendait, tels des hivers pluvieux en Californie, même si certains météorologues et médias sont tentés de rendre ces épisodes climatiques responsables de tout.

Précipitations en Californie (en centimètres, par rapport à la moyenne)
 Plus de pluie : 26,2
 Moins de pluie : -19,8
 Moyenne (décembre à février)

Température (en °C) au nord-est des États-Unis
 Plus chaud : 3,6
 Plus frais : -1,6
 Moyenne saisonnière

Energie combinée des ouragans (indice plus élevé = tempêtes plus nombreuses ou plus fortes)
 Pacifique nord-ouest : 568
 Atlantique nord : 177



El Niño et La Niña influent sur la météo surtout en hiver. Les nombres à l'intérieur des cercles sont les écarts par rapport à la moyenne à long terme de décembre à février. En 1958, par exemple, les précipitations en Californie (en bleu) ont été supérieures de 11,7 centimètres à la moyenne.

Durant des épisodes La Niña puissants, les précipitations en Californie ont tendance à être inférieures à la moyenne (1971, 1985, 1989), et pourtant, en 1956, on a noté un remarquable 24,1 centimètres au-dessus de la moyenne. Les épisodes La Niña durent en général plus longtemps que les épisodes El Niño (largeur des pics bleus et rouges).

de ce temps extrême, il est impossible de désigner une tempête, un coup de froid ou une vague de chaleur, et d'affirmer : « c'est El Niño. » El Niño influe sur l'état climatique « de fond », et donc une série d'événements climatiques peut être attribuée partiellement à El Niño, mais pas un incident unique.

Un facteur parmi d'autres

Après le Noël chaud sur la façade atlantique des États-Unis, la neige s'est mise à tomber abondamment sur la région – un temps bizarre, une fois de plus. Le grand public était mûr pour un battage médiatique autour d'El Niño. Mais, à nouveau, attribuer une tempête isolée à une seule influence climatique, en particulier une tempête à la dynamique si complexe, n'a tout

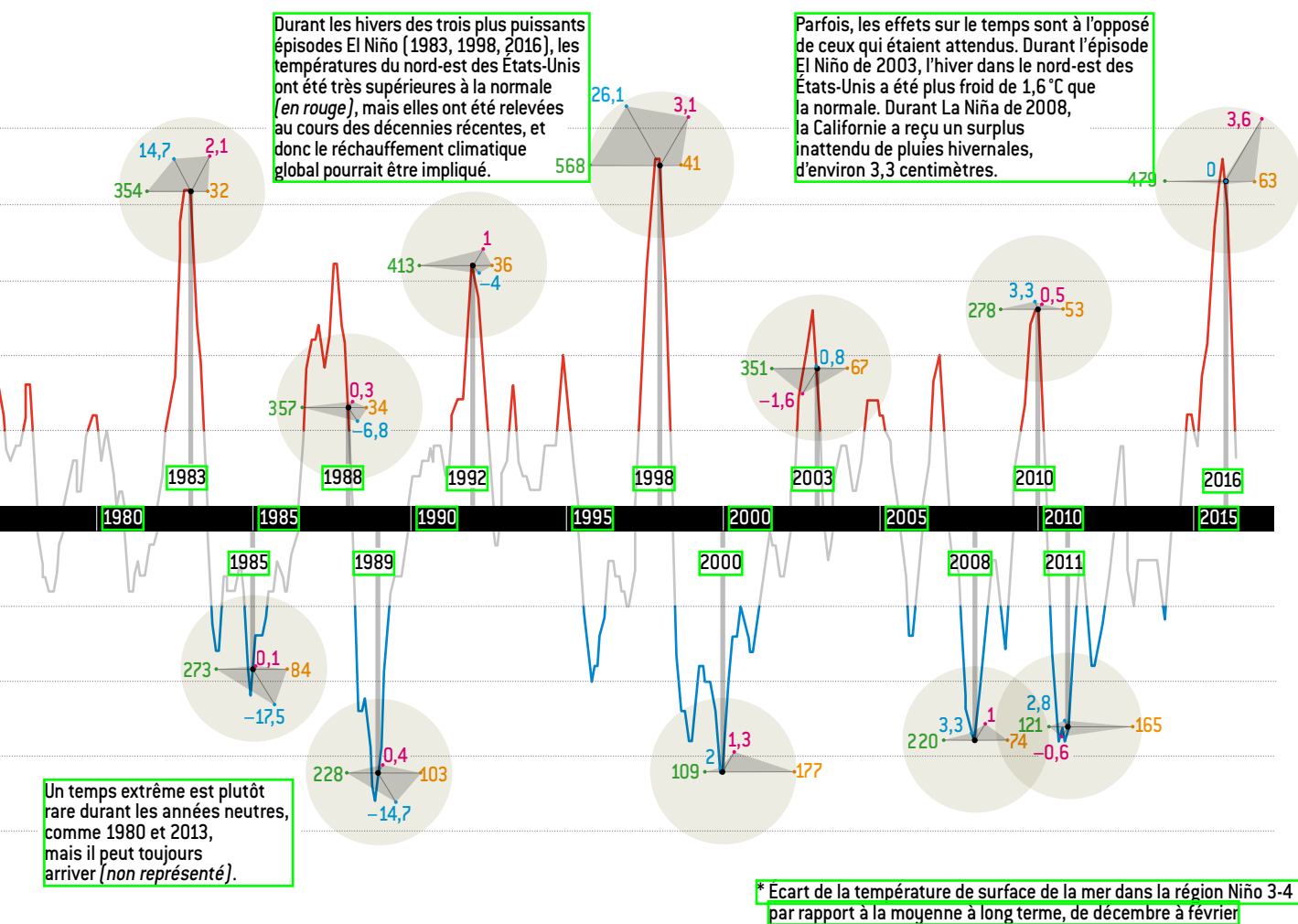
simplement pas de sens. Bien qu'au moins six des dix plus fortes tempêtes de neige se soient produites pendant des épisodes El Niño, le blizzard de 2016 ne s'explique que par l'association de plusieurs facteurs, comprenant une chute rapide des températures, des eaux de l'Atlantique chaudes pour alimenter la tempête en humidité et un front météorologique puissant.

L'empreinte d'El Niño était peut-être présente dans certains de ces facteurs, mais il est très difficile de la distinguer. En particulier, au cours des épisodes El Niño, le jet-stream (un courant atmosphérique de haute altitude) tend à faire remonter vers le nord des orages chargés d'eau du golfe du Mexique. Et dans certains cas, la trajectoire du jet-stream dévie au point de ramener les orages jusqu'à Washington.

En mars 2016, nous pouvions enfin faire le point sur cet épisode El Niño. Quel en a

été le bilan ? Nous disposons d'un ensemble de données complet pour 2015-2016, que nous pouvions comparer avec les données concernant les deux autres puissants épisodes El Niño de 1982-1983 et de 1997-1998. Il était sans aucun doute l'un des trois plus forts depuis 1950, mais il n'est pas évident de les classer plus précisément (même s'il a été annoncé que ce dernier épisode était le plus important de tous) : cela dépend des indicateurs considérés.

L'indice Niño 3-4, l'écart par rapport à la température moyenne sur trois mois dans la région du Pacifique Niño 3-4, était de 2,3 °C pour novembre 2015 à janvier 2016, à égalité avec celui de 1997-1998. Si nous regardons d'autres zones : le Pacifique est a été plus chaud en 1997-1998 et le Pacifique ouest a été plus chaud en 2015-2016. Et la réponse atmosphérique du système Enso a, dans l'ensemble, été plus forte



durant l'épisode 1997-1998 que durant l'épisode 2015-2016.

En termes de puissance, nous avons eu l'un des plus forts épisodes El Niño enregistrés, comparable à au moins deux précédents épisodes. En revanche, les conséquences météorologiques dans les trois cas présentaient certaines différences notables (voir l'encadré ci-dessus). Notamment, en 2015-2016, c'est la Californie du Nord, et non celle du Sud, qui a accaparé la plus grande partie de la pluie de cet État.

Déterminer pourquoi ce schéma a différé de celui des « hivers El Niño » passés est une tâche qui va occuper les climatologues pendant les années à venir. Comme nous l'avons souligné, il existe d'autres phénomènes actifs dans l'océan Indien, dans le Pacifique ou au niveau du cercle arctique, dont les interactions sont complexes. À cela il faut ajouter le fait que les océans du

monde sont aujourd'hui beaucoup plus chauds que durant les deux puissants El Niño précédents. Par ailleurs, des effets chaotiques à court terme sont toujours présents dans les systèmes climatiques, ce qui explique que même si un épisode El Niño semble identique à un autre, ses effets sur la météo ne seront pas exactement les mêmes.

La Niña entre en scène

Une année après que la NOAA a annoncé la formation de l'épisode El Niño 2015-2016, celui-ci s'est terminé. Les anomalies de la température de surface de la mer dans la plus grande partie du Pacifique équatorial ont diminué en 2016, et la grande quantité d'eau sous la surface qui était plus chaude que la moyenne s'est réduite.

En mars 2016, il semblait probable que les conditions deviendraient « neutres » au

début de l'été, et, avec 50 % de chances, que La Niña s'installerait à l'automne. Un épisode La Niña a en effet suivi six des dix El Niño modérés et intenses depuis 1950, mais cette taille d'échantillon est trop petite pour une prévision sûre. Par ailleurs, la météo sur l'Amérique du Nord au cours de cette saison de transition est très variable et complique le travail des prévisionnistes. Néanmoins, la plupart des modèles s'accordaient sur le fait que La Niña allait se développer à l'automne 2016.

Les ordinateurs, traitant à grande vitesse les données les plus récentes, ont estimé que les températures de surface de l'océan continueraient de chuter, franchissant potentiellement le seuil de La Niña (0,5 °C au-dessous de la moyenne). En outre, des eaux plus froides que la moyenne s'accumulaient déjà sous la

L'impact du réchauffement climatique sur El Niño

Le réchauffement de la planète engendre une réorganisation globale des circulations océaniques et atmosphériques. Comment évaluer les conséquences de cette évolution sur les effets d'El Niño et de La Niña ?

Avec le changement climatique, chaque région du globe évolue de façon spécifique. Par exemple, dans l'océan Pacifique, la région où naissent El Niño et La Niña, les modèles climatiques prévoient que les eaux s'échaufferont plus à l'équateur qu'aux tropiques.

Le changement climatique agit comme un nouvel élément perturbateur du climat local, qui va éventuellement contribuer à déplacer ou moduler les effets typiques d'El Niño. Par conséquent, même s'il était possible d'affirmer avec certitude que les épisodes El Niño seront plus fréquents à l'avenir, cela ne serait pas suffisant pour en dire

de même des épisodes pluvieux en Californie, des hivers chauds à Washington ou des sécheresses en Afrique du Sud.

À l'heure actuelle, nous ne disposons pas du recul nécessaire pour déceler les effets possibles du changement climatique sur El Niño.

Explorer le passé peut alors nous aider à comprendre comment un changement global de climat affecte El Niño et La Niña. Le programme de recherche *El Paso*, qui regroupait de nombreux laboratoires français entre 2011 et 2015, a rassemblé et synthétisé le maximum de données possible sur des époques où le climat était

différent de celui que nous connaissons aujourd'hui. Le passé d'El Niño se lit dans des squelettes de coraux fossiles, dans des sédiments ou encore dans des simulations numériques destinées à reproduire les conditions passées. L'analyse de ces données suggère que les effets caractéristiques d'El Niño, en une région donnée, peuvent varier selon les époques.

Ainsi, dans les îles du Pacifique ouest, au Vanuatu ou en Nouvelle-Calédonie, El Niño se manifeste aujourd'hui typiquement par une diminution des pluies et par leur déplacement vers le nord. Or il y a 21 000 ans, par exemple, au dernier maximum glaciaire, les océans étaient plus froids, le niveau de la mer plus bas et les pluies tropicales moins intenses en moyenne. Il est possible que la zone de pluies du Pacifique

ouest ait été plus au nord qu'aujourd'hui. Il est alors peu probable qu'avec des conditions si différentes, l'impact d'El Niño au Vanuatu ait pu rester identique. L'analyse d'un corail fossile de cette époque semble même indiquer que l'impact était inversé par rapport à aujourd'hui, même si rien n'est sûr.

Ces subtilités dans les variations des impacts locaux d'El Niño sont cruciales pour les nombreuses populations locales. Bien qu'El Niño soit attendu avec espoir en Californie, il est très redouté dans d'autres régions plus vulnérables, où il apporte inondations et maladies, ou sécheresses et disette. C'est pourquoi il s'agit d'un axe de recherche prioritaire à l'heure actuelle.

- Marion Saint-Lu
Université d'Exeter, Royaume-Uni

SUR LE WEB

Site d'information de la NOAA sur l'ENSO : www.climate.gov/enso

Blog de la NOAA sur l'ENSO : www.climate.gov/news-features/departement/enso-blog

BIBLIOGRAPHIE

M. Saint-Lu et J. Leloup, Petit précis de théorie pour comprendre El Niño, *La Météorologie*, n° 95, pp. 30-38, novembre 2016.

J. Masters, Le jet-stream polaire se dérègle-t-il ?, *Pour la Science*, n° 449, mars 2015.

M. Dettinger et L. Ingram, Les rivières atmosphériques, *Pour la Science*, n° 431, septembre 2013.

surface à travers tout le Pacifique, le long de l'équateur. Il est intéressant de noter que l'eau sous la surface dans la région Niño 3-4 a atteint des températures froides records en 1998 – immédiatement après le puissant El Niño de 1997-1998. Et effectivement, à partir de novembre 2016, un épisode La Niña a formellement été annoncé par la NOAA, mais son intensité était relativement faible.

Aux États-Unis, les effets de La Niña sont à peu près l'inverse de ceux d'El Niño. La Niña modifie différemment les vents d'ouest et le jet-stream. Notamment, elle a tendance à créer un environnement propice au développement d'ouragans dans l'Atlantique, et les hivers La Niña en Californie sont souvent secs.

Le réchauffement brouille les pistes

Les chercheurs ne savent pas encore clairement comment le réchauffement climatique global va interagir avec le cycle El Niño-La Niña. Certains travaux suggèrent que des océans plus chauds entraîneront des épisodes El Niño plus

puissants, mais, selon d'autres études, le réchauffement climatique global pourrait au contraire les atténuer. Dans un système global aussi complexe où interviennent de vastes phénomènes atmosphériques et océaniques qui passent naturellement d'un état à un autre, telle l'oscillation décennale pacifique, comprendre comment El Niño sera affecté par le réchauffement global est un défi.

Ce que nous pouvons tenir pour quasi sûr, c'est que des épisodes El Niño et La Niña continueront à apparaître, certains plus importants que les autres. Les études de coraux fossilisés ont montré que ce cycle climatique existe depuis des milliers d'années.

En dépit de sa mauvaise réputation, El Niño ne provoque habituellement pas plus de désastres climatiques dans le monde que les autres années, mais ces désastres sont plus prévisibles. Si nous comprenons mieux la dynamique du système climatique et si les autorités tiennent compte des prévisions saisonnières liées à El Niño, nous pourrions mieux anticiper les effets du phénomène sur le climat global ainsi que ses impacts sur les populations humaines. ■

EXPOSITION

6.12.16 > 27.08.17

PALAIS-DECOUVERTE.FR



80 ans
Palais



M Champs-Élysées Clemenceau M Franklin Roosevelt

#FaitesVosJeux

Exposition conçue avec le concours du

mathematikum
Mathematik zum Anfassen.

En partenariat avec

SCIENCE

JUNIOR

SCIENCE&VIE

Syfy

FUTURA

OUI FM

l'éléphant

Les bienfaits des toxines végétales sur le cerveau

Mark Mattson

En provoquant un stress au sein de nos neurones, les toxines issues des plantes que nous consommons préparent notre cerveau à se défendre contre des agressions plus importantes.

Pourquoi consommer des fruits et légumes est-il bon pour la santé ? À cette question, la réponse de nombre de personnes tient en un mot : antioxydants. Et elle paraît plutôt logique, quand on sait que beaucoup de maladies telles que le cancer, le diabète et les maladies cardiovasculaires sont liées à des dégâts causés aux cellules par les radicaux libres, que les antioxydants neutralisent.

Ces radicaux libres, des atomes ou des molécules instables à cause de leur nombre impair d'électrons, tentent continuellement de céder ou de capter un électron aux molécules qui les entourent. Ils propagent ainsi un phénomène dit de stress oxydatif dans l'organisme, que les antioxydants combattent. On sait aussi que les personnes qui consomment régulièrement des fruits, légumes et autres produits issus de plantes réputés pour être à haute teneur en antioxydants ont tendance à avoir un cerveau en meilleure forme et sont moins prédisposées à souffrir de maladies neurodégénératives. Mais les choses ne sont pas aussi simples.

Lorsque l'on isole des antioxydants, tels que les vitamines C, E et A, et que

L'ESSENTIEL

■ Pour survivre, les plantes ont développé au cours de l'évolution la production de toxines, qui éloignent les insectes et les animaux.

■ En mangeant, nous consommons ces toxines en petites quantités. L'exposition à ces substances provoque un léger stress dans les cellules.

■ La réponse de l'organisme à ces stress a certains bénéfices sur la santé, dont la protection contre la dégénérescence des neurones, qui advient dans les maladies d'Alzheimer et de Parkinson.

L'on évalue leur effet chez l'animal et chez l'homme, on n'observe aucun bénéfice sur la prévention de maladies ou leur atténuation. Quelle est alors la recette des fruits et légumes pour nous maintenir en bonne santé ?

Ce qui ne nous tue pas nous rend plus fort

La réponse qui émerge peu à peu est liée aux stratégies de défense que les plantes ont développées au cours de l'évolution. Les végétaux produisent des molécules au goût amer qui agissent comme répulsif naturel et les protègent ainsi des insectes et autres animaux qui tentent de les manger. Lorsque nous consommons des aliments issus des plantes, nous ingérons ces molécules en petites quantités. Elles provoquent un léger stress au sein des cellules de l'organisme – le même qui se produit lorsque nous jeûnons ou pratiquons une activité physique. Ce stress modéré ne tue pas les cellules, bien au contraire : il les rend plus fortes ! La capacité des cellules à s'adapter à un stress plus important, tel qu'un stress



PHOTO: GETTY IMAGES

oxydatif dû aux radicaux libres, est ainsi renforcée. Un nombre croissant de chercheurs considère que ce processus serait à l'origine des bienfaits de la consommation de fruits et légumes sur la santé. Comprendre ce phénomène serait même utile dans la lutte contre certaines maladies liées à la dégénérescence des neurones, telles que les maladies d'Alzheimer et de Parkinson, ou les accidents vasculaires cérébraux (AVC).

C'est un chemin détourné qui nous a conduits, mes collègues et moi, à nous pencher sur ces processus. Au début des années 1990, avec mon équipe du centre Sanders-Brown sur le vieillissement à l'université du Kentucky, nous étudions la possibilité de produire un traitement contre la maladie d'Alzheimer à partir d'antioxydants. Nous pensions qu'ils pouvaient être utiles, car nous avions observé que la protéine bêta-amyloïde, qui s'accumule en excès dans le cerveau de patients atteints de cette maladie, endommage les neurones cultivés *in vitro*, et nous savions que des radicaux libres sont impliqués dans ces dégâts. Toutefois, lors d'un essai clinique mené par Douglas Galasko et Paul Aisen, de l'université de San Diego en Californie, l'administration d'antioxydants à des patients atteints de la maladie d'Alzheimer n'a conduit à aucune amélioration.

Nous nous sommes alors intéressés à un autre phénomène *a priori* sans rapport avec les végétaux, mais qui nous a conduits à eux. Plusieurs équipes, dont la nôtre, ont montré que les individus qui pratiquent régulièrement une activité physique, ont un régime faible en calories et réalisent quotidiennement des tâches cognitives tendent à maintenir un cerveau en meilleure forme que ceux ayant un mode de vie opposé. En outre, ils ont moins de risques de souffrir de la maladie d'Alzheimer, de Parkinson ou d'un AVC. Nous nous sommes demandé si le régime, l'exercice physique et l'activité intellectuelle influaient sur les fonctions cérébrales et la prédisposition à certaines maladies en agissant tous trois sur les cellules du cerveau *via* les mêmes processus moléculaires.

À partir de travaux réalisés en 1999 par Annadora Bruce-Keller, alors postdoctorante

L'AUTEUR



Mark MATTSON dirige le laboratoire de neurosciences de l'Institut américain sur

le vieillissement, à l'université Johns Hopkins.

dans mon laboratoire, nous nous sommes penchés sur les effets du jeûne. Nous avons découvert que les neurones de rats soumis à un jeûne un jour sur deux résistaient aux neurotoxines connues pour causer des symptômes qui ressemblent à ceux de l'épilepsie ou de la maladie de Huntington. À l'inverse, les animaux nourris normalement succombaient à ces neurotoxines. Peu après, j'ai été recruté à la tête du laboratoire de neurosciences à l'Institut américain du vieillissement, où nos recherches ont montré que la privation de nourriture un jour sur deux protégeait aussi le cerveau d'animaux modèles présentant des symptômes des maladies d'Alzheimer, de Parkinson ou d'un AVC.

Quel processus le jeûne déclençait-il ? Nos expériences mirent en évidence que les neurones répondaient au stress induit par la privation de nourriture en mobilisant des défenses moléculaires contre les radicaux libres et l'accumulation de la protéine bêta-amyloïde. Ce système de défense se caractérisait par une production de protéines, nommées facteurs neurotrophes, responsables de la croissance et de la survie des neurones, mais aussi d'autres molécules qui optimisent l'utilisation de l'énergie et préviennent l'accumulation de molécules lésées.

D'un point de vue évolutif, le fait qu'une privation temporaire de nourriture puisse être bénéfique n'est pas si surprenant. Le léger stress qui en résulte incite le cerveau à privilégier la protection des neurones, permettant à l'animal de préserver ses capacités cérébrales, nécessaires pour trouver de la nourriture.

Ces effets positifs du stress nous ont alors conduits à considérer des études menées dans les années 1970. Elles faisaient état d'une neurotoxine, l'acide kaïnique, présente dans une algue et capable d'augmenter l'activité des récepteurs du glutamate, la principale molécule impliquée dans l'activation des neurones. Or diverses équipes, dont la nôtre, avaient mis en évidence des effets paradoxaux du jeûne et de l'activité physique sur le glutamate : une stimulation excessive des récepteurs endommageait ou détruisait les neurones tandis qu'une stimulation modérée activait une voie chimique qui

Le stress lié à un jeûne temporaire

incite le cerveau à privilégier la protection des neurones, ce qui préserve les capacités cérébrales nécessaires pour trouver de la nourriture

joue un rôle fondamental dans l'apprentissage, la mémorisation et la protection des neurones. Nous nous sommes donc demandé si de petites quantités de neurotoxines issues des plantes pouvaient provoquer des effets bénéfiques sur la santé en induisant de légers stress dans les neurones.

Les bienfaits des fruits et légumes sur la santé sont le résultat d'une guerre de longue haleine menée par les végétaux contre les animaux qui tentent de les manger. Au cours de centaines de millions d'années d'histoire évolutive, ces plantes en sont venues à produire des pesticides naturels qui leur ont permis de survivre en tant qu'individus et en tant qu'espèces.

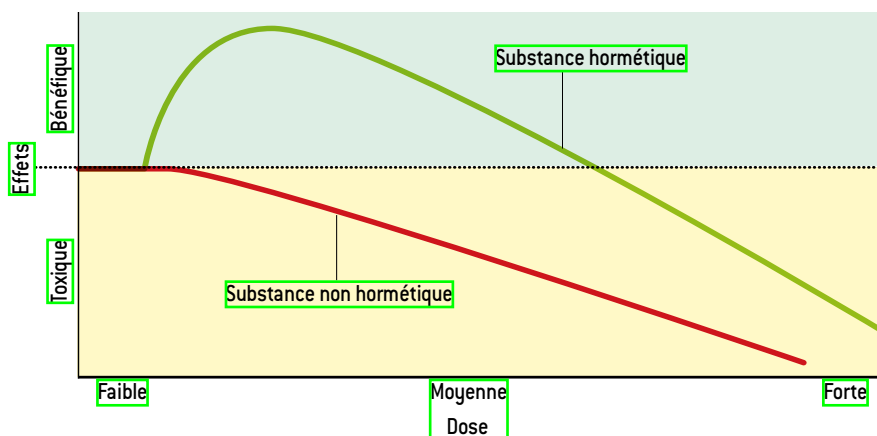
En général, ces molécules ne tuent pas les insectes, mais agissent sur leur système nerveux. Et plus particulièrement sur des neurones spécifiques, les neurones sensoriels de la partie buccale des insectes, rassemblés en de petites structures nommées sensilles, similaires aux papilles gustatives de notre langue. Ces neurones font parvenir un message au cerveau, qui décide ensuite si la plante est comestible ou non.

Nos ancêtres primates ont aussi cherché à utiliser les racines, feuilles et fruits qu'ils trouvaient dans les forêts tropicales où ils vivaient. Les plantes constituaient une source précieuse de nourriture ou de médicaments, mais pouvaient aussi causer des nausées, des vomissements et même la mort.

C'est ainsi que, au fil de l'évolution, l'homme a développé un système d'avertissement élaboré, qui signale au cerveau la présence de substances toxiques. Le goût amer de certaines plantes est une mise en garde contre la consommation excessive de feuilles, de racines ou de fruits ; ou même contre leur consommation tout court, afin de ne pas mettre notre santé en péril.

Les herboristes traditionnels ont appris empiriquement (à force d'expérimentation et parfois d'erreurs fatales) à reconnaître les plantes présentant des vertus médicinales. Aujourd'hui, les pharmacologues, toxicologues et biochimistes confirment que certaines molécules issues de végétaux, toxiques à haute dose, peuvent être bénéfiques à faible dose. Ce phénomène se nomme l'hormèse.

Lorsque l'on mesure les effets hormétiques induits par ces substances, on observe ce que les scientifiques appellent une réponse biphasique. Sur un graphique



UNE QUESTION D'ÉQUILIBRE. Les fruits et légumes contiennent souvent des toxines qui ont des effets bénéfiques sur notre santé lorsque nous en consommons de petites quantités. Mais, à haute dose, ces substances deviennent nocives. Cette dualité est nommée l'hormèse. Les substances non hormétiques tel le mercure sont dangereuses même à faible dose.

(voir la figure ci-dessus) qui représente la nature des effets en fonction de la dose, ce phénomène s'illustre par une courbe en cloche. La courbe commence par croître, indiquant que la consommation d'une petite quantité de la substance a des effets bénéfiques sur la santé. Puis elle chute, illustrant le fait que des quantités plus importantes sont toxiques. Ainsi, consommer trop de noix du Brésil risque d'empoisonner le foie et les poumons, à cause de la présence de traces de sélénium. Pourtant, en manger en petite quantité fournit un nutriment essentiel, qui aide notre organisme à s'armer contre les maladies du cœur et le cancer.

Un stress bénéfique... à petite dose

Les molécules qui induisent l'hormèse semblent omniprésentes dans le monde végétal. Edward Calabrese, professeur de toxicologie à l'université du Massachusetts Amherst, a dédié la majeure partie de sa carrière à répertorier ces molécules. Sur sa liste figurent la caféine, les opiacés et d'autres composés ayant des effets sur le cerveau.

À présent, des chercheurs réévaluent les expériences antérieures qui mettaient en évidence le rôle bénéfique des antioxydants des fruits et légumes sur la santé. Ils examinent si l'hormèse ne serait pas la cause des résultats observés à l'époque. Leurs conclusions suggèrent que le stress que les toxines des plantes produisent sur les cellules complèterait, voire, dans certains cas, éclipserait la contribution des antioxydants. Mais les antioxydants

ne disparaissent pas complètement du scénario, car les processus biochimiques déclenchés par le stress hormétique semblent contrôler à quel moment les antioxydants interviennent.

Prenons l'exemple du curcuma, cette épice extraite des rhizomes des plantes du même nom et qui entre dans la composition du curry. Il y a plus d'une décennie, Gregory Cole, de l'université de Los Angeles en Californie, menait des expériences sur cet ingrédient, espérant aboutir à un traitement contre la maladie d'Alzheimer. En effet, quand elles consommaient du curcuma, des souris modèles génétiquement modifiées pour développer des symptômes de la maladie présentaient moins de lésions neuronales dues aux radicaux libres et accumulaient moins de protéine bêta-amyloïde que celles qui n'en ingéraient pas. Gregory Cole pensait à l'époque que le curcuma agissait en éliminant les radicaux libres. Mais des expériences plus récentes, menées par d'autres équipes ainsi que dans mon laboratoire, ont montré que le curcuma provoque en réalité un léger stress dans les cellules du cerveau. Ce stress déclenche la production d'enzymes antioxydantes qui atténuent à la fois l'effet des radicaux libres et l'accumulation de protéines toxiques. Des études sur le curcuma, menées sur d'autres animaux, montrent qu'il atténuerait aussi les lésions provoquées par un AVC et aiderait à lutter contre la dépression et l'anxiété.

D'autres épices seraient aussi bénéfiques pour notre cerveau. L'ail et les piments contiennent des composés qui induisent l'ouverture des canaux dans la membrane

externe des neurones. Des ions calcium pénètrent dans les cellules et l'activité électrique des neurones augmente. Chez des animaux modèles, ce stress semble protéger les cellules de l'hyperactivité qui survient lors d'un AVC.

Dans toutes ces études, les substances végétales hormétiques semblent ainsi jouer un rôle dans les interactions des radicaux libres et des antioxydants. Le curcuma n'agit pas directement en neutralisant les radicaux libres. Il recrute des enzymes pour aider les cellules à s'en protéger. Ce

procédé soigneusement synchronisé expliquerait pourquoi les traitements à base d'antioxydants sous forme de suppléments sont inefficaces, voire contreproductifs.

En effet, nourrir l'organisme avec des suppléments pourrait inhiber la réponse naturelle au stress dans le corps. Dans une étude publiée en 2009, une équipe de l'université Friedrich Schiller, à Jena, en Allemagne, a comparé la santé de deux groupes d'hommes. Tous étaient soumis à une activité physique régulière et, dans l'un des deux groupes, les personnes prenaient

des compléments d'antioxydants. Chez ces individus, les chercheurs n'ont constaté aucune amélioration de la régulation du taux de glucose dans le sang et d'autres indicateurs de la santé, contrairement aux résultats de l'autre groupe. Cette étude suggère que les compléments d'antioxydants annihilent les effets de l'exercice physique sur la santé en empêchant l'hormèse.

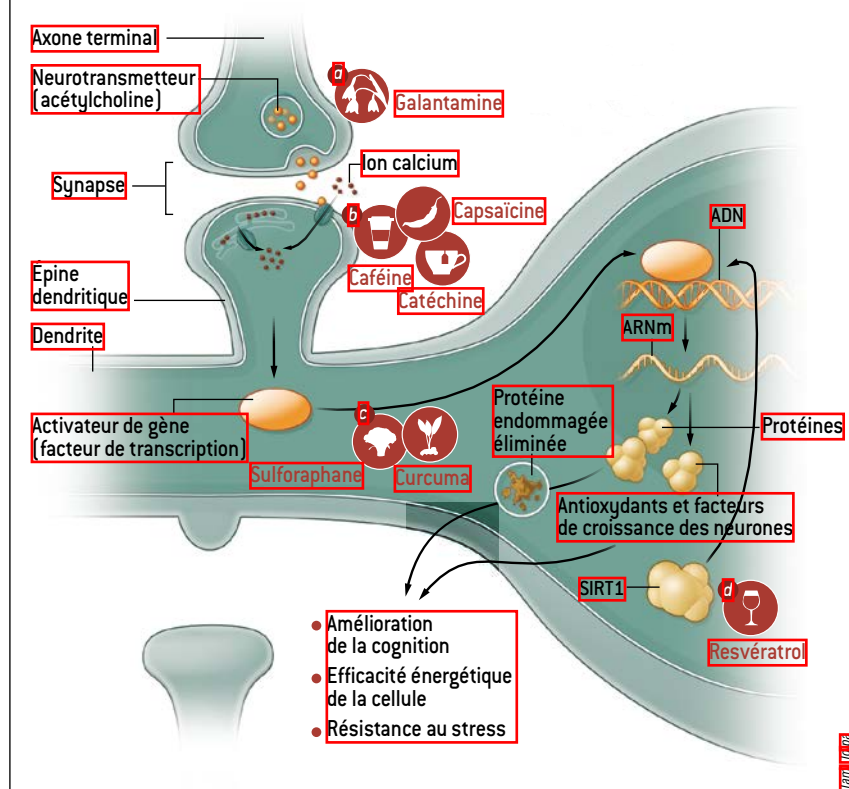
Peu à peu, les voies biochimiques impliquées dans les réactions aux toxines des plantes se précisent. L'une d'elles implique deux protéines, Nrf2 et Keap1, normalement liées l'une à l'autre dans le cytoplasme (l'espace de la cellule situé hors du noyau). Quand ces protéines sont exposées à des substances telles que le curcuma ou le sulforaphane du brocoli, Keap1 libère Nrf2, qui entre dans le noyau de la cellule. La protéine y active alors des gènes codant des enzymes antioxydantes qui éliminent les radicaux libres.

Dans le prolongement de ces travaux sur la protéine Nrf2, je me suis intéressé à des pesticides naturels produits par des plantes. Mon équipe a testé leur capacité à activer une ou plusieurs voies de signalisation de l'adaptation au stress sur des neurones en culture. Plusieurs de ces composés ont activé la voie de la protéine Nrf2 et produit une réponse en courbe biphasique caractéristique de l'hormèse. L'un des composés était particulièrement efficace : la plumbagin, que l'on trouve dans un type de plante tropicale à fleurs et dans les noyers noirs. Nos travaux suggèrent que la plumbagin réduit les lésions cérébrales de souris génétiquement modifiées pour présenter les symptômes d'un AVC et améliore leur état de santé. La prochaine étape sera de tester les composés identifiés comme neuroprotecteurs, tels que le sulforaphane ou la plumbagin, chez des patients humains.

Une autre voie clé de la défense cellulaire implique une famille de protéines : les sirtuines. Leonard Guarente, du MIT (l'institut de technologie du Massachusetts), a découvert que l'une des sirtuines, SIRT1, augmente la durée de vie chez la levure. Or le resvératrol, que l'on trouve dans le raisin noir et le vin, semble activer SIRT1, qui déclenche de multiples voies chimiques responsables d'effets hormétiques. Des études menées chez l'animal ont aussi montré que le resvératrol protégerait le cerveau et la moelle épinière contre les dégâts liés à l'interruption du flux sanguin qui survient dans certains types d'AVC.

RENFORCER LES CAPACITÉS DE RÉSILIENCE DU CERVEAU

Les plantes produisent des substances hormétiques qui renforcent le fonctionnement des neurones en agissant sur les voies de signalisation. La galantamine, une toxine extraite des perce-neige, augmente la concentration d'acétylcholine (a), une molécule impliquée dans la communication entre les neurones et déficiente chez les patients atteints de la maladie d'Alzheimer. Une fois libérée à l'extrémité d'un neurone, l'acétylcholine stimule un autre neurone en se liant à un site récepteur, l'épine dendritique. La caféine, la capsaïcine du piment et la catéchine du thé (b) favorisent l'entrée d'ions calcium dans les neurones en agissant sur les canaux qui traversent leur membrane. L'entrée de ces ions déclenche la machinerie de fabrication des protéines. À l'intérieur de la cellule, le sulforaphane du brocoli, le curcuma (c) et le resvératrol du raisin (d) déclenchent aussi l'activité de gènes ou d'une protéine régulatrice de gènes (SIRT1). Ces chaînes d'événements biochimiques produisent des antioxydants ou des facteurs de croissance des neurones et éliminent les protéines endommagées. Tout ceci renforce la résistance au stress, régule l'efficacité énergétique des cellules et améliore les fonctions cognitives.



Mais tous les effets de cette molécule ne seraient pas bénéfiques. Les chercheurs doivent encore vérifier si l'une des voies activées par le resvératrol n'accélérerait pas la mort de certains neurones.

Depuis, d'autres recherches ont complété ces études. Elles indiquent que la durée de stress dans une cellule est déterminante pour qu'une cellule en tire profit ou non. Des exercices physiques intenses doivent être ponctués d'un temps de repos nécessaire à la croissance et à la réparation cellulaire; c'est la même chose en ce qui concerne la consommation des toxines végétales. Lorsqu'on consomme des fruits et légumes, l'organisme entre dans un mode de résistance au stress, caractérisé par une réduction générale de la fabrication de nouvelles protéines, une élimination accrue des molécules endommagées et la production de protéines spécifiquement nécessaires à la survie de la cellule.

Les périodes de repos sont importantes

Les cellules peuvent endurer cet état un certain temps avant d'avoir besoin de fabriquer des protéines ayant d'autres fonctions que la résistance au stress et d'être altérées par ce surplus de stress. Lorsque celui-ci disparaît, la synthèse de protéines reprend, les cellules entrent en croissance et réparent les dommages moléculaires qui sont apparus. Dans le cas des neurones, de nouvelles connections se forment entre les cellules pendant la période de récupération. Des études suggèrent que la consommation de fruits et légumes ou la pratique d'exercices physiques suivis d'une période de repos stimulent la synthèse de nouveaux neurones à partir des cellules souches. Les nouveaux neurones forment des connexions avec les neurones existants, stimulant efficacement l'apprentissage et la mémorisation. En pratique, un temps de sommeil normal la nuit suffit pour que les cellules récupèrent après un effort physique ou une consommation de toxines végétales.

Des chercheurs voient dans l'hormèse une piste de nouveaux médicaments, voire d'explication du mécanisme de certains médicaments déjà sur le marché. C'est le cas de la galantamine, la molécule extraite des fleurs blanches du genre *Galanthus* telles que les perce-neige, prescrite aux patients atteints de la maladie d'Alzheimer. Cette molécule est censée améliorer, certes



LE BROCOLI ET LE RAISIN contiennent des toxines, respectivement le sulforaphane et le resvératrol, qui stressent les cellules de l'organisme et lui permettent de lutter contre certaines maladies. De tels composés sont omniprésents dans les fruits et les légumes.

BIBLIOGRAPHIE

J. Yun et T. Finkel, *Mitohormesis*, *Cell Metabolism*, vol. 19, n° 5, pp. 757-766, 2014.

J. Xu et al., *Neurotrophic natural products: chemistry and biology*, *Angewandte Chemie Int. Ed.*, vol. 53, n° 4, pp. 956-987, 2014.

A. M. Stranahan et M. P. Mattson, *Recruiting adaptive cellular stress responses for successful brain ageing*, *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 13, pp. 209-216, 2012.

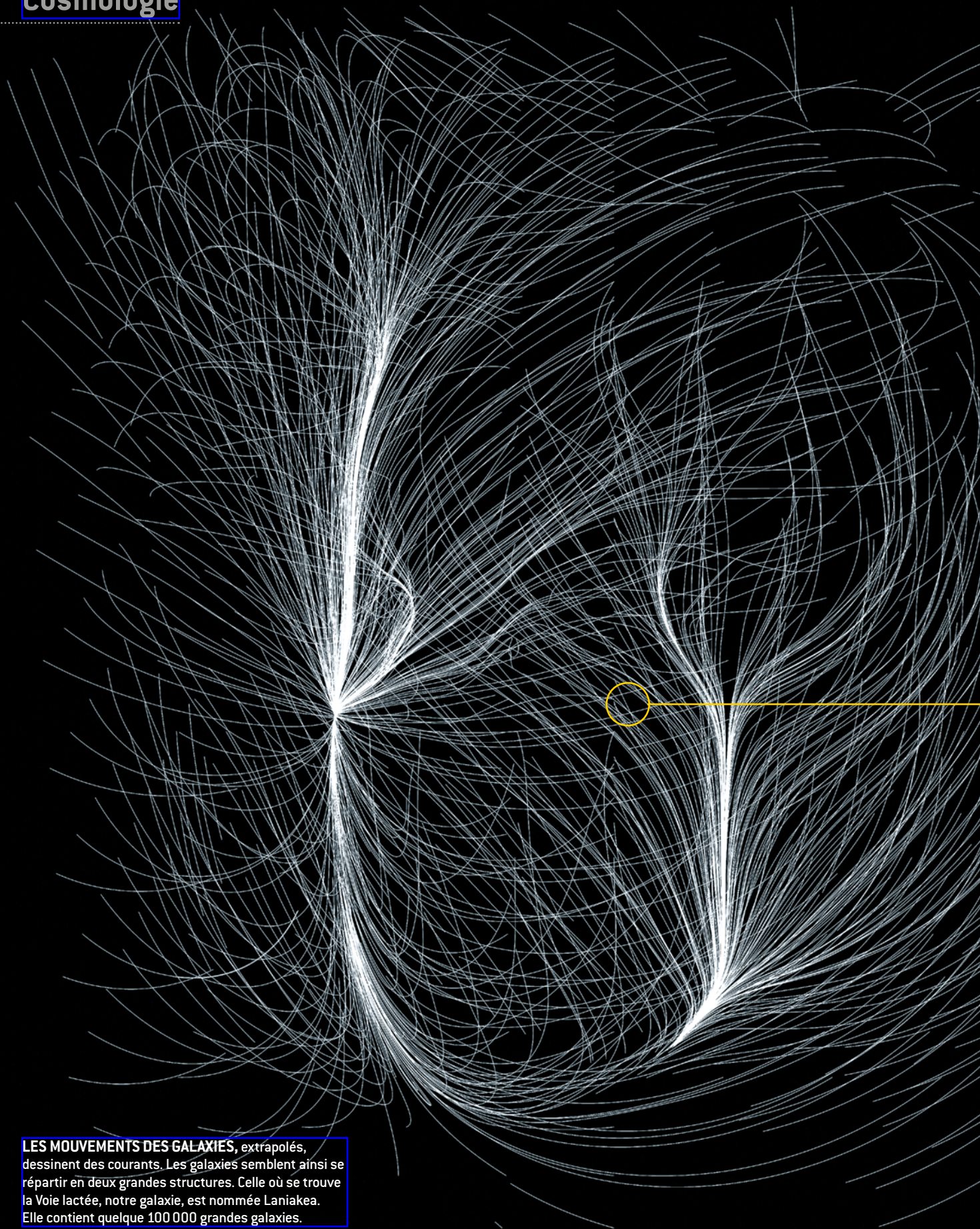
modestement, la mémoire des patients en augmentant la concentration d'acétylcholine (une molécule qui joue un rôle dans la communication entre les neurones) dans les cellules. Elle produit un certain stress dans les neurones qui semble les protéger de la neurodégénérescence tout en améliorant leur capacité à user de molécules et de signaux électriques pour communiquer.

D'autres pistes viendront peut-être de la médecine traditionnelle à base de plantes. Une substance connue sous le nom d'uwhangchungsimwon est utilisée dans la pharmacopée coréenne pour prévenir l'AVC. Elle protégerait les neurones en induisant une réponse au stress favorisant la fabrication de protéines, telle Bcl-xL, qui empêchent les cellules de mourir.

Le concept d'hormèse n'échappe pas à son lot de controverses. Certains chercheurs se demandent si les méthodes employées pour déterminer la dose à laquelle les effets bénéfiques disparaissent sont réellement adéquates. Le seuil exact à partir duquel une réaction toxique commence peut varier entre les individus. Évaluer les effets bénéfiques potentiels de l'hormèse requiert des essais cliniques contrôlés. Actuellement, de nombreuses plantes sont commercialisées en tant que médicaments accompagnés de revendications infondées sur leurs bienfaits. Le Centre américain pour la santé complémentaire et intégrative a été établi en 1998 en partie pour aider à financer des études sur de tels composés.

Ces défis ne devraient pas décourager les scientifiques de poursuivre leurs recherches sur l'hormèse. Car les toxines qui induisent un stress cellulaire pourraient avoir des avantages par rapport aux médicaments classiques, qui présentent parfois des effets secondaires dérégulant le fonctionnement normal des neurones.

Certains laboratoires, dont le mien, poursuivent leurs recherches sur les médicaments hormétiques et ont obtenu des résultats encourageants sur des modèles animaux de plusieurs maladies neurodégénératives humaines. De précédentes recherches indiquent que ces médicaments protègent les neurones de la mort en les rendant plus résistants à une attaque de radicaux libres et à d'autres lésions moléculaires. Dans un futur proche, une peau de pomme, des noix ou de la poudre de curcuma deviendront peut-être la base d'une génération radicalement nouvelle de traitements contre les maladies du cerveau. ■



LES MOUVEMENTS DES GALAXIES, extrapolés, dessinent des courants. Les galaxies semblent ainsi se répartir en deux grandes structures. Celle où se trouve la Voie lactée, notre galaxie, est nommée Laniakea. Elle contient quelque 100 000 grandes galaxies.

Où sommes-nous dans l'Univers ?

Noam Libeskind et Brent Tully

La Voie lactée fait partie d'un énorme superamas de galaxies qui constitue l'une des plus grandes structures connues de l'Univers. Cette découverte découle d'un effort de cartographie cosmique qui ne fait que commencer.

NOUS
SOMMES
ICI

L'ESSENTIEL

■ Les étoiles se regroupent en galaxies, les galaxies en amas, et les amas en superamas. Ces derniers constituent les plus grandes structures connues de l'Univers.

■ Les mouvements de milliers de galaxies proches ont révélé que le superamas où réside la Voie lactée est plus étendu qu'on ne le pensait. Ce superamas a été nommé Laniakea.

■ Une cartographie plus détaillée de Laniakea et des superamas voisins aidera à mieux comprendre la formation des galaxies et à éclaircir les mystères de la matière noire et de l'énergie sombre.

Danielle Pomarède / CEA/STIRADY/IRFU

■ imaginez que, en visite dans une galaxie lointaine, vous vouliez écrire à vos amis restés sur Terre. L'adresse commence par le numéro de la maison, le nom de la rue et de la ville, quelque part sur notre monde, la troisième planète en partant du Soleil. Il vous faut ensuite indiquer l'emplacement du Soleil dans le bras d'Orion, un bras spiral des faubourgs de la Voie lactée, puis la localisation de la Voie lactée dans le Groupe local qui contient plus d'une cinquantaine de galaxies et s'étend sur quelque sept millions d'années-lumière. Le Groupe local lui-même se trouve à la périphérie de l'amas de la Vierge, un amas de plus d'un millier de galaxies situé à 50 millions d'années-lumière et qui représente une petite partie de ce que l'on nommait jusqu'ici le « Superamas local » : une région d'environ 100 millions d'années-lumière de diamètre contenant plusieurs centaines d'amas de galaxies. On pense que les superamas de ce type sont les plus vastes structures de l'Univers. Dans ces superamas, les galaxies dessinent des filaments, voire des nappes à deux dimensions. Et les superamas contiennent aussi d'immenses espaces presque entièrement vides de galaxies.

Jusqu'à récemment, le Superamas local était considéré comme la dernière ligne de notre adresse cosmique. Toute indication supplémentaire aurait été vaine, pensait-on, car à une échelle plus vaste, le tissu des superamas se fond en un contenu homogène dépourvu de structures discernables : les galaxies y semblent distribuées de façon régulière. Toutefois, en 2014, l'un de nous (Brent Tully) et trois chercheurs, dont Hélène Courtois, de l'université de Lyon, et Daniel Pomarède, du CEA, avons découvert que nous faisons partie d'une structure si immense que nos représentations en ont été bouleversées. Il s'avère en effet que ce que l'on avait identifié comme le Superamas local n'est qu'un lobe d'un superamas rassemblant 100 000 grandes galaxies et

s'étendant sur une distance dix fois plus grande de 500 millions d'années-lumière. L'équipe qui a découvert ce superamas gigantesque l'a nommé Laniakea («horizon céleste immense» en langue hawaïenne) en l'honneur des premiers Polynésiens qui ont exploré les immensités de l'océan Pacifique en se guidant aux étoiles. La Voie lactée se trouve loin du centre de Laniakea, quelque part dans une de ses provinces reculées.

Laniakea n'est pas juste une ligne de plus dans notre adresse cosmique. En étudiant l'architecture et la dynamique de cette structure immense, nous pouvons en apprendre davantage sur le passé de l'Univers et sur son avenir. La répartition des galaxies et leur mouvement dans Laniakea nous renseignent non seulement sur la manière dont les structures de galaxies se forment et croissent, mais aussi sur la «matière noire», cette substance invisible dont les physiciens supposent qu'elle constitue près de 80 % de la matière du cosmos. Laniakea pourrait aussi nous aider à comprendre la nature de l'«énergie sombre», cette composante de l'Univers découverte en 1998 qui serait à l'origine d'une accélération de l'expansion cosmique, déterminante pour prédire le destin ultime de l'Univers.

Finalement, ce superamas pourrait ne pas être la dernière ligne de notre adresse cosmique : il pourrait faire lui-même partie d'une structure plus vaste encore à découvrir.

Sonder l'Univers grâce aux mouvements des galaxies

L'équipe qui a découvert Laniakea ne le cherchait pas. Ses travaux visaient initialement à répondre à des questions persistantes sur la nature fondamentale de l'Univers.

Les scientifiques ont constaté depuis près d'un siècle que le cosmos est en expansion : l'espace enfle et les galaxies s'éloignent les unes des autres comme des points à la surface d'un ballon que l'on gonfle. Cependant, au cours des dernières décennies, il est apparu que la plupart des galaxies ne font pas que s'éloigner les unes des autres, soumises à la seule action de l'expansion cosmique. Une autre force, locale celle-là, est à l'œuvre : l'attraction gravitationnelle exercée par les amas de matière voisins et susceptible de retenir

LES AUTEURS



Noam I. LIBESKIND est cosmologiste à l'institut Leibniz d'astrophysique de Potsdam, en Allemagne. Il modélise l'évolution de l'Univers et la formation des galaxies, en particulier la Voie lactée et les galaxies naines qui l'entourent.

R. Brent TULLY est astronome à l'université de Hawaï. Il est spécialiste de la cartographie et de la distribution des galaxies.

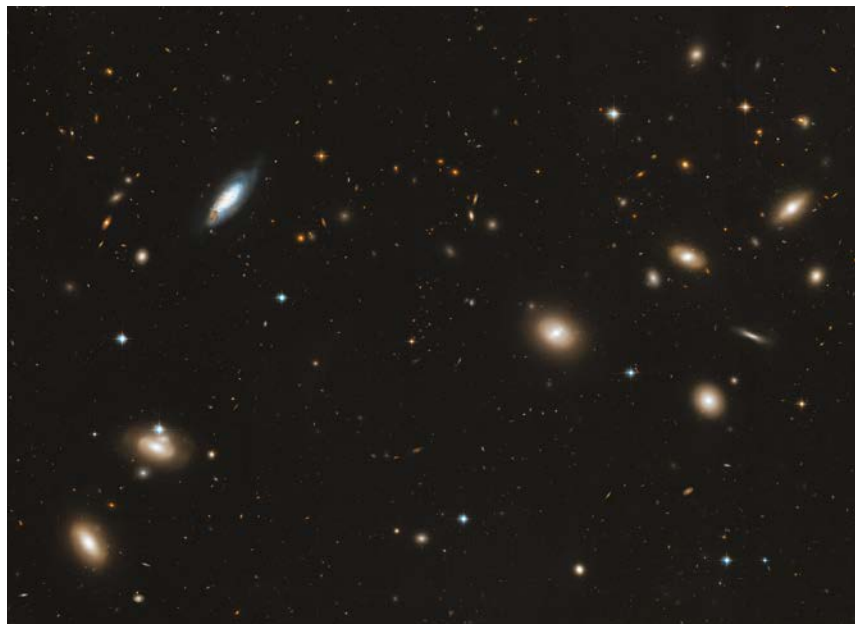
une galaxie à contrecourant du flot de l'expansion. On qualifie de «vitesse particulière» la différence entre le mouvement d'une galaxie lié à l'expansion cosmique et son mouvement lié à son environnement gravitationnel.

En comptabilisant toutes les étoiles de toutes les galaxies visibles et en y ajoutant tout le gaz et les autres formes de matière ordinaire qu'elles doivent contenir, on obtient une masse totale très insuffisante (il s'en faut d'un ordre de grandeur) pour expliquer les vitesses particulières observées. La masse manquante est qualifiée de «matière noire» par les physiciens, un terme qui ne fait essentiellement que mettre un nom sur l'inconnu. On suppose que cette matière noire est constituée de particules qui sont pratiquement insensibles aux forces telles que l'électromagnétisme et qui n'interagissent avec le reste de l'Univers que *via* la gravitation. La matière noire exerce la force gravitationnelle «manquante» nécessaire pour rendre compte des vitesses observées. Les scientifiques pensent que les galaxies s'agglutinent au sein de régions riches en matière noire, qui constitue l'échafaudage invisible du cosmos.

Notre équipe d'astronomes a vite compris qu'en cartographiant l'écoulement des galaxies à partir de leurs vitesses particulières, on pourrait en déduire la distribution cachée de la matière noire dans le cosmos, les plus grandes concentrations de cette mystérieuse substance étant trahies par leur influence gravitationnelle sur le mouvement des galaxies. Si, par exemple, des galaxies convergent vers un point donné, c'est qu'elles y sont attirées gravitationnellement car il s'agit d'une région à forte densité de matière.

Nous nous sommes aussi rendu compte que la détermination précise de la densité et de la distribution de toutes les formes de matière dans l'Univers nous aiderait à résoudre un autre mystère encore plus profond : le fait que le cosmos est non seulement en expansion, mais en expansion accélérée. Ce comportement va à l'encontre de l'intuition : c'est comme si une pierre lancée en l'air partait en flèche vers l'espace plutôt que de retomber sur Terre. On parle d'«énergie sombre» pour désigner ce qui se cache derrière ce phénomène étrange, qui a des implications profondes pour l'avenir de l'Univers. L'expansion accélérée du cosmos suggère que la plupart des galaxies s'éloigneront les unes

LES AMAS DE GALAXIES tels que celui de la Chevelure de Bérénice (*ci-contre*) sont les éléments de base des plus grandes structures de l'Univers. Distant de plus de 300 millions d'années-lumière et contenant un millier de grandes galaxies, l'amas de la Chevelure de Bérénice fait partie d'une structure encore plus grande, le superamas de la Chevelure de Bérénice, qui se trouve hors des frontières de Laniakea.



NASA, ESA and Hubble Heritage (ST ScI/AURA)

des autres à des vitesses sans cesse plus élevées. Mais pour savoir précisément comment tout cela se terminera, il faut déterminer non seulement en quoi consiste l'énergie sombre, mais aussi combien de matière il y a dans l'Univers : si la densité de matière est suffisante, dans un futur lointain, l'expansion pourrait ralentir et laisser place à un effondrement de l'Univers sur lui-même sous l'effet de la gravitation de sa propre masse.

Ainsi, le mouvement des galaxies dans l'Univers n'est pas sans rappeler celui de liquides qui coulent des hauteurs vers le fond des vallées, qui seraient ici les zones de forte densité. C'est au cours de cette cartographie des écoulements galactiques visant à mesurer la densité de la matière ordinaire et de la matière noire que Laniakea a finalement été mis en évidence.

Hydrographie cosmique

La cartographie de ces écoulements galactiques nécessite de connaître pour chaque galaxie à la fois le mouvement dû à l'expansion cosmique et le mouvement lié à la matière avoisinante.

Dans un premier temps, les astronomes mesurent le décalage vers le rouge d'une galaxie (l'étirement de la longueur d'onde du rayonnement qu'elle émet tandis qu'elle s'éloigne de nous du fait de l'expansion). Le son d'une sirène qui s'éloigne de nous est plus grave que lorsqu'elle s'approche, parce que les ondes sonores sont étirées

par le mouvement et donc décalées vers des longueurs d'onde plus grandes et des fréquences plus basses. Par un phénomène similaire, les ondes lumineuses d'une galaxie qui s'éloigne de nous sont étirées vers des fréquences plus basses et des longueurs d'onde plus grandes, d'où l'expression « décalage vers le rouge » (c'est bien ce qui arrive à la lumière visible, mais l'expression est utilisée de façon générale pour un décalage vers des plus grandes longueurs d'onde). Et plus la galaxie s'éloigne vite, plus ce décalage vers le rouge est important. Ainsi, le décalage vers le rouge d'une galaxie fournit aux astronomes une mesure de sa vitesse globale, ainsi qu'une première estimation de sa distance (parce que, en principe, la vitesse d'éloignement d'une galaxie sous l'effet de l'expansion est proportionnelle à la distance qui nous en sépare).

Pour déterminer quelle part de la vitesse d'une galaxie résulte de l'attraction gravitationnelle locale, il faut mesurer sa distance par une autre méthode, indépendante du décalage vers le rouge. Par exemple, d'après des estimations rigoureuses du taux d'expansion de l'Univers, une galaxie située à 3,25 millions d'années-lumière devrait s'éloigner de nous à environ 70 kilomètres par seconde. Si, au lieu de cela, le décalage vers le rouge de la galaxie indique une vitesse de 60 kilomètres par seconde, on en déduit que les concentrations de matière autour d'elle lui confèrent une vitesse propre de 10 kilomètres par seconde par rapport à la trame de l'Univers.

Les techniques utilisées pour fournir des mesures de distance indépendantes de la vitesse reposent essentiellement sur le fait que l'intensité de la lumière décroît comme l'inverse du carré de la distance à sa source. En d'autres termes, si vous voyez deux phares dont vous savez qu'ils sont identiques, mais que l'un d'entre eux apparaît quatre fois moins brillant, vous pouvez en conclure que ce dernier se trouve deux fois plus loin. En astronomie, ces phares identiques sont qualifiés de « chandelles cosmiques ». Ce sont des objets astrophysiques dont on connaît bien les propriétés lumineuses. Parmi ces chandelles figurent certains types d'étoiles périodiques nommées céphéides, un type particulier d'explosion d'étoiles en supernova, ou même des galaxies massives comme l'ont proposé, en 1977, Brent Tully et l'Américain Richard Fisher.

Ces deux astronomes ont en effet déterminé une relation (dite de Tully-Fisher) reposant sur le fait que les galaxies massives sont à la fois plus lumineuses et tournent plus vite sur elles-mêmes que les petites galaxies : elles contiennent plus d'étoiles et doivent donc tourner plus vite pour ne pas s'effondrer sous l'effet de leur auto-gravité, plus intense. Mesurez la vitesse de rotation de la galaxie et vous aurez une estimation du nombre d'étoiles qu'elle contient et donc de sa luminosité intrinsèque. Comparez cette luminosité avec sa luminosité apparente dans le ciel, et vous aurez sa distance.

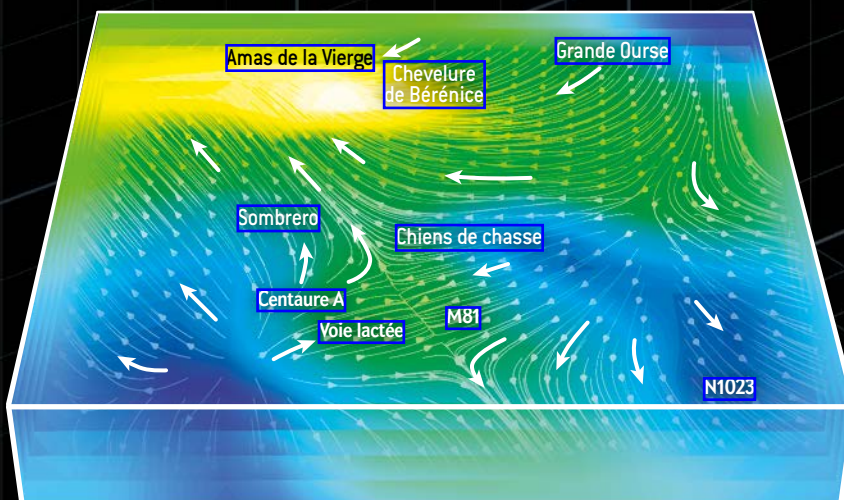
Les galaxies, composées de centaines de milliards d'étoiles, ne sont pas les plus grandes structures de l'Univers. Liées par la gravité, les galaxies se regroupent parfois par centaines en amas de galaxies. La gravité peut ensuite concentrer ces amas pour former des superamas contenant des centaines de milliers de galaxies. Dans cette hiérarchie, l'adresse cosmique du Système solaire est traditionnellement la suivante : galaxie de la Voie lactée, Groupe local, amas de la Vierge, et enfin Superamas local. Des recherches récentes montrent que le Superamas local ne représente en fait qu'une portion d'un autre superamas plus de 100 fois plus gros. Ce vaste superamas est nommé Laniakea (« horizon céleste immense » en langue hawaïenne).

1 CARTOGRAPHIER LE SUPERAMAS LANIAKEA

Les frontières des superamas délimitent des régions où la force convergente de la gravité commence à entraver de façon significative le mouvement divergent des galaxies dû à l'expansion cosmique. Ici, les positions de plus de 8 000 galaxies sont cartographiées et colorées en fonction de leur mouvement relatif (leur vitesse et leur trajectoire). Les contours en couleurs chaudes (jaune et rose) représentent les amas de galaxies qui convergent rapidement. Les contours de Laniakea apparaissent en bleu, délimitant la région où les amas convergent le plus lentement. Laniakea s'étend sur près d'un demi-milliard d'années-lumière, et ses frontières englobent un ensemble d'amas galactiques qui, en l'absence d'expansion cosmique, convergeraient pour devenir une structure unique liée par sa propre gravité. Au-delà des frontières de Laniakea, on devine des superamas voisins, par exemple ceux de Shapley, d'Hercule ou de Persée-Poissons.

2 SUIVRE LE MOUVEMENT

Un zoom à l'intérieur de Laniakea révèle la distribution de matière noire et le processus d'évolution galactique. Prenons par exemple une tranche tridimensionnelle de Laniakea contenant la Voie lactée et le Groupe local qui l'abrite (détail ci-dessous). Les flèches correspondent au mouvement des galaxies, qui s'écoulent vers des zones où la matière est dense et la gravité forte (représentées par des couleurs chaudes) et s'éloignent des régions de basse densité (couleurs froides). Les mesures de flux réalisées par Noam Libeskind ont montré que le Groupe local tombe le long d'un filament de matière noire long de 50 millions d'années-lumière vers l'amas de la Vierge (en jaune), un assemblage de plus d'un millier de galaxies entassées dans un volume de 13 millions d'années-lumière. On pense que de tels filaments jouent un rôle important dans la formation des galaxies.



LANIAKEA

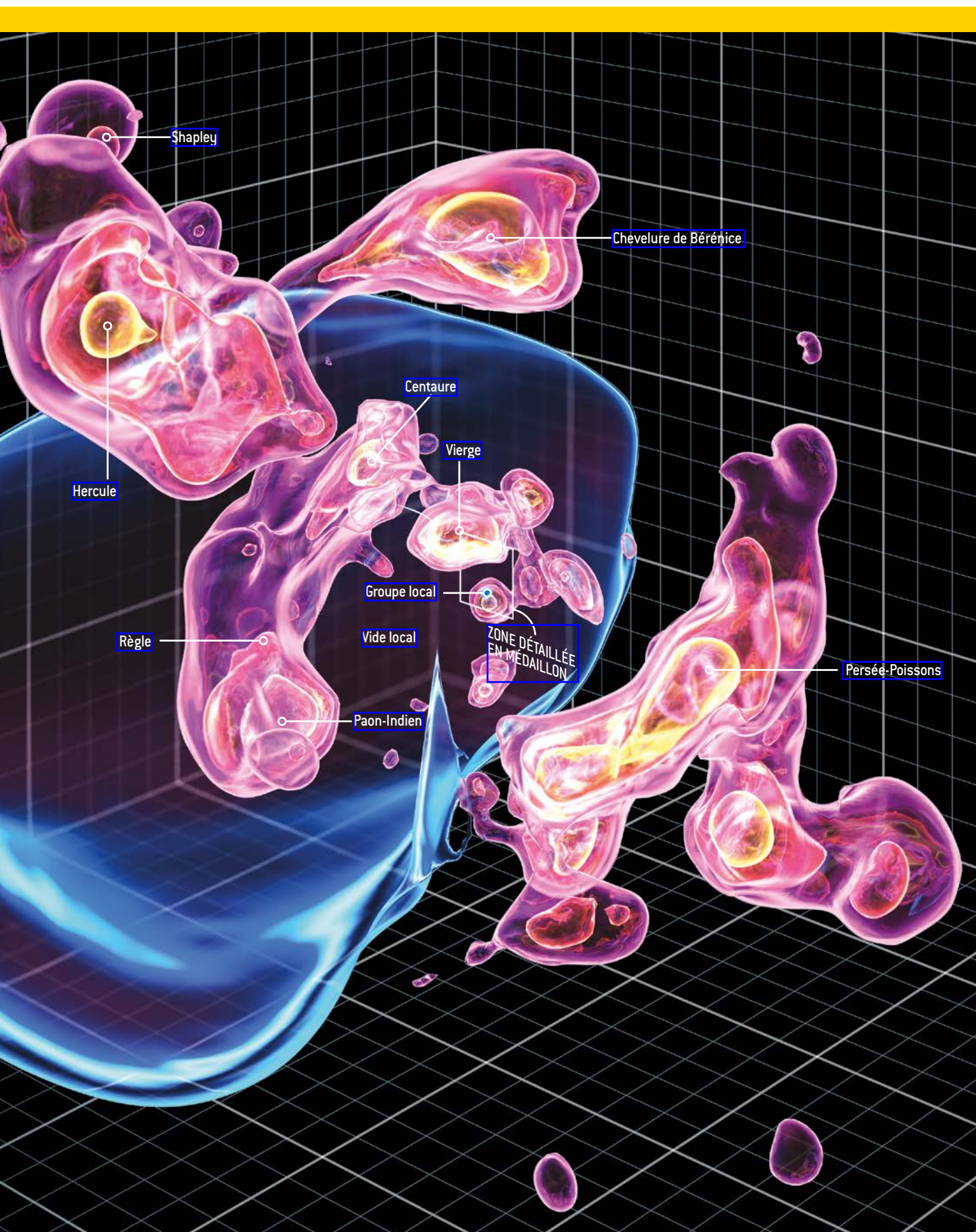




PHOTO: J. HANCOCK

Selon l'ordre de grandeur des distances mesurées, chaque type de chandelle cosmique est plus ou moins bien adapté. On ne peut bien observer les céphéïdes que si les galaxies qui les abritent sont proches de la Voie lactée. Elles ne conviennent donc pas pour la mesure de grandes distances. La relation de Tully-Fisher est applicable à de nombreuses galaxies spirales, mais elle fournit des estimations de distance dont l'incertitude peut dépasser 20 %. Quant aux supernovæ de type Ia, elles donnent des mesures deux fois plus précises et sont visibles sur des distances cosmiques très grandes, mais elles sont rares : une par siècle environ dans une galaxie moyenne.

À partir d'un échantillon assez grand de galaxies dont on connaît les vitesses propres, les astronomes sont en mesure d'établir une carte des écoulements galactiques aux plus grandes échelles. À ces échelles immenses, le mouvement des galaxies est comparable à l'écoulement d'un réseau de rivières qui serpentent à travers une sorte de « bassin horographique cosmique » où les lignes de partage des eaux ne seraient plus définies par le relief du paysage, mais par les attractions gravitationnelles des

LE TÉLESCOPE DE GREEN BANK, en Virginie-Occidentale, aux États-Unis, est le plus grand radiotélescope orientable du monde. Sa surface collectrice mesure 100 mètres par 110 mètres. L'équipe d'Hélène Courtois et Brent Tully a utilisé certaines observations de ce télescope pour établir le catalogue *Cosmicflows*. Les données spectroscopiques collectées ont été utilisées pour mesurer la vitesse de rotation de galaxies spirales. Cette vitesse, reliée à la luminosité intrinsèque des galaxies par la loi de Tully-Fisher, permet de calculer la distance de la galaxie considérée.

grandes structures voisines. Dans ces cartes cosmographiques, les galaxies s'écoulent le long de courants, tourbillonnent dans des zones de remous ou s'amassent dans des bassins, révélant indirectement la structure, la dynamique, les origines et l'avenir des plus grandes accumulations de matière de l'Univers (voir l'encadré pages 64-65).

La découverte de Laniakea

Pour répondre à nos questions sur la matière noire et l'énergie sombre, il fallait établir des cartes à des échelles aussi grandes que possible et compiler les meilleures données disponibles provenant d'un grand nombre de programmes d'observation. En 2008, Brent Tully, Hélène Courtois et leurs collègues ont publié le catalogue *Cosmicflows*, qui compilait divers ensembles de données pour détailler la dynamique de 1 800 galaxies à moins de 130 millions d'années-lumière de la Voie lactée. L'équipe a prolongé ses efforts en 2013 avec le catalogue *Cosmicflows-2*, qui compile les mouvements d'environ 8 000 galaxies dans un volume d'environ 650 millions d'années-lumière de diamètre.

L'un des membres de l'équipe, Yehuda Hoffman, de l'université hébraïque de Jérusalem, a développé des méthodes pour déduire précisément la distribution de matière noire à partir des vitesses propres contenues dans les données *Cosmicflows*.

Le catalogue s'étoffant, nous avons eu la surprise de découvrir un motif inattendu caché dans la masse des données : les contours d'une nouvelle structure cosmique qui n'avait jamais encore été observée. Les amas de galaxies d'une région large de plus de 400 millions d'années-lumière se déplaçaient tous ensemble au sein d'un « bassin d'attraction » local, comme l'eau qui s'accumule au point topographique le plus bas d'un paysage. S'il n'y avait pas l'expansion continue de l'Univers, ces galaxies finiraient par s'agréger en une structure compacte liée par la gravitation. Ce vaste essaim de galaxies constitue le superamas Laniakea.

Jusqu'à présent, l'étude du mouvement des galaxies au sein de Laniakea est en parfait accord avec les modèles les plus consensuels de distribution de la matière noire. De surcroît, la densité totale de matière visible et noire dans Laniakea suggère que, comme le pensaient les théoriciens de l'énergie sombre, l'Univers est destiné à subir une perpétuelle expansion accélérée.

Ces conclusions restent provisoires. La tâche immense de cartographie des écoulements galactiques ne fait que commencer. Actuellement, on ne dispose d'une estimation des vitesses propres que pour 20 % des galaxies situées à moins de 400 millions d'années-lumière, et de nombreuses mesures de distance faites grâce aux chandelles cosmiques sont encore entachées d'incertitudes élevées. De surcroît, les cartes actuelles ne couvrent qu'un millionième du volume de l'Univers observable. Néanmoins, ces premières esquisses de notre voisinage galactique donnent une perception nouvelle de notre position dans les bassins cosmographiques et les vastes étendues de l'Univers.

Un voisinage complexe

Faisons le tour des torrents tumultueux qui composent notre foyer céleste récemment découvert, Laniakea, en partant de l'élément qui nous est le plus familier : nous. Quelle que soit la vitesse à laquelle nous voyageons sur Terre en lisant cet article, nous tournons autour du Soleil avec le reste de la planète à environ 30 kilomètres

par seconde. Le Soleil, quant à lui, tourne autour du centre de la Voie lactée à quelque 200 kilomètres par seconde. Et l'ensemble des galaxies du Groupe local, dont la Voie lactée, se précipitent vers une mystérieuse concentration de masse dans la direction de la constellation du Centaure à une vitesse supérieure à 600 kilomètres par seconde (nous reviendrons sur ce point). Vous n'imaginiez probablement pas qu'il était possible de se déplacer aussi vite rien qu'en lisant un article, voire en ne faisant rien du tout !

Mais au lieu de nous laisser emporter par la Terre, prenons notre envol pour avoir une vue d'ensemble sur notre voisinage. Nous quittons d'abord la Voie lactée, et notre périple à travers les étendues de Laniakea commence par la rencontre avec deux galaxies naines, les Petit et Grand Nuages de Magellan, situés à des distances comprises entre 180 000 et 220 000 années-lumière « seulement ». On peut discerner les Nuages de Magellan depuis l'hémisphère Sud de la Terre, mais le meilleur point de vue est en Antarctique, pendant l'hiver. La seule autre galaxie visible à l'œil nu est la spirale géante d'Andromède, bien qu'elle n'apparaisse guère que comme une tache floue par une nuit très sombre.

Andromède se trouve à 2,5 millions d'années-lumière et vient à la rencontre de la Voie lactée à une vitesse propre de quelque 110 kilomètres par seconde. Dans quatre milliards d'années environ, les deux galaxies se rencontreront lors d'une collision frontale au cours de laquelle elles fusionneront en une galaxie elliptique unique, homogène et constituée de vieilles étoiles rouges. Il est peu probable que le Système solaire soit affecté par ce carambolage cosmique : la distance entre les étoiles est tellement grande qu'il n'y a pratiquement aucune chance que deux étoiles s'approchent suffisamment l'une de l'autre pour entrer en collision. La Voie lactée, Andromède et une cinquantaine d'autres galaxies sont membres du Groupe local, une région où la gravité a gagné la bataille contre l'expansion cosmique et qui est en cours d'effondrement. Comme la Voie lactée et ses Nuages de Magellan, chacune de ces grandes galaxies est accompagnée d'un cortège de galaxies naines.

Juste au-delà du Groupe local, à l'intérieur d'un volume d'environ 25 millions d'années-lumière, toutes les galaxies de cette région, dont la nôtre, font partie de ce que faute d'imagination on a nommé la « Feuille locale ». Comme l'indique le

Cosmicflows, un catalogue de galaxies en expansion

Le premier catalogue de galaxies *Cosmicflows* a été élaboré en 2008. Il répertorie la position des galaxies les plus proches de la Voie lactée et leur vitesse propre.

La deuxième version du catalogue, *Cosmicflows-2*, a été publiée en 2013. Elle contient 8 000 galaxies.

Une prochaine version fournira les caractéristiques de près de 13 000 galaxies. L'augmentation du nombre de galaxies permettra d'esquisser avec encore plus de précision les contours de Laniakea.

terme de « feuille », c'est une structure de faible épaisseur, environ 3 millions d'années-lumière. Elle se trouve dans le plan équatorial de ce qu'on appelle le système de coordonnées supergalactique. Au-dessous de ce plan, après une région vide, se trouvent un filament de galaxies, l'Éperon du Lion, ainsi que l'amas de galaxies de la Machine pneumatique (en latin *Antlia*) et de la Dorade, du nom des constellations où on les trouve, vues de la Terre. Au-dessus du plan, il n'y a pratiquement rien à proximité: c'est la région connue sous le nom de Vide local.

Si l'on ne considère que les

galaxies contenues dans la Feuille locale, la situation est sans surprise. Ces galaxies s'éloignent les unes des autres au rythme de l'expansion et ne présentent que de faibles vitesses propres dues aux interactions locales. C'est aussi le cas au-dessous de la Feuille locale pour les galaxies de la Machine pneumatique, de la Dorade et du Lion. Cependant, elles s'approchent toutes ensemble à grande vitesse de la Feuille locale.

Le coupable est probablement le Vide local. Avec l'expansion de l'Univers, les vides gonflent comme des ballons et la matière, qui s'écoule des régions moins denses vers les régions plus denses, tend à s'accumuler à leurs frontières. Nous comprenons désormais que la Feuille locale est une paroi du Vide local dont l'expansion est en train de nous pousser vers les nuages de la Dorade, de la Machine pneumatique et du Lion.

Des amas aux superamas

En continuant à prendre du recul, nous rencontrons l'amas de la Vierge, qui contient 300 fois plus de galaxies que le Groupe local, entassées dans un volume de 13 millions d'années-lumière de diamètre. Les galaxies de l'amas de la Vierge y tournent à des vitesses de l'ordre de 700 kilomètres par seconde, et toutes les galaxies situées à moins de 25 millions d'années-lumière de l'extérieur de l'amas tombent vers lui et l'intégreront d'ici 10 milliards d'années. Notre Voie lactée, située à 50 millions d'années-lumière, est donc juste en dehors de cette zone de capture.

Laniakea
apporte un éclairage
sur la formation des structures
de galaxies, mais aussi
sur la matière noire
et l'énergie sombre

À l'échelle suivante, la grande région autour de l'amas de la Vierge qui contient notre propre voisinage est nommée le Superamas local (aussi nommé superamas de la Vierge). Il y a près de trente ans, un groupe d'astronomes surnommés depuis les « Sept samourais » – Sandra Faber, de l'université de Californie à Santa Cruz, et six collègues – a découvert que la Voie lactée n'était pas la seule à filer en direction de la constellation du Centaure à plusieurs centaines de kilomètres par seconde. En fait, ce mouvement est celui de l'intégralité du Superamas local. Ils ont donné le

nom de Grand Attracteur à la masse mystérieuse qui attire toutes ces galaxies. À de nombreux égards, le Grand Attracteur n'est pas si mystérieux: la densité de matière dans cette direction du cosmos doit être à l'évidence élevée puisqu'elle contient sept amas comparables à celui de la Vierge dans une sphère de 100 millions d'années-lumière de diamètre. Trois parmi les plus gros de ces amas sont la Règle, le Centaure et l'Hydre.

Si l'on définit les superamas comme des « bassins versants » cosmiques délimités par des « lignes de partage des eaux » au-delà desquelles les galaxies sont destinées à s'éloigner irrémédiablement, le « Superamas local » est mal nommé. Il ne représente qu'une partie d'un ensemble plus vaste (à savoir Laniakea) qui englobe d'autres grandes structures, telles que le superamas du Paon-Indien (du nom de deux constellations de l'hémisphère Sud) et l'amas d'Ophiuchus. Si Laniakea était une grande cité, la région du Grand Attracteur en serait le centre-ville embouteillé. Comme pour la plupart des noyaux urbains, il est difficile d'en préciser le centre exact, mais on peut le placer approximativement quelque part entre les amas de la Règle et du Centaure.

Une telle position relègue notre Voie lactée aux faubourgs reculés, non loin des frontières d'un autre superamas adjacent, dit de Persée-Poissons. Cette frontière est tellement proche en termes cosmiques que nous pouvons l'étudier en détail pour déterminer que Laniakea a une forme globale, plutôt ronde et s'étend sur près d'un demi-milliard d'années-lumière. Au total, les frontières de Laniakea englobent une masse de matière ordinaire et noire

équivalente à quelque 100 millions de milliards de soleils.

Les astronomes entrevoient depuis plusieurs décennies les contours de ce qui pourrait se trouver au-delà de Laniakea. Peu après la découverte du Grand Attracteur par les Sept samourais, quelque chose d'encore plus grand a émergé du brouillard intergalactique. Derrière le Grand Attracteur, mais trois fois plus loin, se trouve une gigantesque accumulation d'amas – la plus dense que nous connaissions dans l'Univers local. Cette lointaine et énorme superstructure porte le nom de superamas de Shapley, du nom de Harlow Shapley, l'astronome qui a détecté les premiers signes de son existence dans les années 1930. (Soit dit en passant, tout comme la Feuille locale, l'amas de la Vierge et la bande principale du Superamas local, le Grand Attracteur et le superamas de Shapley reposent tous sur l'équateur supergalactique. Imaginez une immense crêpe de superamas galactiques, et vous aurez une bonne représentation de notre voisinage cosmique à très grande échelle.)

BIBLIOGRAPHIE

N. Libeskind *et al.*, Planes of satellite galaxies and the cosmic web, *MNRAS*, vol. 452(1), pp. 1052-1059, 2015.

R. B. Tully *et al.*, The Laniakea supercluster of galaxies, *Nature*, vol. 513, pp. 71-73, 2014.

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

H. M. Courtois *et al.*, Cosmography of the Local Universe, *Astronomical Journal*, vol. 146(3), article n° 69, 2013.

S. Gregory et L. Thompson, La distribution des galaxies : vides et superamas, *Pour la Science*, n° 55, mai 1982.

Quelle est donc la cause de la vitesse propre – 600 kilomètres par seconde – de notre Superamas local ? Le complexe du Grand Attracteur joue un rôle non négligeable, mais nous devons aussi prendre en compte l'attraction du superamas de Shapley, situé dans la même direction, certes trois fois plus loin, mais qui contient quatre fois plus d'amas densément peuplés.

Cependant, d'après l'inventaire *Cosmicflows-2* (ce même catalogue qui a révélé Laniakea), ce n'est pas tout. Les vitesses propres des 8000 galaxies de ce catalogue indiquent un écoulement cohérent en direction du superamas de Shapley. Cet écoulement englobe tout le volume du catalogue *Cosmicflows-2*, soit 1,4 milliard d'années-lumière de bout en bout. Cela s'arrête-t-il là ? Nous ne le savons pas encore. Seuls des relevés plus larges, cartographiant des portions d'Univers plus vastes encore, pourront révéler la source attractive ultime (et la structure ultime) qui provoque cet épique écoulement des galaxies de notre Univers local. ■

LES {Partagez les savoirs}
RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM

Entrée gratuite

Au Jardin des Plantes

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

POUR LA SCIENCE

COURS PUBLICS

Établissement du cadre chronostratigraphique du Quaternaire et de l'évolution de l'Homme

Jeudi 2 février - 18h : La révolution du radiocarbone

Jeudi 9 février - 18h : Le cadre chronostratigraphique en 2017

Avec J. Bahain, géochronologue, professeur du Muséum.

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

Cycle en lien avec l'Année internationale du Tourisme durable pour le développement

Lundi 20 février - 18h : Qu'est-ce qu'un tourisme responsable ? Les paroxysmes

Animée par J. Siblet, directeur du Service du Patrimoine naturel, Muséum. Avec L. Guérin, Président de Hop ! Biodiversité, Air France, A. Horellou, Responsable Autorité scientifique CITES France, Service du Patrimoine naturel, Muséum, G. Macava, ambassadeur du Costa Rica en France.

FILMS

Cycle Pousse-Pousse (pour les enfants à partir de 2 ans)

Samedi 25 février - 16h : Les contes de la mer (45', 2015)

Un programme de trois films d'animation pour découvrir différemment le monde de la mer, en famille !

UNE EXPO / DES DÉBATS

Lundi 27 février - 18h : Comment l'hibernation chez les ours inspire la recherche médicale

Avec E. Lefai, biologiste INRA, Laboratoire biomédicale, Université de Lyon, Y. Le Maho, écophysiologiste, Université de Strasbourg, J. Terrien, spécialiste des mécanismes adaptatifs et évolution, Muséum.

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

Le retour de la forêt

Au XIX^e siècle, deux lois reposant sur un discours environnemental catastrophiste ont permis à l'État d'asseoir son autorité sur les espaces ruraux... en favorisant le reboisement.

Guillaume Decocq, Bernard Kalaora et Chloé Vlassopoulos

Novembre 1843. De retour d'un voyage dans les Alpes, l'économiste Adolphe Blanqui, livre ses inquiétudes sur le déboisement des montagnes dans un rapport de l'Académie des sciences morales et politiques. Pour lui, si le pays ne se reboise pas vite, il court à sa perte :

Le sol dépouillé d'herbes et d'arbres par l'abus du pacage et par le déboisement, porphyrisé par un soleil brûlant, sans cohésion, sans point d'appui se précipite alors dans le fond des vallées, tantôt sous forme de lave noire, jaune ou rougeâtre, tantôt par courant de galets et même de blocs énormes qui bondissent avec un horrible fracas et produisent dans leur course impétueuse les plus étranges bouleversements. Il n'y a pas de temps à perdre, ou bien, dans cinquante ans d'ici, la France sera séparée du Piémont comme l'Égypte de la Syrie : par un désert.

Hormis son lyrisme désuet, ce tableau apocalyptique ressemble fort aux discours que l'on entend depuis quelques années, alors que le réchauffement climatique induit par l'émission des gaz à effet de serre est une préoccupation grandissante dont se sont emparées les politiques publiques, nationales et internationales.

En France, l'heure est à la dynamisation de la sylviculture et au remplacement des vieux arbres par de nouveaux :

Il faut rajeunir les forêts en les exploitant plus intensément, de manière à piéger davantage de CO₂. Tel est, en substance, le propos sur les forêts de la loi d'avenir pour l'agriculture, l'alimentation et la forêt du 13 octobre 2014. À l'échelle internationale, la marchandisation du carbone lancée par le protocole de Kyoto, en 1997, place la forêt au premier plan dans la lutte contre le réchauffement climatique.

Certes, les faits sont indiscutables : ex æquo avec l'agriculture, la foresterie constitue la quatrième cause mondiale d'émission de gaz à effet de serre après l'énergie, l'industrie et les transports, selon le rapport du programme des Nations unies pour l'environnement de 2012. La déforestation est la première source incriminée, avant les feux de tourbe et de forêts. En 2014, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec) a estimé que la perte annuelle nette de superficie forestière entre 2000 et 2005 dans le monde s'élevait à 7,3 millions d'hectares (ha) par an. Or d'une part, les forêts constituent des puits de carbone naturels : ensemble, les forêts boréales, tempérées et tropicales représentent près de la moitié du carbone stocké par la biosphère et 77 % du stock constitué par la biomasse aérienne. D'autre part, la destruction des forêts est source d'émission de

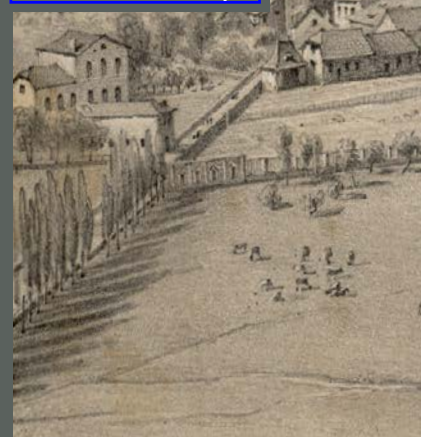
L'ESSENTIEL

■ En France, au XIX^e siècle, les génies forestier et civil rivalisent d'arguments pour convaincre du rôle protecteur de la forêt contre les aléas climatiques.

■ Ignorant les récentes avancées scientifiques, le discours joue sur la fibre émotionnelle et patriotique de l'opinion.

■ Il aboutit aux lois de 1860 et 1882, qui conduisent au boisement de 250 000 hectares de montagne au détriment des sociétés paysannes locales.

■ En écho, le « marché du carbone » mondialisé du XXI^e siècle présente de nouveau la forêt comme un remède miracle contre le réchauffement climatique.



© J. B. BOUTIER / MUSEUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE

salvatrice



AVALANCHES, pluies torrentielles, crues, Luz et la vallée de Barèges, dans les Hautes-Pyrénées (ici sur une lithographie du XIX^e siècle) ont subi de nombreux dégâts au fil des siècles. La faute à la déforestation ? Pas seulement...

gaz à effet de serre, en particulier de CO₂. Le Giec estime que 12 % des émissions globales anthropiques de CO₂ sont dues à la déforestation, soit autant que celles dues aux transports ou à l'agriculture.

Tous ces chiffres plaident en faveur de la reforestation et de l'afforestation (l'implantation de nouvelles forêts). Toutefois, si l'argumentation technoscientifique est indiscutable, elle ne prouve pas pour autant que la transformation de la forêt en moyen pour atténuer le changement climatique ne produit que des impacts positifs, tant pour la planète que pour les communautés locales. Les bergers du XIX^e siècle l'ont appris à leurs dépens lorsque, à la suite de Blanqui et d'autres, l'État français usa de l'argument d'une « forêt salvatrice », capable de protéger les populations humaines des pires catastrophes climatiques, pour asseoir son autorité sur les zones rurales qui lui échappaient encore : les montagnes.

Des montagnes dévastées

Lorsque Blanqui publie son rapport, la France n'a jamais eu aussi peu de forêts : la surface boisée n'est que de 75 000 kilomètres carrés, contre 155 000 aujourd'hui, et consiste bien souvent en des taillis dégradés. Ce « minimum forestier » est le résultat d'une combinaison de facteurs qui ont marqué le XVIII^e siècle : les famines récurrentes, qui ont favorisé le défrichement pour trouver de nouvelles terres agricoles et pastorales ; la multiplication des droits d'usage dans les forêts royales sous l'Ancien régime ; la Révolution qui, avec la privatisation des forêts, a été suivie d'une exploitation assez anarchique et de nouveaux défrichements ; et, probablement, les détériorations climatiques du Petit Âge glaciaire – une période de plus de 400 ans (1400-1850) durant laquelle les hivers furent très rudes en Europe –, qui ont fait descendre la limite altitudinale des forêts en montagne.

C'est dans ce contexte qu'apparaissent des idées nouvelles sur le rôle de la forêt dans la nature et dans la société et que la formation des torrents qui inondent et dévastent les plaines et vallées soulève le problème du déboisement des montagnes. De là émerge peu à peu un discours sur les bienfaits de la forêt, que l'on qualifierait aujourd'hui d'environnemental.

Les agents de l'administration forestière du XIX^e siècle livrent un discours construit

LES AUTEURS



Guillaume DECOCQ est professeur en pharmacie et botanique et directeur de l'unité Écologie

et dynamique des systèmes anthropisés (FRE 3498, CNRS), à l'université de Picardie-Jules-Verne.



Bernard KALAORA est professeur honoraire en sociologie de l'environnement à l'université

de Picardie-Jules-Verne.

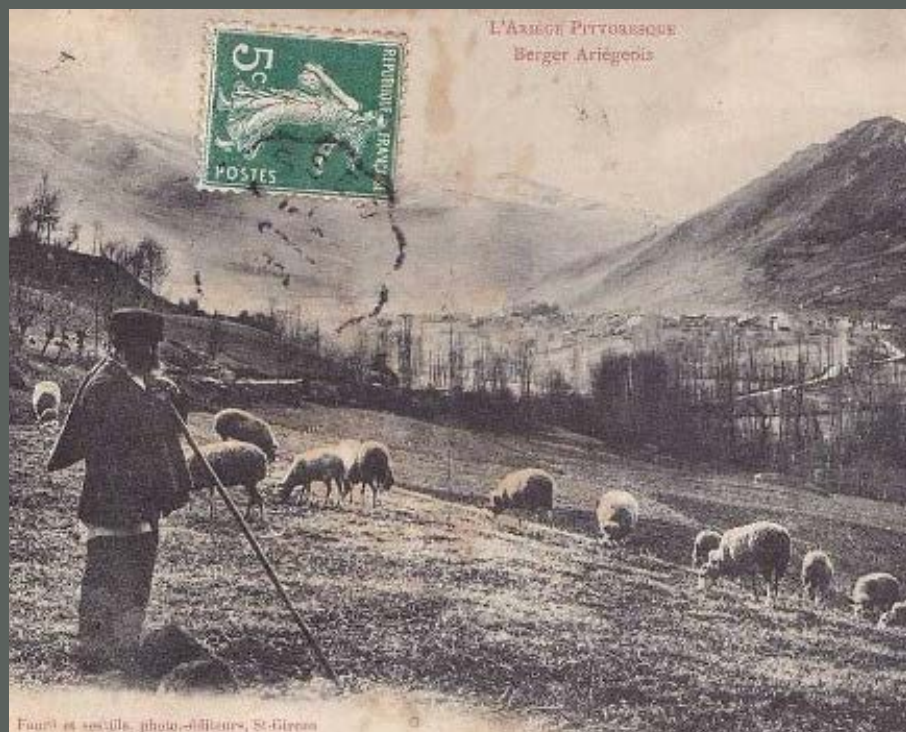


Chloé VLASSOPOULOS est maître de conférences en sciences politiques

à l'université de Picardie-Jules-Verne.

autour de deux registres : l'un se rapporte au rôle de la forêt dans les équilibres naturels, l'autre à son rôle dans la société. Prophètes du catastrophisme, ils opposent les vertus du reboisement aux cataclysmes du déboisement et aux conséquences sur les plans physique et social. La destruction des forêts n'est pas seulement une atteinte au capital économique ; elle porte en elle la disparition des espèces animales et végétales, dont l'homme.

Pour argumenter ce discours, les forestiers attribuent à la forêt la capacité de réguler le climat et les conditions météorologiques, de purifier l'air, de régulariser les cours d'eau, de protéger les sols contre l'érosion, de chasser les « miasmes » responsables des plus terribles épidémies (malaria, typhus, fièvre typhoïde, choléra, tuberculose...), d'embellir les paysages. Le discours hygiéniste rencontrera même le discours patriotique et les intentions militaires au lendemain de la défaite de 1870, celle-ci étant mise sur le compte d'un plus faible taux de boisement en France qu'en



LES SOCIÉTÉS PAYSANNES DE MONTAGNE ont été rendues responsables des crues torrentielles qui ont dévasté les villes de plaine au XIX^e siècle et de bien d'autres maux imputés au déboisement et au pastoralisme. Les politiques de reboisement les ont peu à peu exclues. L'administration des Eaux et Forêts, un corps de police (à droite, un élève officier de l'école royale forestière de Nancy, vers 1843), avait le pouvoir de faire des procès aux paysans récalcitrants et de les instruire.

Allemagne : reboiser devient le moyen de régénérer l'individu et le corps social.

Surestimant l'influence de la forêt, exagérant l'ampleur du déboisement, s'appuyant sur des données scientifiques volontairement déformées et des statistiques biaisées (comme celles montrant que la mortalité diminue et la natalité augmente avec l'augmentation de la densité forestière d'une région), ce discours vise moins la science qu'une certaine conception du social et du rôle de la forêt dans la nature et dans la société. Il s'agit de frapper l'opinion publique et, surtout, d'effrayer les autorités politiques sur le danger que représentent les déboisements.

Le bouc émissaire est d'ailleurs tout trouvé : les populations locales, que l'administration forestière rend responsables de la dégradation des forêts. Les conséquences catastrophiques du déboisement sont en effet perçues comme le résultat de l'archaïsme des sociétés rurales montagnardes, de leurs pratiques jugées irrationnelles et de la résistance qu'elles

opposent aux changements. Le forestier se complaît dans des descriptions macabres de régions ruinées, désertifiées, englouties sous les effets répétés des inondations, et cela par la faute des déboiseurs, paysans « primitifs » et « barbares » des montagnes, qui dégradent les pâturages.

Le discours environnemental s'érige en prêche pour une croisade contre les « forces du mal » que sont les paysans de montagne. Seule une autorité exemplaire, investie d'une mission quasi divine, pourra conduire cette croisade, développer les « forces morales » de la Nation, sauver et racheter le monde : le corps des Eaux et Forêts. Pour s'y employer, il a comme moyens la propagande, l'éducation scolaire et patriotique par le livre, les fêtes de l'arbre, l'encouragement au reboisement et... une alliance inattendue avec son rival au sein des grands corps d'État, les Ponts et Chaussées.

Luttes d'influence

Car les agents de l'administration forestière ont des vues bien plus vastes sur la forêt que les équilibres naturels. Ils la présentent comme une infrastructure qui, en permettant de lutter contre les inondations et les érosions, facilite les communications, le désenclavement des régions de montagne et l'expansion des échanges économiques. L'homme ne peut mener le perfectionnement de son organisation sociale que de pair avec celui de la nature.

Le discours environnemental, de fait, inscrit la forêt dans la modernité : elle devient moteur du progrès et le reboisement autoritaire des montagnes, un hymne à la rationalisation de l'espace national, à l'amélioration des forces productives et à la lutte contre ceux qui sont considérés comme des arriérés. Ce discours renforce l'emprise de l'État sur des populations attachées aux droits coutumiers des usages collectifs – les populations rurales –, à une époque où le pays se partage entre une France industrielle en expansion et une France rurale de plus en plus mécontente (voir l'encadré page 74).

Toutefois, depuis la Révolution française, l'administration des Eaux et Forêts est déstructurée et affaiblie sur le plan organisationnel, éclipsée par la supériorité administrative et la compétence scientifique et technique du corps des Ponts et Chaussées dans le domaine du reboisement et de la

régulation des eaux. De plus, les problèmes de torrents, d'assainissement et de reboisement concernent peu les forestiers, qui n'ont pas de doctrine bien ferme à ce sujet. Depuis les ingénieurs Jean-Antoine Fabre et Nicolas Brémontier, au XVIII^e siècle, ils sont surtout du ressort de l'administration des Ponts et Chaussées, dont l'influence a grandi dans tous les domaines en cette période d'industrialisation et de travaux publics intenses. L'extension à toute la France du service hydraulique en 1849 a ainsi contribué à développer l'intérêt des ingénieurs des Ponts pour un nouveau domaine au moment où, par ailleurs, le développement des chemins de fer (sous la houlette du corps des Mines) amoindrait leurs attributions.

Les forestiers n'hésitent alors pas à s'allier avec les forces les plus modernisatrices, représentées par les Ponts et Chaussées et les Mines, dont certaines sont partisans d'un gouvernement industriel. Génies forestier et civil s'unissent dans l'entreprise de reboisement et imposent leurs vues, disqualifiant ainsi les sociétés paysannes et refusant leur capacité à défendre leurs bois.

Contrairement à l'idée que l'on pourrait s'en faire de nos jours, ces forestiers ne sont donc pas des défenseurs de la cause environnementale. Ce sont des acteurs de la modernité, mus par la croyance en la rationalité et la maîtrise de la nature. Les intérêts qu'ils défendent sont d'abord ceux liés à des intérêts humains : ceux des partis engagés dans le renouvellement des infrastructures de communication de façon à faciliter les échanges marchands. Ceux aussi de leur corps, cherchant à regagner l'influence perdue dans les coulisses du pouvoir. Plus largement, ces intérêts rencontrent ceux des élites urbaines scientifiques et touristiques, pour qui les forêts de montagne doivent devenir un espace à protéger.

En juin 1856 surviennent des crues catastrophiques à la suite d'abondantes précipitations. Le Rhône et la Loire ravagent une partie de la France. Témoin de ce spectacle, Napoléon III réclame une intervention énergique des Ponts et Chaussées pour éviter de tels fléaux, indignes d'un pays industriel : il faut lutter contre l'état de barbarie, la nature. Le 5 janvier 1860, Napoléon III instaure le « Programme de la paix » : le progrès doit se répandre non seulement dans les villes, mais aussi dans les campagnes, où sont prévus de grands travaux de défrichement, de reboisement,

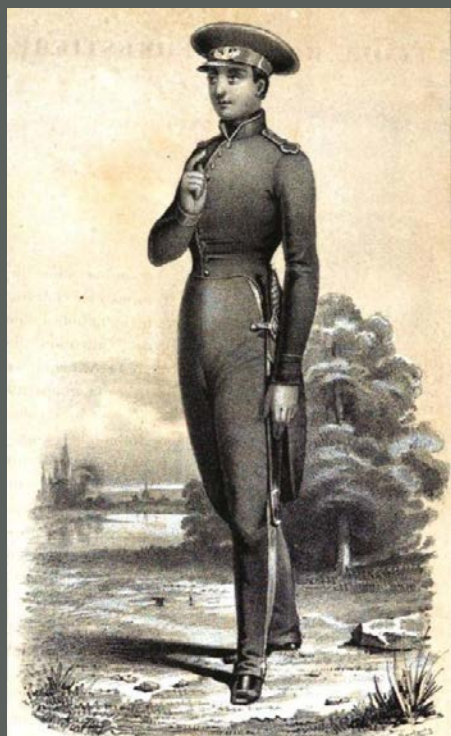


Illustration : Gardien des forêts. D'après : *Le Gardien des forêts*, 1860. Bibliothèque nationale de France.

de drainage et d'irrigation. Le reboisement devient la pierre de touche de l'édifice du « développement de la richesse nationale », de la « bonne économie politique » et du développement économique harmonieux.

Passage à l'offensive

Tout concourt à faire de l'administration des Ponts et Chaussées l'autorité compétente en matière de protection des sols et de lutte contre les torrents dévastateurs. Notamment, depuis la publication de la très populaire *Étude sur les torrents des Hautes Alpes* par l'ingénieur Alexandre Surell, en 1841, le mouvement en faveur du reboisement trouve un écho retentissant en son sein.

Fin observateur, Surell y expose de façon claire les raisons des torrents et les causes contre lesquelles il faut lutter : l'état de la couverture végétale et la topographie du terrain. Mais son esprit scientifique se double d'une nature romantique. Il exagère le rôle antitorrentiel de la forêt et l'ampleur

du déboisement. À sa suite, les ingénieurs férus de science se tournent vers la « forêt primitive régénérée » chère aux forestiers, dans laquelle ils fondent leur espoir de développement contrôlé et rationnel de la société. Il est dès lors nécessaire que les forestiers participent aux débats, même si le rapport entre reboisement et inondations ne fait jusqu'alors pas partie de leur ressort...

Coincidence, le conservateur des Eaux et Forêts, Louis Hun publie, l'année même des crues, un ouvrage intitulé *Des inondations et des moyens de les prévenir*, dans lequel il met en exergue non seulement la compétence de l'administration forestière en matière de reboisement des terrains de montagne, mais surtout sa capacité juridique pour régler les conflits engendrés par « l'interdiction et la mise en défens des périmètres de reboisement ». À la suite de la parution de cet ouvrage, l'administration forestière passe à l'offensive en démontrant sa supériorité « naturelle » et « organique » pour promouvoir une politique de reboisement

et de gestion des ressources naturelles, protéger les reboisements, empêcher les empiétements des propriétaires privés ou communaux sur le domaine de l'État, asseoir et définir de nouvelles délimitations, surveiller et punir les pratiques délictueuses des habitants.

Se dessine dès lors le partage des compétences. L'art de l'ingénieur des Ponts est essentiellement technique ; pour ces questions, c'est à lui qu'il faut s'adresser. En revanche, il ne détient pas les armes juridiques et administratives nécessaires pour s'opposer aux causes réelles du déboisement – l'organisation sociale et les pratiques archaïques des paysans des montagnes. Seule l'administration des Eaux et Forêts est un corps de police qui possède le privilège de faire des procès et de les instruire, en plus de disposer, depuis la réforme de 1843, d'agents communaux.

La loi de 1860 appuie cette organisation en imposant une gestion étatique de l'espace montagnard. Elle permet la constitution de périmètres de reboisement

La guerre des Demoiselles

La colère des paysans a commencé bien avant la loi de 1860 sur le reboisement des montagnes. Elle est montée avec l'essor de la société industrielle, entre 1815 et 1880. La Monarchie de Juillet, puis le Second Empire ont créé les conditions de l'affermissement du système capitaliste en aménageant l'espace de manière à décroquer les régions.

Un immense effort fut fait pour développer les moyens de communication terrestres (notamment le chemin de fer, symbole de la révolution industrielle sous le Second Empire), maritimes et fluviaux, afin de stimuler les échanges nationaux et internationaux.

De 1852 à 1857, Napoléon III, sans pour autant renoncer à la tradition populaire de « labourage et pâturage », consacra ses efforts à l'avènement d'une France industrielle et urbaine. L'urbanisation prit une ampleur sans précédent et s'accompagna d'un exode rural vers les centres industriels. Un déséquilibre flagrant s'instaura

alors entre une France industrielle, qui aménageait ses villes et son infrastructure, et une France « rurale » (qui constituait l'électorat de base de l'empereur) dont le mécontentement grandissait, surtout depuis le vote, le 27 mai 1827, d'une loi modifiant le Code forestier.

Cette loi restreignait les droits d'usage des forêts, tels que l'affouage (le droit de ramasser du bois pour se chauffer), les coupes, le marronnage (le droit d'obtenir du bois destiné à la construction ou à la réparation des maisons), la chasse, la pêche et la cueillette. Surtout, elle interdisait le

pacage – le droit de faire paître son troupeau en forêt communale.

L'application de cette loi déclencha de nombreuses révoltes paysannes, dont la Guerre des Demoiselles, née en Ariège, mais qui se propagea aux régions voisines. Cette révolte atteignit son apogée de mai 1829 à 1832, mais se prolongea de façon moins intense jusqu'en 1872. Les « Demoiselles » étaient les centaines de paysans qui

défilaient déguisés en femmes, le visage noirci ou caché (voir la photo ci-dessous), et menaient des véritables actions de guérilla contre, d'une part, les gardes forestiers et les gendarmes qui cherchaient à appréhender les bergers conduisant leur troupeau en forêt et, d'autre part, les grands propriétaires, les maîtres de forges et les charbonniers, qu'ils accusaient de surexploiter la forêt.

— G. D., B. K. et C. V.



© La Guerre des Demoiselles, Ariège, 1829-1832

définis d'après « l'état du sol et les dangers qui en résultent pour les terrains inférieurs », *via* des décrets d'utilité publique. Mis en demeure d'effectuer les travaux de reboisement, les propriétaires bénéficient de subventions. En cas de refus ou d'incapacité, les particuliers sont expropriés sans indemnisation.

Cette loi fait ainsi peser une menace considérable sur la propriété en montagne et les droits coutumiers des populations rurales. Aussi est-elle très mal accueillie, en particulier par les paysans les plus pauvres, les bergers, toujours nombreux à cette époque. Des résistances très vives, voire des révoltes à « main armée » se produisent. C'est ce qui explique l'échec relatif des reboisements (4639 ha sont reboisés en 1861, 11 416 ha en 1862 ; en 1863, sur les 264 projets élaborés, concernant 140 000 ha, seuls 77 aboutissent à la déclaration d'utilité publique et 26 aux travaux) et la nécessité de voter une nouvelle loi en 1882.

Une loi qui ménage l'électorat paysan

La loi de 1882, dite de restauration des terrains de montagne (RTM), est plus modeste. Le suffrage universel étant instauré depuis la chute du Second Empire, il faut ménager l'électorat paysan. Après plus de six années de débat, l'utilité publique des reboisements ne concerne plus que les cas de « dégradation du sol et de dangers nés et actuels » liés aux risques de torrent. Chaque périmètre nécessite désormais le vote d'une loi au parlement après audition des collectifs concernés. Dans les nouveaux périmètres, l'État doit acquérir les terrains par achat amiable ou par expropriation assortie d'une indemnisation.

Par ailleurs, depuis la création du Club Alpin français, en 1874, se développe le tourisme des citadins dans les zones de montagne et, avec lui, un nouveau rôle de protection imparti à la montagne et à la forêt, qui correspondent à l'idée et aux représentations que se font alors de la nature les classes dominantes : il faut protéger la montagne du berger, investir le terrain et l'utiliser à des fins récréatives. La lutte contre le berger va dans le sens à

Avec du recul,
on peut douter
de la pertinence
du discours
des forestiers
du XIX^e siècle

la fois du mouvement des reboiseurs et des puristes de la nature, qui préfèrent les hautes futaies aux taillis dégradés des communaux.

Moins impopulaire que celle de 1860, la loi de 1882 est aussi plus efficace : en dix ans, 95 000 ha sont reboisés au titre de la RTM. Cependant, l'administration forestière juge ces mesures insuffisantes et tiendra le même discours catastrophiste jusqu'au début du XX^e siècle.

Une vision réductrice

Aujourd'hui, au vu des nouvelles connaissances écologiques dont nous disposons et du recul que nous avons sur les acquis scientifiques de l'époque, on peut douter de la pertinence de ce discours. À aucun moment, le rôle de l'urbanisation dans les inondations n'est abordé. Celle-ci a pourtant pu contribuer à leur aggravation. Les travaux d'endiguement, d'élargissement et de rectification des cours d'eau entrepris à l'époque en amont et à l'intérieur des villes, l'artificialisation des surfaces et la construction d'un réseau routier sont autant de causes qui ont pu modifier l'écoulement des eaux superficielles en cas d'intempéries.

Rien n'est dit non plus sur la politique de remembrement du XIX^e siècle, c'est-à-dire l'échange libre de terrains entre particuliers autorisé par une loi de 1824 en vue de réduire le morcellement des parcelles d'une même exploitation agricole. Pourtant, celui-ci s'est accompagné de l'arasage de talus et de l'arrachage de haies, qui ont pu eux aussi modifier l'écoulement des eaux.

Ces questions d'urbanisation et de remembrement sont d'ailleurs toujours d'actualité. Alors que le massif alpin n'a jamais été autant boisé et que les activités agropastorales d'altitude n'ont jamais été aussi réduites, la vallée du Rhône connaît toujours régulièrement des inondations catastrophiques. Difficile, dans ces conditions, d'en rejeter la faute sur les mêmes boucs émissaires qu'au XIX^e siècle...

Quant au contexte climatique des inondations qui se sont succédé à l'époque, il est tout simplement éludé. Le discours livre une vision fixiste du climat. Pourtant, les scientifiques de l'époque sont déjà convaincus

BIBLIOGRAPHIE

G. Decocq, B. Kalaora et C. Vlassopoulos, *La Forêt salvatrice. Reboisement, société et catastrophe au prisme de l'histoire*, Champ Vallon, 2016.

B. Kalaora et A. Savoye, *La Forêt pacifiée. Sylviculture et sociologie au XIX^e siècle*, L'Harmattan, 1986.

R. Larrère et al., *Forêt et paysans : les reboisements en montagne depuis l'Empire*, dans M. Anselme et al., *Tant qu'il y aura des arbres. Pratiques et politiques de la nature 1870-1960*, *Recherches*, n° 45, 1981.



LE MONT VENTOUX (à gauche en 1902, à droite aujourd'hui) a été reboisé de main d'homme en un demi-siècle. Sa restauration a débuté en 1858 avec la plantation massive de chênes truffiers, puis de hêtres et de pins. Entre 1862 et 1865 a débuté l'implantation de ce qui est devenu

la plus grande cédraie française, à partir de graines de cèdre de l'Atlas importées d'Algérie. De nouvelles plantations ont eu lieu à partir de 1922. Plus récemment, d'autres essences résineuses exotiques ont été plantées, tels des sapins de Céphalonie, de Nordmann et d'Andalousie.

que différents climats ont régné sur Terre. La fonte des glaces d'altitude liée à la fin du Petit Âge glaciaire a pu contribuer aux crues. Et le Petit Âge glaciaire, au déboisement des montagnes en abaissant la limite altitudinale de la forêt. L'homme n'est ainsi peut-être pas le seul responsable de l'absence de forêt en altitude. L'ignorance de Surell sur ce point est d'ailleurs étonnante si l'on considère que l'étagement naturel de la végétation est connu des savants depuis la fin du XVII^e siècle. En d'autres termes, la science forestière de la fin du XIX^e siècle était résolument conservatrice et n'avait intégré aucun des apports de la science écologique naissante.

L'histoire se répète-t-elle ?

À bien des égards, le discours politique du XIX^e siècle sur le rôle des forêts dans la lutte contre les inondations présente des similitudes avec celui, actuel, sur le rôle de la forêt dans la préservation du climat. Certains arguments frappent par leur ressemblance, tant ils visent à imposer une certaine forme de représentation et de gestion globales

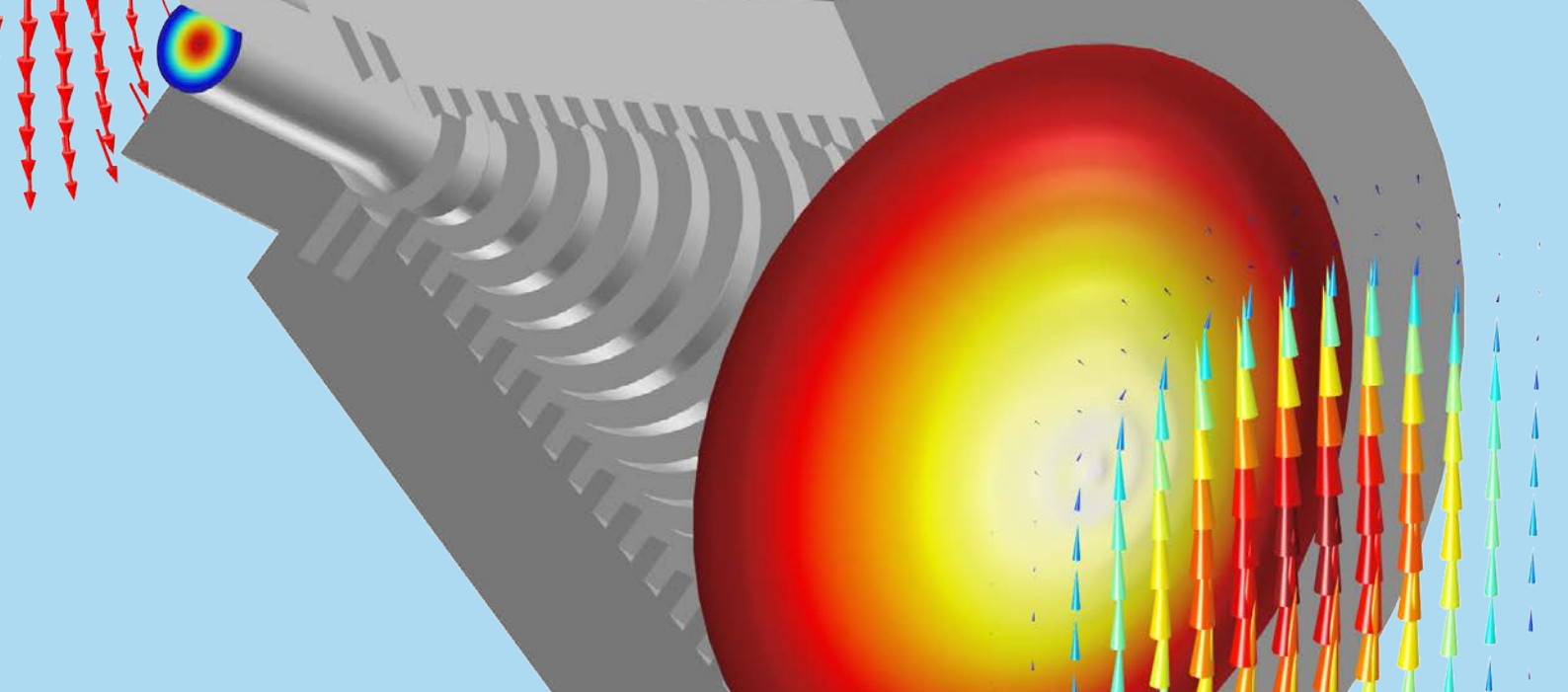
des forêts, aboutissant à la déterritorialisation et à l'exclusion des communautés locales. L'histoire se répéterait-elle ? Sous une forme sans doute différente aujourd'hui, l'argument global de la « lutte contre l'effet de serre et les changements climatiques » occulte les dimensions « écosystémique » et sociale de la forêt en présentant une vision partielle (et partielle) de celle-ci, toujours réduite à un champ d'arbres cultivés de manière intensive.

La forêt salvatrice se retrouve ainsi dans le discours politico-scientifique qui fonde la lutte contre le changement climatique sur la scène internationale. Le reboisement – de préférence dans les régions tropicales – se transforme en enjeu majeur, rattaché aux négociations climatiques, les forêts pouvant servir de puits de carbone et ainsi contribuer à la réduction des gaz à effet de serre. De nombreux acteurs territoriaux sont alors exclus au profit de lobbies financiers et internationaux, sans que soient prises en compte les échelles locales et régionales.

C'est ce qui se produit en particulier avec l'initiative REDD (Réduction des émissions liée à la déforestation et à la dégradation des forêts) qui, sous couvert de

lutte contre la déforestation et l'érosion de la biodiversité, vise notamment à reboiser des terrains dans les pays en voie de développement. Le dispositif entraîne souvent l'exclusion des populations locales pour permettre la plantation massive d'essences généralement exotiques.

En ce début du XXI^e siècle, un discours abstrait et général sur la planète Terre, habillé d'un langage technique et scientifique, a remplacé l'engouement lyrique du XIX^e siècle. Mais l'arbre continue de cacher la forêt... L'arbre salvateur que l'on invoquait hier pour protéger les populations des crues l'est de nouveau aujourd'hui pour sauver le monde des catastrophes climatiques et de la montée du niveau marin. Le timide « verdissement » du langage politique n'est ainsi parfois que la caution écologique d'un discours économique qui, s'il diffère par le style de celui des forestiers du XIX^e siècle, reste profondément scientiste, continuant de véhiculer des *a priori* et des messages stéréotypés sur l'importance des forêts et les bienfaits qu'elles apportent. Et qui, lui aussi, vise à exclure les populations locales au profit d'investisseurs privés et publics. ■



LA MULTIPHYSIQUE POUR TOUS

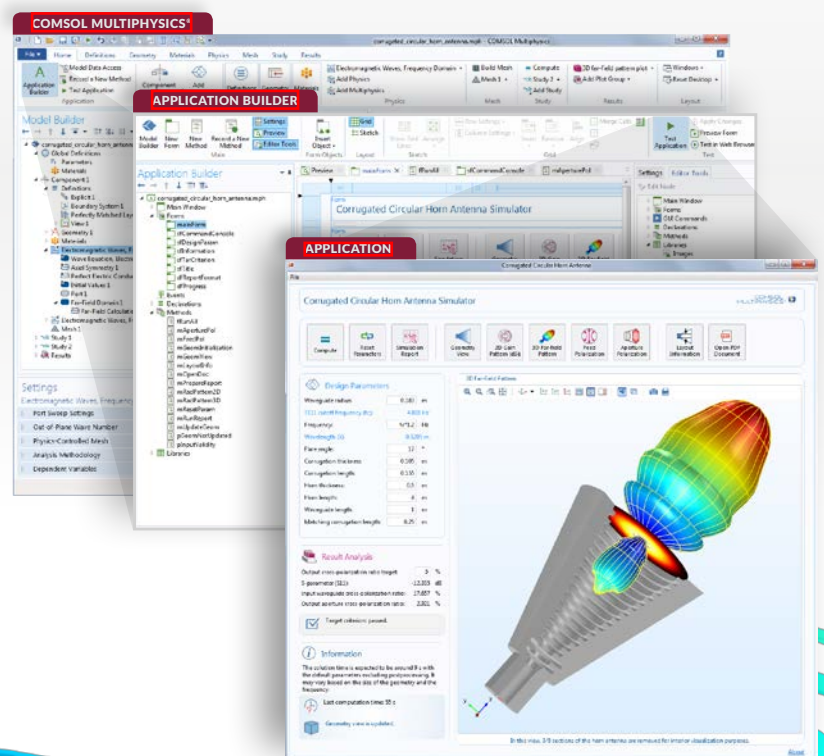
L'évolution des outils de simulation numérique vient de franchir un cap majeur.

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



LOGIQUE & CALCUL

Je le vois, je le démontre, mais est-ce que je le comprends ?

L'un des côtés fascinants des mathématiques est qu'elles recèlent d'innombrables vérités à la fois assez simples et très inattendues. Illustration avec huit exemples étonnants.

Jean-Paul DELAHAYE

Le raisonnement mathématique n'est pas un simple calcul dont on prévoit ce qu'il va donner et dont on connaît à l'avance toutes les limites ; il engendre parfois des miracles.

Nous allons présenter huit petites énigmes et leurs solutions qui vous sembleront inattendues, absurdes ou invraisemblables.

Elles nous font toutes découvrir une propriété assez simple qui réalise une sorte d'exploit *a priori* impossible, ou qui nous place devant une affirmation très éloignée de tout ce qu'on pouvait imaginer.

Miracle 1 - Connaissez-vous la racine de 2 ?

Uniquement de tête, donc sans utiliser ni ordinateur, ni crayon, ni papier... ni smartphone, trouvez le 200^e chiffre décimal après la virgule du nombre $(1 + \sqrt{2})^{1000}$. Oui, c'est possible !

Réponse

$(1 + \sqrt{2})^{1000} + (1 - \sqrt{2})^{1000}$ est un entier, car quand on développe, tous les termes comportant $\sqrt{2}$ s'annulent, comme avec $(1 + \sqrt{2})^2 + (1 - \sqrt{2})^2 = 1 + 2\sqrt{2} + 2 + 1 - 2\sqrt{2} + 2 = 6$.

Or $(1 - \sqrt{2})^{1000}$ est très petit puisque c'est un nombre inférieur à $1/2$ élevé à la puissance 1 000. Sachant que $2^{10} = 1 024$, on voit qu'il est inférieur à $1/2^{1000} = 1/1 024^{100} < 1/(10^3)^{100} = 1/10^{300}$.

Le nombre de l'énoncé est donc la différence entre un entier et un nombre plus petit que 0,000...0001 avec 300 zéros. Tous ses chiffres entre la virgule et le 300^e chiffre après la virgule sont donc des 9.

Cette énigme provient d'une rubrique de problèmes d'Elwyn Berlekamp et Joe Buhler parue dans le numéro d'automne 1999 du bulletin *Emissary*, une publication du MSRI, l'Institut de recherche en sciences mathématiques de l'université de Californie à Berkeley.

Miracle 2 - La somme des chiffres

La magicienne des nombres vous dit : « Prenez un nombre entier quelconque composé de chiffres croissants au sens large, et dont les deux derniers chiffres sont différents (par exemple 1 333 456 778). Multipliez-le par 9. » Elle ajoute : « Je connais la somme des chiffres du résultat. » Pourquoi ?

Réponse

Parce que la somme des chiffres est toujours 9. Avec notre exemple : $9 \times 1 333 456 778 = 12 001 111 002$. La somme des chiffres est bien 9. C'est inattendu, car le nombre de départ peut être très long, et donc celui obtenu en multipliant par 9 aussi.

La démonstration de cet étrange et étonnant résultat se fonde sur la méthode de soustraction apprise à l'école. Partons d'un entier N de 6 chiffres (la méthode s'étend

à un nombre quelconque de chiffres) : $N = a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 a_6$ avec $a_1 \leq a_2 \leq a_3 \leq a_4 \leq a_5 < a_6$.

Le nombre $9 \times N$ est égal à $10 \times N - N$. C'est donc le résultat de la soustraction suivante :

$$\begin{array}{r} a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 a_6 0 \qquad 10 \times N \\ - \quad a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 a_6 \qquad - N \\ \hline b_1 b_2 b_3 b_4 b_5 b_6 b_7 \qquad 9 \times N \end{array}$$

Le chiffre b_7 vaut $10 - a_6$, car il y a une retenue.

Le chiffre b_6 vaut $a_5 + 1 - a_6$, car la retenue précédente a été reportée. L'hypothèse $a_6 > a_5$ assure qu'il n'y a pas de nouvelle retenue à introduire et à prendre en compte pour la colonne suivante.

Le chiffre b_5 vaut $a_4 - a_5$, car $a_5 \geq a_4$ assure qu'il n'y a pas de nouvelle retenue à introduire. De même, b_4 vaut $a_3 - a_4$, b_3 vaut $a_2 - a_3$, b_2 vaut $a_1 - a_2$, et b_1 vaut a_1 . La somme des chiffres de $9N$ est donc : $(10 - a_6) + (a_5 + 1 - a_6) + (a_4 - a_5) + (a_3 - a_4) + (a_2 - a_3) + (a_1 - a_2) + a_1 = 10 - 1 = 9$.

La découverte de ce beau petit résultat semble due à Felix Lazebnik, de l'université du Delaware (*Mathematics Magazine*, vol. 87(3), pp. 212-221, 2014).

Miracle 3 - Un nombre exceptionnel ?

La magicienne des nombres souhaite vous étonner une seconde fois. Elle pose sur la

Le théorème universel des cordes

Pour une courbe donnée, une corde est un segment reliant deux points de la courbe. Entre $x=0$ et $x=1$, la fonction continue $f(x) = \sin(\pi x)$ a des cordes horizontales de toutes les longueurs L possibles, pour L compris entre 0 et 1. On a ainsi dessiné, sur le schéma (1), la corde de longueur 0,6.

Ce n'est pas le cas de la fonction continue $f(x) = \sin(2\pi x)$: on voit clairement sur le schéma (2) qu'elle n'a aucune corde horizontale de longueur L pour $1/2 < L < 1$.

Le théorème universel des cordes stipule que pour toute fonction continue f de l'intervalle $[0, 1]$ dans l'ensemble $\mathbb{R}$ des nombres réels telle que $f(0) = f(1)$, et pour tout entier positif n , il existe une corde horizontale de longueur $L = 1/n$ sur le graphe de f . De plus, pour tout nombre réel L qui n'est pas l'inverse d'un entier positif, il existe des fonctions continues de $[0, 1]$ dans l'ensemble $\mathbb{R}$ des nombres réels et telles que $f(0) = f(1)$ dont le graphe ne comporte aucune corde horizontale de longueur L . En résumé : Les longueurs de cordes horizontales inévitables, et les seules inévitables, sont les inverses des entiers positifs.

La démonstration de la partie affirmative est donnée dans le texte de l'article. La partie négative, démontrée par Paul Lévy, consiste à étudier la fonction $g_L(x) = \sin^2(\pi x/L) - x \sin^2(\pi/L)$, qui n'a pas de corde de longueur L si L n'est pas l'inverse d'un entier.

Sans détailler l'étude de $g_L(x)$, on peut observer le résultat sur les deux dessins suivants. Pour $L = 3/8$, puis pour $L = 3/17$, on a dessiné le graphe de $g_L(x)$ ainsi que la même courbe décalée horizontalement de L vers la droite. Le fait que la courbe et sa version décalée ne se coupent pas, ce que l'on observe, signifie qu'il n'existe pas de corde de longueur L .

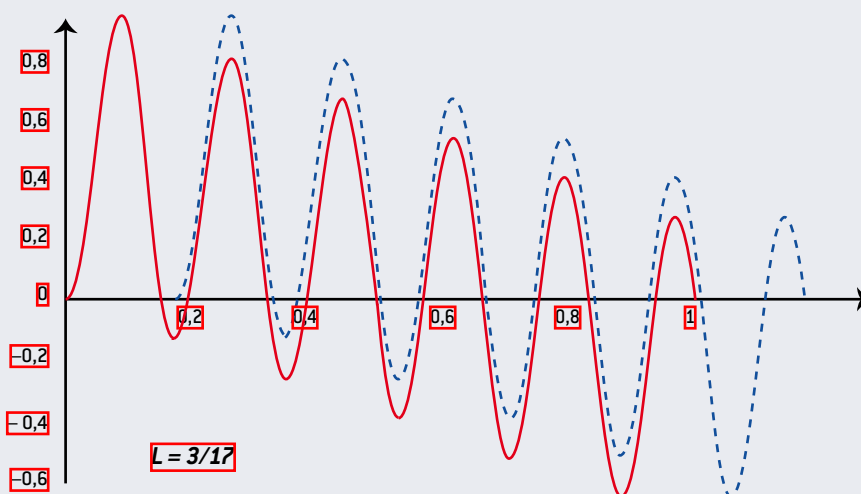
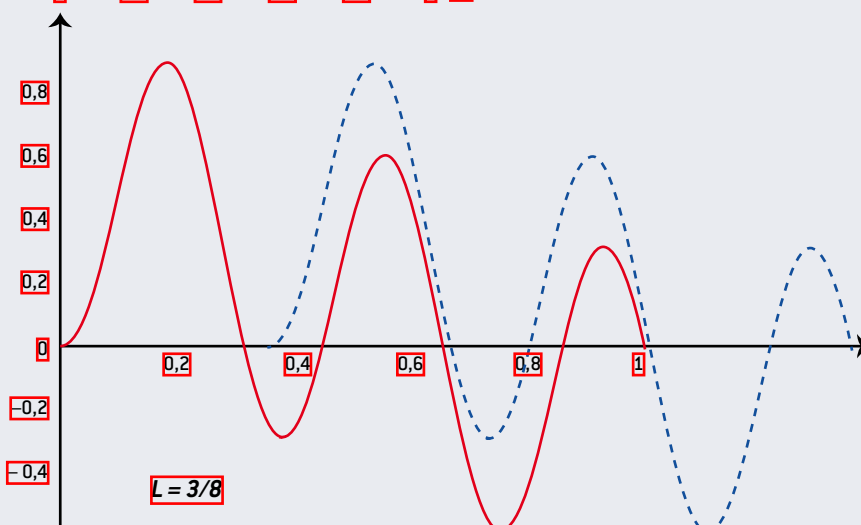
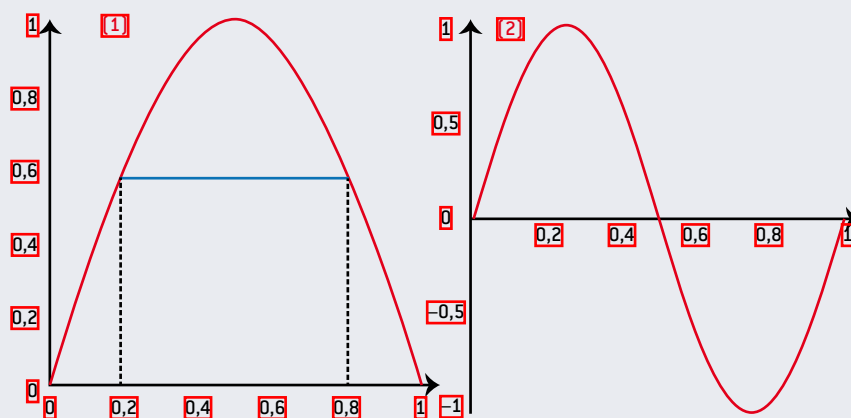


table un verre transparent dans lequel un foulard froissé a été enfoncé. Elle vous donne un papier et un crayon et vous invite à choisir un nombre N de quatre chiffres non tous égaux (par exemple, le nombre 3 333 n'est pas autorisé). Elle demande :

« Classez les chiffres de N par ordre croissant, cela vous donne un nombre X à quatre chiffres ; classez les chiffres de N par ordre décroissant, cela vous donne un nombre Y à quatre chiffres. Calculez $Z = Y - X$. Recommencez à partir de Z les mêmes opérations. Faites-le jusqu'à ce que cela devienne inutile, le Z obtenu redonnant Z . »

En quelques secondes, vous faites ce qui a été demandé et vous disposez donc d'un résultat Z à quatre chiffres. La magicienne tire alors le foulard du verre et le déploie. Il y est écrit 6 174. C'est effectivement le Z que vous avez trouvé. Pourquoi ?

Réponse

Quel que soit le nombre initial N , on finit toujours par tomber sur 6 174 ! Je ne connais aucune preuve par le raisonnement de ce résultat, mais comme c'est une propriété vérifiable par un calcul fini consistant à essayer tous les N possibles, j'ai écrit un petit programme et me suis assuré qu'on obtient effectivement toujours $Z = 6\,174$.

Cette preuve par l'ordinateur est un peu décevante, mais ne laisse aucun doute.

Voici quelques informations supplémentaires sur cette bizarrerie des nombres à quatre chiffres qui, aujourd'hui, n'a aucune explication profonde ou générale. Cette propriété exceptionnelle du nombre 6 174 pourrait être le simple fruit du hasard.

- Aucun autre nombre que 6 174 ne retombe sur lui-même quand on mène le calcul demandé.

- Le nombre maximal d'étapes de calcul pour arriver à 6 174 est 7. C'est par exemple ce qui se passe pour 1 400, qui donne successivement 4 086, 8 172, 7 443, 3 996, 6 264, 4 176, 6 174.

- Le nombre moyen d'étapes de calcul avant d'arriver à 6 174 est 4,7. Ce nombre d'étapes prend toutes les valeurs possibles entre 0 (pour 6 174) et 7. Le nombre X_N d'entiers à quatre chiffres exigeant N étapes de calcul est donné par la liste suivante : $X_0 = 1$, $X_1 = 356$, $X_2 = 519$, $X_3 = 2\,124$, $X_4 = 1\,124$, $X_5 = 1\,379$, $X_6 = 1\,508$, $X_7 = 1\,980$.

Le même miracle se produit quand on part d'un nombre de trois chiffres non tous égaux. Cela conduit invariablement à 495, là encore sans qu'on puisse faire autre chose que le constater. Nous sommes dans une situation où l'on connaît un résultat inattendu,

qu'on prouve par la force du calcul, mais qu'au fond on ne comprend pas.

Le mystère est d'autant plus profond que, si l'on essaye la même chose en partant de nombres de cinq chiffres, ça ne marche plus : tous les nombres conduisent à des cycles (il ne peut pas en être autrement), mais pas nécessairement le même.

Cette formidable propriété de 6 174 et de 495 a été découverte par le mathématicien indien Dattatreya Kaprekar (*Scripta Mathematica*, vol. 15, pp. 244-245, 1949). On trouvera des précisions sur <https://plus.maths.org/content/mysterious-number-6174>.

Miracle 4 - La puissance 2^{29} de Lenstra

Comme pour le premier miracle, vous devez répondre juste en raisonnant, sans utiliser d'ordinateur, ni de papier, ni de crayon... ni de smartphone : sachant que 2^{29} comporte 9 chiffres tous différents, quel est le chiffre qui manque ?

Pas besoin d'être un calculateur prodige qui calculerait vraiment 2^{29} . Même si cela semble impossible, les informations de l'énoncé permettent de trouver la réponse.

Réponse

Pour n variant de 1 à l'infini, le nombre 2^n modulo 9 (c'est-à-dire en comptant comme quand on fait une « preuve par 9 », voir l'encadré ci-contre) vaut successivement 2, 4, 8, 7 (car 16 donne $1 + 6 = 7$), 5 (car 32 donne $3 + 2 = 5$), 1 (car 64 donne 10, qui donne 1), puis de nouveau 2, 4, 8, 7, 5, 1 cycliquement. Puisque $29 = 6 \times 5 - 1$, on en déduit que 2^{29} modulo 9 vaut 5. On sait de plus que tous les chiffres, sauf l'un d'eux, sont présents. S'ils étaient tous présents, la valeur de 2^{29} modulo 9 serait celle de la somme $1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6 + 7 + 8 + 9 = 45$, soit 0 modulo 9. Seule la suppression du 4 conduit à un total qui vaut 5 modulo 9. C'est donc le chiffre 4 qui manque. Ce que l'on vérifie sans peine, cette fois avec une machine, puisque $2^{29} = 536\,870\,912$.

Le problème est dû au célèbre mathématicien néerlandais Hendrik Lenstra, spécialiste des algorithmes de factorisation des entiers.

La preuve par neuf

Le reste de la division par 9 d'un entier positif n , que l'on note « n modulo 9 », est très utile. Il se calcule simplement en faisant la somme des chiffres de n , puis en recommençant si ce que l'on a obtenu demeure supérieur à 9. Et ainsi de suite.

Pour 35 581 929, par exemple, on calcule $3 + 5 + 5 + 8 + 1 + 9 + 2 + 9 = 42$, puis $4 + 2 = 6$; donc 35 581 929 modulo 9 est égal à 6. Pour le justifier, on remarque que 10^n est égal à $99...9 + 1$, c'est-à-dire à 1 modulo 9.

La « preuve par 9 » d'une multiplication

consiste à vérifier que la valeur modulo 9 du résultat qu'on a calculé est le produit des valeurs modulo 9 des facteurs. La méthode fonctionne avec les additions, les soustractions et les divisions.

Supposons que l'on veuille vérifier l'opération $2\,537 \times 823 = 2\,087\,951$. On

calcule les valeurs modulo 9 des facteurs : 2 537 donne $2 + 5 + 3 + 7 = 17$ qui donne 8, et 823 donne $8 + 2 + 3 = 13$ qui donne 4. Le produit de ces valeurs est 32, qui vaut 5 modulo 9. On doit donc trouver 5 modulo 9 pour le résultat 2 087 951. Et en effet, on a $2 + 0 + 8 + 7 + 9 + 5 + 1 = 32$, qui est égal à 5 modulo 9.

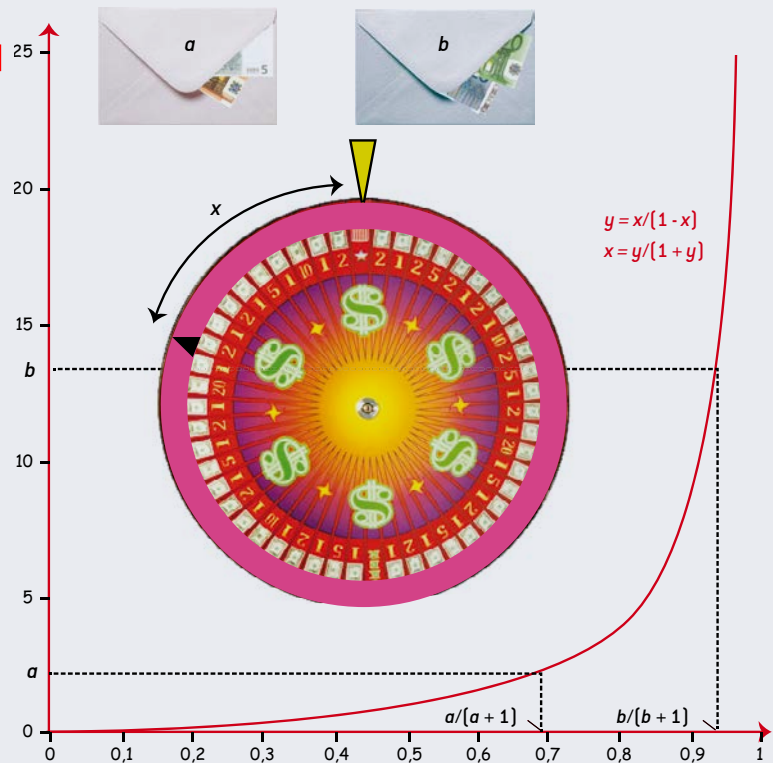
L'opération est donc probablement juste. La certitude n'est pas de 100 %, car on peut faire une erreur qui conduise quand même à la valeur attendue.

Le choix de l'enveloppe

Vous devez choisir entre deux enveloppes contenant des sommes a et b différentes et inconnues. Vous ouvrez la première et trouvez une somme S . Si on vous le permet, avez-vous intérêt à changer d'enveloppe ?

Il est possible de gagner (obtenir le maximum) dans plus de la moitié des cas par la stratégie décrite dans le texte. Elle utilise la fonction $x \rightarrow x/(1-x)$ qui associe bijectivement à tout nombre réel x compris entre 0 et 1 un nombre réel compris entre 0 et l'infini (voir le graphe de la fonction, ci-contre). Une autre fonction continue ayant la même propriété définirait une autre procédure qui marcherait aussi (mais en conduisant à d'autres probabilités de gain).

L'idée de la stratégie est que, en choisissant x au hasard (par exemple à l'aide d'une roulette), on se fixe un seuil $y = x/(1-x)$ à atteindre ; si y n'est pas atteint, on change d'enveloppe, et ce choix sera le bon dans tous les cas où les contenus des enveloppes sont de part et d'autre de y . Globalement, cela donne une probabilité de gagner supérieure à 1/2. Ainsi, si les enveloppes contiennent les sommes $a = 10$ et $b = 100$, la probabilité de faire le bon choix est égale à 54,01 % (voir le texte).



Miracle 5 - Une incroyable stratégie

Vous avez devant vous deux enveloppes contenant deux sommes d'argent différentes. Vous en ouvrez une et regardez son contenu. Maintenant, vous devez choisir soit de garder le contenu de l'enveloppe que vous avez ouverte, soit de prendre l'autre enveloppe sans en connaître le contenu. Il existe une stratégie qui vous permet de faire le bon choix, c'est-à-dire de partir avec l'enveloppe contenant le plus, dans plus de 50 % des cas.

Cela semble absurde puisque vous n'ouvrirez qu'une enveloppe et ne connaîtrez rien de l'autre. L'étonnant est qu'une telle stratégie existe pourtant !

Réponse

Une façon de procéder consiste à :

1) Choisir au hasard uniformément un nombre réel x entre 0 et 1. On fait par exemple

tourner une roue de loterie dont le périmètre est de 1 mètre et qui a une marque sur ce périmètre ; une fois la roue arrêtée, on mesure sur le périmètre la distance x entre la marque et le point d'arrêt de la roue.

2) Calculer $y = x/(1-x)$, qui sera un nombre compris entre 0 et l'infini (voir l'encadré ci-dessus).

3) Si l'enveloppe ouverte contient plus de y euros, la garder ; sinon, prendre l'autre.

Pour démontrer que cette méthode donne plus de 50 % de chances de faire le bon choix, supposons que les enveloppes contiennent respectivement les sommes a et b , avec $a < b$, et calculons la probabilité de prendre la bonne enveloppe (celle qui contient b). Considérons deux cas.

Cas 1. Le nombre y est compris entre a et b . On sera certain de faire le bon choix, car si on a pris la bonne enveloppe, on n'en changera pas, et si on a pris la mauvaise, on en changera.

En utilisant l'équivalence des relations $y = x/(1-x)$ et $x = y/(y+1)$, on sait que le nombre y est compris entre a et b si et seulement si x est compris entre $a/(a+1)$ et $b/(b+1)$. Puisque x est tiré avec une probabilité uniforme entre 0 et 1, la probabilité c que x soit compris entre $a/(a+1)$ et $b/(b+1)$ est la longueur de l'intervalle $[a/(a+1), b/(b+1)]$. Autrement dit, $c = b/(b+1) - a/(a+1)$.

Cas 2. Le nombre y n'est pas compris entre a et b .

La probabilité d'avoir fait le bon choix est alors égale à 1/2. En effet :

– si a et b sont tous deux inférieurs à y , alors on aura choisi au hasard une enveloppe et on en changera, ce qui conduira à une enveloppe choisie au hasard, qui sera donc la meilleure avec une probabilité égale à 1/2.

– si a et b sont tous les deux supérieurs à y , alors on aura choisi une enveloppe au

Les scarabées tomberont tous !

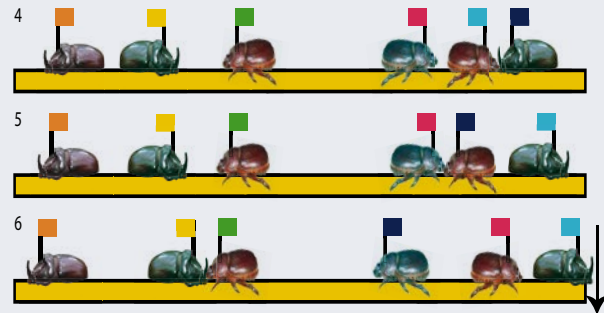
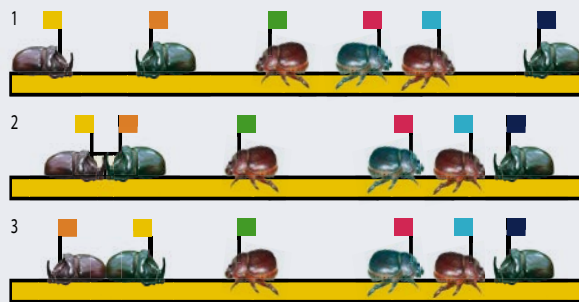
Des scarabées placés et orientés au hasard sur une règle de 1 mètre avancent de 1 centimètre par seconde. Quand deux scarabées se rencontrent, ils font demi-tour. Tous les scarabées tomberont par terre en 100 secondes ou moins.

En effet, imaginons que chaque scarabée porte un

drapeau d'une couleur et que quand deux scarabées se

rencontrent, ils échangent leurs drapeaux. Chaque drapeau avancera dans une direction fixe et tombera donc par terre en moins de 100 secondes avec le scarabée qui le porte. Tous les drapeaux seront donc par terre en 100 secondes ou moins et donc

tous les scarabées qui les portent aussi. On montre sans peine que, dans certains cas, 100 secondes sont nécessaires. Ce problème est cité par Peter Winkler dans son merveilleux livre *Mathematical Mind-Benders* (A. K. Peters, 2007).



hasard et on ne la changera pas. Comme précédemment, on aura encore fait le bon choix avec une probabilité égale à $1/2$.

La probabilité de faire le bon choix quand y n'est pas compris entre a et b est donc de $1/2$. Comme la probabilité pour y de ne pas être dans l'intervalle $[a, b]$ est égale à $1 - c$, en regroupant les deux cas on trouve que la probabilité de faire le bon choix est $c + (1 - c)/2 = 1/2 + c/2 = 1/2 + [b/(b+1) - a/(a+1)]/2$, ce qui est strictement supérieur à $1/2$.

Pour $a = 10$ et $b = 100$, par exemple, la probabilité de garder la meilleure enveloppe est égale à :

$$1/2 + 1/2 \times (100/101 - 10/11) = 54,05 \%$$

Ce troublant miracle semble avoir été découvert plusieurs fois sous des formes variées. On le trouve mentionné, par exemple, par le mathématicien américain David Blackwell (1919-2010) et par le théoricien américain de l'information et spécialiste des probabilités Thomas Cover (1938-2012).

Miracle 6 - Les scarabées vont-ils tomber ?

Une famille de 20 scarabées se trouve sur une règle en bois en position horizontale dont

la longueur est de 1 mètre exactement. Ils sont placés au hasard sur la règle, chacun tourné vers la droite ou vers la gauche, au hasard. Chaque scarabée avance de 1 centimètre par seconde. Quand deux scarabées se rencontrent, ils font tous les deux demi-tour. On suppose que le demi-tour est instantané et que les scarabées sont de longueur négligeable. Quand un scarabée arrive à une extrémité de la règle, il tombe par terre.

Sans connaître aucune donnée plus précise, et c'est là le miracle, on peut être certain que tous les scarabées seront par terre en moins d'une heure, et que c'est encore vrai si, au lieu de 20 scarabées, il y en a 30 ou 100. Pourquoi ? La réponse est donnée dans l'encadré ci-dessus.

Miracle 7 - Le théorème universel des cordes

Certains résultats mathématiques sont totalement déconcertants et semblent presque absurdes. C'est le cas du « théorème universel des cordes » dont j'avoue que, même après en avoir lu la démonstration, je n'arrive pas à en comprendre vraiment la raison. Nous le présentons sous la forme d'une énigme.

On considère une fonction continue f de l'intervalle $[0, 1]$ dans l'ensemble des nombres réels, telle que $f(0) = f(1)$. Par exemple $f(x) = x(1-x)$. On nomme corde horizontale de f de longueur L , tout segment horizontal de longueur L reliant deux points du graphe de f . Les abscisses de ces deux points sont x et $x+L$ et l'on a $f(x) = f(x+L)$ (voir l'encadré page 79).

Selon les fonctions, certaines longueurs de cordes horizontales sont possibles et d'autres non. Ainsi, pour $f(x) = x(1-x)$ ou $\sin(\pi x)$, toutes les longueurs L comprises entre 0 et 1 sont possibles (bien sûr, pour les fonctions f telles que définies plus haut, on est certain qu'elles ont une corde de longueur 1 car, par hypothèse, $f(0) = f(1)$). Mais pour la fonction $h(x) = \sin(2\pi x)$ (dessinée dans l'encadré page 79), il n'existe aucune corde horizontale de longueur strictement comprise entre $1/2$ et 1. D'autres longueurs L que la longueur 1 sont toujours possibles quelle que soit la fonction continue f satisfaisant $f(0) = f(1)$. Lesquelles ?

Réponse

Le résultat est sidérant : pour tout entier positif n , et quelle que soit la fonction f vérifiant les hypothèses, il y aura une corde horizontale de longueur $L = 1/n$. De plus,

pour les nombres L qui ne sont pas des inverses de nombres entiers, il existe des fonctions satisfaisant les hypothèses et n'ayant aucune corde de longueur L .

La partie positive du théorème a été découverte en 1806 par le physicien André-Marie Ampère. Pour la partie négative, il a fallu attendre le mathématicien français Paul Lévy [1886-1971], qui la démontra en 1934.

Démontrons la partie positive. On considère, quel que soit l'entier $n > 1$, la fonction $g(x) = f(x + 1/n) - f(x)$, qui est définie pour tout x compris entre 0 et $1 - 1/n$. On a : $g(0) + g(1/n) + g(2/n) + \dots + g(1 - 1/n) = f(0) - f(1) = 0$. On en déduit que la fonction g ne peut pas être partout strictement positive. Elle ne peut pas non plus être partout strictement négative. D'après le théorème des valeurs intermédiaires (selon lequel une fonction continue qui vaut y en un point y et z en un autre passe par toutes les valeurs comprises entre y et z), g prend donc la valeur 0. Autrement dit, il existe au moins une valeur x_0 tel que $g(x_0) = 0$, c'est-à-dire $f(x_0) = f(x_0 + 1/n)$, et il existe donc une corde horizontale de longueur $1/n$.

La fonction de Paul Lévy, qui montre que ce sont les seules longueurs de corde obligées, est $g_L(x) = \sin^2(\pi x/L) - x \sin^2(\pi/L)$, qui n'a pas de corde de longueur L si L n'est pas l'inverse d'un entier. L'étude qui le montre n'est pas très facile, mais en faisant dessiner par votre ordinateur la fonction $g_L(x) - g_L(x+L)$ pour x compris entre 1 et $1-L$, vous verrez qu'elle n'est jamais nulle (voir l'encadré page 79).

On trouvera une présentation de ce théorème peu connu dans le livre *A Primer of Real Functions*, de Ralf Boas [4^e édition, The Mathematical Association of America, 1996].

Miracle 8 - La période 3 implique le chaos

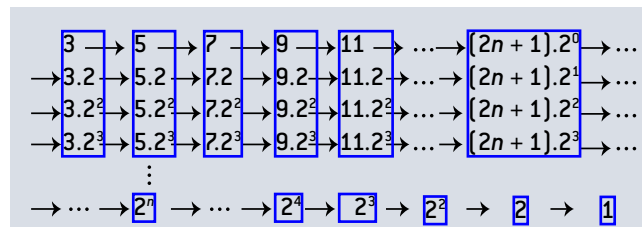
Terminons, cette fois sans donner de démonstrations car elles sont trop compliquées, par un incroyable résultat sur les cycles des fonctions continues.

On considère une fonction continue de $[0, 1]$ dans $[0, 1]$. Pour tout x entre 0 et 1, on considère la suite numérique suivante : $x, f(x), f(f(x)), f(f(f(x))), \dots, f(f(\dots(x)\dots))$.

Si cette suite retombe sur le nombre x initial, on dit que l'on a un cycle. Le plus petit entier pour lequel cela se produit est l'« ordre » du cycle. Par exemple, la fonction $f(x) = 1 - x$ est telle que tout $x \neq 1/2$ engendre un cycle d'ordre 2 : en partant de $x = 1/3$, on a le cycle $1/3 \rightarrow 2/3 \rightarrow 1/3$.

On a la stupéfiante propriété suivante, découverte plusieurs fois, en particulier par Tien-Yien Li et James Yorke (« Period three implies chaos », *The American Mathematical Monthly*, vol. 82 [10], pp. 985-992, 1975) : si f a un cycle d'ordre 3, alors elle a des cycles de tout ordre. Mais l'inverse est faux : pour tout $k \neq 3$, il existe des fonctions ayant un cycle d'ordre k et n'ayant pas de cycle d'ordre 3.

Le théorème a été rendu plus précis en 1964 par le mathématicien ukrainien Oleksandr Charkovski, qui a découvert une relation de nécessité très subtile et totalement inattendue entre les ordres des cycles. L'ordre 3 implique l'ordre 5 qui implique le 7, qui implique le 9, etc. Mais aussi,



le 6 implique le 10, qui implique le 14, etc. Ce système d'implication est défini par le tableau ci-dessus qu'on doit lire ligne par ligne, du haut vers le bas.

Ce tableau ne peut pas être simplifié, car il existe par exemple des fonctions ayant des cycles d'ordre 10 (donc 14, 18, etc.), mais aucun cycle d'ordre 6, 3, 5, 7, ... Pour des détails, voir Chung-Wu Ho et Charles Morris, « A graph-theoretic proof of Sharkovskii's theorem on the periodic points of continuous functions », *Pacific Journal of Mathematics*, vol. 96 [2], pp. 361-370, 1981 (<http://bit.ly/2haC9LH>) et l'article *Sharkovskii's theorem* sur Wikipedia.

Qui aurait imaginé que le seul fait d'être une fonction continue d'un intervalle dans lui-même cachait ce tableau mystérieux ?

L'AUTEUR



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

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



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

SCIENCE & FICTION

Les crocodiliens, divinités ou acteurs de séries B

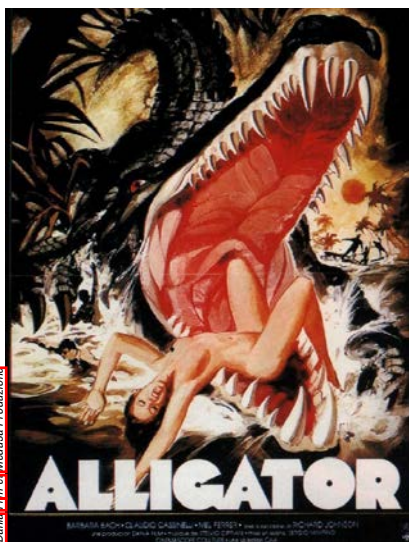
De l'Égypte antique jusqu'à Hollywood, les crocodiliens inspirent la peur par leur taille, leurs crocs et leur goût pour la chair humaine.

Jean-Sébastien STEYER et Roland LEHOUCQ – Illustration : Marc BOULAY

Les bestiaires fantastiques sont souvent inspirés de la biodiversité réelle, actuelle ou fossile : dinosaures, tortues, primates, insectes, céphalopodes ou encore suidés, de nombreux groupes zoologiques sont repris et magnifiés dans les œuvres de fiction. Ces animaux nous inspirent parce qu'ils présentent des morphologies, des tailles ou encore des modes de vie extravagants selon les normes humaines. Parmi eux, les crocodiliens, tantôt dieux mythologiques, prédateurs sanguinaires, ennemis jurés du Capitaine Crochet ou supervillains, méritent une mention spéciale.

Les crocodiliens (ou *Crocodylia* dans le jargon des zoologistes) rassemblent aujourd'hui 23 espèces de reptiles ovipares plutôt amphibies, tropicaux et carnivores – bien que le gaviau du Gange, *Gavialis gangeticus* au long museau fin, soit piscivore. Le genre *Crocodylus* regroupe à lui seul 13 espèces et demeure le plus répandu dans la bande intertropicale, d'Amérique centrale jusqu'en Indonésie, en passant par l'Afrique avec le célèbre et dangereux crocodile du Nil (*Crocodylus niloticus*).

Dans l'Égypte antique, le dieu Sobek, représenté par un humain à tête de crocodile, était associé à l'eau et à la fertilité. Être dévoré par un crocodile vous élevait au rang d'« enfant chéri du dieu » et la présence de nombreux individus dans le Nil annonçait des crues favorables aux récoltes. Des temples ainsi qu'une célèbre



LE GRAND ALLIGATOR, sorti en 1979, illustre parfaitement le genre de film de série B où un crocodilien terrorise la population. Ce film s'inspire fortement des *Dents de la mer* mais aussi de *King Kong*, où le sacrifice d'une jeune femme pourrait apaiser le monstre.

grotte renfermant des momies de crocodiles sont dédiés à Sobek dans la ville de Médinet el-Fayoum, autrefois nommée Crocodilopolis par les Grecs. D'autres espèces de crocodiliens figurent également dans les mythes de différents peuples : ainsi, chez les Mayas, Zipacna, sorte de démon violent et arrogant, créateur des montagnes, est représenté par un grand caïman, tandis qu'une légende papoue raconte que Kabakmeli, crocodile divin, a créé le monde et ses habitants.

Le comportement parfois très agressif des crocodiliens et leur taille souvent impressionnante (avec un record de 6,17 mètres détenu par un crocodile marin, *C. porosus*, qui vivait en captivité aux Philippines jusqu'en 2011) inspirent les auteurs et réalisateurs qui en font alors de terribles monstres mangeurs d'hommes. Au cinéma, les crocodiles sont devenus en eau douce ce que les requins étaient en mer : une gueule affamée garnie de dents aiguisées surgies des profondeurs. Ainsi, après l'énorme succès des *Dents de la mer* (Steven Spielberg, 1975), de nombreuses productions ont tenté d'exploiter le filon avec des crocodiliens plus ou moins réalistes, comme avec *Les Dents de la mort* (Arch Nicholson, 1987) et de nombreux films de série B dont les titres en disent long sur la qualité des scénarios.

Outre une morphologie souvent exagérée avec une surenchère de crêtes, d'écaillés et de dents débordant des mâchoires, le dénominateur commun des



SARCOSUCHUS IMPERATOR, un des plus grands crocodiliens, pouvait mesurer près de 12 mètres. La fonction de la bosse à l'extrémité de son museau reste une énigme.

« crocodiloïdes » de ces films reste souvent le gigantisme de l'espèce en question. Ainsi, le record du plus grand crocodilien fictif est détenu par *Crocosaur*, visible dans le très dispensable *Mega Shark vs. Crocosaurus* (Christopher Ray, 2010) : sa taille varie, selon les séquences du film, de 60 à plusieurs centaines de mètres ! Ces mensurations variables ne sont pas sans rappeler celles de *Godzilla* (Ishirō Honda, 1954), autre géant improbable dont la masse empêcherait tout déplacement au sol, par effondrement sous son propre poids.

Dans la réalité, les plus grands crocodiliens sont à rechercher dans les strates géologiques de notre planète. *Sarcosuchus imperator*, dont un squelette assez bien conservé est exposé à Paris dans la galerie de paléontologie du Muséum national d'histoire naturelle, fait environ 12 mètres pour une masse estimée à 8 tonnes. Ce crocodilien bien en chair (*sarco* signifie « chair » en grec), et dont les premiers fossiles ont été découverts dans les années 1940 par des géologues français au cœur du Sahara, vivait au Crétacé inférieur, il y a environ 112 millions d'années, en Afrique notamment. Grâce à sa taille imposante, il n'avait sans doute rien à craindre des dinosaures carnivores contemporains.

D'autres fossiles de *Sarcosuchus* parfois plus complets ont été découverts en 1997 et 2000 par le paléontologue américain Paul Sereno et son équipe : ceux-ci l'ont alors nommé « Supercroc » sans savoir que ce

sobriquet allait devenir plus tard le titre d'un autre film de série B (Scott Harper, 2007) mettant en scène un crocodile géant qui terrorise Los Angeles... Quoi qu'il en soit, *Sarcosuchus* est remarquable par son museau long et fin, qui présente à l'avant une sorte de bosse naturelle logeant les narines externes, et dont l'éventuelle fonction (olfaction, vocalisation ou autre) demeure très discutée. Cette étrange « bulle osseuse » évoque celle des gavials mâles, avec lesquels l'espèce fossile n'est cependant pas directement apparentée.

Un cuirassé en eaux douces

Un autre trait morphologique rencontré chez de nombreux crocodiliens, est la présence d'ostéodermes sur le corps, sortes d'écailles dermiques reposant sur des plaques osseuses et protégeant l'animal contre les agressions extérieures. Cette armure dermique recouvre le dos, et parfois le ventre de l'animal.

Les ostéodermes sont également connus chez des stégocéphales (grands amphibiens anciens) et de nombreux reptiles, qu'ils soient fossiles (phytosaures, aétosaures, certains dinosaures, etc.) ou actuels (certains lézards).

Des analyses de structure interne, effectuées en microtomographie à rayons X (c'est-à-dire à l'aide de puissants scanners X), ont montré que ces étonnantes écailles présentent des lignes d'arrêt de croissance qui enregistrent le rythme de vie et la croissance

de l'animal, de la même façon que les cernes marquent la croissance des troncs d'arbres. Ainsi, grâce à ses ostéodermes, on sait que *Sarcosuchus* mettait 50 à 60 ans pour atteindre sa taille adulte. En outre, ces écailles osseuses très ornementées sont aussi percées d'un réseau de canaux vasculaires qui leur confère, en plus de leur rôle protecteur, une fonction thermorégulatrice : les ostéodermes permettent aux crocodiliens de capter ou d'évacuer plus rapidement la chaleur. Les canaux sanguins qui irriguent les ostéodermes en profondeur apparaissent en surface sous la forme de petits trous.

Cette morphologie est bien respectée dans la récente représentation que le film *Suicide Squad* (David Ayer, 2016) fait de Killer Croc, un personnage de l'univers *DC Comics*. Waylon Jones, c'est son nom, est victime d'une grave maladie de peau qui recouvre dès son plus jeune âge son corps d'écailles et le transforme en homme-crocodile. Son apparence monstrueuse conduit à son exclusion de la société. Et il est amené à travailler dans un cirque. Cette biographie fictive évoque clairement celle, malheureusement bien réelle, d'un certain Joseph Merrick, au XIX^e siècle, plus connu sous le nom d'*Elephant Man*. Des vies bouleversantes qui font couler bien plus que des larmes de crocodile. ■

Jean-Sébastien STEYER est paléontologue au CNRS-MNHN, à Paris. Roland LEHOUCQ est astrophysicien au CEA, à Saclay. Marc BOULAY est sculpteur numérique.

ART & SCIENCE

Pleurer sans fondre en larmes

Les Pleureuses est un projet artistique fondé sur les traitements de surface. Des formes humaines apparaissent sur des plaques en verre modifiées de façon à guider le comportement de gouttes d'eau : celles-ci deviennent des pixels liquides.

Loïc MANGIN

C'est l'hiver. Le givre, le brouillard, la pluie envahissent les cieux et... nos fenêtres, celles de nos maisons et de nos véhicules.

Ces surfaces vitrées sont alors constellées de gouttes dont, parfois, on suit le parcours chaotique. D'un coup, l'une se libère et descend rapidement, en zig zag, et entraîne dans sa chute celle qu'elle rencontre. Les paramètres en jeu sont nombreux, mais on peut tenter de les maîtriser. C'est ce qu'a fait l'artiste Samuel Bianchini, avec l'aide du CEA-Iramis, à Saclay, et plus particulièrement Pascal Viel, du département Nanosciences et innovation pour les matériaux, la biomédecine et l'énergie.

Le résultat de cette collaboration, née en 2010, a été exposé cet automne à la Crypte d'Orsay, dans l'Essonne. Il s'agit de trois grandes plaques de verre sur lesquelles des gouttes d'eau tombent, glissent et s'arrêtent pour dessiner en fin de compte trois portraits de femmes, ce sont *Les Pleureuses*. Ce nom évoque les femmes dont on loue les services pour feindre un chagrin lors des funérailles.

Cette tradition, déjà attestée en Mésopotamie et en Égypte antique, existe encore aujourd'hui, notamment au Royaume-Uni, au Moyen-Orient et en Asie. Par exemple, au Rajasthan (en Inde), les familles des défunts de haut rang recrutent des pleureuses (les *rudaali*) dans les castes inférieures pour exprimer un chagrin à la place des femmes dont le statut social interdit ce type de manifestation. En France, ce service a disparu

dans les années 1960, mais on distingue des pleureuses sur le monument aux morts du cimetière du Père-Lachaise, à Paris.

Revenons à Orsay. Comment *Les Pleureuses* apparaissent-elles ? Pour comprendre, on doit s'approcher du verre et s'intéresser à son revêtement. C'est invisible, mais le matériau est ponctué de zones hydrophiles (qui aiment l'eau) sur un fond hydrophobe (qui repousse l'eau). Ces zones hydrophiles sont des sortes de pixels où des gouttes se forment et se stabilisent de façon à matérialiser un motif global, en l'occurrence des femmes en train de pleurer.

traiter chimiquement une surface en verre s'apparente à modifier la surface d'un glaçon en train de fondre

Obtenir ce rendu n'a pas été une mince affaire ! En effet, ce type de traitement qui modifie les propriétés de surface (on parle de fonctionnalisation) est plutôt facile avec un métal ou du plexiglas. Avec ce dernier, on peut par exemple transformer les polymères qui le constituent par des procédés classiques de chimie organique. Il en va autrement avec le verre, plus noble pour une œuvre d'art. En effet, c'est un matériau dynamique, en perpétuelle évolution. Une surface de verre peut perdre jusqu'à un micromètre d'épaisseur par an (c'est une dissolution), ce qui correspond à plusieurs couches de molécules

par jour. La chimie s'apparente alors à traiter la surface d'un glaçon en train de fondre !

La solution retenue relève un peu de la sérigraphie. Le verre initial, feuilleté, est d'emblée hydrophile. Un premier traitement, mécanochimique, renforce cette propriété. Puis on rend hydrophobes certaines zones, les futurs pixels (en forme de goutte de 3 millimètres de largeur sur 6 de hauteur), grâce à des silanes. Ces composés à base de silicium sont dotés de deux fonctions chimiques de sorte que, d'une part, ils interagissent avec le verre, et d'autre part, repousse l'eau. On obtient alors un fort contraste entre les deux types de revêtements. L'eau – désionisée pour éviter les traces –, coule d'un dispositif conçu par Bruno Coltrinarì, le dernier artisan verrier du CEA.

Après plusieurs semaines d'exposition, le contraste a bien résisté. Et l'on peut imaginer diverses applications pour les techniques mises en œuvre dans *Les Pleureuses*. Samuel Bianchini et Pascal Viel ne comptent d'ailleurs pas s'arrêter là et réfléchissent à de nouveaux projets où les images d'eau seraient moins évidentes au premier regard.

Les Pleureuses ont désormais quitté la crypte qui, étonnamment, a été construite par un chevalier pour... pleurer son épouse. Toutefois, on peut encore admirer l'une d'elles à New York, jusqu'au 11 mars, dans un endroit au nom prédestiné, la *Waterfall Gallery* ! ■

Le site de Samuel Bianchini : dispotheque.org
Waterfall Gallery : www.waterfall-gallery.com

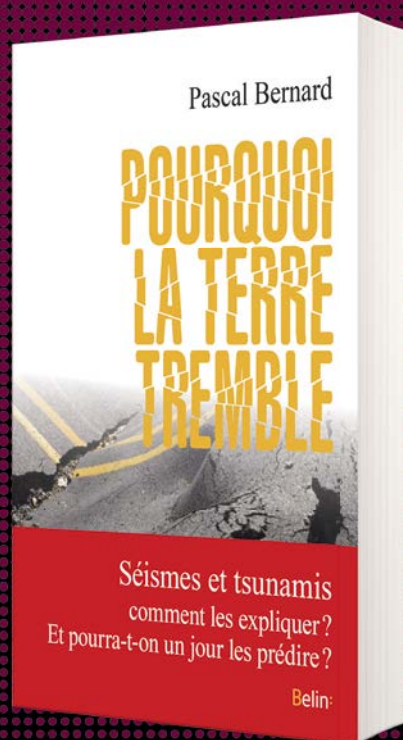
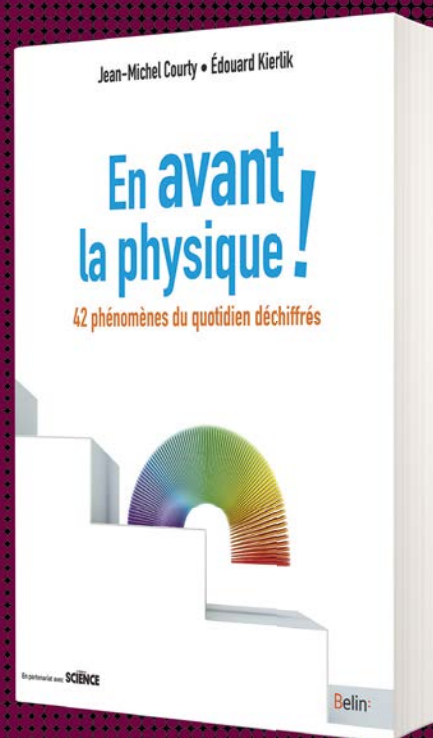


Une pleureuse
formée... de larmes.

Le nouvel opus de deux vulgarisateurs hors pair !

Une bouteille qui chante. Un verre de chocolat soluble qui tinte. Un carillon dont les cloches homothétiques couvrent toute la gamme. Un escalier qui joue du clairon. Une sculpture qui filtre certains sons... Et en avant la physique !

18,5 x 24,5 cm - 192 pages - 24 euros



Séismes et tsunamis, comment les expliquer ? Et pourra-t-on un jour les prédire ?

Une découverte passionnante de la lente évolution de nos connaissances sur les séismes, qui se lit comme un roman !

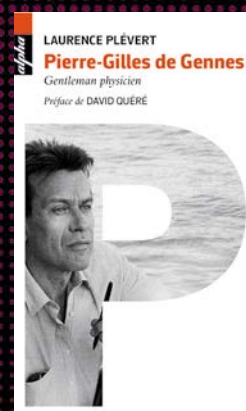
15 x 22 cm - 288 pages - 19,50 €

Et aussi...

Dans notre collection de livres de poche



10 x 17 cm - 304 pages - 9,90 €



10 x 17 cm - 392 pages - 9,90 €

IDÉES DE PHYSIQUE

Bois sec, bois humide

Mesurer avec précision et rapidité la teneur en eau du bois serait très utile pour les industriels. Le défi pourrait être relevé en sondant le matériau avec des ondes électromagnétiques.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Ajoutons une bûche dans la cheminée pour ranimer un feu qui s'éteint doucement. Las, au lieu de flamber vivement, la voilà qui peine à s'enflammer et qui dégage une épaisse fumée : c'est le signe d'un bois sans doute trop humide ! Ce désagrément domestique devient, dans le contexte de la filière bois-énergie, un problème industriel. En outre, acheter du bois humide a un double inconvénient : d'une part, il apporte moins d'énergie que le bois sec ; d'autre part, on a payé inutilement le poids de l'eau qu'il contient.

Mesurer efficacement l'humidité du bois est donc une question importante. Si elle n'a pas encore de réponse satisfaisante, on dispose désormais de pistes prometteuses, comme nous le verrons.

Le taux d'humidité d'un bois est défini comme la fraction en masse d'eau par rapport à sa masse totale : à 0 %, le bois est totalement sec (anhydre), tandis qu'à 100 %, on n'a pas de bois, mais uniquement de l'eau. Le pouvoir calorifique du bois sec est considérable. Il est de 18 gigajoules (GJ) par tonne, soit 45 % de l'énergie que peut fournir la

même masse de pétrole. Le bois vert fraîchement coupé contient, lui, environ 50 % d'eau. Une tonne de bois vert ne contient donc qu'une demi-tonne de matière sèche ; qui plus est, lorsque ce bois brûle, on perd 1,15 GJ pour vaporiser l'eau présente.

Le bois vert fournit donc moins de 8 GJ par tonne, d'où l'intérêt de le faire sécher. Or c'est un processus long, qui mobilise de grands espaces de stockage. Un an de séchage à l'air sous abri réduit l'humidité à 30 % ; deux ans, à 20 %. Mais ce sont là des moyennes, qui ne permettent pas de

LE BOIS HUMIDE BRÛLE TRÈS MAL et dégage beaucoup moins d'énergie que la même masse de bois sec. Il est donc intéressant de pouvoir mesurer avec précision le taux d'humidité du bois. Ici, un appareil fondé sur la mesure de la résistivité électrique.



LES AUTEURS



Jean-Michel COURTJY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'université Pierre-et-Marie-Curie, à Paris. Ils remercient Stéphane Holé. Leur blog : www.scilogs.fr/idees-de-physique

BIBLIOGRAPHIE

M. Merlan, *Study and realization of a microwaves system to estimate the moisture content in wood biomass*, Thèse de doctorat de l'université Pierre-et-Marie-Curie, février 2016.

W. L. James, *Electric moisture meters for wood*, rapport FPL-GTR-6, U. S. Dept. of Agriculture, 1988.

déterminer avec certitude l'humidité d'un bois donné.

Une solution est le passage à l'étuve. On place un échantillon de bois préalablement pesé sous une atmosphère sèche à plus de 100 °C, jusqu'à ce que sa masse n'évolue plus. Le bois est alors anhydre. En le pesant, on en déduit son taux d'humidité initial. C'est l'une des méthodes de mesure les plus précises, mais elle est lente (il faut environ 24 heures) et elle ne porte que sur un échantillon. Que faire lorsqu'on doit gérer des stocks importants et hétérogènes ?

Mesurer la résistivité

Un procédé aujourd'hui très répandu est fondé sur la différence de résistivité électrique entre le bois sec et l'eau. Le bois sec, constitué de cellulose et de lignine, est un isolant électrique (un « diélectrique »), tandis que l'eau, surtout si elle est chargée en ions, est conductrice.

L'humidimètre typique est constitué de deux électrodes, deux sondes longues de quelques millimètres et écartées de quelques centimètres, que l'on plante dans le matériau à tester (voir la figure page précédente). Il convertit alors la valeur de résistance trouvée en teneur en eau, grâce à des abaques qui tiennent compte de la température, mais aussi de l'essence du bois.

Entre 5 % et 30 % d'eau, la résistivité du bois varie de plusieurs ordres de grandeur. On a ainsi de bonnes mesures pour des matériaux usuels massifs et bien homogènes, tels que les bois de charpente. Mais pas

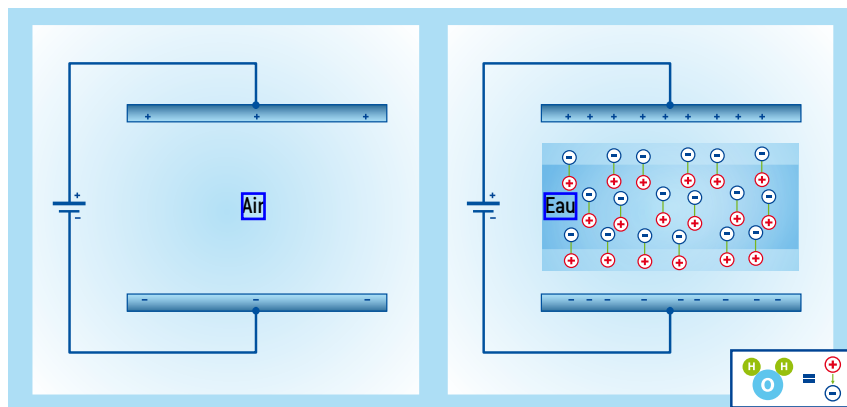
pour les plaquettes forestières, petits morceaux de bois peu épais de quelques centimètres de longueur que l'on emploie de plus en plus comme bois de chauffage. Comment mesurer leur humidité moyenne, qui varie d'une plaquette à l'autre étant donné qu'elles sont très inhomogènes et que leurs surfaces sont dégradées ?

Une solution est de s'appuyer sur le comportement de l'eau en présence d'un champ électrique. La molécule d'eau, H_2O , est polaire, c'est-à-dire que les charges électriques sont inégalement réparties en son sein. On a un excédent de charges négatives sur l'atome d'oxygène, compensé par un excédent de charges positives sur les deux atomes d'hydrogène. Plongée dans un champ électrique, une molécule d'eau s'oriente ainsi préférentiellement dans la direction du champ. Cette orientation privilégiée engendre un champ électrique opposé au champ initial : la présence d'eau modifie donc la réponse électromagnétique du système.

À titre d'illustration, considérons un condensateur constitué de deux plaques métalliques séparées par de l'air. Lorsqu'on applique une différence de potentiel électrique V entre ces deux armatures (voir la figure ci-dessous), ces dernières se chargent électriquement et créent entre elles un champ électrique uniforme et égal au quotient de la différence de potentiel sur la distance entre les plaques.

Supposons maintenant que de l'eau soit présente entre les plaques. Les molécules H_2O s'orientent selon le champ électrique et ont ainsi un effet d'écran qui réduit l'influence des charges présentes sur les plaques. La

LA CHARGE ÉLECTRIQUE des plaques d'un condensateur dépend du matériau présent entre ces plaques. Lorsque ce matériau est composé de molécules polaires, comme l'eau (H_2O), il y a accumulation de charges à proximité des plaques. Celles-ci se chargent alors davantage, pour les compenser.



différence de potentiel V étant fixée par le générateur, la charge sur les plaques doit augmenter : cela revient à une augmentation de la capacité du condensateur (rapport de la charge sur la tension).

Cet effet traduit le fait que la polarisation du matériau entraîne une accumulation de charges (positives d'un côté, négatives de l'autre) au voisinage des plaques du condensateur, accumulation qui provoque l'arrivée de charges compensatrices.

La charge augmente ainsi d'un facteur qui dépend du matériau séparant les deux plaques et qui a pour nom « permittivité relative ». Ce facteur vaut 80 pour l'eau, ce qui est considérable. Sachant que la permittivité relative du bois anhydre est plutôt de l'ordre de quelques unités, on prévoit que la permittivité du bois humide sera bien sensible à sa teneur en eau.

C'est ce qu'a vérifié l'équipe de Stéphane Holé, de l'université Pierre-et-Marie-Curie. Ces physiciens ont conçu un dispositif constitué de deux plaques d'aluminium mesurant 100 centimètres par 50, séparées de 70 centimètres, qui permet de sonder un volume important. Dans l'air, la capacité de ce condensateur n'est que de 6,3 picofarads, mais avec des plaquettes de bois plus ou moins humide, elle peut frôler les 200 picofarads.

Hélas, ces mesures très sensibles requièrent un environnement très bien contrôlé électriquement, et notamment l'absence d'humidité sur les plaques – des conditions difficiles à réaliser sur un convoyeur industriel ou dans un camion de transport.

Des ondes qui sondent

La piste diélectrique ne s'arrête cependant pas là, car la permittivité relative a d'autres signatures. Notamment la réduction de la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans le matériau par rapport à leur vitesse dans le vide (300 000 kilomètres par seconde). Plus subtilement, le facteur d'atténuation de l'onde par le matériau est aussi modifié. Autrement dit, la permittivité relative détermine à la fois l'indice de réfraction du matériau et son pouvoir absorbant, c'est-à-dire tout ce qui pilote les propriétés de propagation des ondes électromagnétiques



dans le matériau, ou de leur réflexion, transmission et pénétration au niveau de sa surface. Du bois humide et du bois sec soumis au même rayonnement – des ondes hertziennes en pratique – se distingueront ainsi par leur réponse électromagnétique.

L'un des dispositifs envisagés consisterait à enfouir dans l'amas de plaquettes une antenne dite demi-onde, constituée de deux tiges conductrices alimentées électriquement en leur point de jonction. La puissance maximale émise dans le vide par une telle antenne s'obtient à une fréquence d'environ 300 mégahertz pour une tige longue de 50 centimètres. Mais cette fréquence est divisée par l'indice de réfraction lorsque l'antenne est plongée dans un matériau diélectrique.

On obtient des fréquences relativement basses, autour de 100 mégahertz, qui ont l'avantage d'être peu atténuées et donc de sonder un volume important du bois. Par ailleurs, la longueur d'onde correspondante (quelques dizaines de centimètres) est suffisamment grande pour que l'antenne voie un matériau homogène autour d'elle, gommant ainsi les hétérogénéités d'agencement, de taille et de forme des plaquettes.

Les premiers tests réalisés par Stéphane Holé sont prometteurs : la sensibilité à la teneur en eau s'est révélée élevée, et la mesure d'humidité assez précise (à 3 % près) et relativement indépendante de l'essence du bois. Mais, comme d'habitude, il faudra déployer le dispositif sur le terrain pour confirmer ces résultats.

AFIN DE MESURER CONVENABLEMENT

l'humidité de plaquettes forestières, une voie explorée consiste à sonder la masse de ces plaquettes à l'aide d'ondes hertziennes émises par une antenne : l'interaction de ces ondes avec le matériau dépend sensiblement de sa teneur en eau, et la longueur d'onde est assez grande pour que ces ondes soient indifférentes aux détails d'agencement, de taille et de forme des plaquettes.



Retrouvez la rubrique
Idées de physique sur
www.pourlascience.fr

QUESTION AUX EXPERTS

L'inversion du champ terrestre sera-t-elle une catastrophe ?

La polarité du champ magnétique de la Terre a changé plusieurs fois au cours des ères géologiques. Sans dégâts !

Henri-Claude NATAF



Le champ magnétique de la Terre a un pôle Sud et un pôle Nord. Or ces pôles magnétiques vont s'inverser. Dans 1 000, 10 000, 100 000 ans, plus ? Les géophysiciens ne sont pas capables de le prévoir, mais en tout cas cette inversion ne déclenchera aucune catastrophe.

Le champ magnétique terrestre n'a rien de bien impressionnant. En surface, son intensité est d'une cinquantaine de microteslas, soit 100 fois moins que celle d'un aimant de réfrigérateur. Il suffit cependant à orienter une petite aiguille aimantée – une boussole – et à former un bouclier contre les particules cosmiques chargées, qui s'étend sur plus de dix fois le rayon de la Terre.

Le champ magnétique de notre planète est dû aux courants électriques qui circulent dans le noyau terrestre, une grosse boule de fer liquide dont la température dépasse les 4 000 °C. Le fer liquide est animé de mouvements de convection (les parties les plus chaudes, moins denses, tendent à monter par poussée d'Archimède). En raison de ces mouvements, de l'ordre du millimètre par seconde, le champ magnétique induit des courants électriques, qui eux-mêmes entretiennent le champ.

Le champ terrestre est principalement dipolaire, comparable à celui que produirait un aimant à peu près aligné sur l'axe de rotation de la Terre. Aujourd'hui, le pôle Sud magnétique se trouve... près du pôle Nord géographique, mais il n'en a pas toujours

été ainsi. Loin de là : l'enregistrement par les roches du champ magnétique passé nous montre que sa polarité peut s'inverser en quelques milliers d'années. Cela s'est produit à un rythme aléatoire, mais plutôt soutenu, de plusieurs inversions par million d'années au cours des dernières ères géologiques !

La blogosphère regorge de scénarios effrayants sur les conséquences de telles inversions : changement du sens de rotation de la Terre, séismes et tsunamis gigantesques, catastrophe climatique, extinctions massives d'espèces, paralysie des circuits électriques, irradiations mortelles...

Des événements bénins

En réalité, une inversion du champ de la Terre est un événement bénin. Comme pour le Soleil, dont le champ magnétique s'inverse tous les onze ans, cela se passe en douceur. Pas besoin d'un réarrangement radical des écoulements dans le noyau. Et les enregistrements géologiques confirment que les nombreuses inversions passées n'ont provoqué aucun événement tectonique ou climatique décelable.

En fait, le champ magnétique ne s'annule jamais en s'inversant. Il chute, typiquement d'un facteur 10, et perd probablement son caractère dipolaire (il présente alors plusieurs pôles Nord et Sud). Le même phénomène se produit lors d'une excursion magnétique, qui est une inversion avortée au bout de laquelle le champ retrouve sa polarité initiale.

Cette atténuation du champ a toutefois des effets. La haute atmosphère subit un bombardement plus intense de particules. Il s'ensuit des trous dans la couche d'ozone, ce qui permet au rayonnement ultraviolet du Soleil de pénétrer plus profondément vers la surface. Mais pas de quoi s'alarmer : nos ancêtres ont déjà vécu plusieurs inversions sans que rien n'indique qu'ils en aient souffert. La dernière inversion franche remonte à 780 000 ans, et la dernière excursion magnétique à l'arrivée d'*Homo sapiens* en Europe, il y a 41 000 ans.

Notre civilisation technologique pourrait toutefois subir quelques désagréments dus à l'affaiblissement du bouclier magnétique spatial. C'est ainsi que, en raison de l'anomalie magnétique (un champ plus faible) présente sur l'Atlantique sud, les satellites qui survolent cette région peuvent voir leurs instruments ou logiciels endommagés par un flux plus important de protons en provenance de l'espace.

Par ailleurs, les éruptions solaires projettent des particules chargées qui illuminent les régions polaires la nuit et induisent aussi des courants électriques susceptibles de perturber les réseaux électriques. En serait-il de même en cas d'inversion magnétique ? Les chercheurs qui étudient les divers scénarios possibles sont nuancés : selon eux, une baisse de l'intensité du champ magnétique ne conduira pas partout à une augmentation des radiations. ■

Henri-Claude NATAF est géophysicien du CNRS à l'Institut des sciences de la Terre, à Grenoble.

ABONNEZ-VOUS À **POUR LA SCIENCE**

**OFFRE
DÉCOUVERTE**
59€

12 N°S POUR LA SCIENCE



**VOTRE
RÉDUCTION**

24%

**OFFRE
PASSION**
79€

**12 N°S
POUR LA SCIENCE
+ 4 HORS-SÉRIES**



+



**VOTRE
RÉDUCTION**

27%

**OFFRE
INTEGRALE**
99€

**12 N°S
POUR LA SCIENCE
+ 4 HORS-SÉRIES
+ ACCÈS
AUX ARCHIVES
DEPUIS 1996**



+



+



**VOTRE
RÉDUCTION**

43%

BULLETIN D'ABONNEMENT

**POUR LA
SCIENCE**

A renvoyer accompagné de votre règlement à : Pour la Science - Service abonnements - 19 rue de l'Industrie - BP 90 053 - 67 402 Illkirch cedex

OUI, je m'abonne à Pour la Science et je choisis la formule :

J'indique mes coordonnées :

PAS472

Nom : _____ Prénom : _____

Adresse : _____

CP : _____ Ville : _____

Tél. Pour le suivi client (facultatif) : _____

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

_____@_____

Grâce 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. Passé ce délai, merci d'en faire la demande à pourlascience@abopress.fr

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

Je choisis mon mode de règlement :

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ Par carte bancaire - N° : _____

Date d'expiration : _____ Clé (Les 3 chiffres au dos de votre CB) : _____

Signature obligatoire

OFFRE INTÉGRALE
12 N°S POUR LA SCIENCE
+ 4 HORS-SÉRIES
+ ACCÈS AUX ARCHIVES DEPUIS 1996

99€
au lieu de 173,50€

PIA99B

OFFRE PASSION
12 N°S POUR LA SCIENCE
+ 4 HORS-SÉRIES

79€
au lieu de 108,50€

PIA79B

OFFRE DÉCOUVERTE
12 N°S POUR LA SCIENCE

59€
au lieu de 78,50€

PIA59E

Délai de livraison: dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 28/02/2016 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.

SCIENCE & GASTRONOMIE

Une théorie de quenelles

En choisissant le liquide de dilution, la matière grasse et d'autres ingrédients mis en œuvre dans les quenelles, on laisse libre cours à sa créativité.

Hervé THIS

Il existe des centaines de recettes de quenelles : pochées, rôties, au poisson, à la viande, avec de la graisse de rognon de bœuf ou de la crème... Laquelle choisir ? L'adaptation de recettes transmises par la tradition à nos penchants gustatifs nécessite de comprendre les phénomènes. Pour les quenelles, tout s'éclaire quand on se souvient que les chairs animales coagulent à la chaleur.

La base des quenelles est de la chair broyée, que l'on cuit. Mais la matière musculaire étant dense (pensons aux terrines) et parfois onéreuse, on ajoute de quoi assouplir.

Qu'il soit de viande ou de poisson, le tissu musculaire est un assemblage de fibres qui contient 25 % de protéines et 75 % d'eau. Le blanc d'œuf, avec ses 10 % de protéines et 90 % d'eau, est, cuit, plus tendre que les terrines, parce qu'il contient plus d'eau. Cette comparaison nous conduit à une première possibilité : à de la chair broyée, ajoutons un liquide et cuisons.

Quel liquide ? Les cuisiniers recourent rarement à de l'eau pure. Ils utilisent du vin, du bouillon, un fumet. Mais tout est possible, du café au jus de fruit. En quelle quantité ? On peut diluer au moins deux fois, pour obtenir une consistance analogue à celle du blanc d'œuf coagulé. En réalité, on peut faire mieux, puisqu'il est possible de gélifier jusqu'à environ 0,7 litre d'eau avec un œuf entier (qui contient environ 8 grammes de protéines, autant que dans 40 grammes de viande ou de poisson).

Qu'ajouter à ce gel ? Par exemple de l'air, de la matière grasse et des particules

solides. On introduit de l'air quand on fouette la préparation avant la cuisson. Dans une chronique précédente, j'ai d'ailleurs évoqué des mousses de viande ou de poisson, qui nécessitent en pratique qu'on libère efficacement les protéines de l'intérieur des fibres, en ne lésinant pas sur le travail de broyage. Si ce dernier est insuffisant, on brise les fibres musculaires, mais on ne libère pas leur contenu. Naguère, le travail des quenelles était pénible, mais les robots actuels facilitent la tâche : il suffit de les faire fonctionner quelques minutes de plus.

Matière grasse liquide, particules solides...

Par ailleurs, puisque la préparation qui est coagulée comporte de l'eau et des protéines, on peut sans difficulté émulsionner de la matière grasse. N'importe quelle matière grasse à l'état liquide convient, qu'il s'agisse de crème, de beurre fondu, de beurre noisette, de foie gras fondu, de fromage fondu, de chocolat fondu. Son choix est évidemment important pour le goût, mais aussi pour la consistance : au refroidissement, des matières grasses se solidifient à l'intérieur des quenelles, comme elles le feraient à l'extérieur.

Enfin, l'ajout de « particules » solides offre la possibilité d'agrandir encore l'univers des quenelles : de la pistache ou des noisettes, des éclats de caramel, pour des quenelles sucrées – car qui a érigé en loi que les quenelles doivent être salées ? Dans ce chapitre de la dispersion des particules solides, mettons aussi les panades, qui sont

à la fois un moyen d'utiliser des pains rassis, mais aussi une façon d'introduire des particules gélifiées, car, chauffée dans de l'eau, la farine s'empêse. Les grains d'amidon gonflent et forment un gel qui, quand on mêle la panade à la chair broyée, n'est généralement pas bien dispersé.

Ce n'est pas un défaut. Pour organiser des variations de goût au sein de la quenelle, on peut disperser médiocrement la panade à la chair broyée, afin de produire des alternances de chair et de panade, cette dernière pouvant être faite d'un liquide qui aura un goût différent de celui utilisé pour diluer la chair.

On peut aussi faciliter et améliorer la nécessaire cuisson des quenelles. Mouler les quenelles en faisant passer la préparation d'une cuillère à une autre, avant de déposer la quenelle dans l'eau frémissante, demande du doigté... Pourquoi ne pas, plus simplement, envelopper la préparation dans un film alimentaire que l'on poche ou que l'on passe au four à microondes ? ■



Hervé THIS, physicochimiste, est directeur du Centre international de gastronomie moléculaire AgroParisTech-Inra et directeur scientifique de la fondation Science & culture alimentaire (Académie des sciences).



Retrouvez la rubrique
Science & gastronomie sur
www.pourlascience.fr



Complétez votre collection!



Retrouvez tous les numéros depuis 1996 !

Commandez vos numéros sur
www.pourlascience.fr

POUR LA
SCIENCE | **ARCHIVES**



PALEOANTHROPOLOGIE

Femmes de la Préhistoire

Claudine Cohen

Belin, 2016

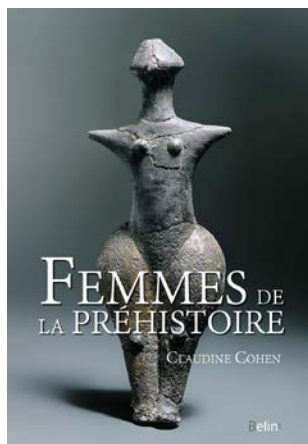
(264 pages, 21 euros).

L'auteure, historienne de la paléontologie et de la préhistoire, revient à la charge sur un sujet que l'on ne peut aborder sérieusement que depuis peu : la moitié invisible de la préhistoire de l'homme, celle de la femme. Ce dernier livre est une synthèse actualisée des questionnements scientifiques sur ce sujet.

L'auteure ne cache pas avoir des convictions féministes. C'est à partir d'elles qu'elle aborde de front les controverses, ce qu'elle fait avec une grande rigueur. Certes, elle ne participe pas directement à des fouilles, mais cette distanciation ne constitue pas une limite, car elle lui permet de présenter une vue d'ensemble à la fois érudite et agréable à lire de l'immense domaine qu'elle résume.

Bien qu'affirmant la prééminence du culturel, elle fait partie de cette part croissante de chercheurs des sciences humaines qui sortent de leur territoire et tiennent compte des avancées des autres disciplines, en particulier de la biologie (et même ici parfois de la sociobiologie). Enseignant l'histoire des sciences à l'École pratique des hautes études et à l'École des hautes études en sciences sociales, elle connaît bien l'œuvre de Darwin, qu'elle cite abondamment et qui, précurseur dans ce domaine comme en d'autres, avait lancé le premier pont entre biologie animale et sociologie humaine.

Cette approche pluridisciplinaire hardie lui permet par exemple de défendre la surprenante théorie de la « révolution des grands-mères » émise par l'anthropologie



américaine Karen Hawkes. Elle explique pourquoi, dans notre espèce, les femmes vivent bien au-delà de la ménopause par l'avantage adaptatif que procure l'éducation des petits-enfants. Ce rôle des grands-mères aurait donné un avantage aux *Homo sapiens* sur les Néandertaliens et serait, d'après l'auteure, une nouvelle cause possible de la disparition de ces derniers... Claudine Cohen va jusqu'à se demander si les Vénus callipyges aux seins lourds, telle celle de Willendorf, ne constituent pas un culte, non pas aux Ève préhistoriques, mais aux grands-mères paléolithiques ! Bref, un ouvrage qui stimule l'imaginaire, instructif sur les avancées de la recherche.

Pierre Jouventin

Directeur de recherche émérite
au CNRS, Montpellier

BIOLOGIE-PHYSIQUE

La Science insolite de l'asymétrie

Frédéric Flamant

Seuil, 2016

(272 pages, 21 euros).

Ce livre défie le principe de Fontenelle : « Assurons-nous bien du fait, avant de nous inquiéter de la cause ». L'auteur part d'une statistique

datant de 2002 : près des trois quarts des *olas* tournent dans le sens des aiguilles d'une montre. Recherchant l'origine de cette préférence, il la trouve dans l'asymétrie des organismes vivants, laquelle à son tour s'explique par une asymétrie à l'échelle atomique. Sa longue enquête visite pratiquement tout l'Univers, des neutrinos aux galaxies en passant par divers animaux ou végétaux. Et comment s'achève-t-elle ? Sur une statistique plus complète et plus récente concernant la *ola*, qui contredit la première ! La proportion de 75 % n'est pas confirmée. La *ola* se développe à peu près une fois sur deux dans un sens,



une fois sur deux dans l'autre. Il n'y avait rien à expliquer.

Plus de 270 pages sur un phénomène inexistant ! Le lecteur devrait être furieux. Au contraire, il savoure la prouesse. Ce livre malicieux nous le rappelle : les tentatives visant un but chimérique peuvent être riches.

Faisons donc comme si la *ola* avait un sens préférentiel, et demandons-nous pourquoi. La cause doit résider dans l'asymétrie de l'être humain (qui est mal comprise : on ignore d'où vient le fait qu'il y a des gauchers et des droitiers). Notre vision est asymétrique. Environ neuf personnes sur dix prêtent un peu moins

d'attention à la partie droite de leur champ visuel qu'à la partie gauche. Et voilà expliqué le sens préférentiel de la *ola*. Elle a plus de chances de s'établir si elle se propage en atteignant chaque participant par le côté de son corps où il est le plus attentif.

Admettons. Mais pourquoi l'asymétrie de notre anatomie ? Parce que, dès l'état embryonnaire, une certaine protéine se répand dans la partie gauche de notre organisme. Cette asymétrie ne nous est pas spécifique et se manifeste dans des organismes très élémentaires. Comment l'expliquer ? En remontant jusqu'à la chiralité des aminoacides présents dans la « soupe prébiotique ». D'où vient leur chiralité ? D'une chiralité interne aux atomes. La prédominance des acides lévogyres sur les dextrogyres est-elle universelle ou est-elle un hasard propre à la Terre ? L'exploration spatiale ou la physique quantique le diront peut-être un jour...

D'œuf en poule et de poule en œuf, l'auteur pousse de plus en plus loin les explications de l'asymétrie, sans jamais en trouver une qui puisse passer pour ultime. Le lecteur est réjoui par le périple imprévu qui lui est proposé.

Didier Nordon

HISTOIRE DES SCIENCES

Une histoire de la biologie

Michel Morange

Points, 2016

(430 pages, 10,80 euros).

Michel Morange a eu le courage d'ouvrir une voie, extrêmement inspirante, en écrivant cette histoire de la biologie. Ce livre comble une lacune. Voici enfin un ouvrage

de référence accessible couvrant l'histoire des études du vivant avec des repères clairement identifiés sans renier la dynamique complexe de ses objets. L'auteur assume avec succès plusieurs partis pris: c'est une histoire



conceptuelle qui ne renie pas les éléments contextuels et pratiques, à l'attention des biologistes au sens large (les enseignants de SVT devraient beaucoup l'apprécier) et c'est une histoire de longue durée.

Parcourant l'Europe depuis l'Antiquité grecque jusqu'à nos jours, Michel Morange esquisse une fresque, où par petites touches il donne des repères sur ce que sont les sciences biologiques, sur leurs relations avec les autres disciplines et sur leurs développements contemporains. S'agissant du XIX^e siècle, par exemple, ses développements permettent de suivre, en parallèle, les avancées de la biologie fonctionnelle (embryologie, biologie cellulaire, physiologie) et celles de la biologie évolutive (évolution, hérédité, génétique, écologie).

L'auteur met en exergue la complexité des phénomènes du vivant en abordant de multiples thèmes (des maladies des plantes au système lymphatique humain) et en insistant sur la nécessité d'une pluralité des approches pour étudier

cette complexité. En même temps, une continuité est sensible et de nombreux ponts et liens entre les scientifiques qui s'y sont intéressés sont dessinés, qu'ils en aient eu conscience ou pas. La rémanence de questions biologiques fondamentales, malgré l'évolution des moyens techniques d'investigation, est mise en évidence.

Ainsi, l'enthousiasme de Michel Morange pour ces deux entreprises humaines d'acquisition de connaissances et de compréhension de mécanismes que sont la biologie et l'histoire des sciences est perceptible et communicatif tout au long de l'ouvrage.

Camille Roux-Goupille
Université Paris-Est-Créteil

■ PRÉHISTOIRE

Cro-Magnon

Gilles et Brigitte Delluc
Éditions Sud-Ouest, 2016
(40 pages, 5,90 euros).

Gilles Delluc, accompagné de son épouse Brigitte, a mis en pratique ses connaissances médicales – il est ancien médecin des hôpitaux – et ses compétences archivistiques pour étudier la nutrition des hommes préhistoriques. Il se sert aujourd'hui de ses acquis pour produire une courte synthèse sur l'homme de Cro-Magnon, destinée à accompagner le nouveau musée des Eyzies-de-Tayac.

La difficulté, pour un auteur n'ayant jamais cessé, parallèlement à son activité de préhistorien, de produire des livres pour le grand public, est de ne pas se répéter, de transmettre les derniers acquis de la recherche

tout en étant quand même obligé de labourer le même sentier. Car si les détails se sont précisés et le flou autour de notre ancêtre s'est en partie dissipé, le cadre général reste le même. Tout l'art du vulgarisateur est alors de franchir ces passages maintes fois empruntés, attendus par le lecteur, et de le surprendre par un nouvel éclairage.

Fort heureusement, deux charmantes divinités sont là pour l'aider: Style et Image. L'iconographie, originale et sympathique, distingue ainsi l'ouvrage des grandes orgues habituelles. L'enfant hydrocéphale de Rochereil, les figures humaines gravées sur des côtes de renne par Cro-Magnon, rarement montrés,



surprennent et interpellent. Par ailleurs, l'écriture est toujours aussi agréable, légère et bienveillante. Le chapitrage choisi, même s'il est attendu, n'est pas scolaire et se parcourt sans difficulté, dans l'hypothèse d'un conteur (ce qu'il est par ailleurs dans ses conférences) qui ménage ses effets. Le lecteur referme ce livre bref sans ennui – et se sent instruit.

Romain Pigeaud
Chercheur associé
à l'université de Rennes 1



ExperimentBoy

Baptiste Mortier-Dumont
Flammarion, 2016
(142 pages, 18 euros).

Mettre une chaîne de science

sur YouTube en livre? C'est le pari réussi de cet ouvrage joyeux et joliment illustré, où sont décrites plus de 60 expériences de physique spectaculaires et instructives. L'auteur, qui se bat sur Internet « pour la science et le fun » sait s'y prendre, puisque ses films ont attiré pas moins de 42 millions de vues. Passionnant et inoffensif, à condition de ne pas se lancer chez soi dans la reproduction des « aventures explosives » d'ExperimentBoy. D'apparence simple, ses expériences sont en réalité très techniques et peuvent mal tourner en cas d'imprudence.



Définition de la vie

Claude Bernard
VillaRose, 2016
(112 pages, 12 euros).

« Les forces mécaniques, physiques et chimiques sont seules les agents effectifs de l'organisme vivant. » Dans cet essai écrit pour la *Revue des deux Mondes*, le grand physiologiste définit la vie, mais résiste aussi au vitalisme. Son postface, le neurobiologiste Alain Prochiantz, du Collège de France, apporte un éclairage sur sa pensée et nous surprend, par exemple quand il démontre que Claude Bernard n'avait pas vraiment compris Darwin et les évolutionnistes, qu'il rangeait parmi les métaphysiciens.



L'Art de l'époque glaciaire

Paul G. Bahn
Errance, 2016
(368 pages, 59 euros).

Peu connu en France, l'auteur

est un maître de l'archéologie en Grande-Bretagne. Dans cette traduction française de *Images of the Ice Age* (Oxford University Press, 2016), il passe en revue l'ensemble des arts de l'âge glaciaire et fait l'exégèse de toutes les théories qu'ils ont suscitées, depuis les plus anciennes jusqu'au plus récentes. Conclusion? Nous ne connaissons presque rien de l'art paléolithique, si ce n'est qu'une partie de cet art était à caractère religieux, et qu'il avait aussi d'autres fonctions, encore non élucidées.

Retrouvez l'intégralité de votre magazine et plus d'informations sur www.pourlascience.fr



L'IGNARE INTERNET

Chercher un spécialiste pour lui poser une question est vieux jeu, mais parfois préférable à Internet. Exemples.

Le mot « probabilité », pourtant peu juridique, figure dans un arrêté ministériel de 2005 sur les risques industriels. Si l'on demande à Internet : « Quand le mot "probabilité" est-il apparu dans une loi ? », ses réponses portent sur les lois de probabilité ! Lui faire entendre qu'il ne s'agit pas de cela est une gageure.

Un colloque explorait le thème « Être de son temps ». Pareille formule aurait-elle pu prendre sens chez les Égyptiens de l'Antiquité ou les Mayas précolombiens ? Seul un spécialiste a l'intuition, forgée par une vie passée à étudier ces peuples, permettant, à partir de ce qu'on sait, d'entrevoir une réponse.



Consulté sur cet autre thème de colloque : « Qu'est-ce qu'on ne sait pas ? », Internet donne une liste de ce qu'on sait ne pas savoir. Seulement, savoir qu'on ne sait pas, c'est savoir. Or la radicalité des changements de perspective imposés par les révolutions conceptuelles en atteste : les réalités qui nous échappent abondent. Époque après époque, nous ressemblons à l'homme qui cherche ses clés sous le réverbère parce que c'est le seul endroit où il voit. Nombre de nos ignorances n'affectent personne, car nous ne les percevons même pas. Ce dont on ne sait pas qu'on ne le sait pas – cette subtilité nargue l'érudition d'Internet.

Dernier exemple. Avoir une interrogation philosophique sur leur discipline est,

m'a-t-on dit, une tradition plus établie chez les physiciens et les biologistes que chez les mathématiciens. Est-ce vrai ? Si oui, pourquoi ? À supposer qu'une idée là-dessus soit enfouie dans ses trésors, comment expliquer à Internet que je voudrais qu'il aille la chercher ?

Selon la vieille boutade, Internet sait tout, mais il ne sait que cela. Il est imbattable quant au précis – que ce précis soit exact ou faux ! Mais la cervelle humaine se nourrit aussi du vague, de l'intuitif, du spéculatif. Et elle les manie mieux qu'Internet.

ASSERTIONS PROVERBIALES

L'homme est un animal politique (Aristote), le monde est écrit en langage mathématique (Galilée), la guerre est la continuation de la politique par d'autres moyens (Clausewitz), l'existence d'une nation est un plébiscite de tous les jours (Renan), la démocratie est le pire des régimes à l'exception de tous les autres (Churchill), la science ne pense pas (Heidegger)...

Ces assertions ont en commun d'être citées souvent, presque comme des proverbes. Seulement, les proverbes sont des constats venus du fond des temps, dont les leçons de vie sont communes à tous les hommes. Rien d'étonnant ni de fâcheux à ce qu'on les répète beaucoup et qu'on ne les rediscute guère. Au contraire, les phrases ci-dessus sont savantes – donc moins générales et moins durables. Leurs prémisses expriment parfois des positions polémiques ou des *a priori* inconscients, dépendent de circonstances historiques, résultent de théorisations toujours à réévaluer. Que ces conclusions de raisonnements soient



devenues abruptes comme des vérités définitives est mauvais signe : auraient-elles cessé de faire réfléchir ?

DÉLICAT PRÉSENT DE NARRATION

Voir un accident est plus stressant qu'arriver sur les lieux juste après. Si l'accident qui vient de se produire est grave, il bouleverse. Mais il est passé. Il ne recèle plus en lui la menace du futur. Alors qu'on ne sait pas quelle gravité atteindra l'accident auquel on assiste.



Conséquence. Que les philosophes, les scientifiques – et les chroniqueurs – s'expriment au présent ne pose pas de problème : leurs écrits ne sont pas soumis à la temporalité d'une succession d'événements singuliers. Par exemple, le présent utilisé pour rendre compte d'une expérience se justifie parce que celle-ci n'appartient pas au passé, mais relève de l'éternel retour. Chaque fois qu'on la fait, on obtient – en principe – le même résultat.

Pour les romanciers, la question est plus délicate. Le présent comme temps de la narration accentue la tension. À chaque instant pourrait surgir une péripétie mettant fin à toute vie, donc à toute possibilité de narration. Le roman serait stoppé en pleine action ! Une histoire narrée au passé ne se déroule pas sous cette menace : puisque quelqu'un la raconte, c'est qu'elle n'a pas tué tous ceux qui en ont été acteurs ou témoins. Le présent dans un roman est réservé aux auteurs capables de ne pas donner l'impression que ce temps leur sert de procédé pour dramatiser une histoire qui, narrée au passé, éveillerait peu l'intérêt.

ENTREPRISES, COLLECTIVITÉS, FINANCEZ VOS BESOINS DE RECHERCHE,

DANS LES DOMAINES DES PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES, DES SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT
ET DE LA VIE, DES SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES



Dans le cadre d'un partenariat entre un étudiant, son laboratoire d'accueil et vous,
l'ADEME vous aide à produire des connaissances nouvelles et renforce les capacités humaines
de votre R&D en finançant un doctorant pendant 3 ans !

ENSEMBLE POUR CONSTRUIRE UN MONDE PLUS DURABLE

www.ademe.fr/theses



CONCEPTION & RÉALISATION GRAPHIQUE : OLFA NEMSI

Participez à la 2nde édition du concours international

THE COSMETIC VICTORIES

BY THE ENDOWMENT FUND COSMETIC VALLEY/ESSEC

PRESENTEZ VOTRE PROJET INNOVANT

Les projets seront sélectionnés par un jury prestigieux, composé d'experts et des représentants des plus grandes maisons de la filière parfumerie-cosmétique.

- **Prix de la recherche**, dédié aux étudiants, postdoctorants et chercheurs publics.
- **Prix de l'innovation**, dédié aux porteurs de projets, aux start-ups et PME.



DEADLINE

30 Mars 2017



DOTATION

20 000 €

Inscription sur www.thecosmeticvictories.com

Informations complémentaires : Emmanuel Laheux
Tél. : +33 (0)2 37 211 211 - E-mail : elaheux@cosmetic-valley.com