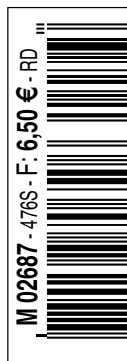


POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American



JUN 2017
N° 476

MÉDECINE
**HÉPATITE C :
TOUT EST PRÊT
POUR LA VAINCRE**

ASTRONOMIE
**STARSHOT, FOLLE
MISSION VERS
LES ÉTOILES**

LINGUISTIQUE
**LES LANGUES
SIFFLÉES :
PAS SI RARES !**

**NOUVELLE
FORMULE**

LES NOUVEAUX TESTS DE TURING

**vont défier
l'intelligence
artificielle**



EXPO



VALERIAN ET LAURELINE

en mission pour la Cité

13 JUN 2017
14 JANVIER 2018

M PORTE DE LA VILLETTE

#ExpoValerian



J. MÉZANGES

ICI L'AFFICHE
AUGMENTÉE



AVEC LA PARTICIPATION DE



AVEC LE SOUTIEN DE



EN PARTENARIAT AVEC





MAURICE MASHAAL
rédacteur
en chef

POUR LA SCIENCE

www.pourlascience.fr
170 bis boulevard du Montparnasse - 75014 Paris
Tél. 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 Gordonnier
Rédacteurs : François Savatier, Sean Bailly

POUR LA SCIENCE HORS-SÉRIE
Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin
Développement numérique : Philippe Ribeau-Gésippe

Conception graphique : William Londiche
Directrice artistique : Céline Lapert
Maquette : Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy
Correction et assistance administrative : Anne-Rozenn Jouble
Marketing & diffusion : Laurence Hay, Arthur Peys assisté de William Armand
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 : Didier Betbeder, Christophe Bonnal, Maud Bruguère, Vincent Colot, Silvana Condemi, Pierre Jouventin, Thierry Lasserre, José Pessis, Christophe Pichon, Daniel Tacquenot, Benoît Valiron

PRESSE ET COMMUNICATION
Susan Mackie
susan.mackie@pourlascience.fr • Tél. 01 55 42 85 05

PUBLICITÉ France
Directeur de la publicité : Jean-François Guillotin
jf.guillotin@pourlascience.fr
Tél. 01 55 42 84 28 • Fax: 01 43 25 18 29

ABONNEMENTS
Abonnement en ligne : <http://boutique.pourlascience.fr>
Courriel : pourlascience@abopress.fr
Tél. 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

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
1 New York Plaza, Suite 4500, New York, NY 10004-1562
Editor in chief : Mariette DiChristina
President : Dean Sanderson
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. », 162 rue du Faubourg Saint-Denis, 75010 Paris.
© Pour la Science S.A.R.L. Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial « Scientific American » sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à « Pour la Science S.A.R.L. ». En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou 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).

Origine du papier : Autriche
Taux de fibres recyclées : 30 %
Certification : PEFC
«Eutrophisation» ou «Impact sur l'eau» : P_{tot} 0,007 kg/tonne



CE MAGAZINE N'EST PAS (ENCORE) ÉCRIT PAR DES ROBOTS

Vous tenez ce mois-ci entre les mains (à moins que vous ne nous lisiez en ligne...) un magazine tout neuf ou presque, bien qu'il fêtera ses 40 ans d'existence cet automne. L'équipe de *Pour la Science* est ravie de vous faire découvrir un nouveau graphisme, une couverture plus esthétique, une mise en pages modernisée, mieux structurée et plus agréable, des polices de caractères qui apportent un meilleur confort de lecture... Nous vous proposons aussi de nouvelles rubriques ainsi que davantage d'actualités pour mieux satisfaire votre curiosité et vos goûts.

Et nous continuons bien sûr à cultiver ce qui a fait la force et l'originalité de *Pour la Science* : des articles de fond rédigés par les meilleurs spécialistes, faisant le point sur les recherches (et découvertes!) récentes dans des disciplines très variées. C'est, avec une équipe rédactionnelle de formation scientifique, le gage d'une information de qualité, claire et rigoureuse, loin des effets d'annonce et des simplifications outrancières, voire des erreurs et des fausses informations qui peuvent circuler sur la Toile ou ailleurs.

Nous sommes aussi convaincus que nos équipes humaines ne risquent pas d'être détrônées, dans un futur prévisible, par des robots-journalistes dont on entend parfois parler... Et pourtant, les programmes informatiques et les robots sont de plus en plus performants. Voire «intelligents». Mais qu'est-ce que l'intelligence d'une machine? Le test de Turing, imaginé en 1950, se révèle insuffisant pour la caractériser et la mesurer. Par quoi le compléter et pourquoi? C'est ce que vous expliquent dans ce numéro Laurence Devillers et Gary Marcus, deux chercheurs en intelligence artificielle (voir pages 25 à 38). Bonne lecture et bonne découverte!

Nous sommes impatients de recueillir vos réactions à cette nouvelle formule sur redaction@pourlascience.fr ■

S OMMAIRE

N° 476 /
Juin 2017

ACTUALITÉS

P. 6

ÉCHOS DES LABOS

- Hérité sans gènes chez la mouche
- Pic de performance cognitive à 25 ans
- Les chevaux scythes
- L'impossible zéro kelvin
- Les motifs du lézard ocellé
- La ruse du virus géant
- Cyanobactéries et origine de la photosynthèse
- L'énergie sombre, une illusion?
- De l'ADN fossile dans la boue

P. 18

LIVRES DU MOIS

P. 20

AGENDA

P. 22

HOMO SAPIENS INFORMATIQUES

Qui est responsable?

Gilles Dowek

P. 24

CABINET DE CURIOSITÉS SOCIOLOGIQUES

Vladimir Poutine
et Barbra Streisand

Gérald Bronner

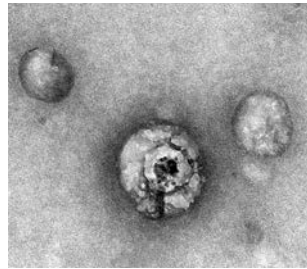
GRANDS FORMATS

P. 58

BIOLOGIE

SULFUREUSE ÉVOLUTION CHEZ LES POISSONS MEXICAINS

Rüdiger Reisch et Martin Plath



Les eaux de certaines sources mexicaines, riches en sulfure d'hydrogène, sont extrêmement toxiques. Pourtant, des espèces de poissons s'y sont adaptées. Par quels mécanismes?

P. 40

MÉDECINE

L'HÉPATITE C BIENTÔT VAINCUE?

Patrick Marcellin
et Pierre Kaldy

Il n'existe pas de vaccin contre l'hépatite C. Néanmoins, on sait aujourd'hui guérir de cette maladie virale meurtrière. Reste à débloquer les fonds pour étendre les traitements aux 71 millions de personnes infectées dans le monde.



P. 48

SPATIAL

CAP SUR ALPHA DU CENTAURE

Ann Finkbeiner

Un projet fou: propulser par laser des sortes de petits voiliers vers une autre étoile que le Soleil. En finançant *Starshot*, le milliardaire russe Yuri Milner va-t-il réaliser un vieux rêve de l'humanité?

P. 66

LINGUISTIQUE

PARLER EN SIFFLANT, UN PHÉNOMÈNE PLANÉTAIRE

Julien Meyer

« Je voudrais manger », « Cache-toi, la police arrive »... Comment transmettre de tels messages sur des centaines de mètres? En sifflant! Dans le monde, de nombreuses populations ont développé cette technique qui fascine les linguistes.



POUR 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



Inscrivez-vous
www.pourlascience.fr

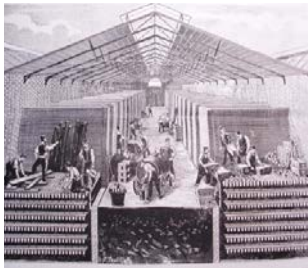


En couverture :

© Takito/Shutterstock.com - PLS

Les portraits des contributeurs
sont de Seb Jarnot

Ce numéro comporte un encart
Mondadori sur une sélection
d'abonnés France métropolitaine.



P.74

HISTOIRE DES SCIENCES

LA CÉRUSE, UN POISON? ET ALORS!

Judith Rainhorn

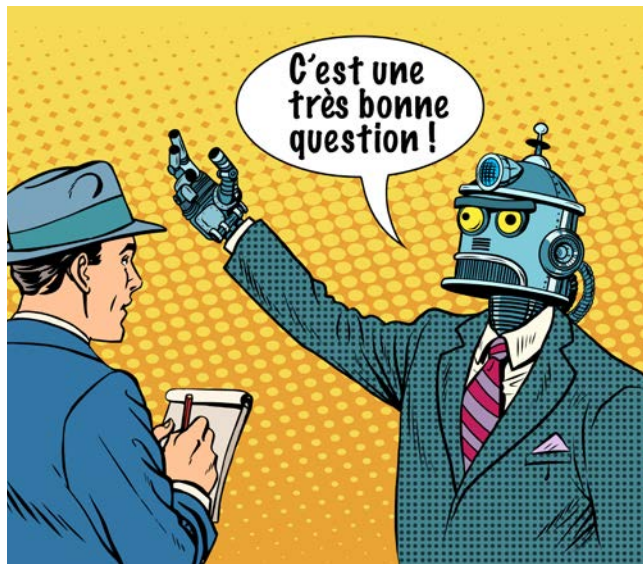
Au XIX^e siècle, la toxicité de la céruse, une poudre à base de plomb largement utilisée dans la peinture en bâtiment, ne faisait aucun doute. Pourtant, son usage est resté légal en Europe jusqu'en 1993: les industriels de la céruse veillaient au grain...

À LA UNE

P.25

INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

AU-DELÀ DU TEST DE TURING



P.26

MACHINE, ES-TU INTELLIGENTE?

Gary Marcus

On a longtemps cherché la réponse à cette question à l'aide du fameux test de Turing. Mais ce test, imaginé en 1950, a montré ses limites. Par quoi le remplacer? Par des batteries d'épreuves de différentes natures, disent les spécialistes.

P.32

TESTER LES ROBOTS POUR BIEN VIVRE AVEC

Laurence Devillers

Dialoguer, apprendre, détecter l'état émotionnel de ses interlocuteurs, faire de l'humour...: certaines machines le font déjà. Mais il sera indispensable de bien évaluer ces capacités si l'on veut utiliser et côtoyer des robots en toute confiance.

RENDEZ-VOUS

P.80

LOGIQUE & CALCUL

LES PARTAGES ÉQUITABLES D'UNE TARTE

Jean-Paul Delahaye

Il est facile de découper un disque en parts égales et identiques en partant de son centre. Mais deux géomètres britanniques ont récemment montré qu'il existe pléthore de découpages équitables plus élaborés... et moins symétriques.

P.86

ART & SCIENCE

La 3D comme vous ne l'avez jamais vue

Loïc Mangin

P.88

IDÉES DE PHYSIQUE

Une vision progressive... pas si nette

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

P.92

CHRONIQUES DE L'ÉVOLUTION

Comment l'ours polaire a conquis l'Arctique

Hervé le Guyader



P.96

SCIENCE & GASTRONOMIE

Beurre et sucre: le bonbon ultime

Hervé This

P.98

À PICORER

A

CTUALITÉS

P.6 Échos des labos

P.18 Livres du mois

P.20 Agenda

P.22 *Homo sapiens informaticus*

P.24 Cabinet de curiosités
sociologiques

GÉNÉTIQUE

COMMENT LA MOUCHE A ACQUIS SES YEUX ROUGES



Ces trois mouches portent le même génome, mais la couleur de leurs yeux diffère. Pourquoi ? En raison de modifications épigénétiques transmises sur plusieurs générations.

Une équipe de Montpellier a mis en évidence chez la drosophile un mécanisme d'hérédité qui n'est pas codé dans les gènes.

Des lignées de mouches ayant toutes le même génome, mais des yeux blancs, jaunes ou rouges, « ça n'existe pas, ça n'existe pas. Et pourquoi pas ? » C'est ce qu'ont obtenu Filippo Ciabrelli, de l'Institut de génétique humaine de Montpellier (UMR 9002, CNRS, université de Montpellier), et ses collègues en modifiant de façon transitoire des interactions entre gènes dans une lignée de drosophiles.

Ces chercheurs s'intéressaient à une question débattue depuis quelques années : transmet-on à notre descendance des caractères qui ne sont pas inscrits dans notre ADN et que nous aurions ac-

quis *via* notre environnement ou une perturbation transitoire de l'expression de nos gènes ? Depuis plus de soixante ans, on sait que l'ADN est le support de l'hérédité. Toutefois, des expériences ont conduit à l'idée que d'autres mécanismes dits épigénétiques contribueraient aussi à la transmission, sur plusieurs générations, de caractères héréditaires.

Ces mécanismes sont multiples : ajout de marques biochimiques sur les chromosomes tels des groupes méthyle (CH₃), modifications chimiques des histones – ces groupes de protéines autour desquels s'enroule l'ADN dans les chromosomes –, modulation des marques épigénétiques par de petits ARN... Tous régulent l'activité des gènes sans changer la séquence d'ADN. Et

la transmission de certaines marques sur plusieurs générations a été observée chez la plante *Arabidopsis thaliana*, le ver *Caenorhabditis elegans*, la drosophile et la souris. Chez *A. thaliana*, une équipe de l'École normale supérieure, à Paris, a même montré en 2014 que des caractères complexes tels que la taille des racines ou le moment de floraison sont transmissibles par épigénétique aux générations suivantes.

Toutefois, chez l'animal, il reste des doutes sur l'existence d'une hérédité épigénétique stable. Souvent, dans les expériences, les marques acquises s'estompent en quelques générations. De plus, on ne peut exclure l'intervention d'une mutation génétique dans la transmission des caractères épigénétiques et des phénotypes associés.

Filippo Ciabrelli et ses collègues ont donc cherché à établir, chez des mouches issues d'une même lignée, des marques épigénétiques stables et associées à un

phénotype facile à contrôler – la couleur des yeux –, tout en s'affranchissant des biais possibles. Pour ce faire, ils ont décidé d'agir sur des protéines d'une famille nommée polycomb, qui présentaient un double intérêt. D'une part, elles sont très impliquées dans la méthylation des histones. D'autre part, recrutées sur les chromosomes par des séquences spécifiques d'ADN, elles répriment les fonctions de divers gènes – et cette activité dépend de l'organisation spatiale des chromosomes: recrutées sur l'un d'eux, elles peuvent réguler un gène situé sur un autre si ce dernier est proche spatialement du premier.

La lignée d'origine avait les yeux jaunes, résultat d'une faible pigmentation rouge. Les biologistes ont modifié la structure 3D des chromosomes pour moduler la capacité des protéines polycomb, recrutées sur un chromosome, à réprimer un gène impliqué dans la pigmentation rouge des yeux et situé sur un autre chromosome. Puis, dans la descendance des mouches, ils ont retenu et séparé celles dont les yeux étaient les plus et les moins pigmentés. Ensuite, par croisements successifs au sein de chaque groupe, ils ont conforté la couleur des yeux. Ils ont ainsi obtenu une lignée aux yeux rouges et une aux yeux blancs, stables sur plus de cinquante générations.

Pour Filippo Ciabrelli et ses collègues, il ne fait aucun doute que ce résultat est le fruit d'un mécanisme d'hérédité épigénétique lié à la fois à l'organisation spatiale de l'ADN et à l'action des protéines polycomb. D'abord, les génomes des deux lignées sont identiques (aux variations habituelles près). Ensuite, les histones de la lignée blanche sont fortement méthylées, signe de l'action des protéines polycomb, contrairement à celles de la lignée rouge. De plus, le phénomène est réversible: en croisant les deux lignées, on retrouve des yeux jaunes, toujours sans changement du génome. Enfin, une autre expérience a montré qu'il dépend de l'environnement: quand on augmente la température ambiante de la lignée rouge pendant deux générations, celle-ci perd ses pigments, et ce de façon stable sur plusieurs générations, même après un retour à une température normale. Un tel mécanisme existerait-il aussi chez les mammifères? Ces derniers portent en tout cas eux aussi des protéines polycomb... ■

MARIE-NEIGE CORDONNIER

F. Ciabrelli et al., *Nature Genetics*, en ligne le 24 avril 2017

Un pic de performance cognitive à 25 ans

Avec plusieurs collègues, le mathématicien et psychologue Nicolas Gauvrit a développé de nouveaux outils pour évaluer la complexité d'une suite de chiffres. Ceux-ci ont des applications en neurosciences, notamment pour évaluer certaines fonctions cognitives des patients. Le chercheur nous explique ces travaux et leurs résultats.



Propos recueillis par SEAN BAILLY

NICOLAS GAUVRIT
chercheur au Labores
et à l'École pratique
des hautes études,
à Paris

Comment la notion de complexité joue-t-elle un rôle en neurosciences ?

N. G. : Prenons les deux suites de chiffres « 12121212 » et « 12212111 ». La seconde est dite plus complexe, car elle est plus difficile à décrire que la première, qui est juste la répétition du motif « 12 ». Cette notion de complexité, dite algorithmique, d'une suite de chiffres a été formalisée au XX^e siècle par le mathématicien russe Andreï Kolmogorov.

Si l'on demande à quelqu'un de produire une suite aléatoire de chiffres, on se rend compte qu'en général, cette personne cherchera à produire une suite complexe. Or, depuis longtemps, les psychologues pensent que la complexité permet de mesurer d'une certaine façon des fonctions cognitives de haut niveau, telles que l'attention, la mémoire à court terme ou encore l'inhibition (après un 1, on a tendance à vouloir mettre un 2, il faut inhiber ce réflexe pour créer de la complexité). La production de suites complexes s'appuie sur ces fonctions cognitives.

Quelles sont les applications possibles de cette idée ?

N. G. : Ces fonctions cognitives de haut niveau reposent beaucoup sur le lobe frontal. Ainsi, les neurologues peuvent demander au patient qui a subi un choc à la tête de produire une suite de chiffres la plus aléatoire possible, afin de détecter des traumatismes du lobe frontal. Si la région est endommagée, le patient aura du mal à créer de la complexité et la suite présentera de nombreuses répétitions.

Cependant, un des problèmes majeurs de la complexité algorithmique est qu'elle n'est pas calculable. On peut juste l'estimer approximativement. Cela rend délicat l'utilisation de cette méthode par les neurologues. En outre, pour avoir une assez bonne évaluation, la suite demandée

au patient doit être assez longue (une centaine de chiffres) pour que l'on puisse conclure quant à son caractère complexe.

Comment améliorer ces estimations ?

N. G. : Deux de mes collègues, Jean-Paul Delahaye (NDLR : chroniqueur à *Pour la Science*) et Hector Zenil, ont proposé une nouvelle façon d'estimer la complexité. Elle repose sur la probabilité algorithmique – la probabilité qu'un programme choisi au hasard produise une suite donnée. Ainsi, en générant un grand nombre de programmes aléatoires et les suites qu'ils produisent ou non, nous avons une estimation de cette probabilité et donc de la complexité. En effet, un programme généré aléatoirement a plus de chance de créer une suite simple comme « 0000... » plutôt qu'une suite complexe.

L'avantage de cette méthode est qu'il est possible de l'appliquer même à des suites de chiffres assez courtes, qui comprennent une dizaine de symboles seulement.

Dans le contexte des neurosciences, qu'est-ce que l'application de cet outil vous a permis de conclure ?

N. G. : Nous avons soumis plus de 3 400 personnes, âgées de 4 à 91 ans, à une série de tests qui leur demande de créer diverses suites aléatoires (pile ou face, lancers de dé, etc.). Nous observons que les performances cognitives, en termes de vitesse et de complexité, augmentent jusqu'à 25 ans et sont relativement stables jusqu'à 60 ans, puis déclinent.

La courbe d'évolution des performances en fonction de l'âge est comparable à celle que l'on obtient en évaluant d'autres fonctions cognitives de haut niveau, ce qui tend à confirmer que notre approche est correcte.

Nous avons aussi considéré d'autres facteurs que l'âge, notamment le sexe, la langue parlée par la personne, son profil (plutôt scientifique ou littéraire) et son niveau d'études. Mais seul l'âge semble être un facteur déterminant. ■

N. Gauvrit et al., *PLoS Computational Biology*, en ligne le 13 avril 2017

GÉNÉTIQUE

LES CHEVAUX SCYTHES, LOIN DE CEUX D'AUJOURD'HUI

Les génomes d'anciens chevaux montrent que la sélection des traits chevalins actuels avait commencé à l'époque des Scythes, puis s'est accélérée au cours des deux derniers millénaires.

Chevaux de trait, chevaux de selle, poneys... Il existe des centaines de races de chevaux domestiques. Quand et comment cette diversité est-elle apparue? Réalisé par une vaste équipe internationale autour de Ludovic Orlando, de l'université de Copenhague, le séquençage de quatorze génomes d'anciens chevaux apporte plusieurs éléments de réponse surprenants.

Les chercheurs travaillent à restituer l'histoire évolutive des chevaux domestiques, animaux qui ont joué un très grand rôle dans l'histoire humaine (transport à longue distance, guerres, etc.). Amorcée il y a quelque 5500 ans en Asie centrale, la domestication d'*Equus ferus* a été à l'origine de nombreuses cultures nomades dans les steppes asiatiques. Ainsi, il y a plus de 3000 ans, un homme de la culture préscythe de Subeshi, dans le désert du Taklamakan, a été enterré avec un pantalon taillé pour la monte. Quelques siècles plus tard, au début de l'âge du Fer, les Scythes pratiquaient une culture équestre hautement développée et occupaient un territoire allant de la mer Noire au massif de l'Altaï, en Mongolie.

Ces repères chronologiques expliquent pourquoi les chercheurs ont choisi de séquencer les génomes de quinze étalons sacrifiés il y a entre 2350 et 2750 ans, à l'occasion de funérailles royales scythes. La biodiversité de ces chevaux s'est révélée plus importante que celle des chevaux actuels, qui n'ont pratiquement plus qu'un seul type de chromosome Y, comme s'ils descendaient tous d'un unique étalon.

À l'époque des Scythes, la sélection par l'homme était cependant déjà largement lancée. Ainsi, les chercheurs ont constaté que les gènes mutés favorables à la course, à une plus grande taille du corps, mais aussi à la lactation chez les juments avaient déjà commencé à s'accumuler dans le génome des chevaux scythes. Particulièrement intéressante est l'accumulation de mutations adaptatives dans une région du génome associée à la crête neurale, une population de cellules de l'embryon à l'origine de nombreux tissus de l'organisme. Cette constatation va dans le sens de la «théorie de la crête neurale», selon laquelle c'est une modification précoce du développement de cette population de cellules qui



Ces chevaux ont été sacrifiés par des Scythes vers 650 avant notre ère sur le site de Tuva, en Sibérie. Les chercheurs ont notamment séquencé les génomes de deux étalons appartenant à ce groupe.

aurait rendu possible la sélection artificielle des traits typiques de toutes les espèces domestiques: robes et tailles variées, oreilles tombantes (pour d'autres animaux que les chevaux)...

L'équipe de Ludovic Orlando a aussi établi que lors des sacrifices qui accompagnaient les inhumations royales, les Scythes aimaient sacrifier des chevaux de couleurs diverses: ils ont en effet pu établir la présence dans leur échantillon de deux chevaux noirs, d'un de couleur crème, de quatre chevaux bais et de six alezans. Une preuve de plus du fait que la domestication était enclenchée, puisque c'est elle qui a produit l'aspect très divers des chevaux d'aujourd'hui. Il semble que ce soit seulement au cours des deux derniers millénaires que la reproduction à partir d'un très petit nombre d'étalons s'est généralisée. C'est cela, et aussi une sélection incessante, qui a produit les centaines de types de chevaux souvent très athlétiques, arborant des dizaines de robes et de marques très variées, que nous connaissons. Malheureusement, cela a aussi multiplié les défauts d'organe, les cataractes et les nombreuses maladies congénitales auxquelles les éleveurs sont confrontés aujourd'hui. ■

FRANÇOIS SAVATIER

P. Librado et al., *Science*, vol. 356, pp. 442-445, 2017

LA GRANDE TACHE FROIDE DE JUPITER

La planète géante gazeuse est connue pour sa grande tache rouge. Elle présenterait une tache presque aussi grande (24 000 par 12 000 kilomètres) correspondant à une zone plus froide de 200 °C que l'atmosphère environnante. D'après Tom Stallard, de l'université de Leicester, elle résulterait des importants transferts de chaleur à partir des aurores polaires de la planète. Les astronomes pensent qu'elle est là depuis des milliers d'années.

LES FOURMIS AIDENT LEURS BLESSÉS

La fourmi africaine *Megaponera analis* est un prédateur de termites. Elle organise des raids lors desquels de nombreux insectes meurent ou sont blessés. Erik Frank, de l'université de Wurtzbourg, en Allemagne, et ses collègues ont observé que les fourmis blessées sont ramenées au nid par leurs congénères, un cas unique chez des invertébrés. Avec un modèle mathématique simple, les chercheurs ont montré qu'il y a un avantage à porter secours à ses blessés : cela confère à la colonie une taille plus grande.

AUX ORIGINES DE L'HOMME DE FLORÈS

Une équipe dirigée par Debbie Argue, de l'université nationale d'Australie, a étudié chez l'homme de Florès (*Homo floresiensis*) 133 traits du crâne, des mâchoires, des dents, des bras, des jambes, des épaules. Ce petit hominide d'Indonésie serait plus proche d'*H. habilis* qu'il ne l'est d'*H. ergaster*, d'*H. erectus* et de toutes les formes humaines postérieures. Ses ancêtres seraient donc issus d'*H. habilis*, l'auteur des premiers outils de pierre taillée clairement humains, il y a quelque 1,75 million d'années. Une preuve de plus que des humains sortent d'Afrique depuis... qu'il y a des humains.

L'IMPOSSIBLE ZÉRO KELVIN

Selon le troisième principe de la thermodynamique, il n'existe aucune procédure capable de refroidir un système à zéro kelvin (-273,15 °C) en un nombre fini d'étapes, soit en un temps fini. Mais, contrairement aux deux premiers principes, celui-ci n'est pas fondé sur une démonstration solide. Lluís Masanes et Jonathan Oppenheim, de l'University College de Londres, ont proposé une nouvelle preuve de ce principe qui a l'intérêt de se généraliser à des systèmes quantiques.

L'approche adoptée par les deux physiciens est d'exprimer une température limite en fonction de la durée du refroidissement, qui peut être atteinte indépendamment du protocole choisi (celui-ci peut être quantique). Les chercheurs ont transposé le problème de la thermodynamique à celui de la théorie de l'information quantique (il existe en effet de grandes similarités entre la notion d'entropie thermodynamique et celle de l'entropie mathématique en théorie de l'information, telle que développée par Claude Shannon et poursuivie par Andreï Kolmogorov). Ils ont comparé une machine thermique, qui refroidit un système en transférant son énergie dans un réservoir, à un ordinateur universel de Turing effectuant des calculs. Par cette démarche, ils ont pu déterminer de



TOUJOURS PLUS FROID

Certains dispositifs nécessitent d'être refroidis, par exemple à l'aide d'azote liquide (ci-dessus). Mais pourrait-on aller jusqu'au zéro absolu ? Il semble bien que non.

façon rigoureuse la température limite qu'il est possible d'atteindre en un temps fini.

Comme on pouvait s'y attendre, un système fixe, de taille finie, ne peut transférer qu'une certaine quantité d'énergie en un temps fini. Et en un temps fini, un tel système ne peut exploiter un réservoir de taille infinie pour y transférer son énergie. De plus, la vitesse de transfert diminue à mesure que la température se rapproche du zéro absolu, de sorte qu'il est impossible d'atteindre le zéro absolu. Les deux physiciens confirment donc l'énoncé du troisième principe de la thermodynamique en consolidant et en généralisant sa démonstration. ■

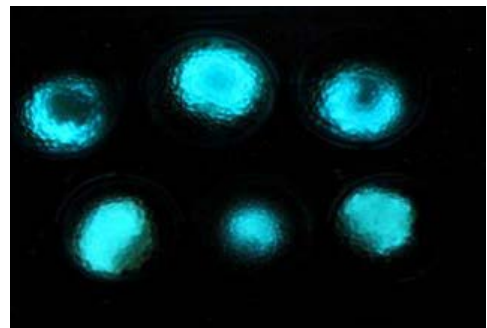
S. B.

L. Masanes et J. Oppenheim, *Nature communications*, vol. 8, 14538, 2017

DÉMINER AVEC DES BACTÉRIES

Chaque année, plusieurs milliers de personnes sont tuées ou blessées par des mines antipersonnel malgré un traité international pour leur interdiction, entré en vigueur en 1999. Près de 100 millions de ces dispositifs seraient toujours enterrés dans près de soixante-dix pays. De vastes campagnes de déminage sont en cours, mais les techniques de détection restent à améliorer. Qu'elles utilisent des rats dressés ou des robots, la recherche des mines ne peut se faire sans intervention humaine et expose les démineurs à de graves accidents.

Shimshon Belkin, de l'université hébraïque de Jérusalem, et son équipe ont observé que les mines libèrent de petites quantités de vapeur d'explosif qui s'accumulent dans le sol. Ils ont alors modifié génétiquement des bactéries pour qu'elles brillent par fluorescence en présence de



Les bactéries, contenues dans ces microcapsules, sont fluorescentes et brillent en présence de vapeurs d'explosifs.

ces composés chimiques. Les bactéries, encapsulées dans des billes en plastique, sont ensuite dispersées dans le champ de mines. Un dispositif laser détecte alors la position des bactéries. ■

S. B.

S. Belkin et al., *Nature Biotechnology*, vol. 35, pp. 308-310, 2017

EN IMAGE

Le lézard ocellé est le plus grand lézard d'Europe et mesure jusqu'à 70 centimètres de longueur pour les mâles. Jeune, le reptile présente une majorité d'écailles marron et certaines forment des taches blanches (ocelles). Progressivement, ces écailles deviennent vertes et noires. Puis, certaines changent de couleur, de noir à vert et inversement. Le motif juvénile disparaît au profit d'un dessin «labyrinthique».

LES MATHS DÉCRIVENT LES MOTIFS DU LÉZARD OCELLÉ

En 1952, le mathématicien anglais Alan Turing a proposé un système d'équations différentielles pour expliquer comment se forment les motifs pigmentaires des zèbres, des tigres, des poissons-clowns, etc. Cependant, les motifs sur le dos du lézard ocellé (*Timon lepidus*, *ci-contre*), qui dessinent des labyrinthes composés d'écailles vertes et noires, ne semblent pas suivre les équations de Turing. Michel Milinkovitch, de l'université de Genève, et son équipe ont montré que les travaux d'un autre mathématicien de génie, John von Neumann, sur les «automates cellulaires», permettent de décrire les dessins du reptile.

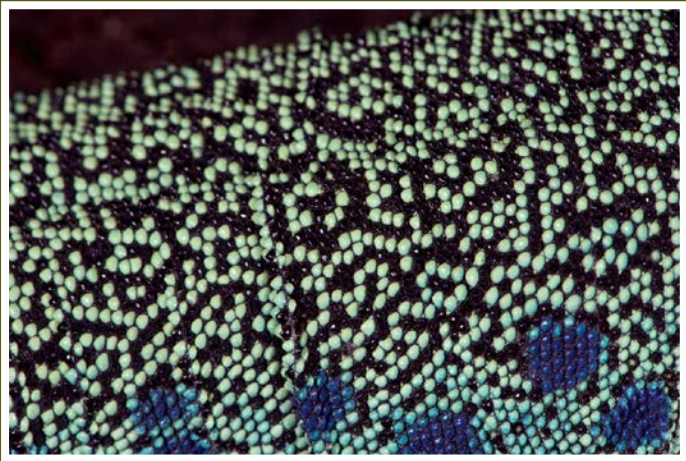
Pendant trois à quatre ans, les chercheurs ont régulièrement examiné au scanner optique trois lézards, afin de suivre l'évolution d'environ 5000 de leurs écailles (*voir le médaillon*). Ils ont alors identifié les règles de l'automate cellulaire – un réseau de «cellules» (ici les écailles) dont chacune change d'état en fonction des états de ses voisines, selon des règles simples fixées – qui reproduisent ces motifs. Michel Milinkovitch et ses collègues ont simulé par ordinateur cet automate et ont obtenu un résultat très proche de ce que l'on observe chez les reptiles en question.

Une énigme restait à résoudre: à l'échelle cellulaire, les équations de Turing s'appliquent toujours. Comment donnent-elles un comportement d'automate cellulaire? Michel Milinkovitch et ses collègues ont compris que l'épaisseur de la peau sous les écailles joue un rôle important. En effet, la peau est épaisse sous l'écaille, mais très mince à la frontière avec ses voisines. Dans cette région, les interactions des cellules sont donc fortement réduites. En introduisant cet effet dans les équations de Turing et en résolvant celles-ci, les chercheurs ont bien retrouvé des motifs similaires à ceux du lézard ocellé. ■

S. B.

L. Manukyan *et al.*, *Nature*, vol. 544, pp. 173-179, 2017





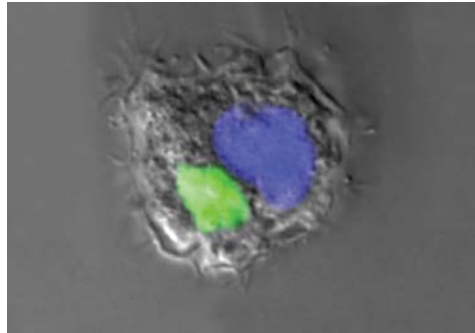
© Shutterstock.com/Omar Alonso Bautista - © L. Manukyan et al./Université de Genève (en médaillon)

VIROLOGIE

LA RUSE DU VIRUS GÉANT

Nouméavirus, un virus géant découvert récemment en Nouvelle-Calédonie, semble se répliquer selon une stratégie tout à fait originale d'après les travaux de l'équipe de Jean-Michel Claverie et Chantal Abergel, du CNRS et de l'université Aix-Marseille.

Jusqu'à présent, on connaissait deux stratégies de réplication des virus à ADN, reposant sur des utilisations différentes des enzymes de leur hôte. Certains virus, dits nucléaires, transportent leur ADN dans le noyau de l'hôte où se trouvent les enzymes qui transcrivent l'ADN en ARN, les ARN polymérase. Chez d'autres virus, dits cytoplasmiques, l'ADN viral reste dans le cytoplasme de la cellule contaminée. Ces virus apportent leurs propres ARN polymérase, ce qui leur permet d'enclencher le cycle infectieux et, ensuite, d'utiliser la machinerie de synthèse des protéines de l'hôte. Les particules virales transportent ainsi à la fois des gènes codant ces enzymes et les protéines elles-mêmes. Un grand nombre de virus géants suivent cette seconde stratégie, et Nouméavirus présente aussi de tels gènes. Cependant, une analyse protéomique a montré que lorsqu'il infecte une cellule, l'ADN n'est pas accompagné de ses enzymes de transcription.



Dans une amibe, le noyau (en fluorescence verte) retrouve son intégrité après avoir été perturbé par le virus (dont l'ADN est ici marqué en bleu).

Jean-Michel Claverie, Chantal Abergel et leurs collègues ont suivi le processus dans une amibe dont le noyau avait été chargé en marqueurs fluorescents. Quelques minutes après le début de l'infection, ils ont vu ces marqueurs se répandre dans le cytoplasme: le noyau était devenu perméable aux protéines fluorescentes. En déclenchant cette perméabilisation, le virus peut alors recruter les enzymes du noyau dont il a besoin pour démarrer la transcription de son ADN. Quelques heures plus tard, alors que la multiplication du virus bat son plein dans le cytoplasme, le noyau retrouve son apparence normale. ■

S. B.

E. Fabre et al., *Nature Communications*, vol 8, 15087, 2017

EN BREF

MARCHER POUR LES SCIENCES

Le mouvement « Marche pour les sciences » est né aux États-Unis à la suite de l'élection de Donald Trump, en réponse à la remise en cause des sciences, notamment sur le climat. La marche, qui a eu lieu le 22 avril, a eu un écho international avec 600 rassemblements dans le monde. En France, près de 12 000 personnes ont marché dans une vingtaine de villes pour promouvoir « des sciences ouvertes au cœur de la démocratie ».

Le mouvement, apolitique, rédige un livre blanc avec des propositions autour de trois idées : défendre l'indépendance et la liberté de la recherche, promouvoir un meilleur dialogue entre science et société, renforcer l'emploi des méthodes et résultats scientifiques dans le processus de décision politique.

MICHEL BRUNE, PRIX DES 3 PHYSICIENS 2017



Le prix des Trois Physiciens a été créé en 1951 à la mémoire des fondateurs du laboratoire de physique de l'École normale supérieure (ENS) de Paris, Henri Abraham, Eugène Bloch et Georges Bruhat, tous les trois victimes de la barbarie nazie. Il est décerné chaque année par l'ENS et la fondation Eugène-Bloch. Cette année, il honore Michel Brune, du laboratoire Kastler, du laboratoire Brossel, à l'ENS Paris, pour ses travaux sur l'électrodynamique quantique en cavité, en particulier pour la réalisation d'expériences de comptage non destructif de photons.

LES RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM

Partagez les savoirs

FILMS

Cycle De l'île de Pâques à Rapa Nui : embrasser un territoire
Proposé par A. de la Chapelle (artiste)

Samedi 3 juin - 15h : « Regards sur l'île » : projection & débat
L'île de Pâques, par J. Fernhout et H. Storck (Belgique - 1935 - 26')
Toromiro, par R. Olmos et C. Orziac (France - 1987 - 11')

Samedi 10 juin - 15h : « L'esprit des anciens » : projection & débat
Te Kuhane o Te Tepuna, par L. Pakarati (Chili - 2015 - 65' - VOSTF)

Samedi 17 juin - 15h : « Panoramas insulaires » : lecture, projections & débat
avec P. Vassel, écrivain

CYCLE DE CONFÉRENCES

Du côté des jardins
Ce cycle de conférences est organisé dans le cadre de l'exposition
Jardins des Galeries Nationales du Grand Palais

Lundi 12 juin - 18h : **Jardin des livres, livres de jardins**
A. Lemaire, conservatrice, bibliothèques du Muséum

Lundi 19 juin - 18h : **Les fleurs, entre passion et indifférence**
V. Chansigaud, historienne des sciences et de l'environnement, chercheuse associée au laboratoire SPHERE

Lundi 26 juin - 18h : **Sauvage ou régulier, mais toujours artificiel**
J-P Le Dantec, professeur honoraire des ENS d'architecture

Lundi 3 juillet - 18h : **Les jardins de l'Anthropocène**
A. Sourisseau, paysagiste et agricultrice, A. G. Cohen, doctorant en philosophie de l'écologie, Muséum

MÉTIERS DU MUSÉUM

Dimanche 25 juin - 15h
Médiatrice scientifique, spécialité : herpétologie
Avec F. Serre-Collet

Au Jardin des Plantes

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

SCIENCE

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

PRÉHISTOIRE

NÉANDERTAL EN AMÉRIQUE?

À San Diego, ce qui ressemble à une boucherie préhistorique très antérieure aux premiers vestiges humains connus en Amérique intrigue. En 1992, des chercheurs du muséum de la ville ont mis au jour 300 fragments d'os de mastodonte portant de nombreuses traces de percussion et accompagnés de pavés. Ils ne semblent pas pouvoir être dus à un processus naturel, mais leur âge, qui vient d'être établi, serait de 130 000 ans, alors que l'on pensait les premiers Américains arrivés il y a quelque 15 000 ans.

La nouvelle a provoqué une levée de boucliers chez les préhistoriens américains, qui réclament d'autres traces humaines plus certaines. On sait pourtant que le climat était froid il y a 130 000 ans, de sorte que des Eurasiens ont fort bien pu passer en Amérique. Des Néandertaliens? ■

F. S.

S. Holen *et al.*, *Nature*, vol. 544, pp. 479-495, 2017

BIOLOGIE

LE MICROBIOTE DÉCIDE DU MENU

Le microbiote a une grande influence sur la santé et peut être source de certaines maladies, comme la dépression ou l'hypertension. Il influencerait aussi le choix des aliments. L'équipe de Carlos Ribeiro, du centre Champalimaud, à Lisbonne, et ses collègues ont identifié certains mécanismes impliqués dans ce choix chez la drosophile.

Les chercheurs ont contrôlé l'alimentation des insectes en retirant divers acides aminés. La suppression de certains acides aminés essentiels a entraîné une baisse de la reproduction et une préférence pour de la levure (connue pour couvrir les besoins en protéines de l'insecte). Celle d'autres tout aussi importants, en revanche, n'a rien changé. Les biologistes ont découvert que certaines bactéries du microbiote, notamment *Acetobacter* et *Lactobacillus*, produisaient des métabolites à partir de l'alimentation de la drosophile lui indiquant qu'elle pouvait se passer des acides aminés manquants. Et ainsi, son activité de reproduction n'était pas altérée. ■

S. B.

R. Leitão-Gonçalves *et al.*, *PLoS Biology*, vol. 15(4), e2000862, 2017

PHYSIQUE

LA MUSIQUE DES MÉTÉORES ENFIN EXPLIQUÉE?



Les Perséides (ici en 2015) sont une pluie de météores revenant chaque année après le 20 juillet, issue des débris de la comète Swift-Tuttle. Leurs tailles varient du grain de sable au petit pois.

Quize mille tonnes de météorites frappent le sol chaque année. Une masse bien plus grande encore de météores, c'est-à-dire de corps extraterrestres entrant dans l'atmosphère sans parvenir au sol, se consume aussi dans l'air. Or de très nombreux témoins rapportent avoir entendu, alors qu'un météore se consumait dans le ciel devant eux, des craquements et des crissements dans le sol ou du moins autour d'eux. Ces sons ne peuvent provenir directement du météore volant à plusieurs dizaines de kilomètres d'altitude, car ils mettraient quelques minutes pour arriver. Alors? Michael Kelley, de l'université Cornell, et Colin Price, de celle de Tel Aviv, proposent que les oscillations de forts champs électriques établis à l'arrière du météore induisent des ondes radio (c'est-à-dire de longueur d'onde supérieure au millimètre), lesquelles font résonner des corps au sol.

L'idée n'est pas nouvelle, mais les mécanismes d'émission des ondes radio diffèrent d'une théorie à l'autre. Pour les deux chercheurs, les théories existantes ne sont pas satisfaisantes. Dans leur vision, le frottement du météore contre l'air ionise de nombreux atomes. Tandis que les ions suivent le météore, les électrons s'éloignent, déviés par le champ magnétique terrestre. Ce phénomène entraîne l'établissement de champs électriques très intenses en arrière du météore, lesquels engendrent de forts courants électriques oscillants à l'origine de bouffées d'ondes radio, exactement comme dans une antenne. D'après leurs calculs, les champs à la traîne des météores seraient si forts que la conversion en ondes sonores de seulement un millième de l'énergie de leurs émissions radio suffirait à engendrer des puissances sonores perceptibles. Si cette théorie se révélait pertinente, elle expliquerait un phénomène longtemps resté de l'ordre du mythe.

F. S.

M. C. Kelley et C. Price, *Geophysical Research Letters*, vol. 44, pp. 2987-2990, 2017

ÉVOLUTION

COMMENT LES CYANOBACTÉRIES ONT COMMENCÉ À RESPIRER

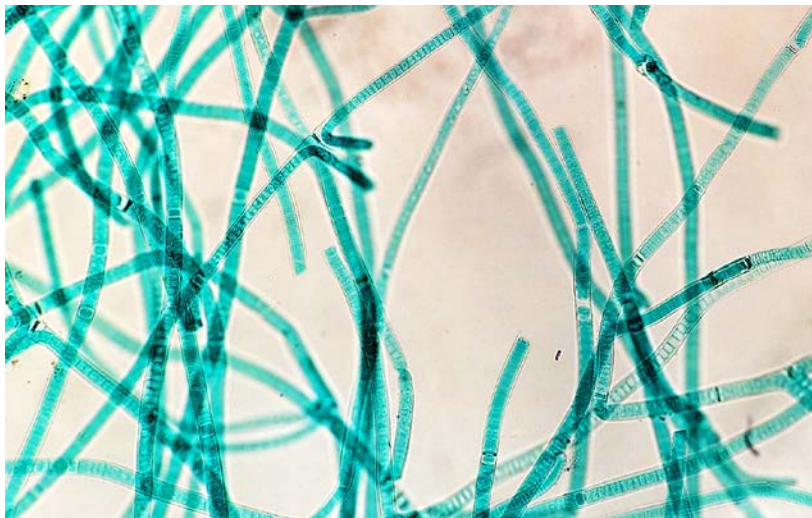
Il y a environ 2,6 milliards d'années, les cyanobactéries ont acquis la capacité de synthétiser du dioxygène par photosynthèse en incorporant des gènes provenant d'autres organismes.

On doit l'apparition de l'oxygène dans l'atmosphère terrestre, il y a 2,3 milliards d'années environ, aux cyanobactéries capables de réaliser la photosynthèse, dite oxygénique. D'autres organismes effectuaient la photosynthèse (le processus de production de matière organique en utilisant la lumière du soleil), mais seules les cyanobactéries avaient la machinerie spécifique qui produit du dioxygène.

Il est cependant difficile de savoir si la photosynthèse est d'abord apparue chez les cyanobactéries, avant d'être transférée aux autres bactéries, ou si le contraire s'est produit. En décrivant et analysant le génome de 41 nouvelles bactéries affiliées aux cyanobactéries, Rochelle Soo, de l'université du Queensland, en Australie, et ses collègues soutiennent la seconde hypothèse: ce serait par transfert horizontal de gènes, c'est-à-dire en incorporant des gènes provenant d'autres organismes, que les cyanobactéries ont acquis la capacité de réaliser la photosynthèse oxygénique.

Les cyanobactéries seraient réparties en trois classes partageant un ancêtre commun: les oxyphotobactéries (les cyanobactéries photosynthétiques classiques), la classe Melainabacteria (décrite en 2013) et une nouvelle classe, mal connue, que Rochelle Soo et ses collègues ont nommée Sericytochromatia. Pour en savoir plus, les chercheurs ont analysé des données métagénomiques et ainsi découvert 38 nouvelles espèces de la classe Melainabacteria et 3 espèces de la classe Sericytochromatia. L'étude des génomes montre que ces deux classes ne possèdent aucune des deux machineries cellulaires simultanément nécessaires pour la photosynthèse oxygénique, à savoir les photosystèmes I et II. «Bien qu'on puisse remettre en cause la classification proposée par les auteurs de ces classes dans le groupe des cyanobactéries, ces travaux montrent que l'ancêtre des cyanobactéries, commun à ces deux classes, n'avait aucune capacité photosynthétique», commente Purificación López-García, de l'université Paris-Sud.

D'après Rochelle Soo et son équipe, les oxyphotobactéries ont acquis la photosynthèse oxygénique après s'être séparées des deux autres classes, en intégrant des gènes issus



Il y a 2,3 milliards d'années, une classe de cyanobactéries (ici du genre *Tolypothrix*), ayant la capacité de réaliser la photosynthèse oxygénique, a enrichi l'atmosphère terrestre en oxygène.

7 500

ESPÈCES DE
CYANOBACTÉRIES,
AU MOINS, SONT
CONNUES POUR
RÉALISER LE
PROCESSUS DE LA
PHOTOSYNTÈSE.
PLUSIEURS
CENTAINES VIVENT
LIBREMENT,
MAIS LA PLUPART
SONT EN SYMBIOSE
AVEC DES
CHAMPIGNONS
(DANS LES LICHENS),
DES ÉPONGES,
DES AMIBES, ETC.

d'autres organismes. «Les photosystèmes I et II étaient déjà présents dans d'autres bactéries photosynthétiques anoxygéniques, mais jamais ensemble. C'est en acquérant l'ensemble des gènes codant les deux photosystèmes que les cyanobactéries ont accédé à la photosynthèse produisant du dioxygène, beaucoup plus efficace sur le plan énergétique», explique Purificación López-García.

En janvier 2017, des travaux reposant sur la notion d'horloge génétique dataient la divergence entre les mélainabactéries et les oxyphotobactéries à 2,5-2,6 milliards d'années. L'équipe de Rochelle Soo estime donc que l'apparition de la photosynthèse oxygénique s'est produite à cette époque, plus récente qu'on ne l'admettait généralement.

L'analyse comparée des génomes montre enfin que les machineries cellulaires de la chaîne respiratoire, présentes dans les trois classes de cyanobactéries, sont apparues de façon indépendante, provenant ainsi d'autres organismes variés. Cela confirme l'importance des transferts horizontaux de gènes lors de l'acquisition de processus cellulaires fondamentaux par les bactéries. ■

MARTIN TIANO

R. M. Soo *et al.*, *Science*, vol. 355, pp. 1436-1440, 2017

COMMENT SAVOIR SI QUELQU'UN RÊVE ?

Une découverte récente permet de déterminer avec une bonne fiabilité si une personne rêve. En réveillant plusieurs fois une trentaine de sujets pour savoir s'ils rêvaient, Francesca Siclavi, de l'université de Lausanne, et ses collègues ont identifié une zone toujours très active pendant les songes. Cette région à l'arrière du cerveau comprend notamment des aires sensorielles (surtout visuelles) et impliquées dans l'intégration des données perceptives, ce qui rend cette région propice à la simulation virtuelle caractéristique des rêves.

DES CHENILLES MANGE-PLASTIQUE

Le polyéthylène représente 40 % de la production européenne de plastique. Or il n'est pas biodégradable et s'accumule dans la nature. Plusieurs approches, utilisant des produits chimiques ou des bactéries ont été testées pour le dégrader, mais elles sont lentes. Federica Bertocchini, de l'université de Cantabrie, en Espagne, et ses collègues ont observé que la chenille de la fausse teigne de la cire (*Galleria mellonella*) dévore le plastique pour former de l'éthylène glycol, certes toxique, mais plus facile à dégrader.

URANUS SE DÉVOILE AVEC SES AURORES

Les aurores polaires sont liées à d'intimes interactions du champ magnétique de la planète, de son atmosphère et du vent solaire. Celles d'Uranus ont été rarement vues. En surveillant les éruptions solaires, Laurent Lamy, de l'observatoire de Paris, et ses collègues ont estimé le moment où Uranus recevrait une bouffée de vent solaire. Ils ont ainsi détecté plusieurs aurores, grâce au télescope spatial *Hubble*. Ce qui leur a permis d'étudier le champ magnétique d'Uranus et de déterminer la position de ses pôles.

L'ÉNERGIE SOMBRE, UNE ILLUSION ?

En 1998, l'étude d'un type particulier d'explosions d'étoiles, les supernovæ de type Ia, a permis d'affirmer que l'Univers est en expansion accélérée. Cette conclusion s'inscrit dans le cadre du modèle standard de la cosmologie qui, pour simplifier les calculs, fait l'hypothèse que l'Univers est homogène à grande échelle. Or pour expliquer cette dynamique accélérée, il faut supposer l'existence d'une «énergie sombre», qui représenterait 68 % du contenu de l'Univers et dont la nature est inconnue. Mais une autre approche est revenue à l'actualité.

Elle consiste à prendre en compte les hétérogénéités dans la distribution de la matière (les amas de galaxies et les vides cosmiques). En 2000, Thomas Buchert, maintenant à l'université Claude-Bernard, à Lyon, a suggéré qu'un effet de rétroaction pouvait jouer sur la vitesse d'expansion de l'Univers: les régions riches en matière tendent à courber l'espace-temps de telle sorte que l'expansion de l'Univers serait plus lente dans ces régions et plus rapide dans les espaces vides.

Ces hétérogénéités expliqueraient ainsi la dynamique cosmique observée sans faire appel à l'énergie sombre. Cette idée vient de recevoir



DES EXPLOSIONS EXCEPTIONNELLES

L'étude des supernovæ de type Ia (en bas, à gauche) suggère une expansion cosmique accélérée. La cause reste inconnue.

le renfort des simulations de Gábor Rácz, de l'université Loránd Eötvös, et ses collègues: l'effet des hétérogénéités conduit à des résultats comparables à la dynamique d'expansion observée. Mais certains experts, qui ont réalisé d'autres simulations fondées sur les hétérogénéités, sont étonnés par l'importance de l'effet de rétroaction trouvé. Les chercheurs doivent encore comparer leurs hypothèses de travail pour comprendre d'où viennent ces différences. Et selon d'autres cosmologistes, la rétroaction devrait être si faible que l'hypothèse de l'énergie sombre ne peut être écartée. La lumière est loin d'être faite sur cette énigme de l'Univers... ■

S. B.

G. Rácz et al., *MNRAS*, en ligne, 2017

DES NANOPARTICULES FRANCHISSENT LE MUCUS

Depuis les années 2000, les chercheurs mettent au point des nanoparticules biodégradables servant de «cargos» pour transporter, par voie respiratoire, des médicaments jusqu'aux cellules épithéliales qui tapissent les muqueuses des poumons afin de traiter, par exemple, des symptômes locaux liés à l'asthme ou la mucoviscidose. Mais la plus grande partie des substances actives sont arrêtées par le mucus, liquide visqueux qui protège les bronches. Craig Schneider et ses collègues, de l'université Johns Hopkins, à Baltimore, aux États-Unis, proposent d'utiliser des nanoparticules modifiées en surface par des chaînes de polyéthylène-glycol qui les rendent non mucoadhésives.

Des travaux théoriques datant de 2012 semblaient indiquer que de telles nanoparticules

ne sont pas adaptées aux voies respiratoires, en raison de la trop grande épaisseur de la couche de mucus qui les caractérisent.

Grâce à des expériences *in vivo*, les chercheurs de Baltimore contredisent cette idée: chez la souris, non seulement les nanoparticules mucopénétrantes diffusent plus vite dans les bronches, mais elles sont aussi réparties de façon plus uniforme et retenues plus longtemps dans les tissus que les nanoparticules mucoadhésives. Utilisées pour transporter un anti-inflammatoire stéroïdien, les nouvelles nanoparticules réduisent plus efficacement des inflammations pulmonaires aiguës chez le rongeur. Il reste à tester cette technique chez l'homme. ■

M. T.

C. Schneider et al., *Science Advanced*, vol. 3, e1601556, 2017

TECHNOLOGIE

IMPRIMER DU VERRE EN 3D

Bastian Rapp et ses collègues de l'Institut de technologie de Karlsruhe ont mis au point un procédé pour imprimer en trois dimensions et avec une haute précision des objets en verre de silice.

Jusqu'à présent, c'était impossible, car pour obtenir du verre, et notamment du verre de haute qualité, des températures élevées et des produits chimiques agressifs sont nécessaires. Les chercheurs ont contourné le problème en incorporant des nanoparticules de silice dans une matrice monomère liquide. En utilisant la stéréolithographie, une technique d'impression 3D qui solidifie la matrice à l'aide d'un laser, il est possible de donner au matériau ainsi préparé des formes tridimensionnelles complexes comportant des détails de taille micrométrique. Le polymère obtenu est vitrifié par chauffage à 1300° C. D'après les chercheurs, le verre obtenu est dénué de pores et sa surface a une très faible rugosité (quelques nanomètres). Aussi transpa-



CHÂTEAU DE VERRE

Ce minuscule portail de château a été imprimé en verre par le nouveau procédé d'impression 3D.

rent que le verre classique, il peut être utilisé en optique. La technique inventée à Karlsruhe devrait même permettre de fabriquer des verres colorés. Comment? En ajoutant des sels métalliques appropriés, comme le font les verriers depuis des siècles. ■

ALINE GERSTNER

F. Kotz et al., *Nature*, vol. 544, pp. 337-339, 2017

EN BREF

UNE SUPERNOVA LENTILLÉE

Les lentilles gravitationnelles sont des objets massifs (galaxie, amas de galaxies) qui, en déformant l'espace-temps voisin, dévient la lumière d'une source en arrière-plan et peuvent alors en produire une image amplifiée, voire plusieurs exemplaires (la lumière empruntant plusieurs chemins de différentes longueurs). Ariel Goobar, du centre Oskar Klein, à Stockholm, et son équipe ont détecté quatre images d'une même supernova à travers une lentille gravitationnelle. Cette supernova est de type Ia, c'est-à-dire de celles qu'on utilise pour mesurer les distances dans l'Univers. En étudiant le temps mis par la lumière de chaque image, les chercheurs en apprendront plus sur l'expansion du cosmos.

4ÈME ÉDITION

Au cinéma le Grand Action
5 rue des Écoles, 75005, Paris

UNIVERS CONVERGENTS

sciences-fictions-société

Le ciné-club de
l'Institut Henri Poincaré

Prochaines séances :

30 mai - *The private life of Sherlock Holmes*

27 juin - *The Big Short*

Le dernier mardi de chaque mois
En présence de Cédric Villani et de nombreux intervenants

Entrée libre sur réservation :
www.ihp.fr/cine-club-2017

En partenariat avec :

NEUTRINOS ET URANIUM 235

Les neutrinos sont des particules qui existent en trois versions, ou saveurs. Ils ont la propriété d'«osciller», c'est-à-dire de passer spontanément d'une saveur à une autre. Lors de différentes expériences auprès de centrales nucléaires, sources d'antineutrinos (les antiparticules des neutrinos), le flux mesuré de ces particules, toutes d'une même saveur, était inférieur à la prévision théorique.

Deux explications ont été avancées: soit les antineutrinos oscillent vers un quatrième type de neutrino, dit stérile, soit le flux théorique d'antineutrinos produit par le combustible radioactif est erroné. Les physiciens de l'expérience *Daya Bay*, en Chine, confortent la seconde hypothèse et précisent que le problème viendrait du flux issu de l'uranium 235. ■

S. B.

Collaboration Daya Bay, en ligne, 4 avril 2017
<https://arxiv.org/abs/1704.01082>

UN TRÈS VIEUX CHAMPIGNON?

Depuis quelques années, les chercheurs découvrent des traces de vie dans la roche de la croûte océanique. Les cavités et les fractures auraient hébergé différentes formes de vie microscopique. Ainsi, dans du basalte de la formation Ongeluk, en Afrique du Sud, datée de 2,4 milliards d'années, Stefan Bengtson, du Muséum d'histoire naturelle de Suède, et ses collègues ont trouvé des fossiles en forme de filaments qui rappellent le mycélium des champignons.

La similarité de la structure avec des fossiles plus récents identifiés comme des champignons renforce cette hypothèse. Si elle se confirme, cela repousserait de près d'un milliard d'années l'apparition des premiers eucaryotes, jusque-là estimée à 1,4 milliard d'années. En outre, cette découverte ouvre de nouvelles perspectives sur la croûte océanique ancienne, qui aurait permis l'évolution d'organismes complexes. ■

S. B.

S. Bengtson et al., *Nature Ecology & Evolution*, vol. 1, n° 0141, 2017

DE L'ADN FOSSILE DANS LA BOUE !



Un ours est mort sur cette couche sédimentaire de la grotte de la Caune de l'Arago, à Tautavel, dans les Pyrénées orientales. Ses sédiments révéleront-ils que des humains l'ont foulée aussi ?

C'est une immense surprise: les fins sédiments des grottes contiennent de l'ADN identifiable, y compris de l'ADN humain! Autour de Svante Pääbo, de l'institut Max-Planck d'anthropologie évolutionniste, à Leipzig, une équipe internationale vient de démontrer qu'il est possible de détecter des traces génétiques d'espèces mammifères dans les sédiments de grottes. Qu'ont fait les chercheurs? Pour commencer, ils ont rassemblé 85 échantillons de sédiments provenant d'habitats en cavernes connus de Néandertaliens ou de Denisoviens (hominidés de Denisova); puis ils ont tenté d'en extraire de l'ADN mitochondrial de mammifères. Cet «ADNmt» provient non pas du noyau de la cellule, mais des mitochondries, les petits organites qui lui apportent son énergie. Le résultat est étonnant: alors que, selon l'expérience des paléogénétiens, un milligramme d'os contient entre 34 et 9142 fragments d'ADNmt, la même masse de sédiments contient entre 30 et 4490 fragments d'ADNmt de mammifères.

Bien entendu, l'ADNmt trouvé dans les sédiments est noyé dans beaucoup plus d'ADN – surtout celui de microorganismes –, mais les paléogénétiens savent trier les séquences grâce à leurs puissants programmes bio-informatiques. Ils ont ainsi identifié des mammifères de 12 familles: mammoth, rhinocéros à poils laineux, hyènes des cavernes et tachetées, ours des cavernes, bovidés, suidés (sangliers), équidés et canidés (loups)... Afin d'identifier la présence d'ADNmt humain, ils ont fabriqué, à partir d'une séquence de référence, des sondes spécifiques des espèces néandertalienne et denisovienne, conçues pour se lier à un fragment d'ADNmt complémentaire de ces espèces. Ils ont ainsi identifié entre 10 et 165 séquences néandertaliennes, dans les grottes d'El Sidrón (Espagne), de Trou Al'Wesse (Belgique) et de Denisova (Sibérie), où l'on sait par des fossiles que des Néandertaliens ont séjourné. Neuf échantillons extraits de la galerie et de la grotte de Denisova nous apprennent que les Denisoviens y ont vécu depuis les débuts de la sédimentation dans cette grotte, au Pléistocène moyen (il y a 781 000 à 126 000 ans). Les chercheurs n'ont pas pu identifier d'ADNmt dans quatre autres sites où des fossiles néandertaliens ont aussi été découverts. Ils expliquent cela par l'ancienneté des sédiments de deux d'entre eux et par le petit nombre des échantillons qui leur sont parvenus des deux autres. ■

F. S.

V. Slon et al., *Science*, en ligne le 27 avril 2017



INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

**LE MYTHE DE LA SINGULARITÉ
FAUT-IL CRAINdre
L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ?**
Jean-Gabriel Ganascia

Seuil, 2017
144 pages, 18 euros

Certains s'en félicitent, d'autres s'en effraient: les machines vont prendre le pouvoir. Devenus autonomes, les systèmes conçus pour servir les humains se déploieront d'eux-mêmes et se grefferont sur la matière organique pour donner naissance à des cyber-organismes. Ainsi, l'homme cessera d'avoir prise sur son destin. Telle est la Singularité que, vers 1950-1980, la science-fiction imaginait. Jusque-là, rien là de choquant.

Aujourd'hui, par contre, des chercheurs, des roboticiens, des philosophes se réclamant de la science prétendent non plus imaginer, mais prévoir. Avec ceux-là, Jean-Gabriel Ganascia est sévère. Transhumanistes enthousiastes ou, au contraire, géants du Web déstabilisés à l'idée que leur pouvoir soit moins assuré qu'il n'en a l'air, ils se trompent – ou nous trompent. Par exemple, ils confondent autonomie technique et autonomie philosophique. L'autonomie technique est en cours de réalisation, mais rien n'autorise à affirmer que les machines sauront, sans concours humain, acquérir l'autonomie philosophique.

La prévision de la Singularité est obtenue en prolongeant des lois observées en période normale. Cette méthode, souligne Jean-Gabriel Ganascia, repose sur un axiome implicite d'uniformité: les conditions d'amélioration technique subsisteront. Voilà qui n'est pas acquis!

Un aspect inattendu du livre réside dans le rapprochement opéré entre gourous de la Singularité et gnostiques. Selon les membres de ce courant religieux de l'Antiquité, un démiurge ayant usurpé le pouvoir de Dieu était responsable de l'imperfection du monde; dualistes, ils dissociaient le spirituel et le matériel; ils anticipaient une libération du temps grâce à laquelle certains accéderaient à l'Être Pur, mettant fin aux maux causés par le démiurge. Tel semble être l'état d'esprit des prophètes de la Singularité.

DIDIER NORDON / ESSAYISTE

HISTOIRE DES SCIENCES

**LES COULISSES DES
LABORATOIRES D'AUTREFOIS**
**Anaïs Massiot
et Natalie Pigeard-Micault**

Glyphe, 2016
100 pages, 12 euros

Les deux auteures de ce livre, l'une archiviste aux Ressources historiques du musée Curie et l'autre responsable desdites Ressources, y évoquent la vie à l'Institut du radium, depuis sa fondation jusqu'à la Seconde Guerre mondiale. Toutefois, leur propos n'est pas de relater les activités de recherche. Sans se limiter aux tâches accomplies dans les ateliers et laboratoires, elles ont exhumé des archives la vie des personnels modestes qui ont apporté leur concours au progrès de la lutte contre le cancer.

Souvent, c'est d'abord un homme qui est recruté par l'institut avant d'y trouver un emploi pour son épouse, puis pour un parent. Une partie de ce personnel constitue bientôt une petite communauté qui vit sur le campus Curie, espace bordé par les rues Saint-Jacques, Pierre-et-Marie-Curie et d'Ulm du cinquième arrondissement de Paris. Des appartements sont aménagés au dernier étage des pavillons, et des mariages résultent souvent des rencontres entre ces familles. Les besoins sont variés, allant des techniciens aux personnels de service, sans oublier les apprentis, garçons de laboratoire, infirmières, standardistes, jardiniers, etc. Citons enfin les personnels administratifs dont l'importance croît avec les activités de recherche et le nombre des patients traités pour un cancer. Le bon fonctionnement repose sur l'efficacité des secrétaires qui assurent les liaisons entre l'établissement et le patient, sa famille, son médecin habituel, et archivent les dossiers.

C'est une attachante galerie de personnages qui nous est révélée avec bonheur par ce précieux petit ouvrage, face méconnue d'une institution créée en 1910 autour de Marie Curie et devenue l'institut Curie dans les années 1970.

JACQUES GAPAILLARD /
CENTRE FRANÇOIS VIÈTE, UNIVERSITÉ DE NANTES

ÉTHOLOGIE

L'INTELLIGENCE ANIMALE CERVELLE D'OISEAUX ET MÉMOIRE D'ÉLÉPHANTS Emmanuelle Pouydebat

Odile Jacob, 2017

215 pages, 22,90 euros

L'intelligence ou la conscience animale font de beaux titres, mais ce sont des notions éminemment difficiles à définir ! Heureuse surprise, cet ouvrage de vulgarisation se joue de cette difficulté puisque l'auteure la retourne à son avantage en montrant que l'intelligence animale est un domaine plus varié et complexe qu'il n'a longtemps semblé.

Le lecteur novice est donc habilement conduit à comprendre, à travers les découvertes récentes et les interrogations, que l'intelligence animale recouvre bien des sujets très différents tels que l'utilisation d'outils, la culture (ou proto-culture animale), la taille du cerveau (comme mesure de l'intelligence), les types d'intelligence (variables selon les espèces), le retour au gîte. Emmanuelle Pouydebat traite même de sujets plus actuels – que l'on n'osait pas aborder en biologie jusqu'à récemment – comme la coopération, l'altruisme et l'empathie. La conclusion s'intitule d'ailleurs « De l'aberration de devoir prouver l'intelligence animale » !

Le livre est court pour un pareil sujet. Pour autant, il ne s'agit pas d'un survol superficiel, l'auteure ayant su concilier un style familier et personnel avec des références et une abondance d'exemples parfois vécus. Emmanuelle Pouydebat, dont le domaine est au confluent de la paléoanthropologie et de l'éthologie, se situe dans la lignée d'Yves Coppens, qui a écrit la préface, et de Jane Goodall, qui a toujours mêlé science et éthique. Avec prudence mais légèreté, elle parvient à évoquer en fin de volume les grandes interrogations de société et de science vivante auxquelles l'éthologie moderne a conduit en replaçant, à la suite de Darwin, notre espèce dans le monde animal sur les plans physique et moral. D'où une conclusion osée, mais lucide, sur l'éthique animale, la place de l'homme dans la nature et l'avenir de l'humanité.

PIERRE JOUVENTIN / ÉTHOLOGUE,
DIRECTEUR DE RECHERCHE ÉMÉRITE AU CNRS

ARCHÉOLOGIE

LA TRUELLE ET LE PHYLACTÈRE, LA PROXIMITÉ DES IMAGES Bénédicte Coudière

Fedora, 2017

230 pages, 28 euros

Une nouvelle collection de l'éditeur donne la parole à des acteurs extérieurs à l'archéologie, afin de profiter de leur regard décalé. Journaliste, historienne de l'art, créatrice du blog *Bulles & Parchemins*, l'auteure nous parle ici du rapport de la bande dessinée avec l'archéologie puis l'histoire. Le lecteur sera impressionné par la richesse et la diversité des approches du neuvième art, surtout dans l'exploration des genres : uchronie, dystopie, steampunk...

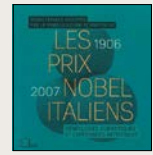
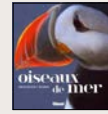
Bénédicte Coudière a eu la bonne idée d'interviewer plusieurs dessinateurs et scénaristes. Dommage que les archéologues, sauf un, n'aient pas été sollicités. Point particulièrement intéressant, les bédéastes s'inspirent des travaux de l'archéologie et de l'histoire pour en faire de beaux enfants, comme dirait Alexandre Dumas, mais, ce faisant, inspirent à leur tour les archéologues et les historiens eux-mêmes. Ils leur apportent par exemple des « mises en couleurs » de leurs théories grâce aux illustrations qu'ils commandent pour leurs ouvrages.

Quelques regrets cependant : si l'auteure s'était davantage entourée d'archéologues, elle aurait évité certaines maladresses, comme le fait de donner la parole à Jens Harder, dont l'œuvre fleurit le créationnisme, ou de parler de la « théorie » des ombres chinoises dans les grottes ornées. On aurait aimé aussi qu'elle s'intéresse plus à la bande dessinée anglosaxonne et aux mangas historiques, sans parler de Disney...

Ces réserves ne doivent pas empêcher de lire cette excellente synthèse, bien écrite et pleine d'humour sur les relations entre la bande dessinée et les sciences historiques et archéologiques.

ROMAIN PIGEAUD / CHERCHEUR ASSOCIÉ
À L'UMR 6566, UNIVERSITÉ DE RENNES 1

ET AUSSI



BIBRACTE

Fabienne Lemarchand

Bibracte EPCC, 2017

104 pages, 18 euros

Toute une ville, d'abord gauloise, puis romaine, sous les bois. Voilà ce qu'est Bibracte, le grand oppidum des Éduens, le plus puissant des peuples gaulois. Édité par le centre archéologique européen installé sur place pour fouiller cette ville antique, ce petit livre très joliment illustré présente les principales structures de ce site hors du commun, son histoire et le récit de sa découverte. Sa lecture constituera un préalable agréable et utile à la visite de ce grand site de notre histoire et de son musée.

LES OISEAUX DE MER

Fabrice Genevois

Glénat, 2017

192 pages, 19,99 euros

Les oiseaux de mer sont des sous-marins volants qui marchent sur terre. Pour nous en persuader, l'auteur, ornithologue, commente les images de Biosphoto, une agence représentant 450 photographes naturalistes dans le monde. Il n'en fallait pas moins pour saisir dans mille postures spectaculaires les oiseaux évoqués ici. Chaque page y est source d'étonnement ; chaque solution technique trouvée par l'ingénieur Évolution pour faciliter aux oiseaux l'accès aux trois éléments étonne. La cruauté et l'adaptabilité de ces prédateurs hors pair n'ont d'égalé que le caractère attendrissant des bébés qu'ils élèvent farouchement.

LES PRIX NOBEL ITALIENS

Segretariato Europeo

per le Pubblicazioni Scientifiche

Éditions rue d'Ulm

753 pages, 34 euros

Ce livre collectif, traduit de l'italien, illustre de quelle façon particulière la Botte produit ses grands chercheurs. Les travaux de vingt lauréats italiens du prix Nobel de la période 1906-2007, surtout scientifiques, y sont présentés et replacés au sein de l'histoire culturelle européenne. D'un grand intérêt scientifique, ces récits montrent aussi que l'Italie du xx^e siècle, comme l'Allemagne, a perdu beaucoup de ses grands savants, parce que ceux-ci ont refusé de vivre sous le fascisme et qu'ils ont pu être accueillis ailleurs. Une situation qui semble malheureusement se reproduire de nos jours dans certains pays.

PARIS

JUSQU'AU 8 JANVIER 2018

Musée de l'Homme, 17 place du Trocadéro – 75116 Paris
www.museedelhomme.fr • Tél. 01 44 05 72 72

NOUS ET LES AUTRES

Des préjugés au racisme



Catégoriser, c'est-à-dire grouper dans des catégories des éléments perçus comme étant de même nature, est un processus cognitif universel et utile. Mais il faut aussi s'en méfier: ce mécanisme naturel peut être manipulé socialement pour conduire à une hiérarchisation des personnes et des sociétés, aux stéréotypes et préjugés, puis aux discriminations et aux massacres. Cette première exposition temporaire du musée de l'Homme depuis

sa réouverture a le mérite de le montrer clairement, à travers une scénographie immersive et des dispositifs multimédias. Anthropologie, biologie, sociologie et histoire sont convoquées pour expliquer au visiteur les ressorts du racisme et lui faire comprendre ses réactions face aux autres. En ces temps où la régression menace, une exposition bienvenue et salutaire, qui donnera au visiteur des arguments plus solides que ceux des comptoirs de café. ■

POITIERS

JUSQU'AU 7 JUILLET 2017

Espace Mendès-France
1 place de la Cathédrale – 86000 Poitiers
http://emf.fr • Tél. 05 49 50 33 08

Maths & puzzles



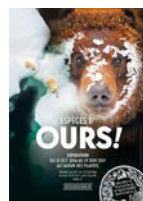
Des activités ludiques portant sur des puzzles géométriques, afin de familiariser enfants ou adultes à quelques facettes des mathématiques: telle est l'idée de cette exposition originale, où l'on découvrira des puzzles paradoxaux, les tangrams, polyminos ou polycubes, la construction d'un carré à l'aide de carrés, le calcul d'aires ou de volumes, des éléments d'histoire... ■

PARIS

JUSQU'AU 19 JUIN 2017

Grande galerie du Jardin des plantes,
36 rue Geoffroy-Saint-Hilaire – 75005 Paris
www.mnhn.fr • Tél. 01 40 79 54 79

Espèces d'ours



La biologie des huit espèces actuelles d'ours, leurs habitats, leur histoire évolutive, leurs relations avec les hommes, les mythes et légendes qui leur sont liés, etc., sont présentés au travers d'une centaine d'objets, dont 25 spécimens d'ours naturalisés et 3 squelettes complets. L'exposition est bilingue, en français et en anglais. ■

EXPOS, CONFÉRENCES...

JEUDI 1^{ER} JUIN - 19 H

Cité des sciences et de l'industrie – 75019 Paris
www.cite-sciences.fr
Tél. 01 85 53 99 74

FLORE INTESTINALE, ATTENTION FRAGILE !

Le microbiote intestinal intervient dans le système immunitaire et peut être impliqué dans des pathologies telles que le diabète ou le cancer. Quatre intervenants vous l'expliqueront dans cette conférence qui se tient également en duplex au Muséum d'histoire naturelle de Toulouse.

JUSQU'AU 6 JUIN 2017

Muséum d'histoire naturelle de Nantes
www.museum.nantes.fr
Tél. 02 40 41 55 00

À VUE D'ŒIL

Le photographe angevin Daniel Perdriau présente une série de ses prises de vue d'insectes, caractérisées par une lumière diaphane et un style minimaliste.

MARDI 27 JUIN 17 H - 19 H

Académie des sciences
75006 Paris
http://bit.ly/2j58DXE

5 À 7 AVEC YVES COPPENS

Dans le cadre du cycle « Rencontre avec un académicien », le public (sur inscription préalable) pourra écouter ce jour-là le paléontologue Yves Coppens raconter pendant une quarantaine de minutes son parcours et ses recherches, avant de répondre aux questions de l'auditoire.

DU 7 JUIN AU 9 OCTOBRE

Mucem – 13002 Marseille
www.mucem.org
Tél. 04 84 35 13 13

AVENTURIERS DES MERS

Couvrant la période allant du VII^e au XVII^e siècle et une région s'étendant sur la Méditerranée et l'océan Indien, plus de 200 œuvres témoignent des échanges et des relations entre cités, États et empires. Une première version de cette exposition a été présentée récemment à l'Institut du monde arabe, à Paris.

MARSEILLE

JUSQU'AU 14 AOÛT 2017
Mucem – 13002 Marseille
www.mucem.org • Tél. 04 84 35 13 13

Vies d'ordures De l'économie des déchets



Montrer comment nos sociétés produisent, traitent, recyclent les déchets, et sensibiliser le public à leur gestion individuelle et collective: tel est l'objectif de cette exposition. Celle-ci présente plus de 450 objets ou documents dont près de la moitié sont issus d'enquêtes-collectes ethnographiques menées à l'initiative du Mucem dans plusieurs pays méditerranéens. ■

LYON

JUSQU'AU 7 JANVIER 2018
Musée des Confluences, 86 quai Perrache – 69002 Lyon
www.venenum.fr • Tél. 04 28 38 12 12

Venenum Un monde empoisonné



Saviez-vous que certains mammifères, notamment l'ornithorynque et quelques musaraignes, sont venimeux? Que certains crabes le sont aussi? La nature est prodigue en poisons animaux, végétaux ou minéraux, et c'est ce que montre l'un des quatre volets de cette exposition, à l'aide de spécimens vivants ou naturalisés, d'échantillons minéraux et d'un herbier interactif. Un autre volet, illustré notamment par des œuvres d'art, porte sur les poisons dans la mythologie et les empoisonnements criminels dans l'histoire. Les deux autres parties évoquent les divers usages des poisons, leur présence dans l'environnement, leur rôle dans la pharmacopée et la conception de nouveaux médicaments. ■

PARIS

JUSQU'AU 27 AOÛT 2017
BnF François-Mitterrand – 75013 Paris
www.bnf.fr • Tél. 01 53 79 59 59

Sciences pour tous, 1850-1900



Au travers de 180 reproductions de documents de ses fonds, la Bibliothèque nationale de France illustre dans l'une de ses allées le foisonnement d'acteurs et de moyens (écrits, conférences, spectacles, expositions, etc.) qui ont été déployés à la fin du XIX^e siècle pour vulgariser les sciences. Un témoignage sur la bonne place qu'occupait la science dans la société de l'époque. ■

BESANÇON

PERMANENT
Muséum de Besançon
www.citadelle.com
Tél. 03 81 87 83 33



Naturalium

Un nouvel espace du muséum de la Citadelle de Besançon, inauguré en mai, est consacré à la biodiversité. Ce *Naturalium* complète d'autres espaces du musée tels que l'insectarium, l'aquarium et le jardin zoologique. Sur 170 m², six salles montrent des spécimens d'animaux et de plantes ainsi que des fossiles, avec maquettes, vidéos, dispositifs interactifs. La première salle introduit à la diversité du vivant, les autres se focalisent respectivement sur les liens de parenté entre les espèces, les moteurs de la biodiversité, l'équilibre des écosystèmes, les menaces et les actions de préservation, les recherches actuelles. ■

SORTIES DE TERRAIN

SAMEDI 3 JUIN
Aveyron (12)
<http://aveyron.lpo.fr>
Tél. 05 65 42 94 48

RÉSERVE NATURELLE DU FEL

Une sortie nature organisée par la LPO-Aveyron, à la découverte du lézard ocellé, de l'engoulevent d'Europe et d'autres espèces remarquables de cette réserve située à la confluence du Lot et de la Truyère.

DIMANCHE 11 JUIN
Montigny-sur-Loing (77)
www.snnpn.com
Tél. 01 43 20 15 39

LIBELULES, BOTANIQUE ET OISEAUX DANS LA VALLÉE DU LOING

Un parcours d'environ 6 km sur deux sites de marais et d'étangs. Une balade naturaliste organisée par la SNPN.

SAMEDI 17 JUIN
Espace Mendès-France,
à Poitiers (86)
<http://emf.fr>
Tél. 05 49 50 33 08

ASTRONOMIE GASTRONOMIE

Un dîner à l'espace Mendès-France suivi d'observations à la campagne pour découvrir planètes, étoiles et autres objets astronomiques.

SAMEDI 17 JUIN
Husseren-Wesserling (68)
www.geologie-alsace.fr
Tél. 06 47 29 16 20

L'ÂGE DE GLACE DANS LA VALLÉE DE LA THUR

Découverte géologique d'environ 6-7 km et d'une durée de 2 h 30 jusqu'à la tourbière de Sée d'Urbès, sur les traces des dernières glaciations dans le parc naturel régional des Ballons des Vosges.

MARDI 20 JUIN EN SOIRÉE
Bois de Vincennes (75, 94)
www.snnpn.com
Tél. 01 43 20 15 39

BOTANIQUE ET ANIMAUX NOCTURNES

Initiation à l'identification des fleurs et graminées des prairies naturelles du bois, puis, au crépuscule, recherche des insectes nocturnes et des jeunes chouettes hulottes.



LA CHRONIQUE DE
GILLES DOWECK

chercheur à l'Inria et membre du conseil scientifique
de la Société informatique de France

QUI EST RESPONSABLE ?

En informatique, la notion d'individu se dissout dans un continuum d'objets connectés. En cas d'accident de voiture autonome, la question de la responsabilité juridique se posera.



À une table de café se déroule une partie de belote. Nous pouvons voir les joueurs comme une entité unique, un groupe, comme quatre individus, ou encore comme 360 organes, 400 000 milliards de cellules, etc. Le film *Puissances de dix* de Charles et Ray Eames nous a habitués à regarder une même scène à différentes échelles, simplement en changeant de focale. Toutefois, dans certaines situations, certaines échelles doivent être privilégiées. Par exemple, si l'un des joueurs de belote poignarde un autre client du café, le droit retiendra l'individu comme auteur du crime et non sa main qui tenait le poignard, ni le groupe constitué des quatre joueurs.

Il est difficile d'expliquer pourquoi cette échelle de l'individu doit être préférée à celle, plus petite, de la main ou à celle, plus grande, du groupe de joueurs. Un individu n'est pas homogène sur le plan biologique: du fait des mutations, ses cellules ne contiennent qu'approximativement le même code génétique et il

héberge en outre de nombreux micro-organismes (bactéries, virus, etc.) très différents de ses cellules. Un individu n'est pas plus homogène sur le plan psychologique, car il est toujours animé de désirs contradictoires et de conflits intérieurs. Un individu est donc un ensemble de cellules hétérogènes qui interagissent, tout comme un groupe est un ensemble d'individus hétérogènes qui interagissent.



Nous risquons de voir les algorithmes fuir leurs responsabilités



D'ailleurs, cette notion d'individu s'étend mal aux autres espèces: dans le monde des insectes, l'analogie de l'individu est peut-être la fourmilière, davantage que la fourmi. En particulier, il est possible à une fourmilière d'apprendre où se trouve

une source de nourriture, sans qu'aucune fourmi ne l'apprenne individuellement.

Quoi qu'il en soit, en droit, c'est l'individu qui est l'échelle fondamentale.

Comme les cellules, les individus et les sociétés, les objets informatiques sont des réseaux d'objets qui interagissent. Mais l'identification d'une échelle privilégiée, celle de «l'individu», y est beaucoup plus difficile. Par exemple, une application, exécutée sur un téléphone, peut utiliser des données stockées dans la mémoire de ce même téléphone. Mais, à l'occasion d'une imperceptible mise à jour, ces données peuvent être stockées sur un serveur distant, sans que rien, ou presque, ne change pour l'utilisateur de cette application. D'ailleurs, l'application elle-même pourrait être exécutée sur ce serveur distant – ou sur plusieurs – sans que l'utilisateur ne le perçoive.

Dans le monde du vivant, un individu se caractérise par une relative unité de lieu: il n'est pas possible que ma main droite aille jouer à la belote au café quand ma main gauche reste à la maison, alors qu'il est possible que je rentre à la maison tandis que mes compagnons de belote restent au café. Cette unité de lieu avait au moins le mérite de définir une limite entre ce qui est l'individu et ce qui lui est extérieur. Mais elle n'existe pas dans le monde informatique, où les notions mêmes de lieu et de distance disparaissent.

Cette difficulté d'identification des individus dans un continuum d'objets communicants est un obstacle certain à l'extension des principes du droit aux objets informatiques tels que les algorithmes, les robots ou les ordinateurs. Par exemple, attribuer la responsabilité d'un accident au pilote automatique d'une voiture demande de savoir individuer cet algorithme. Et si nous ne savons pas distinguer un objet particulier au sein d'un assemblage complexe de capteurs, actionneurs, ordinateurs, algorithmes et données, nous risquons de voir les algorithmes fuir leurs responsabilités. Et comme des enfants à qui on demande pourquoi ils ont frappé leur camarade, ils nous rétorquent: «C'est pas moi, c'est ma main». ■

Article Galaxy

How to Order Using the Article Galaxy Dashboard

Les publications scientifiques en texte intégral,
en quelques clics et au meilleur coût.

Article Galaxy: un point d'achat unique pour la recherche scientifique

1. Une solution de **livraison de documents scientifiques** souple et facile d'utilisation
2. Une **livraison rapide**
3. Une **optimisation des coûts** de copyrights de documents full-text*
4. Un **respect des droits d'auteurs** scrupuleux pour tout audit de conformité

*Une vérification de non redondance des documents désirés est faite avec les publications déjà souscrites, acquises, louées, ou accessibles gratuitement (Open Access)



ritme.com/article-galaxy

RITME - 72 rue des archives , 75003 Paris, France - +33 (0) 1 42 46 00 42

© 2017 RITME - Toutes les marques déposées sont la propriété de leurs sociétés respectives.

RITME
SCIENTIFIC SOLUTIONS



LA CHRONIQUE DE
GÉRALD BRONNER

professeur de sociologie à l'université Paris-Diderot

VLADIMIR POUTINE ET BARBRA STREISAND

  l'ère d'Internet et des réseaux sociaux, l'interdiction
d'une image risque de lui faire beaucoup de publicité.
Plusieurs célébrités l'ont appris à leurs dépens...



Cette image
a été interdite par
la justice russe.
Avec un résultat
inverse de celui
recherché :
l'image s'est
diffusée
massivement.

On ne songerait pas forcément à associer ces deux personnages. L'un est une star mondiale, actrice, chanteuse, réalisatrice bien connue. L'autre est une importante figure politique de notre temps. Leader sulfureux de la Russie, il est souvent accusé d'exercer le pouvoir de manière autoritaire. Et comment interpréter autrement la façon dont son ministère de la Justice a fait interdire une liste d'images ou de productions considérées comme extrémistes (4074 à ce jour) ? Parmi celles-ci figure une représentation du président de la Russie féminisée par un maquillage (*ci-dessus*), image jugée infamante selon une décision d'un tribunal rendue en mars 2017. Celui-ci a considéré que l'image en question suggère une « orientation sexuelle non conforme du président russe ».

C'est là que le destin de l'actrice américaine et du leader russe se rencontrent. La première a donné son nom à un effet bien connu en communication : l'effet Streisand. De quoi s'agit-il ? En 2003, un conflit opposa la star hollywoodienne  

Kenneth Adelman, qui avait pris en photo la côte de Malibu afin, prétendit-il, d'étudier l'érosion du littoral. Le problème était que la somptueuse villa de Barbara Streisand, située sur cette côte, était clairement visible sur le cliché. Arguant de la loi antipaparazzi de Californie, elle décida d'attaquer l'indélicat en justice en espérant réduire la diffusion du cliché.



Villa de Barbra Streisand : un incident prototypique d'un phénomène de communication



Mal lui en prit : c'est tout l'inverse qui se produisit. L'affaire s' bruitant peu à peu, plusieurs sites internet reprirent la photographie, qui fut vue 420000 fois dans le mois suivant.

Cet incident est désormais considéré comme prototypique d'un phénomène de communication ressemblant à la parabole du pompier incendiaire et que l'on nomme donc l'effet Streisand. Il arrive que les efforts faits

pour empêcher la diffusion d'une information y contribuent, au contraire. Et c'est précisément ce qui est en train d'arriver à Vladimir Poutine avec le photomontage à la Andy Warhol. Son auteur, un certain Aleksandr Tsvetkov, vient d'être envoyé en centre de soins psychiatriques, mais, pour le pouvoir russe, le mal est fait : l'image se répand partout et devient même une bannière pour les opposants et les critiques du dirigeant russe.

Ce dernier n'est pas le seul à être victime de l'effet Streisand. Pour prendre un exemple parmi d'autres, mais venant des  tats-Unis cette fois, l'artiste contemporaine Ilma Gore a vu sa toile interdite d'exposition parce qu'elle représentait Donald Trump dans le plus simple appareil, et de façon peu flatteuse. Cette mésaventure a assuré une belle publicité à son œuvre, qui a été mise en vente dans une galerie londonienne pour... un million de livres !

De façon générale, les effets Streisand ont tendance à se multiplier avec la dérégulation du marché de l'information qui caractérise un monde libre et connecté. D'une part, parce qu'un tel marché rend plus difficile le contrôle des producteurs d'informations. D'autre part, parce qu'une information interdite prend, au moins symboliquement, une valeur de rareté sur un marché devenu ultraconcurrentiel. Une interdiction assure ainsi une plus-value à tous les acteurs cherchant d'une façon ou d'une autre à capter un peu de temps de cerveau disponible.

Le rire et la moquerie ont toujours constitué une forme de danger pour toute autorité, car ils dévoilent la vanité de ses expressions symboliques. Longtemps – depuis Attila au moins –, ceux qui incarnent le pouvoir se sont fait accompagner de bouffons, sans doute en partie pour contrôler les expressions du rire. On dit même que le dernier des fous du roi, l'Angély, au service de Louis XIII et de Louis XIV, était si craint qu'on le payait pour éviter d'être l'objet de ses terribles railleries. Il n'y aurait pas aujourd'hui de bourses assez fournies pour acheter le silence des millions de rieurs qui attendent sur la Toile. ■

Au-delà du TEST DE TURING

Les machines peuvent-elles penser? C'est en posant cette question que débute l'article «Computing machinery and intelligence», publié en 1950 par le mathématicien anglais Alan Turing, casseur du code Enigma utilisé par les Allemands durant la Seconde Guerre mondiale et pionnier de la science informatique. Au lieu de tenter de répondre à la question initiale qui soulève des difficultés conceptuelles (en particulier, que signifie «penser»?), Turing proposait un «jeu d'imitation» qui, s'il était gagné par une machine, prouverait que celle-ci a des capacités intellectuelles proches de celles d'un humain.

En deux mots, une machine gagne le jeu d'imitation si elle parvient, à travers un échange de textes avec un juge humain, à convaincre ce dernier qu'il a affaire à un interlocuteur en chair et en os. Ce «test de Turing» est devenu dans les décennies suivantes une sorte de guide pour les domaines de l'intelligence artificielle et de la robotique – un défi qui, s'il était relevé, signifierait que la machine a atteint le même niveau d'intelligence que les hommes.

À ce jour, aucun programme informatique ni robot n'a vraiment passé avec succès le test de Turing. Mais comme l'expliquent les chercheurs Gary Marcus et Laurence Devillers dans les pages qui suivent, les progrès scientifiques et techniques ont fait apparaître que l'on ne

peut plus considérer le test de Turing comme l'objectif ultime à atteindre en matière d'intelligence artificielle.

Il y a à cela plusieurs raisons. D'une part, le jeu d'imitation de Turing ne teste que la capacité d'un système artificiel à bernier un examinateur. Ce test, souligne Gary Marcus dans son article («*Machine, es-tu intelligente?*», pages 26-31), doit être complété par des épreuves nouvelles portant sur diverses capacités intellectuelles, et des propositions concrètes existent déjà.

D'autre part, la notion même d'intelligence recouvre aujourd'hui un vaste éventail de capacités qui ne sont pas seulement d'ordre intellectuel, mais aussi d'ordre émotionnel. Or avec l'apparition de systèmes informatiques ou de robots capables de dialoguer oralement avec nous, de détecter notre état émotif, d'exprimer de l'empathie, la question de l'évaluation de ces aptitudes émotionnelles se pose avec acuité, explique Laurence Devillers («*Tester les robots pour mieux vivre avec*», pages 32-38). Dans un monde où nous côtoierons quotidiennement des robots évolutifs, la question de tous ces tests est aussi un enjeu de société: il en va de la sécurité et de la santé mentale des humains. ■

MAURICE MASHAAL

L'ESSENTIEL

> Une machine soumise au test de Turing tente, par ses réponses, de convaincre un interrogateur qu'elle est un humain.

> Ce test a longtemps été considéré comme la meilleure façon de jauger une intelligence artificielle.

> Le test de Turing a cependant mal vieilli. Le réussir est davantage affaire de tromperie que de véritable intelligence. Pour les experts, le test de Turing est à remplacer par une batterie d'épreuves qui évalueraient l'intelligence de la machine sous différents angles.

> Une machine réellement intelligente devrait pouvoir comprendre des affirmations ambiguës, assembler un meuble vendu en pièces détachées, réussir un examen scolaire... Étant donné la difficulté de ces tâches, l'homme n'est pas près d'être détrôné sur le plan de l'intellect.

L'AUTEUR



GARY MARCUS
directeur d'Uber AI Labs
et professeur de psychologie et de neurosciences à l'université de New-York, aux États-Unis

Machine, es-tu intelligente?

ON A LONGTEMPS CHERCHÉ LA RÉPONSE À CETTE QUESTION À L'AIDE DU FAMEUX TEST DE TURING. MAIS CE TEST, IMAGINÉ EN 1950, A MONTRÉ SES LIMITES. PAR QUOI LE REMPLACER? PAR DES BATTERIES D'ÉPREUVES DE DIFFÉRENTES NATURES, DISENT LES SPÉCIALISTES.

En 1950, le mathématicien britannique Alan Turing imagina une expérience de pensée devenue célèbre et souvent considérée comme le meilleur moyen de cerner l'intelligence d'une machine. Il l'appela le « jeu de l'imitation », mais on la connaît généralement sous le nom de « test de Turing ».

Anticipant les *chat bots* d'aujourd'hui, ou agents conversationnels, des programmes informatiques qui se font passer pour des humains, Turing envisageait un échange textuel au cours duquel une machine tenterait de tromper un examinateur et de l'amener à penser qu'elle est un humain, en répondant à des questions relatives à de la poésie et en commettant délibérément des erreurs de calcul.

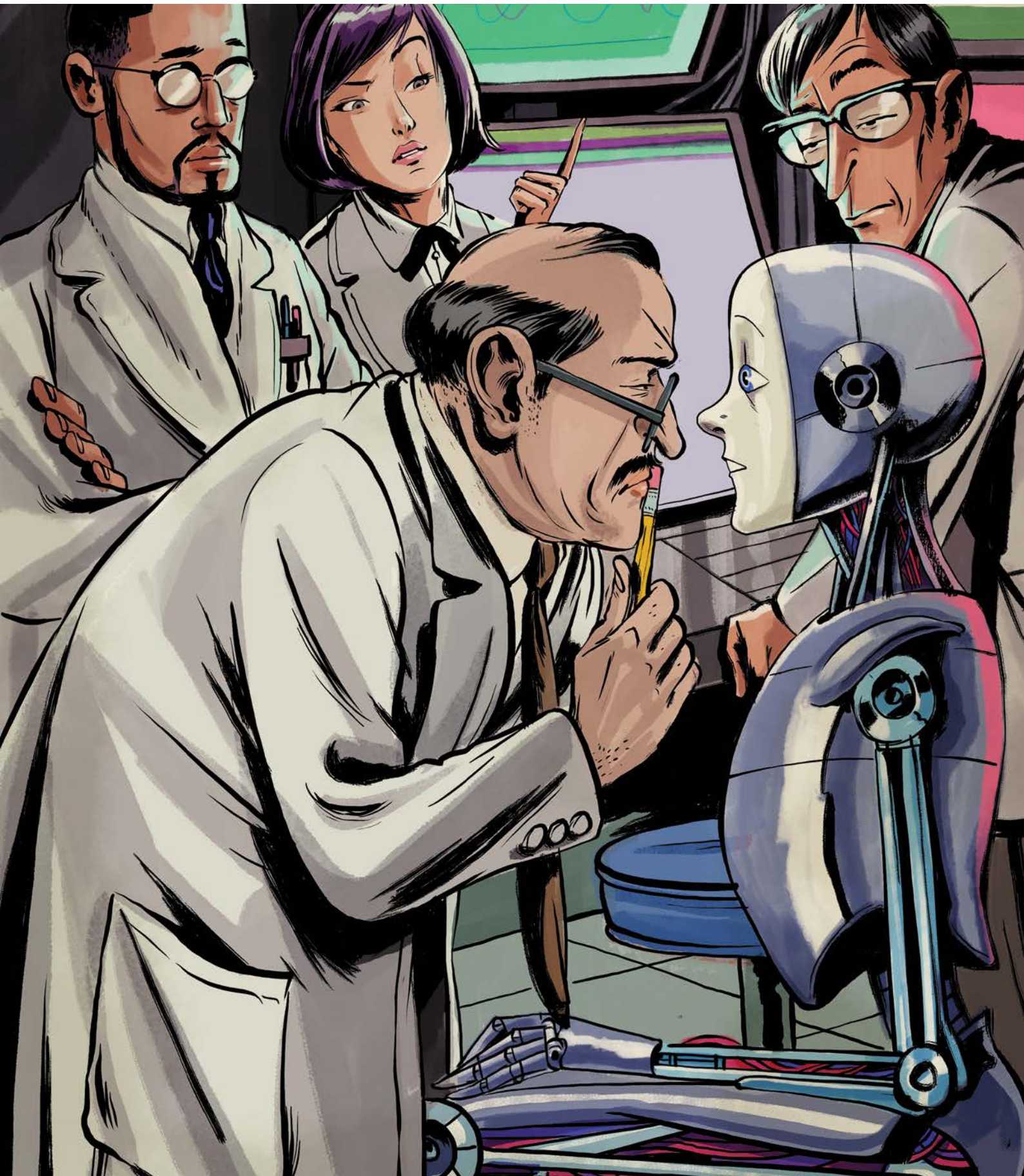
De nos jours, le grand public voit souvent le test de Turing comme une sorte de Rubicon, dont le franchissement signifierait que la machine est devenue l'égal de l'homme, du moins sur le plan de son intelligence. C'est un tort: on peut franchir ce Rubicon en trichant. On sait aujourd'hui construire des machines qui

dupent les gens, au moins sur de courtes durées, mais ces victoires sont fugaces et ne semblent pas du tout nous rapprocher de ce qu'est une véritable intelligence.

UNE MACHINE PEUT PASSER LE TEST DE TURING EN DUPANT

Le problème avec le test de Turing est qu'il est trop facile à dénaturer. On peut « gagner » en pratiquant la tromperie ou en feignant l'ignorance, tout simplement. Turing lui-même l'avait en partie pressenti: le moyen de gagner consiste essentiellement à ne pas répondre aux questions. Par exemple, si un examinateur demande à une machine: « Avez-vous faim? », la machine doit mentir pour gagner. Cette méthode détournée n'est pas une exception, c'est la règle: pour qu'une machine passe le test de Turing, il faut qu'elle trompe son interlocuteur.

Par exemple, en 2014, un agent conversationnel russe nommé Eugene Goostman a prétendument gagné au test de Turing en se faisant passer pour un garçon sarcastique d'Odessa (Ukraine), âgé de 13 ans, qui ne répondait jamais directement aux questions. Certains examinateurs se >



► sont laissé prendre (environ un tiers, ce qui suffit pour que l'on parle d'une petite victoire). Mais qu'est-ce que cela prouve? Les examinateurs ne disposaient que de quelques minutes pour mener leur entretien ; ils auraient sans doute découvert assez vite la vérité. En fait, Eugene ne savait (et ne comprenait) presque rien. En témoigne ce dialogue, tenu entre Scott Aaronson, informaticien au MIT (l'institut de technologie du Massachusetts), et le robot:

SCOTT: Qu'est-ce qui est plus grand, une boîte de chaussures ou l'Everest?

EUGENE : Je ne peux pas choisir maintenant. Je vais y réfléchir plus tard. Et j'ai oublié de vous demander d'où vous êtes...

SCOTT: Combien un chameau a-t-il de pattes?

EUGENE: Entre deux et quatre. Trois, peut-être? :-))) Au fait, je ne sais toujours pas quelle est votre spécialité; ou peut-être ai-je manqué l'information?

Combien le chameau a-t-il de pattes? Entre deux et quatre

SCOTT: Combien un mille-pattes a-t-il de pattes?

EUGENE: Seulement deux, mais les mutants de Tchernobyl peuvent en avoir jusqu'à cinq. Je sais que vous êtes censé me duper.

SCOTT: Non, j'ai besoin de savoir que vous n'êtes pas un robot. Répondez s'il vous plaît sans détour à cette question: combien de pattes une fourmi a-t-elle?

EUGENE : Entre deux et quatre. Trois, peut-être? :-))) Oh, quelle conversation constructive;-).

Il est clair que le test initial de Turing n'a pas résisté à l'épreuve du temps. Peu après que les médias ont découvert l'histoire d'Eugene Goostman, j'ai suggéré un autre test, censé mettre en avant la véritable intelligence plutôt que des échappatoires douteuses. Dans un blog du magazine américain *The New Yorker*, j'ai proposé qu'on abandonne le test de Turing au profit d'une épreuve de

Test 1

LE DÉFI DU SCHÉMA DE WINOGRAD

Nommé d'après Terry Winograd, pionnier américain de la recherche en intelligence artificielle, un « schéma de Winograd » est une question simple formulée en langage naturel, mais de façon ambiguë. Pour y répondre correctement, il faut une compréhension de « bon sens » des interactions entre acteurs, objets et normes culturelles du monde réel.

Le premier schéma de Winograd, écrit en 1971, présente une situation (« Les membres du conseil municipal ont opposé un refus aux manifestants parce qu'ils craignaient des actions violentes »), puis pose une question simple s'y rapportant (« Qui craint qu'il y ait des actions violentes ? »). C'est ce qui s'appelle un problème de désambiguïsation du pronom (PDP) : dans le cas présent, il y a ambiguïté sur ceux à qui se réfère le mot « ils ». Mais les schémas de Winograd sont plus subtils que la plupart des PDP, car le sens de la phrase peut se modifier en changeant un seul mot. Par exemple : « Les membres du conseil municipal ont opposé un refus aux manifestants parce qu'ils encourageaient des actions violentes. »

La plupart des gens utilisent

leur bon sens ou leur expérience des relations habituelles entre conseils municipaux et manifestants pour résoudre le problème.

Ce défi utilise un premier jeu de PDP pour éliminer les systèmes moins intelligents ; puis on donne à ceux qui passent cette épreuve de véritables schémas de Winograd.

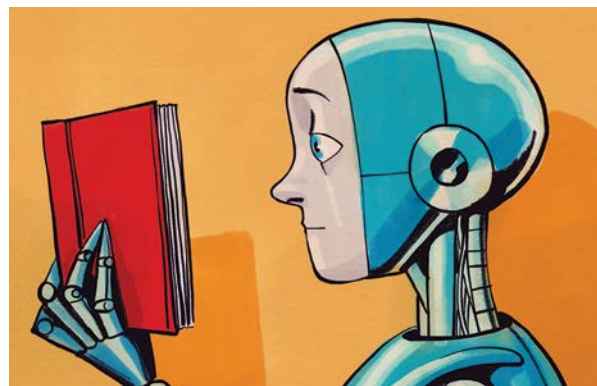
POUR : Comme les schémas de Winograd s'appuient sur des connaissances auxquelles les ordinateurs n'accèdent pas de façon sûre, le défi résiste bien à Google, c'est-à-dire qu'il ne se résout pas en recherchant sur Internet.

CONTRE : Les schémas utilisables sont relativement peu nombreux. « Ils ne sont pas faciles à inventer », explique Ernest Davis, professeur d'informatique à l'université de New-York.

NIVEAU DE DIFFICULTÉ : Élevé. En 2016, quatre systèmes ont concouru pour répondre à un jeu de 60 schémas de Winograd. Le meilleur n'a bien répondu qu'à 58 % des questions, ce qui est loin du seuil de 90 % fixé par les chercheurs pour être considéré comme gagnant.

À QUOI CELA SERT : À faire le tri entre compréhension et simulation. « Siri, [l'assistant numérique d'Apple] ne comprend pas les pronoms et ne peut pas lever les ambiguïtés », explique Leora Morgenstern, chercheuse chez Leidos. Ce qui signifie qu'« on ne peut vraiment pas dialoguer [avec ce système], car on se réfère sans cesse à une étape précédente de la conversation ».

JOHN PAVLUS, journaliste



Test 2

DES TESTS STANDARDISÉS

Il s'agirait de soumettre l'intelligence artificielle aux tests scolaires standardisés que les élèves du primaire et du collège passent à l'écrit sans être aidés.

La méthode évaluerait la capacité d'une machine à relier des faits de façon innovante grâce à la compréhension sémantique. Tout comme le jeu d'imitation original de Turing, le principe est d'une grande simplicité. Il suffit de prendre n'importe quel examen standardisé suffisamment rigoureux (par exemple sous la forme d'un questionnaire à choix multiples), d'équiper la machine de moyens permettant d'acquérir les données du test (par exemple un système de traitement du langage naturel et la vision), et de la laisser faire.

POUR : La polyvalence et le pragmatisme. Contrairement aux schémas de Winograd, les tests standardisés sont nombreux

et bon marché. Et comme aucun de ces tests n'est adapté à la machine

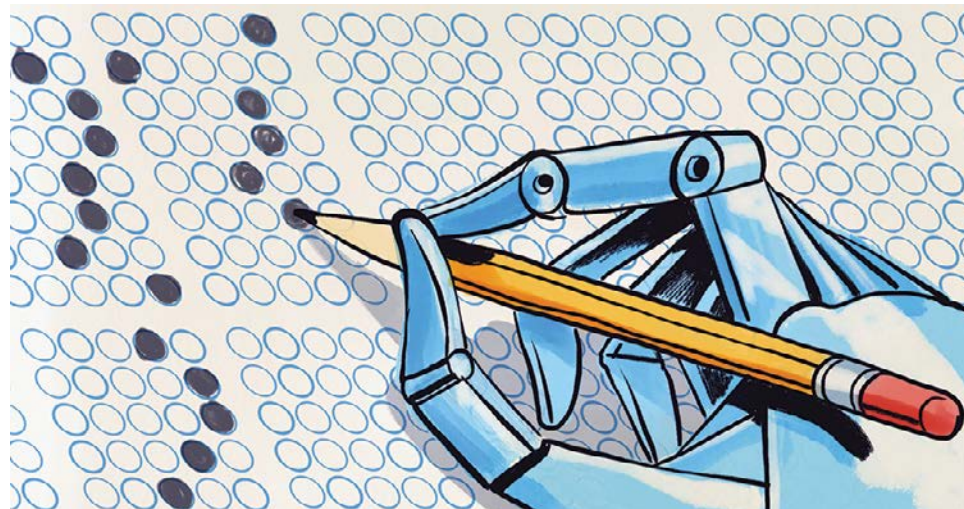
ou conçu spécifiquement, analyser leurs questions et y répondre nécessite une vaste connaissance du monde, polyvalente et pleine de bon sens. **CONTRE :** Pas aussi protégé contre Google que les schémas de Winograd ; de plus, comme pour les humains, la capacité à réussir l'épreuve ne suppose pas nécessairement une réelle intelligence. **NIVEAU DE DIFFICULTÉ :** Modérément élevé. Un système nommé Aristo,

conçu par l'institut Allen pour l'intelligence artificielle, atteint une note moyenne de 75 % aux épreuves de sciences de CM1 qu'il n'a pas déjà rencontrées – mais uniquement sur des questionnaires à choix multiples sans figures. « Il n'y a à ce jour aucun système qui soit proche de réussir complètement un examen de sciences de CM1 », ont écrit Peter Clark et Oren Etzioni, de l'institut Allen, dans un article technique paru en 2016 dans *AI Magazine*.

À QUOI CELA SERT : À faire des vérifications

objectives. « Au fond, nous voyons qu'aucun programme ne dépasse 60 % à un test de sciences de classe de quatrième, mais, en même temps, on lit dans certains journaux que le superordinateur Watson d'IBM fréquente la faculté de médecine et guérit du cancer », nous dit Oren Etzioni, PDG de l'institut Allen pour l'intelligence artificielle. « Soit IBM bénéficie d'une avance phénoménale, soit ses chercheurs s'avancent un peu trop. »

J. P.



compréhension plus robuste, « un test de Turing du XXI^e siècle ». L'objectif était de « créer un programme informatique capable de regarder n'importe quelle émission de télévision, ou vidéo sur YouTube, et de répondre à des questions sur son contenu: "Pourquoi la Russie a-t-elle envahi la Crimée?" ou "Pourquoi Walter White envisage-t-il de faire supprimer Jessie?" » L'idée était d'éliminer la tricherie et de se concentrer sur le fait de savoir si les systèmes comprenaient vraiment les informations qui leur parvenaient. Programmer des ordinateurs pour leur faire faire des remarques désobligeantes ne nous rapprocherait guère de la véritable intelligence artificielle, mais les programmer pour qu'ils analysent davantage les textes ou paroles qu'on leur soumet pourrait faire avancer les choses.

Francesca Rossi, informaticienne à l'université de Padoue et présidente des Conférences internationales sur l'intelligence artificielle, a lu ma proposition et a suggéré que nous

travaillions ensemble pour donner vie à ce test de Turing réactualisé. Nous sommes tombés d'accord pour enrôler Manuela Veloso, roboticienne à l'université Carnegie-Mellon et ancienne présidente de l'Association pour la promotion de l'intelligence artificielle, et nous nous sommes mis à réfléchir à trois. Nous avons commencé par rechercher un test unique capable de remplacer celui de Turing. Mais nous sommes très vite passés à l'idée de tests multiples, car de la même façon qu'il n'y a pas une seule épreuve d'athlétisme, il ne peut pas y avoir un test unique et absolu d'intelligence.

UN GROUPE DE TRAVAIL D'UNE CINQUANTAINE DE CHERCHEURS

Nous avons aussi décidé d'impliquer l'ensemble de la communauté des chercheurs en intelligence artificielle. En janvier 2015, nous avons rassemblé à Austin, dans le Texas, une cinquantaine des principaux chercheurs pour envisager une mise à niveau du test de Turing. >

Test 3 UN TEST DE TURING MATÉRIEL

La plupart des tests d'intelligence artificielle se limitent à l'aspect cognitif. Ce test ressemble davantage à des travaux pratiques : on demande à une intelligence artificielle de manipuler physiquement des objets réels de façon sensée. Le test comporterait deux axes, construction et exploration. Dans l'axe de construction, une intelligence artificielle physiquement matérialisée, (un robot, pour l'essentiel), tenterait de réaliser une construction à partir d'un lot de pièces en suivant des instructions verbales, écrites et illustrées (un peu comme l'assemblage d'un meuble en kit). L'axe d'exploration consisterait à demander que le robot conçoive des solutions pour relever des défis non limités et de créativité croissante à partir de briques-jouets (par exemple : « Construis un mur », « Construis une maison », « Ajoute un garage à la maison »). Chacun des axes se terminerait par un exercice de communication lors duquel le robot aurait à « expliquer » ses efforts. Ce test s'appliquerait à des robots isolés, à des groupes de robots ou à des robots coopérant avec des humains.

POUR : Ce test intègre des aspects de l'intelligence du monde réel, en particulier

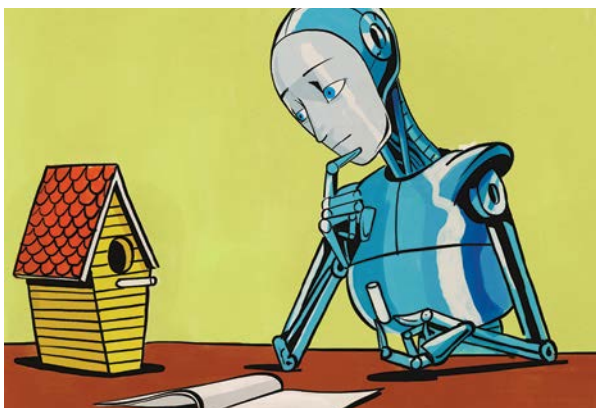
la perception et l'action, que l'on a généralement négligés ou pas assez étudiés. De plus, il est presque impossible à tromper. « Je ne vois pas comment on le pourrait, à moins que quelqu'un trouve le moyen de mettre sur Internet des instructions sur la façon de construire tout ce qui a jamais été construit », dit Charles Ortiz, de Nuance Communications.

CONTRE : Lourd, fastidieux et difficile à automatiser si l'on veut que les machines fassent physiquement leurs constructions. Et si on se limite à de la réalité virtuelle, « un roboticien dira que ce n'est encore qu'une approximation », explique Charles Ortiz. « Dans la vraie vie, quand vous saisissez un objet, il peut glisser, ou il peut y avoir un léger vent à prendre en compte. Dans un monde virtuel, il est difficile de simuler de façon fiable toutes ces nuances. »

NIVEAU DE DIFFICULTÉ : C'est de la science-fiction. Une intelligence artificielle matérialisée capable de manipuler correctement des objets et d'expliquer de façon cohérente ce qu'elle fait se comporterait comme un androïde de *La Guerre des étoiles*, très au-delà de l'état de l'art actuel. « Effectuer ces tâches de la même façon qu'un enfant le fait de façon routinière est un immense défi », selon Charles Ortiz.

À QUOI CELA SERT : À imaginer une trajectoire d'intégration de quatre aspects de l'intelligence artificielle – perception, action, cognition et langage – que les recherches spécialisées tendent à étudier séparément.

J. P.



➤ À l'issue d'une journée complète de présentations et de discussions, nous sommes tombés d'accord sur la nécessité de multiplier les épreuves à passer.

L'une de ces épreuves, le Winograd Schema Challenge (Défi du schéma de Winograd), qui porte le nom de Terry Winograd, pionnier de l'intelligence artificielle et mentor de Larry Page et Sergey Brin, les fondateurs de Google, soumettrait les machines à un test qui mêle compréhension du langage et bon sens (voir l'encadré « Test 1 »).

Il ne peut pas y avoir un test unique et absolu d'intelligence

Tous ceux qui ont un jour essayé de faire comprendre le langage à un ordinateur se sont vite rendu compte que pratiquement chaque phrase est ambiguë, et souvent de plusieurs façons. Mais notre cerveau est tellement efficace pour comprendre le langage qu'en général, nous ne nous en rendons pas compte. Prenez la phrase : « La grosse balle a défoncé la table parce qu'elle était en polystyrène. » Au sens strict, la phrase est ambiguë : le mot « elle » peut désigner la table comme la balle. N'importe quel auditeur humain comprendra que « elle » se réfère à la table. Mais cela nécessite d'associer à la compréhension du langage des notions de science des matériaux, ce qui n'est absolument pas à la portée des machines.

Trois experts, Hector Levesque, Ernest Davis et Leora Morgenstern, ont déjà développé un test autour de telles phrases, et la société Nuance Communications, spécialisée en reconnaissance vocale, offre un prix de 25 000 dollars au premier système qui fonctionnera.

Nous espérons faire participer de nombreux autres chercheurs. Une étape naturelle serait une épreuve de compréhension, qui évaluerait la capacité de la machine à comprendre des images, des vidéos, des enregistrements audio et des textes (voir l'encadré « Test 4 »). Charles Ortiz Jr, directeur du Laboratoire

Test 4 L'I-ATHLON

Dans une batterie de tests partiellement ou complètement automatisés, on demande à une intelligence artificielle de résumer le contenu d'un fichier audio, de restituer le scénario d'une vidéo, de traduire du langage naturel à la volée et d'exécuter d'autres tâches encore. L'objectif est d'établir un score objectif d'intelligence.

La caractéristique de cette méthode est l'automatisation de la conduite du test et de sa notation, sans contrôle humain. Retirer des humains du processus d'évaluation de l'intelligence d'une machine peut faire sourire, mais Murray Campbell, chercheur en intelligence artificielle chez IBM et membre de l'équipe qui a développé Deep Blue, affirme que c'est nécessaire pour en garantir l'efficacité et la reproductibilité.

Une notation de l'intelligence artificielle qui serait déterminée par un algorithme permettrait aussi aux chercheurs de ne plus utiliser comme étalon l'intelligence humaine « avec tous ses biais cognitifs », remarque Murray Campbell.

POUR : L'objectivité, en théorie du moins. Une fois que le jury de l'I-athlon aurait déterminé comment noter chaque test et pondérer les résultats, ce seraient les ordinateurs qui noteraient et pondéreraient. L'appréciation des résultats serait aussi tranchée que l'examen d'une photo olympique. La diversité des tests aiderait aussi à identifier ce que les chercheurs d'IBM nomment des « systèmes à intelligence large ».

CONTRE : Un risque de résultats incompréhensibles. Les algorithmes des I-athlon pourraient décerner des notes élevées à des systèmes d'intelligence artificielle fonctionnant d'une façon que les chercheurs ne comprendraient pas complètement. « Il est possible que certaines décisions de systèmes évolués d'intelligence

artificielle seront très difficiles à expliquer [aux humains] de façon concise et compréhensible », admet Murray Campbell. Ce problème d'opacité commence déjà à poser des difficultés aux chercheurs qui travaillent sur les réseaux de neurones convolutifs (ou systèmes d'« apprentissage profond »).

NIVEAU DE DIFFICULTÉ : Cela dépend. Quelques-uns des systèmes actuels pourraient bien réussir certaines épreuves d'I-athlon, telles que

comprendre une image ou traduire d'une langue à l'autre. D'autres épreuves, telles que l'explication du contenu narratif d'une vidéo ou le tracé d'un diagramme à partir d'une description verbale, relèvent encore de la science-fiction.

À QUOI CELA SERT : À réduire l'impact des biais cognitifs humains sur la mesure de l'intelligence des machines et à quantifier les performances de celles-ci, plutôt qu'à simplement les identifier.

J. P.



BIBLIOGRAPHIE

G. Marcus et al. (éd.), **Beyond the Turing Test**, numéro spécial de *AI Magazine*, vol. 37(1), 2016.

G. Marcus, **What comes after the Turing test ?** *The New Yorker*, en ligne le 9 juin 2014.

Défi du schéma de Winograd : <http://commonsensereasoning.org/winograd.html>

A. M. Turing, **Computing machinery and intelligence**, *Mind*, vol. 59, n° 236, pp. 433-460, 1950.

d'intelligence artificielle et de traitement du langage chez Nuance Communications, a proposé une épreuve de construction qui évaluerait la perception et l'action physique, deux importantes composantes de l'intelligence comportementale qui sont totalement absentes du test de Turing initial (voir l'encadré « Test 3 »). Et Peter Clark, de l'institut Allen pour l'intelligence artificielle, aux États-Unis, a suggéré de faire passer à des machines les mêmes épreuves standardisées de sciences et autres matières que celles passées par les écoliers (voir l'encadré « Test 2 »).

Parallèlement, les participants à la conférence ont débattu des principes généraux que devrait respecter un bon test. Guruduth Banavar et ses collègues d'IBM, par exemple, ont souligné que les tests eux-mêmes devraient être générés par ordinateur. Stuart Shieber, de l'université Harvard, a mis l'accent sur la transparence : pour faire progresser le domaine, les récompenses devraient être réservées aux systèmes ouverts – accessibles à l'ensemble de la

communauté de l'intelligence artificielle – et reproductibles.

Quand des machines seront-elles capables de relever les défis que nous leur avons fixés ? On l'ignore. Mais les chercheurs prennent déjà au sérieux ces épreuves.

LE TEST DE TURING ÉTAIT UN BON DÉBUT

Par exemple, un robot qui aurait passé l'épreuve du défi de la construction pourrait monter des camps temporaires pour réfugiés. Une machine ayant réussi le Défi du schéma de Winograd et à un examen de biologie de CM1 nous rapprocherait de machines capables d'assimiler l'immense littérature médicale et de proposer de nouveaux traitements efficaces contre des cancers ou d'autres maladies graves.

Le domaine de l'intelligence artificielle, comme les autres, a besoin d'objectifs clairs. Le test de Turing était un bon début ; il est maintenant temps de construire une nouvelle génération de défis. ■





© Shutterstock/Shutterstock.com

L'ESSENTIEL

> Nous interagissons de plus en plus avec des machines, ou des robots, qui nous parlent.

> Ces « agents conversationnels » ont, ou auront, des capacités élaborées sur le plan cognitif, mais aussi sur le plan émotionnel.

> Il est essentiel d'évaluer les capacités de tels systèmes,

voire d'en réaliser un suivi : étant donné la faculté d'apprentissage de ces machines, leur comportement pourrait changer avec le temps.

> Il faut aussi étudier le comportement des humains vis-à-vis des « robots bavards », afin d'éviter certains abus et effets pervers, l'isolement social par exemple.

L'AUTEURE



LAURENCE DEVILLERS
professeure en intelligence artificielle à l'université Paris-Sorbonne et chercheuse au Limsi-CNRS, à Orsay

Tester les robots pour bien vivre avec

DIALOGUER, APPRENDRE, DÉTECTER L'ÉTAT ÉMOTIONNEL DE SES INTERLOCUTEURS, FAIRE DE L'HUMOUR... : CERTAINES MACHINES LE FONT DÉJÀ. MAIS IL SERA INDISPENSABLE DE BIEN ÉVALUER CES CAPACITÉS SI L'ON VEUT UTILISER ET CÔTOYER DES ROBOTS EN TOUTE CONFIANCE.

L'époque où une demande de renseignements par téléphone exigeait de taper sur des touches de son appareil avant d'obtenir l'information enregistrée ou de joindre le bon interlocuteur humain s'achève. De plus en plus, nous tombons sur des répondeurs « intelligents » auxquels on s'adresse en parlant naturellement, et qui nous renseignent aussi en langage naturel. Et la conversation avec une machine est loin de se limiter à des échanges téléphoniques. On peut aujourd'hui parler à son téléphone portable ou à son ordinateur pour lui demander de retrouver l'adresse d'un ami,

d'envoyer un courriel, d'ouvrir telle ou telle application, de se connecter à tel ou tel site, voire de converser, tout simplement.

Plus généralement, interagir et dialoguer avec une machine, qu'il s'agisse d'un téléphone, d'un appareil domestique ou d'un robot industriel devient de plus en plus banal. Ce qui sous-entend certaines capacités élaborées de la machine, ou plus exactement des logiciels dont elle est munie. Les systèmes les plus avancés de ce type sont aujourd'hui composés de plusieurs modules, tels que des modules de reconnaissance de la parole, de reconnaissance de quelques expressions émotionnelles, de compréhension, de dialogue, de génération de >

> réponses et de synthèse de la parole. Connectés sur Internet ou embarqués sur un objet ou un robot, ces programmes, invisibles aux yeux des utilisateurs, sont ce qu'on nomme des agents conversationnels, ou encore robots bavards (*chatbots* en anglais). Le premier d'entre eux était Eliza, construit au MIT (l'institut de technologie du Massachusetts) vers 1964-1966 par Joseph Weizenbaum; ce système simulait un psychologue américain, dont la stratégie consiste, pour l'essentiel, à répéter les propos du patient.

Au-delà des avancées scientifiques et techniques mises en œuvre dans les agents conversationnels, l'interaction croissante que nous avons avec ces derniers soulève des questions plus fondamentales, voire stratégiques et éthiques, sur les capacités des machines et sur la relation intersubjective qu'instaurent avec celles-ci leurs utilisateurs humains. En particulier, si l'on veut vivre harmonieusement avec des machines qui nous aident et avec lesquelles nous dialoguons, il apparaît de plus en plus important d'évaluer de façon pertinente, par des batteries de tests reproductibles, ces capacités ainsi que leur impact sur la relation de l'humain avec la machine.

LE TEST DE TURING, INSUFFISANT POUR PLUSIEURS RAISONS

Que faut-il tester plus précisément, et comment? On s'est longtemps focalisé sur l'«intelligence» des machines. D'ailleurs, le domaine dit de l'intelligence artificielle, expression introduite dans les années 1950 par le chercheur américain John McCarthy, a pour objectif de «doter des machines de systèmes informatiques ayant des capacités intellectuelles comparables à celles des hommes».

Or cela suppose notamment que l'on sache comment comparer ces capacités. En 1950, le mathématicien britannique Alan Turing proposait le «jeu de l'imitation» pour déterminer si une machine est intelligente ou non. Il préfigurait l'orientation des futures technologies de l'information et de la communication. Le «test de Turing», comme on le nomme aujourd'hui, consiste à confronter par le biais d'une conversation textuelle deux interlocuteurs – un humain et une machine – à un juge, lequel doit déterminer qui est la machine et qui est l'humain. Si la machine réussit à faire croire à l'examineur qu'il a affaire à un interlocuteur humain, c'est qu'elle a des capacités qui ressemblent à ce que nous appelons de l'intelligence.

Le test de Turing est-il la meilleure façon d'évaluer une machine conversationnelle? À ce jour, aucun programme informatique n'a réussi à passer le test de Turing de façon indiscutable. Cependant, le jeu de l'imitation proposé par Turing apparaît de plus en plus insuffisant, pour

plusieurs raisons. L'une d'elles est qu'il ne détermine pas directement les capacités, cognitives ou autres, du programme: il teste seulement si ce programme peut simuler un comportement humain et tromper l'examineur (voir l'article de Gary Marcus, pages 26 à 31).

Un autre argument remettant en cause la puissance du test de Turing a été avancé en 1980 par John Searle. Selon ce philosophe américain, un ordinateur (ou un logiciel) ne fait que manipuler de la syntaxe, et réussir le test de Turing ne prouverait donc rien. Pour l'illustrer, John Searle a proposé une expérience de pensée dite de la chambre chinoise. Supposez que vous vous trouviez à l'intérieur d'une pièce muni d'un ensemble de caractères chinois et d'un manuel d'instructions de type: «Si la question posée est constituée de telle suite de caractères, donnez la réponse formée avec telle autre suite de caractères.» Vous pouvez alors répondre aux questions d'un locuteur chinois situé à l'extérieur de la pièce et fournir des réponses adéquates grâce au manuel. Ce faisant, vous donnez l'impression à votre interlocuteur de savoir parler sa langue, sans qu'il soit nécessaire que vous la compreniez.

Les systèmes actuels d'intelligence artificielle font de même: ils imitent (ou cherchent à imiter) le comportement et le langage des humains, mais ils ne comprennent pas le sens de l'information qu'ils traitent.

Pour en revenir au test de Turing, il est insuffisant pour une autre raison encore: il ne prend pas en compte les diverses et nombreuses facettes de l'intelligence humaine. On définit souvent l'intelligence comme la capacité à mener un raisonnement abstrait, mais

BIOGRAPHIE



LAURENCE DEVILLERS
dirige au Limsi (Laboratoire d'informatique pour la mécanique et les sciences de l'ingénieur, unité propre du CNRS) l'équipe Dimensions affectives et sociales dans les interactions parlées et est membre de la Cerna, la commission de réflexion sur l'éthique d'Allistene (Alliance des sciences et technologies du numérique). Elle vient de publier *Des robots et des hommes: mythes, fantômes et réalité* (Plon, 2017).

DES SYSTÈMES PERFORMANTS QUI GAGNENT

Il existe des programmes informatiques qui effectuent des tâches spécialisées avec une efficacité impressionnante. C'est le cas du programme AlphaGo qui, en 2016, a battu au jeu de go le champion Lee Sedol (à droite dans la photographie ci-dessous). Et début 2017, le programme Libratus a battu quatre joueurs professionnels de poker Texas Hold'em (ci-contre, Jason Les jouant contre Libratus), un jeu où l'on fait face à des informations incomplètes et à des ruses. Ici, la capacité de calcul ne suffit plus...



© Georgia Wood (à gauche) - Nate Smallwood (à droite)

L'intelligence émotionnelle ou sociale est un autre aspect primordial du comportement humain, qui requiert d'autres compétences. De façon générale, l'intelligence regroupe un vaste ensemble de fonctions mentales: apprentissage, compréhension et organisation du réel en concepts, interprétation des règles sociales et culturelles, capacité à utiliser le raisonnement



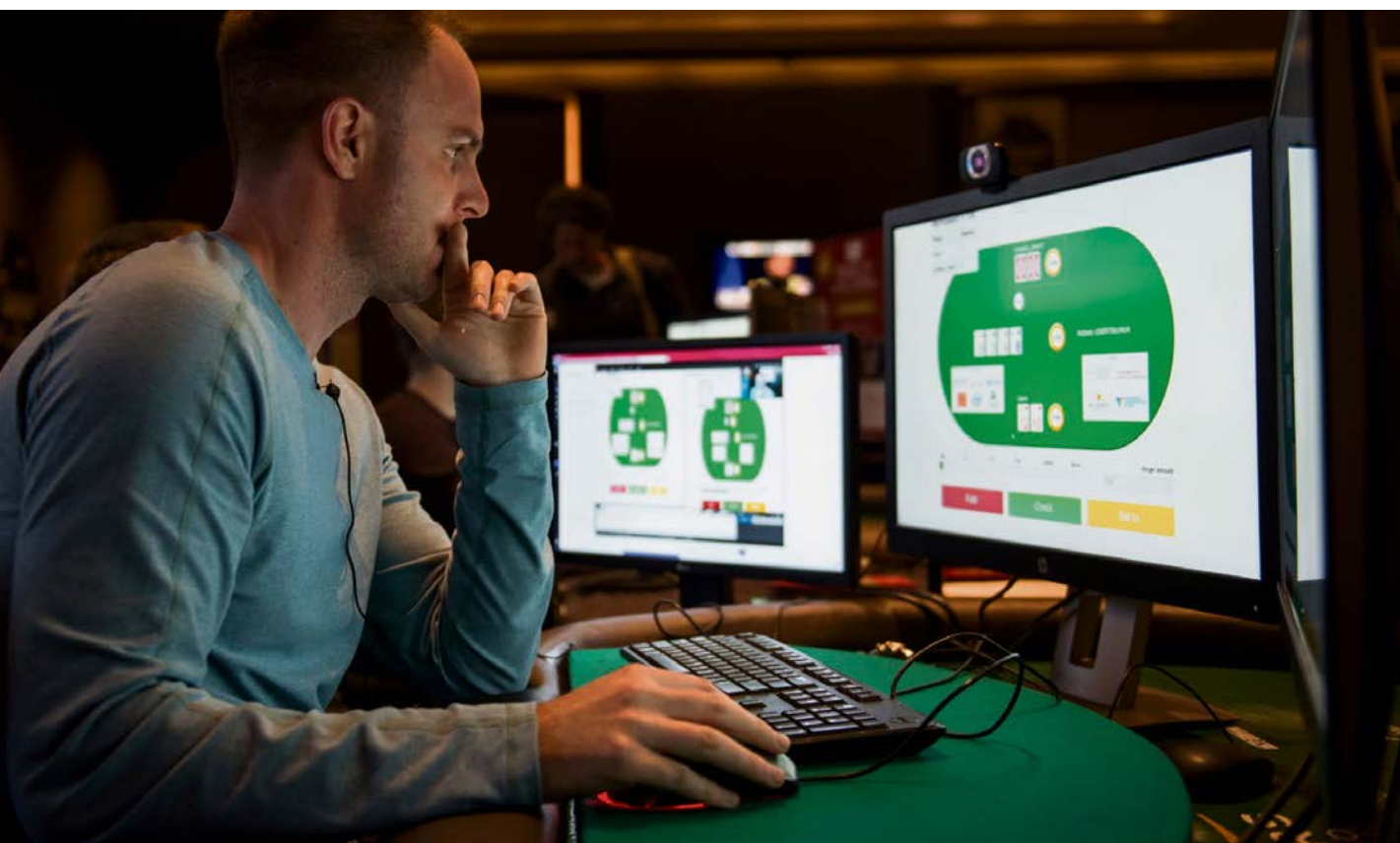
Le test de Turing ne prend pas en compte de nombreuses fonctions mentales



causal, imagination, prospection et flexibilité, mais aussi habileté à percevoir et à exprimer les émotions, à les intégrer pour comprendre, dialoguer et raisonner, ainsi qu'à réguler les émotions chez soi et chez les autres.

L'intelligence est un concept tellement polysémique que nous ne parvenons pas encore à la caractériser de façon satisfaisante. Cela n'a pas empêché le domaine de l'intelligence artificielle d'avoir beaucoup progressé ces dernières années et d'avoir acquis une importance stratégique. Ces avancées sont liées à deux ruptures technologiques: d'une part, la puissance de calcul des ordinateurs permet aujourd'hui d'analyser d'énormes masses de données en quelques secondes; d'autre part, avec les techniques d'apprentissage profond (*deep learning* en anglais), des réseaux de neurones artificiels apprennent à effectuer certaines tâches selon des mécanismes plus efficaces que ceux utilisés dans les années 1990.

Ainsi, pour une tâche qui exige uniquement des calculs aujourd'hui bien compris, comme jouer aux échecs ou au go, les programmes informatiques ont des performances très impressionnantes et peuvent battre des champions du monde: le superordinateur Deep Blue d'IBM l'a fait en 1997 pour les échecs, et le programme AlphaGo de l'entreprise DeepMind-Google l'a fait en 2016 pour le go. Certains programmes sont également capables de bluffer: ainsi, il y a quelques mois, le système Libratus, conçu à l'université Carnegie-Mellon, aux États-Unis, a battu quatre joueurs professionnels au poker dans sa version Texas Hold'em. Or le poker est un jeu complexe où il >



> faut prendre des décisions fondées sur des informations incomplètes tout en affrontant les bluffs et autres ruses.

Quant aux performances des agents conversationnels, la possibilité de parler naturellement à ces systèmes afin qu'ils exécutent des tâches à notre service ne tient pas du fantasme, même si la technologie actuelle est encore loin de ce que montre la science-fiction. Mais les agents conversationnels ne comprennent pas l'information qu'ils traitent, ce qui est la majeure différence avec la notion d'intelligence artificielle dite forte (qui n'est pas pour demain), laquelle vise à reproduire une véritable compréhension de l'information. Les assistants conversationnels ne gèrent pas encore bien un dialogue, n'ont pas de sens commun et ne comprennent pas les règles sociales; ils répondent à des questions sans se préoccuper de l'historique ni du contexte de la conversation, d'où un dialogue qui paraît souvent simpliste ou incohérent.

DES ROBOTS QUI BAVARDENT

Dans leur état actuel, ces systèmes repèrent des mots (voire des expressions entières) sémantiquement importants dans le discours de l'interlocuteur, afin de retrouver des réponses dont le schéma est programmé et qui permettent de mener le dialogue d'une manière plus ou moins intelligente, sans qu'une réelle compréhension du sujet et des phrases prononcées soit nécessaire.

Donner aux robots conversationnels des connaissances sémantiques, une compréhension du sens commun et des règles sociales est un défi scientifique complexe, auquel les géants du numérique (Google, Apple, Facebook, Amazon, Microsoft, IBM) se sont attelés. Bien que l'objectif soit encore loin d'être atteint, ces entreprises ont développé des agents conversationnels qui répondent à des questions en langage naturel et dont certains rendent déjà service aux particuliers.

Ainsi, en 2011, le programme Watson d'IBM a gagné au jeu télévisé Jeopardy, une sorte de « Questions pour un champion », où il fallait répondre en langage naturel aux questions. Siri, installé sur les Iphone d'Apple, est capable de répondre à nos questions prononcées oralement, et une version plus perfectionnée sera bientôt disponible. Autre exemple: l'assistant vocal Alexa, intégré dans la petite enceinte cylindrique Echo d'Amazon, peut répondre à vos demandes, anticiper vos besoins, contrôler les autres objets connectés du domicile... Commercialisé depuis deux ans, ce système équipe déjà 20 % des foyers aux États-Unis!

La robotique conversationnelle se développe également. Les robots Nao et Pepper, de la société japonaise Softbank Robotics, le robot



L'humour fait partie des capacités que l'on souhaite donner aux machines

Buddy de la société française Blue Frog Robotics, pour ne citer qu'eux, sont capables de quelques dialogues préséncarés. Jibo, de la société américaine du même nom, est un robot de petite taille, sans bras ni jambes, dont l'écran rond simule une tête. Il est censé aider pour des tâches simples, mais il a aussi été créé pour faire office de compagnon amusant, qui connaît par exemple quelques plaisanteries.

Par ailleurs, les concepteurs d'agents conversationnels ajoutent de plus en plus une « personnalité » à la machine. Celle-ci a alors des préférences ou des habitudes qu'elle exprime dans la conversation, ce qui lui donne un semblant d'identité. La machine peut ainsi prononcer des phrases telles que « J'aime



jouer» ou des expressions empathiques comme «Je comprends votre détresse, je vais vous aider». Il existe d'ailleurs des bibliothèques de réponses empathiques, comme Koko (<https://itskoko.com/>), issue des travaux du MIT et qui permet de choisir, suivant le contexte du dialogue, certaines réponses exprimant de l'empathie.

Dans tous ces développements autour de l'intelligence artificielle et des agents conversationnels, les fonctionnalités émotionnelles – empathie, humour, etc. – prennent de plus en plus d'importance pour que l'on puisse interagir de façon naturelle avec une machine.

D'ailleurs, la détection des émotions et l'humour font partie depuis 2001 des axes de recherche de mon équipe au Limsi, où l'on explore trois types de problématiques et de technologies: la détection des émotions, le raisonnement exploitant des informations de nature affective et la génération d'expressions d'ordre affectif.

En particulier, l'humour, à un degré assez simple, fait partie des capacités que l'on souhaite donner aux machines. On peut le simuler à travers divers types d'expressions – verbales ou non verbales – socialement et culturellement adaptées, et l'utiliser pour rendre les machines plus attachantes et plus amusantes à utiliser, et ainsi améliorer nos interactions avec elles.

L'humour est en effet omniprésent dans les relations sociales humaines et constitue l'un des moyens les plus répandus pour produire un affect positif chez d'autres personnes. Plusieurs études ont montré que l'humour innocent augmente l'appréciation, renforce l'amitié, atténue le stress, encourage la créativité et améliore le travail d'équipe. Il peut aussi aider à détendre une situation, à surmonter des échecs ou encore à mettre une situation en perspective.

MACHINES EMPATHIQUES

Par exemple, quand le robot perçoit que vous êtes malheureux, il peut plaisanter pour vous faire rire et vous reconforter; s'il détecte chez vous de la colère, il peut vous rappeler avec humour que la situation n'est pas si dramatique. L'humour d'autodérision est également très utile lorsque le robot commet une erreur de reconnaissance ou d'interprétation, à condition bien sûr qu'il ait détecté son erreur: si le robot est capable de vous émouvoir et de vous divertir, il vous sera plus facile de vous attacher à lui et de lui pardonner ses imperfections.

Parler, répondre avec pertinence, apprendre, raisonner, détecter les émotions de l'interlocuteur, faire de l'humour sont ainsi des capacités que l'on attend d'une machine intelligente. Mais comment évaluer les capacités réelles d'une machine donnée? Comment évaluer les performances d'un agent conversationnel en

matière d'imitation, de conversation, de mémorisation, de raisonnement, de simulation affective, d'anticipation?

L'une des difficultés est que ces capacités sont conférées aux robots ou aux agents conversationnels au travers d'algorithmes et de techniques d'apprentissage profond, procédures qui gardent une forme d'opacité: ces techniques fonctionnent selon un principe transparent et bien compris, mais elles produisent des décisions dont il est impossible d'expliquer les raisons et le cheminement.

Hormis ce problème dit de boîte noire, nous sommes en droit de nous poser bien d'autres questions sur les robots ou les agents conversationnels. Par exemple, la machine en question respecte-t-elle la vie privée de ses utilisateurs et des autres humains? Se comporte-t-elle de façon éthiquement responsable, et, si oui, est-ce que ce sera toujours le cas jusqu'à sa fin de vie? Suffit-il de tester la machine avant sa mise sur le marché si elle s'adapte en continu?

TESTER LES MACHINES TOUT AU LONG DE LEUR VIE

De telles questions sont particulièrement importantes dans le cas de systèmes capables d'apprendre tout au long de leur durée d'utilisation. Il est alors difficile de contrôler leur comportement futur et de garantir que ce dernier restera acceptable. Un robot au contact d'humains pourrait développer des attitudes agressives ou inconvenantes, un algorithme conçu pour faire des offres financières pourrait à terme orienter ses propositions en fonction du groupe social auquel appartient son interlocuteur, etc.

Un exemple d'une telle dérive a été fourni en 2016 par Tay, un système conversationnel développé par Microsoft. Ce *chatbot*, déployé pour converser avec des jeunes sur la plateforme Twitter, était doté d'une capacité d'apprentissage en continu. On a pu constater qu'il était capable d'apprendre de ses interactions avec les internautes, puisqu'il adaptait son langage aux habitudes et autres éléments qu'il repérait dans les conversations. Mais l'essai a tourné court: au bout de vingt-quatre heures seulement, Tay s'est mis à poster sur la plateforme des tweets à caractère raciste et nazi!

Ces considérations et l'exemple malheureux de Tay montrent que tester les capacités des systèmes à intelligence artificielle est indispensable pour que l'on puisse interagir avec eux en toute confiance. D'où la question: comment faire évoluer le test de Turing pour évaluer les capacités des machines et leur code moral?

Comme on l'a vu, ce test éprouve la faculté d'une machine à imiter la conversation humaine. La mission du juge est de deviner, >

> d'après les messages échangés, qui est, de l'un ou de l'autre de ces interlocuteurs, une machine. Le contenu des messages est libre : il est possible de parler de tous types de sujet. Cependant, chacun des éléments du test de Turing peut être remis en question et, aujourd'hui encore, il faut se demander quels sont les biais à éviter lorsqu'on effectue un tel test. Jean-Paul Delahaye, chercheur en informatique à Lille (et auteur de la rubrique « Logique & calcul » de *Pour la Science*), explique par exemple qu'une simple question de calcul est susceptible de démasquer l'interlocuteur-programme : l'humain sera en effet mauvais pour effectuer correctement un calcul laborieux, alors que la machine va exceller. Mais, pourrait-on rétorquer, rien n'empêche de programmer la machine pour qu'elle fasse exprès de se tromper...

Toujours est-il que faire passer le test de Turing reste un graal pour tous les concepteurs d'agents conversationnels. Depuis 1990, il existe même une compétition annuelle, le prix Hugh Loebner, qui couronne les systèmes satisfaisant le mieux les critères du test de Turing, c'est-à-dire avec lesquels il est le plus difficile de déterminer s'il s'agit d'un humain ou d'une machine. Mais, répétons-le, aucune intelligence artificielle n'a encore passé avec succès le test de Turing. Les meilleurs programmes n'effectuent qu'un simulacre de conversation qui, malgré de récents progrès (systèmes capables de répondre dans des domaines ouverts, adaptables à différents interlocuteurs, dotés de certains traits de personnalité...), fait rarement illusion plus de quelques minutes.

SURVEILLER LA COÉVOLUTION DES HUMAINS ET DES MACHINES

Il reste donc à trouver des façons pertinentes d'évaluer les diverses capacités, tant cognitives qu'émotionnelles, des machines. Pour ce qui est des performances cognitives, de nombreux chercheurs imaginent des scénarios inspirés du test de Turing, mais composés de plusieurs épreuves dans des contextes différents. Dans des versions scolaires, les machines passent des examens, comme des écoliers. D'autres tests portent sur la capacité à démêler des ambiguïtés du langage naturel, sur la préhension d'objets, etc. (*voir l'article de Gary Marcus*). Quant aux capacités émotionnelles, tout ou presque reste à faire : la conception de tests sur cet aspect constitue un nouveau chantier de la recherche en intelligence artificielle.

Ainsi, avec robots munis de facultés que l'on considérerait comme le propre des humains il n'y a pas si longtemps, des variantes du test de Turing ou des batteries de tests sont à développer – qui pourront être à la base d'une sorte

JIBO, UN ROBOT BAVARD

Sur son écran rond, ce petit assistant conversationnel illustre une histoire qu'il est en train de raconter. Ce petit robot de forme épurée aide à effectuer des tâches simples et a été aussi conçu pour amuser : Jibo peut faire quelques plaisanteries.



d'autorisation de mise sur le marché et de contrôle technique pour robots tout au long de leur vie. C'est un axe prometteur des recherches actuelles.

Enfin, il est nécessaire de surveiller la coévolution des humains et des machines dans leur interaction. La vie des robots émerge à travers nous et s'inscrit dans notre monde intérieur. La simple présence d'un robot assis près peut déjà nous conduire à nous interroger : « Que pense-t-il ? » Les robots pourront nous manipuler ou nous mentir pour notre bien-être, mais encore faudra-t-il s'assurer que c'est bien le cas. Il faut se préoccuper de l'évolution, à long terme, du comportement des humains vis-à-vis des agents conversationnels et des robots, afin d'éviter l'isolement social, un attachement démesuré à la machine ou des manipulations abusives. C'est aussi dans cette direction que doit évoluer le test de Turing : non seulement tester les capacités des machines, mais aussi tester leur propension à modifier nos croyances et notre comportement vis-à-vis d'elles.

Ajoutons, pour finir, qu'une bonne information sur les capacités de ces assistants conversationnels, sur la façon dont ils fonctionnent, sur les biais qu'ils peuvent présenter, permettrait aux utilisateurs de prendre plus de recul et de se comporter de façon adéquate vis-à-vis d'eux. Cela fait aussi partie des défis sociétaux à relever pour bien vivre avec les machines. ■

BIBLIOGRAPHIE

L. Devillers, **Des robots et des hommes : mythes, fantômes et réalité**, Plon, 2017.

L. Devillers, **Rire avec les robots pour mieux vivre avec**, *Journal du CNRS*, juin 2015 (<http://bit.ly/1Lnhgp2>).

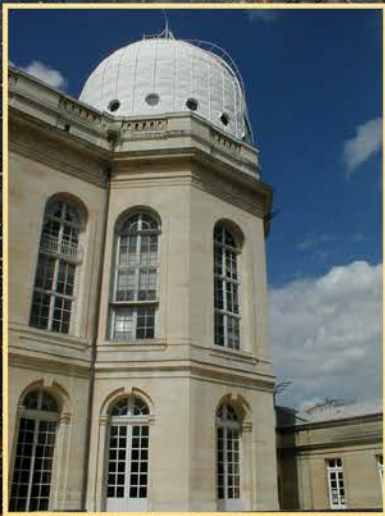
Vivre avec les robots, vidéo réalisée par le Limsi-CNRS : www.youtube.com/watch?v=p1ID-gvUnWs

Les robots en quête d'humanité, *Dossier Pour la Science*, n° 87, avril-juin 2015.

A. M. Turing, **Computing machinery and intelligence**, *Mind*, vol. 59, pp. 433-460, 1950.

LUMIÈRES SUR L'UNIVERS

FORMATION EN LIGNE
EN ASTROPHYSIQUE - NIVEAU (L1-M1) - DIPLOMANTE



LES PARCOURS

Des étoiles aux planètes : niveau L1-L2

Cosmologie et Astrophysique extragalactique : niveau L2

Mécanique Céleste : niveau L3

Fondamentaux pour l'astronomie et l'astrophysique : niveau L3

Sciences Planétaires : niveau L3

Fenêtres Sur l'Univers : niveau M1

Instrumentation, chaîne de mesure et projets : niveau M1

Ouvert à tous (niveau bac minimum) : passionnés, animateurs scientifiques, étudiants ...

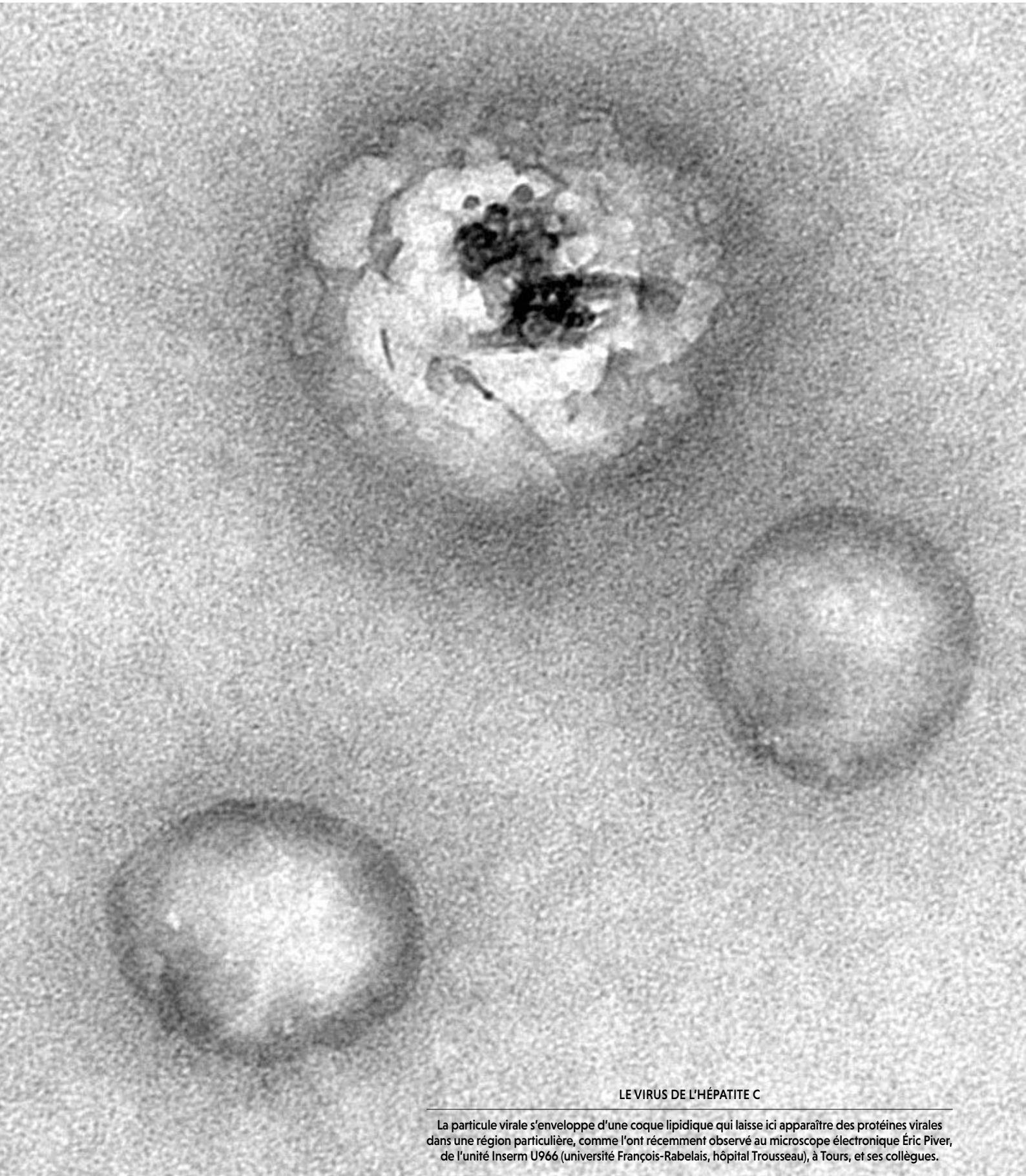
Cours et exercices interactifs assurés par des astronomes professionnels.

Formation pouvant être validée sous forme de Crédits de Licence ou de Master (ECTS)

Inscriptions 2017-2018 ouvertes jusqu'au 19 juin 2017 !

<https://media4.obspm.fr/dulu>

contact.dulu@obspm.fr



LE VIRUS DE L'HÉPATITE C

La particule virale s'enveloppe d'une coque lipidique qui laisse ici apparaître des protéines virales dans une région particulière, comme l'ont récemment observé au microscope électronique Éric Piver, de l'unité Inserm U966 (université François-Rabelais, hôpital Trousseau), à Tours, et ses collègues.

L'ESSENTIEL

> Transmise par voie sanguine, l'hépatite C est une maladie virale qui, à terme, entraîne la destruction du foie et la mort.

> Comme le virus du sida, celui de l'hépatite C est d'une grande variabilité, ce qui complique la mise au point d'un vaccin.

> Mais, depuis quelques années, la recherche

pharmaceutique a mis au point une nouvelle génération de médicaments qui permettent de guérir plus de 95 % des personnes traitées.

> Le défi est à présent de dépister et traiter les personnes infectées, et ce à l'échelle mondiale : 57 millions de personnes ignorent encore qu'elles sont concernées.

LES AUTEURS



PATRICK MARCELLIN
directeur du service
d'hépatologie de
l'hôpital Beaujon,
à Clichy



PIERRE KALDY
journaliste
scientifique

L'hépatite C bientôt vaincue?

IL N'EXISTE PAS DE VACCIN CONTRE L'HÉPATITE C. NÉANMOINS, ON SAIT AUJOURD'HUI GUÉRIR DE CETTE MALADIE VIRALE MEURTRIÈRE. RESTE À DÉBLOQUER LES FONDS POUR ÉTENDRE LES TRAITEMENTS AUX 71 MILLIONS DE PERSONNES INFECTÉES DANS LE MONDE.

L'hépatite C est un fléau mondial. Cette maladie est due à un virus qui s'attaque aux cellules du foie et provoque, après des décennies d'une infection chronique, une cirrhose qui évolue parfois en cancer du foie. Elle est la seconde cause infectieuse de mortalité par cancer dans le monde après l'hépatite B. En 2015, elle a entraîné le décès de 400 000 personnes, dont près de 150 000 par cancer du foie selon l'Organisation mondiale de la santé (OMS), qui précise que ce nombre est sous-estimé, faute de données. Depuis 2012, elle est même devenue la première cause de décès par maladie infectieuse aux États-Unis, causant plus de morts, par cancer du foie ou insuffisance hépatique liée à la cirrhose, que 60 autres agents infectieux réunis, dont le virus du sida et le bacille de la tuberculose. Et le pic de mortalité dans le monde est à venir, car 71 millions de personnes sont chroniquement infectées par le virus de l'hépatite C, selon l'OMS. C'est aussi, avec l'alcoolisme, la première cause de greffe du foie dans le monde.

Le défi pour traiter cette maladie est d'autant plus énorme que la très grande majorité des individus atteints ignorent leur état. On estime en effet que, parmi les personnes chroniquement infectées, seules 20 % savent qu'elles le sont. Pour compliquer les choses, toutes ne tombent pas malades et, une fois installée, la maladie chronique reste silencieuse pendant des décennies avant les premiers symptômes de destruction du foie.

UN MYSTÉRIEUX VIRUS

Mais depuis peu, ce sombre tableau n'est plus une fatalité. Chose impensable il y a sept ans à peine, on peut désormais guérir la plupart des patients en quelques semaines, même à un stade avancé de la maladie. Cette prouesse est due à une série de percées de la recherche pharmaceutique qui ont permis d'élucider la structure du virus, de reproduire son infection *in vitro* et de trouver des médicaments ciblant les enzymes essentielles à sa multiplication dans l'organisme.

Tout a commencé à la fin des années 1970, quand des médecins ont identifié un nouveau >

> type d'hépatite chronique post-transfusionnelle qui, dans la plupart des cas, n'était dû ni au virus de l'hépatite A ni à celui de l'hépatite B, connus à l'époque. Pendant une décennie, les biologistes ont tenté d'isoler le virus responsable de cette forme d'hépatite dans le sang des malades, sans succès. Mais en 1989, une équipe du laboratoire américain Chiron, dirigée par Michael Houghton, a enfin identifié le virus à l'aide d'une technique alternative de biologie moléculaire.

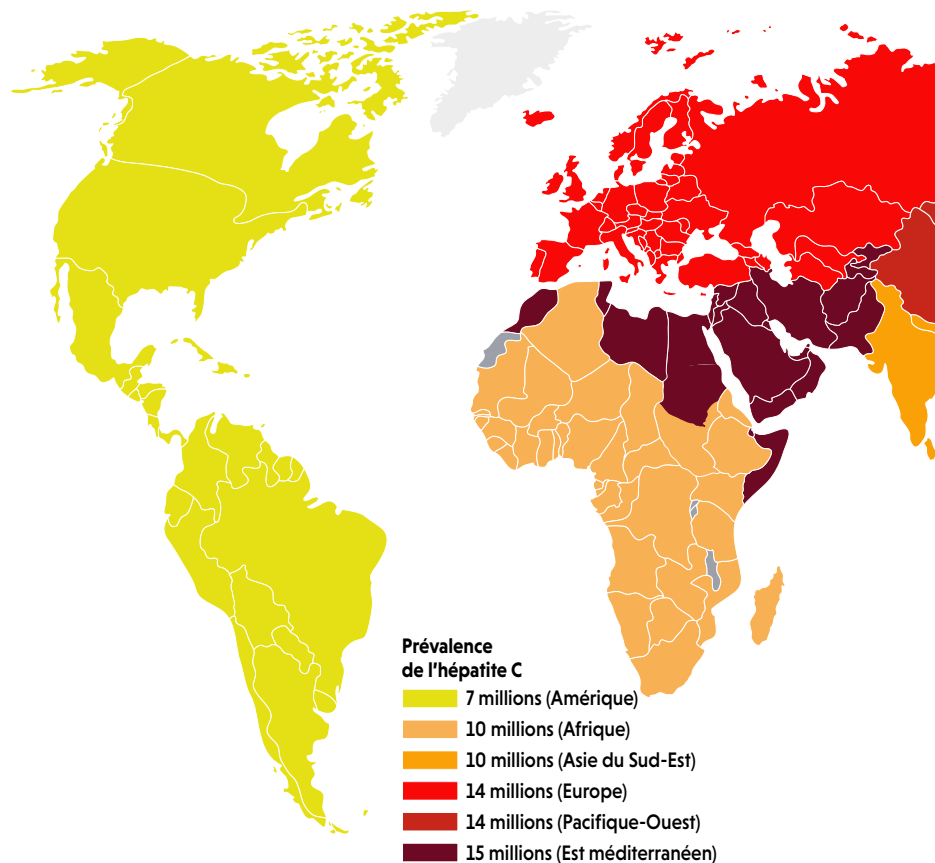
Ne réussissant ni à purifier les particules virales dans le sang ni à cultiver le virus *in vitro*, ces virologues ont cherché à isoler directement le génome viral dans le sang. D'un côté, ils ont construit une banque de matériel génétique issu du sang d'un chimpanzé contaminé (après avoir éliminé les cellules du sang) en l'insérant sous forme de fragments dans un million de bactériophages, des virus de bactérie. Infectées avec ces bactériophages, des bactéries ont alors produit des fragments de protéines du virus recherché.

De l'autre côté, les biologistes ont récupéré du sérum d'un patient infecté contenant *de facto* des anticorps contre le mystérieux virus. Mis au contact des bactéries, l'anticorps a reconnu les fragments de protéines du virus qu'elles exprimaient, ce qui a permis de remonter à la séquence virale qui les codait. Grâce à cette technique, originale pour l'époque, les chercheurs ont retrouvé la séquence de la quasi-totalité du génome viral.

MILLE MILLIARDS DE VARIANTS DU VIRUS PAR JOUR

Son décryptage a révélé un petit virus à ARN de la famille des Flaviviridae (la famille des virus Zika et de la dengue) qui ne code que dix protéines (voir l'encadré page 44). Les chercheurs pouvaient enfin étudier ces protéines, première étape pour tenter de bloquer spécifiquement l'activité du virus. Le séquençage du génome des particules virales produites au cours d'une infection a cependant mis au jour une caractéristique redoutable du virus : sa très grande variabilité. Cette propriété, qu'il partage avec un autre petit virus à ARN, celui du sida, lui permet de brouiller les pistes de reconnaissance par le système immunitaire, ce qui complique beaucoup la mise au point d'un vaccin.

De plus, la petitesse du virus fait qu'il se réplique très vite dans les cellules hépatiques, au point que l'on estime à près de 1000 milliards chaque jour le nombre de copies légèrement différentes susceptibles d'être produites par un patient infecté. Les défenses de l'organisme sont alors rapidement dépassées par le nombre et la variété de ces particules virales. Pour redonner le dessus au système immunitaire et lui permettre d'éradiquer les cellules du foie infectées, il fallait trouver le moyen de bloquer cette répllication incessante du virus.



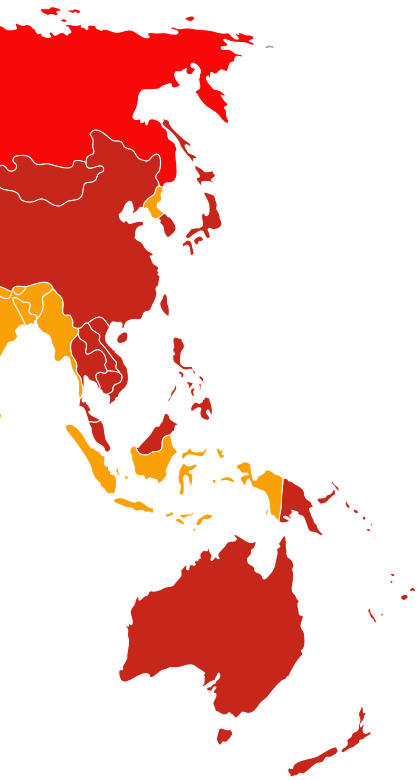
Là encore, le virus échappait aux chercheurs car il était toujours impossible de le cultiver *in vitro* dans des cellules hépatiques. De plus, ils n'arrivaient à reproduire l'infection que dans un seul modèle animal, le chimpanzé.

Cependant, deux indices encourageants étaient aussi apparus lors de l'étude de la reproduction du virus. Le premier était qu'il n'infecte que le foie, organe facile à atteindre avec des médicaments par voie orale. Le second était qu'à la différence des virus de l'hépatite B ou du sida, celui de l'hépatite C reste dans le cytoplasme des cellules et ne s'installe pas comme eux respectivement dans le noyau ou le génome de la cellule. Ces deux propriétés offraient l'espoir d'arriver, un jour, à éliminer le virus de l'organisme. Cette possibilité, l'un d'entre nous (Patrick Marcellin) l'avait confirmée en 1997 chez des patients qui avaient été traités des mois auparavant avec une petite protéine antivirale, l'interféron alpha (IFN- α).

Dès 1986, des hépatologues américains avaient observé que la maladie disparaissait parfois à la suite de l'injection, trois fois par semaine pendant un an, de cette protéine de l'organisme qui stimule le système immunitaire en cas d'infection virale et que l'on commençait alors à produire par génie génétique. L'étude de 1997 montra que, chez certains patients, l'ARN viral disparaissait complètement du sang et du foie après leur traitement.

L'HÉPATITE C DANS LE MONDE

En 2015, 71 millions de personnes étaient infectées dans le monde. Fragile, le virus de l'hépatite C n'est transmissible que par le sang et très rarement par voie maternelle ou sexuelle. Beaucoup de personnes ont été infectées dans le passé par des transfusions sanguines non contrôlées pour la présence de ce virus, ce qui n'est plus le cas depuis 1991 en Europe et aux États-Unis. La plupart des contaminations actuelles sont liées à l'utilisation de matériel médical souillé (Pakistan, Mongolie, Chine...) et à l'utilisation de seringues contaminées par les usagers de drogues injectables (États-Unis, Géorgie...).



En 1999, une nouvelle découverte débloqua finalement la situation. Cette année-là, l'équipe de Ralf Bartenschlager de l'université de Mayence, en Allemagne, annonça avoir obtenu une répllication stable du génome viral dans des cellules. Elle montrait que si l'on n'introduisait qu'une partie du génome viral dans des cellules de cancer du foie humain, il s'y répliquait de façon autonome.

Cette opportunité de reproduire *in vitro* la répllication du virus offrait enfin à l'industrie pharmaceutique un moyen de l'étudier de près et de tester différentes pistes visant à la bloquer. Ce n'est qu'en 2005, à la suite de la découverte chez un patient japonais d'une souche du virus extrêmement virulente, capable de contourner les mécanismes antiviraux internes des cellules, que l'on put reproduire *in vitro* tout le cycle de l'infection virale dans des cellules de foie humain. Mais les chercheurs n'avaient pas attendu ce modèle complet pour tester leurs différentes pistes visant à entraver le virus.

La première cible qu'ils avaient identifiée était une protéine importante codée dans le génome viral et nommée NS3. Le matériel génétique du virus est une unique molécule d'ARN qui code une longue protéine précurseur constituée des dix protéines virales. Parmi elles, NS3 est une enzyme qui débite une partie de la longue protéine, libérant ainsi plusieurs protéines virales. Dès 1996, des virologues avaient cristallisé cette protéase pour connaître sa structure dans les moindres détails. Elle semblait une cible idéale, d'autant que les chercheurs pouvaient bénéficier à l'époque de l'expérience acquise dans la recherche sur le virus du sida.

Très coûteux et mal tolérés, les premiers traitements n'agissaient que sur certaines souches

Ce dernier produit aussi une protéase dont un inhibiteur, le saquinavir, élaboré en 1995 grâce aux progrès de la modélisation informatique, avait donné des résultats spectaculaires. L'efficacité du saquinavir contre le VIH était si puissante que, deux ans après sa commercialisation en 1997, le nombre de décès dus au virus avait été divisé par presque

trois aux États-Unis. Ce médicament inaugurerait l'ère victorieuse des trithérapies, lesquelles combinaient un blocage de la répllication virale, une prise par voie orale et une bonne tolérance par les patients.

UN PREMIER INHIBITEUR

Cependant, l'étude du virus de l'hépatite C révéla encore un obstacle imprévu. La structure tridimensionnelle de la protéine NS3, visualisée par bio-informatique, ne présentait aucune cavité particulière qui aurait pu servir de point d'ancrage à un inhibiteur. De nombreux chercheurs prirent alors pour cibles d'autres protéines du virus, mais une équipe canadienne du laboratoire Boehringer Ingelheim, dirigée par la chimiste Montse Llinàs-Brunet, persévéra. En 2003, elle mit au point une molécule de synthèse qui bloquait l'enzyme tout en étant assez stable et petite pour une absorption par voie orale. Les essais préliminaires chez des patients étaient très prometteurs: sous l'effet du produit, baptisé BILN 2061, la charge virale chutait de presque mille fois dans le sang jusqu'à devenir quasi indétectable. C'était du jamais vu comparé aux traitements de l'époque.

Très coûteux et mal tolérés, ces derniers reposaient sur des injections hebdomadaires d'IFN- α pendant 24 ou 48 semaines, associées à la prise orale d'une petite molécule antivirale, la ribavirine, qui augmentait l'efficacité de l'IFN- α par des mécanismes non élucidés. La guérison, confirmée par l'absence de virus dans le sang six mois après la fin du traitement, dépendait de la souche (le génotype du virus) et de sa charge virale dans le sang. Si le traitement fonctionnait bien pour les génotypes 2 et 3, seulement moins de la moitié des malades du génotype 1, le plus fréquent en Occident, étaient guéris.

De son côté, l'inhibiteur de la NS3 était surtout efficace sur le génotype 1. Il devait son efficacité au fait qu'en bloquant spécifiquement l'enzyme virale, il empêchait non seulement la répllication du virus, mais aussi la paralysie par cette protéase de mécanismes de défense cellulaire. De plus, il semblait avoir moins d'effets indésirables que l'IFN- α , souvent à l'origine d'un syndrome pseudogrippal, d'une fatigue, de dépression, d'anxiété, d'insomnies, auxquels s'ajoutait parfois une anémie due à la ribavirine.

Dans la foulée, d'autres laboratoires produisirent de nouveaux inhibiteurs de la NS3 et deux d'entre eux furent commercialisés en 2011 sous les noms de télaprevir et bocéprévir. Malgré tout, ces trois nouveaux médicaments par voie orale ne suffisaient pas à enrayer à eux seuls la maladie, car le virus, très variable, parvient à contourner leur blocage avec une seule mutation. De plus, ils n'étaient pas compatibles avec de nombreux médicaments et avaient encore des effets indésirables. >

> Néanmoins, utilisés en complément des traitements antérieurs (IFN- α et ribavirine), ils faisaient nettement progresser le taux de guérison pour le génotype 1 du virus, même chez des patients en échec thérapeutique.

Pour la première fois, le virus de l'hépatite C apparaissait vulnérable à un produit simple capable de cibler une de ses composantes. La puissance de ces inhibiteurs spécifiques suggérait que le blocage de protéines virales ayant des rôles multiples aurait un effet démultiplié sur l'infection. L'ère des antiviraux à action directe (AAD) avait commencé, et la course pour bloquer d'autres protéines virales allait offrir de nouvelles surprises.

UN ARSENAL D'INHIBITEURS SPÉCIFIQUES

Une autre cible toute désignée était l'enzyme qui réplique le génome du virus – la polymérase NS5B. Comme la NS3, cette protéine non structurale du virus n'a pas d'équivalent cellulaire. Sa structure tridimensionnelle était connue depuis sa cristallisation, en 1999, et présentait

de nombreux sites potentiels d'inhibition. S'appuyant sur les résultats obtenus auparavant sur la structure de la polymérase inverse du virus du sida, plusieurs laboratoires pharmaceutiques ont alors rivalisé pour trouver un inhibiteur qui ne soit pas facilement contourné par le virus de l'hépatite C, testant pour cela *in vitro* la vitesse d'apparition de souches virales résistantes.

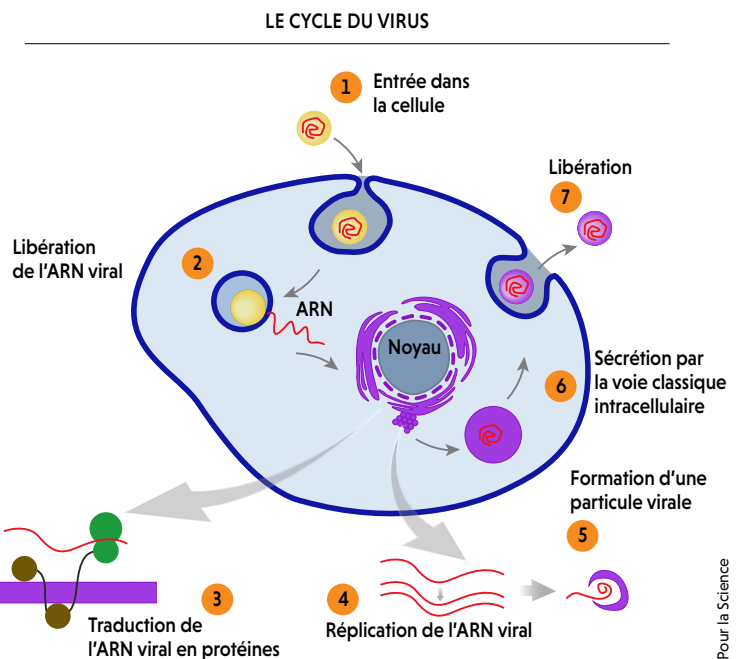
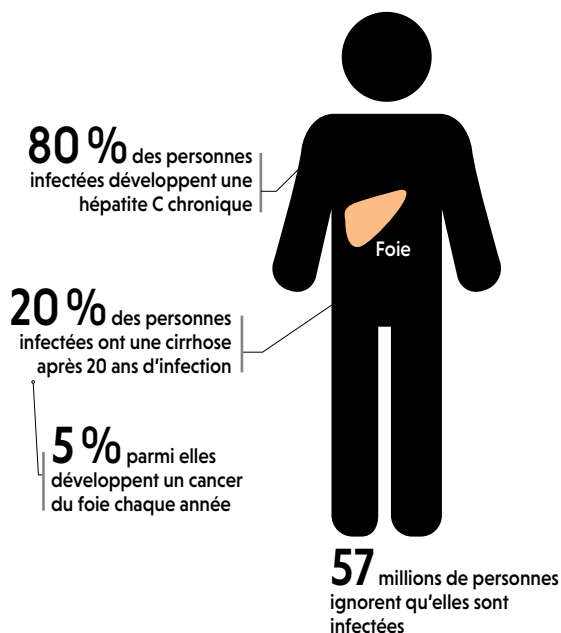
Dès 2004, un premier inhibiteur de ce type s'est révélé capable de bloquer la synthèse d'ARN viral par la polymérase. Ciblant le site actif de l'enzyme, il agit sur toutes les souches virales. De plus, les mutations du virus contournant son action perturbent trop fortement l'enzyme pour que le virus se réplique normalement. Et en 2010, un autre inhibiteur très prometteur de ce type, le sofosbuvir, est mis au point par l'équipe de Michael Sofia, qui travaillait alors pour une start-up américaine de Princeton, Pharmasset Inc (rachetée en 2011 par le laboratoire pharmaceutique Gilead).

En 2012, les premiers résultats cliniques de ce nouvel inhibiteur, combiné à la ribavirine, confirment non seulement son efficacité contre



L'infection s'effectue par le sang ou du matériel contaminé par le sang. S'il n'est pas éliminé d'emblée par l'organisme (dans 20 % des cas environ), le virus s'installe de manière silencieuse dans le foie, entraînant au fil des ans une inflammation chronique et une fibrose. L'hépatite C chronique qui en résulte reste

cependant décelable par la détection du génome viral sous forme d'ARN dans le sang. Après environ vingt ans d'infection chronique, 20 % des personnes infectées déclarent une cirrhose qui aboutit, dans 5 % des cas, chaque année, à un cancer du foie par un mécanisme encore inconnu. Le virus utilise les particules lipidiques



les souches 2 et 3 du virus, mais aussi que les malades le tolèrent bien. Mieux encore, une seule dose par jour suffit et le produit reste compatible avec d'autres traitements médicamenteux, ce qui élargit la base des malades pouvant être soignés.

En 2013, devant ces résultats engageants, le traitement est autorisé par l'Agence américaine des produits alimentaires et médicamenteux. Pour la première fois, après 27 ans de recherches, on était capable, dans certains cas, de traiter et guérir des patients sans IFN- α .

Dans le même temps, une autre protéine du virus, la NS5A, était aussi dans le collimateur des chercheurs, car on s'était aperçu que sa mutation empêchait le virus d'infecter les cellules. Son blocage paraissait en revanche très difficile à réaliser, car on ignorait encore tout de son rôle (on sait aujourd'hui qu'elle intervient dans la régulation de la réplication et l'assemblage du virus). Mais en 2010, une équipe du laboratoire pharmaceutique américain Bristol-Myers Squibb annonça la mise au point d'un inhibiteur spécifique de cette enzyme.

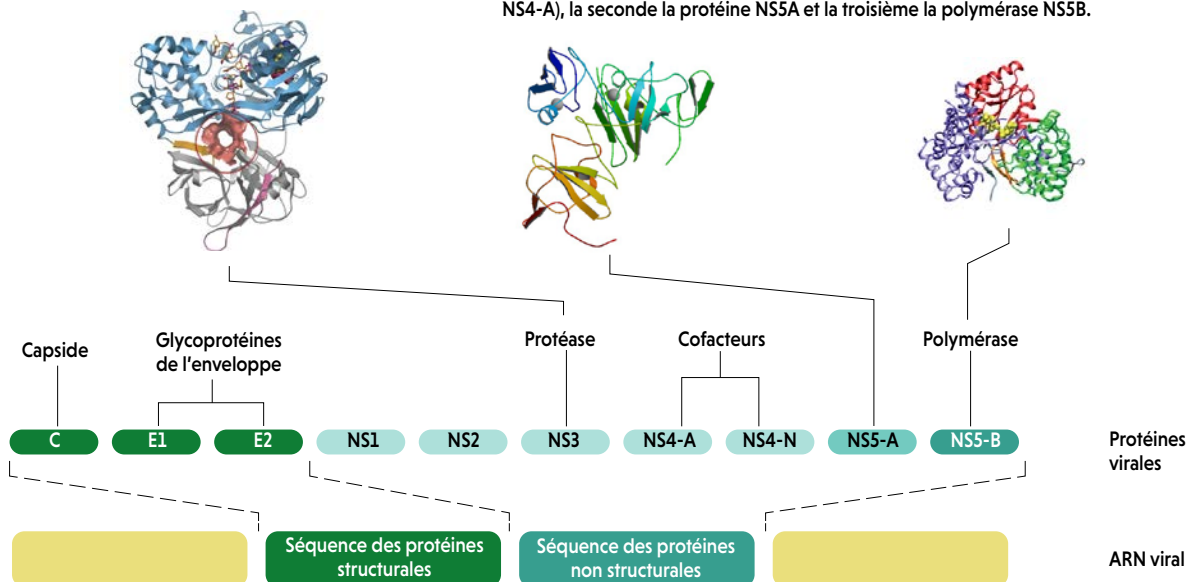
L'équipe avait testé à l'aveugle la capacité d'un million de molécules à inhiber la réplication du virus *in vitro*. Parmi les molécules retenues, les chercheurs avaient ensuite éliminé celles qui bloquaient les enzymes du virus autres que la NS5A. Les molécules conservées inhibaient donc la réplication virale en bloquant la NS5A. L'équipe avait alors modifié la structure d'une de ces molécules pour améliorer son absorption et ses propriétés pharmacologiques. Tous ces efforts aboutirent au produit le plus puissant jamais trouvé contre le virus de l'hépatite C, le daclatasvir. En effet, l'année suivante, un premier essai clinique confirma que le daclatasvir était bien toléré par les patients et capable de faire chuter plus de mille fois les concentrations du virus dans le sang des patients, avec une dose quatre fois moins forte que celle du BILN2061. En 2012, un nouvel arsenal ciblant précisément le virus de l'hépatite C avait enfin émergé, d'une puissance nouvelle pour contrer son infection chez l'homme. Le moment était venu de le tester plus largement chez les patients.

du sang exportées par le foie comme cheval de Troie pour se disséminer dans l'organisme et infecter les cellules. Il se lie à un récepteur de la membrane cellulaire, ce qui entraîne son entrée dans la cellule par endocytose, le mécanisme par lequel les cellules se nourrissent : la membrane se creuse jusqu'à englober la particule virale dans une vésicule qui se détache en emportant son chargement à l'intérieur de la cellule (1). La coque lipidique qui escorte le virus fusionne

alors avec la membrane de la vésicule, ce qui conduit à la libération de l'ARN viral dans la cellule (2). Celui-ci est alors traduit en protéines (3). Certaines orchestrent la réplication de l'ARN viral à la surface des membranes cellulaires (4). L'accumulation d'ARN et de protéines virales conduit à la formation de nouveaux virus (5), qui sont alors sécrétés (6) et libérés (7) via la voie classique de sécrétion des particules lipidiques par la cellule hépatique. Le génome viral code dix protéines, trois

de structure qui constitueront la capsid et l'enveloppe virale et sept permettant la réplication du virus. Il existe sept génotypes différents du virus, dont la séquence diffère d'au moins 30 %, et de nombreux sous-types où la séquence peut encore différer de 20 %. Chez une personne infectée, chaque particule virale produite est légèrement différente, car la réplication du génome viral est peu fidèle. Des milliers de « quasi-espèces » sont ainsi produites chaque jour.

Pour bloquer l'action du virus dans les cellules, il existe actuellement trois familles d'antiviraux à action directe. L'une cible la protéase NS3 (parfois associée au cofacteur NS4-A), la seconde la protéine NS5A et la troisième la polymérase NS5B.



Structures protéase et polymérase : avec la permission de Macmillan Publishers Ltd.; Nat. Chem. Biol., S. M. Saalau-Beitheh et al., vol. 8, pp. 920-925, © 2012 (protéase) et Nat. Rev. Microbiol., R. Bartenschlager et al., vol. 11, pp. 482-496, © 2013 (polymérase) / Structure NS5-A : www.rcsb.org/pdb/

> L'arrivée des AAD a suscité un immense espoir, celui d'éradiquer dans tous les cas le virus de l'organisme sans recourir à l'IFN- α et à la ribavirine. Dès 2012, un premier essai clinique chez des patients totalement réfractaires au traitement classique a conforté cet espoir. Les médecins ont testé le daclatasvir associé à un inhibiteur de la NS3 et guéri quatre patients sur onze au bout de trois mois de traitement. Pour la première fois, le virus de l'hépatite C était éliminé à l'aide d'un simple traitement oral.

PLUS DE 95% DES PATIENTS TRAITÉS GUÉRISSENT

L'année suivante, lors d'un essai clinique sur une centaine de personnes, un traitement associant le daclatasvir et le sofosbuvir a permis de guérir en 24 semaines plus de 90% des patients, dont certains étaient, là encore, réfractaires à tous les traitements antérieurs et à un stade avancé de cirrhose. Résultat inédit, cette guérison a été obtenue pour les virus non seulement de génotype 1, mais aussi de génotypes 3 et 4.

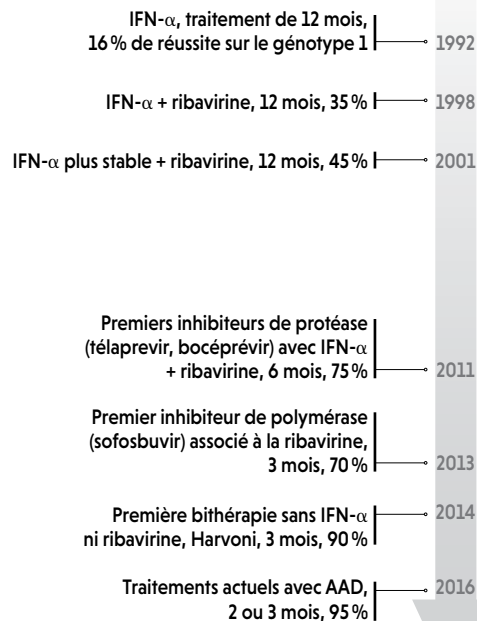
Le sofosbuvir a ainsi été le troisième AAD à être commercialisé, en 2013, pour compléter le traitement classique. Parallèlement, grâce à une intense collaboration en Europe et aux États-Unis entre les spécialistes hospitaliers, les laboratoires pharmaceutiques et les autorités publiques de validation des médicaments, les essais cliniques d'envergure se sont succédé pour déterminer les AAD et les combinaisons les plus efficaces en fonction des malades.

En 2014, un pas décisif a été franchi avec l'autorisation de mise sur le marché, en Europe et aux États-Unis, du premier traitement curatif sans IFN- α ni ribavirine. Il s'agit de l'association de deux AAD, le sofosbuvir et le lédiripasvir, un autre inhibiteur de la NS5A. Bien toléré, particulièrement efficace sur le génotype 1 du virus, pris oralement pendant seulement douze semaines, ce traitement a inauguré l'ère actuelle du traitement de l'hépatite C.

Actuellement, cinq traitements combinant des inhibiteurs de la NS3, de la NS5A et de la NS5B sont autorisés aux États-Unis et en Europe, et plusieurs autres sont annoncés pour les années à venir. L'utilisation du sofosbuvir combiné à différents AAD permet de traiter tous les génotypes du virus circulant dans le monde. De plus, ces nouveaux médicaments sont actifs même sur les formes les plus avancées de cirrhose du foie, ce qui allège la liste des patients en attente de transplantation de foie. Le traitement des patients greffés est aussi un succès: il élimine une cause majeure de rejet des foies greffés – leur réinfection par le virus, que facilite le traitement immunosuppresseur visant à éviter la réaction du système immunitaire contre le greffon. Enfin, il arrive même que la cirrhose du foie due au virus, qui entrave gravement son fonctionnement, régresse chez les patients suite

LES TRAITEMENTS DISPONIBLES

Après les traitements contre l'hépatite C à base d'IFN- α , une protéine antivirale à large spectre, sont apparus, en 2011, les premiers antiviruses à action directe (AAD), dont l'efficacité sur le génotype 1 du virus, le plus fréquent en Occident, est allée croissant.



à l'éradication du virus par ces traitements. Désormais, plus de 95% des patients traités guérissent de l'hépatite C, et les prochains traitements annoncés pour 2017 (de nouvelles combinaisons d'inhibiteurs déjà utilisés ou nouveaux) devraient encore relever ce chiffre, car les premiers essais cliniques suggèrent qu'ils atteignent toutes les souches virales, indépendamment de leur génotype.

Ces nouveaux traitements révolutionnent la prise en charge thérapeutique des patients et déplacent la lutte contre l'hépatite C à l'échelle des populations. Les médicaments sont pris à domicile, les patients restant seulement en surveillance dans des centres spécialisés. Quand la charge virale est indétectable dans le sang trois mois après le traitement, les rechutes sont exceptionnelles. Ces progrès laissent espérer aux spécialistes une éradication de l'épidémie à l'échelle de pays entiers, les traitements devenant beaucoup plus accessibles à des populations marginales particulièrement touchées par la maladie comme les usagers de drogues injectables, les détenus et

les personnes séropositives pour le virus du sida. En France, par exemple, parmi les quelque 193 000 personnes infectées par le virus de l'hépatite C en 2011, environ 65% étaient des usagers de drogues injectables, 5% des détenus et 18% des porteurs du virus du sida, selon une estimation de l'Institut de veille sanitaire.

ÉLIMINER L'HÉPATITE C

Fin de l'histoire? Non, car il reste à vaincre plusieurs obstacles. Le premier est le dépistage des nombreuses personnes infectées de façon chronique à leur insu. Elles ont tout à bénéficier des AAD, car l'infection entraîne souvent des fatigues ainsi que des douleurs musculaires ou articulaires qui disparaissent avec la guérison de l'hépatite, ce qui améliore considérablement la qualité de vie. De plus, l'étude de patients infectés de façon chronique a montré que le virus favorise aussi la résistance à l'insuline et le diabète, augmente le risque de maladie cardio ou cérébrovasculaire et entraîne certains cancers tel celui des voies biliaires ou le lymphome diffus à grandes cellules B. Un pas important pour faciliter ce dépistage a été franchi fin 2016 avec la validation, par l'OMS, d'un premier test de diagnostic portable et moins coûteux que les précédents.

Le second obstacle est le financement à grande échelle de ces traitements encore très coûteux, notamment pour les pays émergents particulièrement touchés par la maladie. Néanmoins, avec une baisse des prix à venir et un raccourcissement de la durée du traitement à huit semaines, voire moins, plusieurs pays, dont la France, l'Allemagne, le Portugal, l'Écosse, l'Australie et l'Irlande ont déclaré leur objectif d'éradiquer le virus d'ici à dix ans.

En France, le ministère de la Santé a annoncé en avril 2017 que l'accès aux nouveaux traitements serait désormais généralisé à tous les patients infectés, alors qu'il était réservé aux personnes dont le foie était atteint à un stade assez avancé (précirrhose et au-delà, fibrose hépatique avancée) et à celles qui avaient un risque élevé de transmettre le virus. À l'échelle mondiale, les 194 membres de l'OMS se sont engagés, le 28 mai 2016, à éliminer les hépatites B et C d'ici à 2030. Un tel but sera difficile à atteindre pour de grands pays particulièrement touchés par la maladie tels que la Chine, avec ses 10 millions de personnes infectées par le virus, ou le Pakistan, mais aussi dans une moindre mesure la Russie, l'Ukraine, le Brésil et l'Argentine.

Afin d'aider une centaine de pays défavorisés à faire face à l'épidémie, le laboratoire Bristol-Myers Squibb a accordé en 2015 des licences du daclatasvir pour la fabrication de génériques. De son côté, le laboratoire Gilead vend ses produits avec un rabais de 99% à ces pays et a aussi permis à une dizaine de

fabricants indiens de produire des génériques à leur intention. Il a aussi engagé des partenariats avec des pays particulièrement frappés par la maladie tels que l'Égypte, où 12% de la population est infectée. Une campagne massive de traitement gratuit de sa population a ainsi pu démarrer en 2014 et a conduit au traitement de près de un million de patients en 2016. En Géorgie, troisième pays le plus touché après la Mongolie, le gouvernement a

5% des injections médicales dans le monde ne sont pas faites dans des conditions stériles

lancé en mai 2015 un plan national de prise en charge gratuite de tous les malades, soit environ 5% de la population, avec des médicaments fournis par Gilead et le soutien du gouvernement américain, et plus de 24 000 patients ont été traités. Dans d'autres pays, en revanche, le prix très élevé du sofosbuvir de Gilead a incité des pays comme le Brésil et la Chine à rejeter sa demande de brevet, et des organisations humanitaires comme Médecins du monde et Médecins sans frontières à en contester la validité auprès de l'Office européen des brevets dans l'espoir de faciliter l'arrivée de génériques.

Un autre obstacle est de disposer de moyens suffisants pour permettre un accès rapide au soin de tous les patients et confirmer la disparition du virus trois mois après la fin du traitement, marque d'une guérison définitive. Enfin, un défi propre aux pays émergents reste de prévenir les contaminations dues à l'utilisation encore trop fréquente de matériel médical usagé. Selon l'OMS, 5% des injections médicales dans le monde ne sont pas sûres; on estime qu'avec l'injection de drogue, elles ont causé 1,75 million de nouvelles infections en 2015.

En moins d'une décennie, la découverte des AAD a radicalement changé les perspectives de lutte contre l'hépatite C. Les autorités politiques et sanitaires de tous les pays vont-elles saisir cette chance historique de guérir les populations de cette infection virale encore trop souvent mortelle? ■

BIBLIOGRAPHIE

Asselah et al., **Direct-acting antivirals for the treatment of hepatitis C virus infection : Optimizing current IFN-free treatment and future perspectives**, *Liver International*, vol. 36, pp. 47-57, 2016.

S. Pol, **Virus de l'hépatite C. 25 ans, la fin de l'histoire ?**, *Médecine/Sciences*, vol. 29, pp. 998-1003, 2013.

T. K. H. Scheel et al., **Understanding the hepatitis C virus life cycle paves the way for highly effective therapies**, *Nature Medicine*, vol. 19, pp. 837-849, 2013.

L'ESSENTIEL

> Un milliardaire de la Silicon Valley, Yuri Milner, finance un projet audacieux : envoyer une sonde vers l'une des étoiles les plus proches.

> La mission, intitulée *Breakthrough Starshot*, utilisera des lasers pour propulser des « voiles solaires » fixées à de petites puces électroniques capables de prendre des photos,

d'effectuer certaines mesures et de renvoyer les informations vers la Terre.

> Les spécialistes estiment que le projet constitue un défi technique coûteux et sans garantie de succès. Mais il n'en est pas moins passionnant : ce serait le premier objet fabriqué par l'homme à atteindre une autre étoile que le Soleil.

L'AUTEURE



ANN FINKBEINER
journaliste scientifique,
spécialisée en astronomie
et en cosmologie

Cap sur Alpha du Centaure

UN PROJET FOU : PROPULSER PAR LASER DES SORTES DE PETITS VOILIERS VERS UNE AUTRE ÉTOILE QUE LE SOLEIL. EN FINANÇANT *STARSHOT*, LE MILLIARDAIRE RUSSE YOURI MILNER VA-T-IL RÉALISER UN VIEUX RÊVE DE L'HUMANITÉ ?

Au printemps 2016, j'étais à une soirée en compagnie du brillant physicien et mathématicien Freeman Dyson, alors âgé de 92 ans et professeur émérite à l'Institut d'études avancées de Princeton, aux États-Unis. Il a la réputation d'avoir un franc-parler et de toujours vous surprendre, alors je lui ai demandé quelles étaient les nouvelles. Il a souri de façon énigmatique et a répondu : « Apparemment, nous allons rendre visite à Alpha du Centaure. »

Cette étoile est l'une des plus proches voisines du Soleil et un milliardaire russe avait récemment annoncé qu'il voulait financer un projet nommé *Breakthrough Starshot* pour y envoyer un vaisseau spatial d'un type nouveau. « Et c'est une bonne idée ? », ai-je demandé. Le sourire de Freeman Dyson s'est élargi : « Non, c'est idiot. Mais le vaisseau est intéressant. »

Son principe est effectivement séduisant. Au lieu de l'habituelle fusée propulsée par des

réactions chimiques et assez grande pour transporter des humains ou des instruments lourds, *Starshot* est un essaim de minuscules puces électroniques polyvalentes, dénommées *StarChips*, munies chacune d'une « voile solaire » (voir l'illustration ci-contre).

La voile sera tellement légère que, poussée par un faisceau laser, elle atteindra jusqu'à 20% de la vitesse de la lumière. Alpha du Centaure étant distante de 4,37 années-lumière, la plus rapide des fusées pourrait mettre, selon sa masse, 30 000 ans à l'atteindre; une puce *StarChip* ferait le voyage en vingt ans. À leur arrivée, les puces ne s'arrêteront pas et croiseront en quelques minutes l'étoile et ses éventuelles planètes. Au passage, elles prendront des clichés qui mettront 4,37 années à nous parvenir.

L'aspect « idiot » de la mission *Starshot*, c'est que son intérêt scientifique est très limité. Les informations que les astronomes souhaitent obtenir sur les étoiles ne sont pas du genre de celles que l'on peut saisir en un rapide survol. >



Une escadrille de voiles poussées par de la lumière laser et portant chacune une petite puce équipée de capteurs, telle est l'idée du projet *Starshot* pour atteindre une étoile voisine du Soleil.

► Et comme personne ne sait si Alpha du Centaure est accompagnée de planètes, *Starshot* ne peut même pas promettre de gros plans sur des planètes extrasolaires. «Nous n'avons pas vraiment réfléchi à l'aspect scientifique», admet l'astrophysicien Ed Turner, de l'université de Princeton et membre du comité consultatif de *Starshot*. «Nous avons presque considéré comme allant de soi que la science serait intéressante.»

Mais en août 2016, la chance a souri à l'équipe de *Starshot*: des astronomes européens sans lien aucun avec le projet ont découvert une planète autour d'une autre étoile, Proxima du Centaure, un dixième d'année-lumière plus proche de nous qu'Alpha du Centaure. D'un seul coup, *Starshot* est devenue la seule option quelque peu réaliste pour visiter une planète en orbite autour d'une autre étoile dans un avenir assez proche. Mais même ainsi, *Starshot* n'est pas loin des rêves de la science-fiction – des scénarios où l'on imagine envoyer des hommes au-delà du Système solaire grâce à des technologies miraculeuses, souvent contraires aux lois de la physique, et grâce à beaucoup d'argent.

Pour *Starshot*, nul besoin de miracles. Sa technologie, même si elle n'existe pas encore, est fondée sur des concepts bien établis qui ne violent aucune loi de la physique. Et le projet a de l'argent pour le porter. Yuri Milner, l'entrepreneur qui finance de nombreux programmes de recherche (les *Breakthrough Initiatives*) et des prix scientifiques (les *Breakthrough Prizes*), a lancé *Starshot* avec une enveloppe de 100 millions de dollars.

En outre, au vu de l'impressionnant comité consultatif dont s'est entouré l'investisseur, même un sceptique finirait par penser que *Starshot* a une chance de réussir. Ce groupe inclut des spécialistes mondiaux des lasers, des voiles solaires, des puces électroniques, des exoplanètes, de l'aéronautique et de la gestion de grands projets, ainsi que deux lauréats du prix Nobel, l'astronome royal du Royaume-Uni, d'éminents astrophysiciens, un groupe d'ingénieurs aussi doués qu'expérimentés, et Freeman Dyson qui, même s'il pense que la mission *Starshot* est idiote, dit aussi que l'idée de voiles poussées par laser tient la route et mérite d'être explorée. L'un dans l'autre, il serait assez risqué de parier contre un projet servi par tant d'argent, d'avis éclairés et d'ingénieurs compétents.

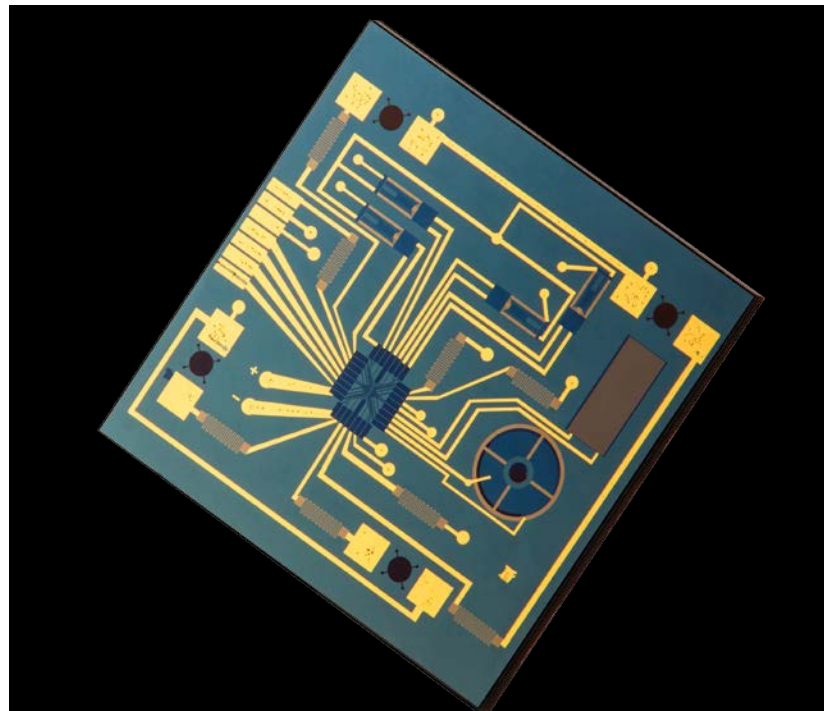
Par de nombreux aspects, le projet ne ressemble à aucune autre mission spatiale. «Tout dans le projet *Starshot* est hors du commun», dit Joan Johnson-Freese, experte en politique spatiale au Naval War College, aux États-Unis. Ses objectifs, son mode de financement et sa gestion divergent de ceux de tous les autres acteurs de l'exploration spatiale. Les entreprises spatiales commerciales se concentrent sur la réalisation de profits et sur les missions habitées qui se cantonnent au Système solaire. La Nasa, qui a

étudié des projets de voyage interstellaire dans les années 1990, est trop prudente pour se lancer dans quelque chose d'aussi incertain; ses procédures bureaucratiques sont plus lourdes; et le financement de ses missions est à la merci des aléas du Congrès américain (ce qui n'empêche pas que la Nasa ait mené de nombreuses missions interplanétaires avec succès). «La Nasa est obligée de prendre son temps; les milliardaires sont libres de se lancer», résume Leroy Chiao, ancien astronaute et commandant de la Station spatiale internationale.

RETOUR AU PREMIER AMOUR

L'homme à la tête du projet *Starshot* a toujours été inspiré par les horizons lointains. Yuri Milner est né en 1961 à Moscou, l'année où Yuri Gagarine est devenu le premier homme à aller dans l'espace. «Mes parents m'ont envoyé un message en me prénommant Yuri», dit-il. Il faudrait donc qu'il aille quelque part où nul n'est jamais allé. C'est ainsi qu'il s'est lancé dans la physique: «C'était mon premier amour», déclare-t-il. Yuri Milner a passé alors dix ans à étudier la chromodynamique quantique, la théorie de l'interaction forte qui lie certaines particules élémentaires. «Malheureusement, sans grand succès», raconte-t-il.

Il s'est alors tourné vers le monde des affaires et est devenu l'un des premiers investisseurs de Facebook et de Twitter. Il aurait



UNE PUCE STARCHIP

Ce prototype de puce *StarChip*, conçu dans un laboratoire de Mountain View, en Californie, a une largeur d'environ 15 millimètres. Il doit cependant intégrer aussi une caméra, de quoi émettre un signal vers la Terre, une source d'énergie... Un énorme défi technique!

amassé une fortune qui s'élèverait à 3 milliards de dollars. «Et, il y a peut-être quatre ans, poursuit-il, j'ai commencé à repenser à mon premier amour», les sciences.

En 2013, il a fondé les *Breakthrough Prizes*, trois prix pour la physique, pour les mathématiques et pour les sciences de la vie. Deux ans plus tard, il a lancé ce qu'il appelle son passe-temps, les *Breakthrough Initiatives*: un prix de un million de dollars pour le meilleur message à envoyer à une civilisation extraterrestre, 100 millions de dollars pour la recherche d'intelligence extraterrestre et, maintenant, 100 millions de dollars pour *Starshot*.

Au début de 2015, Yuri Milner a recruté pour commencer une équipe de personnes qu'il a rencontrées à diverses réunions *Breakthrough*. Le directeur du comité consultatif et le directeur exécutif du projet sont respectivement Avi Loeb, qui dirige le département d'astronomie de l'université Harvard, et Pete Worden, qui a dirigé le centre Ames de recherche de la Nasa et qui a participé à un projet de la Nasa de vaisseau destiné à être lancé dans un siècle. Pete Worden a recruté comme directeur de l'ingénierie Pete Klupar, un ingénieur qui avait travaillé pour lui au centre Ames et pour l'industrie aérospatiale. Ce groupe initial a mis sur pied l'impressionnant comité du programme, un concentré de spécialistes des technologies, ainsi que des grands noms comme Mark Zuckerberg de Facebook ou le physicien Stephen Hawking.

La politique de gestion du projet semble être un compromis entre la rigueur de l'arbre décisionnel hiérarchique de la Nasa et l'approche typique de la Silicon Valley: réunir des personnes de talent dans une pièce, leur donner un objectif à long terme et leur laisser le champ libre. L'un des membres du comité, James Benford, président de Microwave Sciences (une société californienne de recherche et de développement), explique que le mot d'ordre est de «nous donner [les objectifs] de la semaine prochaine et pour dans cinq ans, puis à nous de faire le lien entre les deux».

LA FEUILLE DE ROUTE SE DESSINE

Les membres de l'équipe se sont rapidement entendus pour exclure l'idée irréaliste d'envoyer des cosmonautes vers Alpha du Centaure, et qu'il fallait privilégier une mission non habitée. Ils ont estimé qu'une telle mission pourrait être lancée d'ici vingt ans. Ils sont ensuite convenus que le principal problème était la propulsion du vaisseau. Ainsi, à la mi-2015, les postdoctorants et les étudiants en thèse d'Avi Loeb ont commencé à trier les possibilités en trois catégories: impossibles, improbables et faisables.

En décembre de la même année, ils ont reçu un article de Philip Lubin, physicien à l'université de Californie à Santa Barbara, intitulé «Une

DES PROTOTYPES DE VOILES SOLAIRES

Le Russe Constantin Tsiolkovski, considéré comme le père de l'astronautique moderne, a été le premier à suggérer, dans les années 1920, d'utiliser la lumière du Soleil comme moyen de propulsion. Les voiles solaires sont poussées par la pression

feuille de route pour le vol interstellaire». Philip Lubin proposait comme moyen de propulsion un réseau au sol de lasers en phase, c'est-à-dire un grand nombre de petits lasers émettant de telle sorte que leur lumière se combine en un seul faisceau cohérent. Le faisceau laser pousserait une puce portée par une voile, qui pourrait alors voyager à une vitesse relativement proche de celle de la lumière et atteindre une étoile en quelques décennies.

Une idée similaire avait été publiée il y a une trentaine d'années par le physicien et écrivain de science-fiction Robert Forward; il l'avait baptisée *Starwisp*. Même si la technologie relève encore davantage de la science-fiction que de la réalité, «j'ai pour l'essentiel fourni à *Starshot* sa feuille de route», raconte Philip Lubin, qui a depuis rejoint le projet.

En janvier 2016, Yuri Milner, Pete Worden, Pete Klupar, Avi Loeb et Philip Lubin se sont réunis dans la Silicon Valley et ont mis au point une stratégie. «Yuri est arrivé en tenant un article avec des *post-it*, se rappelle Philip Lubin, et il a commencé à poser les bonnes questions scientifiques et économiques.» L'avantage de l'approche originale du projet est que, plutôt que d'avoir à se soumettre au long processus d'appel à propositions et d'évaluation de la Nasa, ou de devoir se soucier des perspectives de retour sur investissement comme une entreprise commerciale, l'équipe de *Starshot* était libre de discuter de toutes les options et de proposer un concept fondé uniquement sur ce qui lui semblait le mieux pour atteindre l'objectif.

En termes de coûts, le seul élément vraiment cher de *Starshot* est le laser; les voiles et les puces devraient être bon marché. Un lanceur expédierait des centaines, voire des milliers de ces puces au-dessus de l'atmosphère où elles déploieraient leur voile. En envoyant >

de radiation, c'est-à-dire par les photons qui viennent percuter les voiles. La pression exercée par la lumière du Soleil, à la distance de la Terre, est de l'ordre de quelques micronewtons par mètre carré. Il faut donc des voiles très grandes et très légères pour obtenir une accélération importante. Le premier démonstrateur, *Ikaros*, n'a été lancé qu'en 2010, par l'agence spatiale japonaise. Sa voile a une superficie de 173 mètres carrés. La force exercée sur la sonde, d'une masse totale de 315 kilogrammes, augmente sa vitesse d'une dizaine de mètres par seconde tous les mois. Fin 2017, la Nasa enverra dans l'espace *LightSail 2*, un nanosatellite propulsé par une voile, encore une fois pour éprouver cette technique.

COMMENT RENDRE VISITE À UNE ÉTOILE

L'ambitieux projet *Breakthrough Starshot* vise à envoyer de minuscules vaisseaux vers une étoile voisine du Soleil afin d'y prendre des photos et d'effectuer des mesures lors d'un rapide survol. La mission serait le premier voyage interstellaire jamais entrepris par l'humanité. Ces vaisseaux seront propulsés grâce à un faisceau laser,

pointé depuis la surface de la Terre. Il exercera une pression sur des feuillets ultraminces formant des sortes de voiles attachées à de minuscules puces électroniques nommées *StarChips* (l'ensemble formant un « nanovaisseau »), qui nous émettraient en retour les données recueillies par leurs capteurs.

1 Un « vaisseau mère » sera mis en orbite terrestre par une fusée conventionnelle. Il larguera alors, au rythme d'un par jour et pendant plus de trois ans, les nanovaisseaux, qui entameront dès lors leur trajet vers la destination.

2 Cent millions de petits lasers, disposés en un réseau d'environ un kilomètre carré, combineront leur lumière en un faisceau unique. Pointé sur la voile solaire d'une puce *StarChip*, ce faisceau accélérera le nanovaisseau qui atteindra en quelques minutes 20 % de la vitesse de la lumière.

Nanovaisseau

Vaisseau mère

Réseau de lasers en phase

3 Les *StarChips* communiqueront avec la Terre en renvoyant des signaux au réseau laser qui les a accélérées. Une fois parvenues à destination, les *StarChips* devront diriger avec une grande précision leurs émissions afin que les données et images recueillies atteignent bien les récepteurs sur Terre.

StarChip

Les vaisseaux qui entreprendront ce voyage sont conçus sur le modèle des petites puces des smartphones, et pèseront environ un gramme chacun. Les puces, de 15 millimètres de côté, seront munies de caméras, de piles, d'un dispositif d'émission de signaux, éventuellement de spectrographes pour étudier la chimie stellaire et planétaire, et de magnétomètres pour mesurer les champs magnétiques.

Voile

Mesurant environ quatre mètres carrés, les voiles de *Starshot* s'inspirent des voiles solaires, mais seront propulsées par le recul provoqué par le faisceau laser. Afin d'accélérer les *StarChips*, elles devront être extrêmement légères, solides et réfléchissantes à 99,999 %. Le système de fixation à la puce n'est pas encore décidé.

➤ autant de puces, la perte de quelques-unes ne serait pas un problème. Ensuite, chaque puce serait accélérée par le laser et atteindrait 20 % de la vitesse de la lumière en quelques minutes. Le laser s'éteindrait alors et le long vol de croisière de la puce avec sa voile commencerait. Parvenue à proximité de son objectif, la puce renverrait un signal vers la Terre. « Il y a dix ans, nous n'aurions pas pu envisager cela sérieusement », explique Yuri Milner. Mais maintenant, avec les progrès des lasers, des puces et des nouveaux matériaux, « la perspective de réussite d'un tel projet ne se compte plus en siècles, mais en décennies ».

La direction de *Starshot* a soumis le plan à l'évaluation de scientifiques indépendants, leur demandant de chercher des failles insurmontables. Aucun n'en a trouvé. « Je peux vous dire pourquoi ce projet est difficile et pourquoi il est cher, dit Philip Lubin, mais je suis incapable de trouver une raison pour laquelle il serait impossible. » En avril 2016, l'équipe s'est mise d'accord sur le principe de base de la mission, et le 12 avril, Philip Lubin a organisé une conférence de presse au sommet de la nouvelle Freedom Tower de New York, avec des vidéos, des animations et plusieurs membres du comité consultatif. Il a annoncé le projet d'un « voilier interstellaire » poussé par un vent de lumière. Les chercheurs ont passé l'été suivant à développer les grandes lignes de la mission.

STARCHIP ET VOILES SOLAIRES

L'équipe a rapidement compris que les défis techniques allaient être difficiles à surmonter, à commencer par la conception de la *StarChip* (la puce stellaire). Elle doit être minuscule (avec une masse de l'ordre du gramme) et néanmoins capable de recueillir et d'envoyer des données, de transporter sa propre alimentation et de survivre au long voyage.

Il y a plusieurs années, le groupe d'ingénieurs dirigé par Mason Peck, à l'université Cornell, a construit ce qu'ils nomment des *sprites*, des puces semblables à celles des smartphones. Chacune de ces puces comportait un détecteur de lumière, des panneaux solaires et une radio, le tout pesant quatre grammes.

Les puces *StarChips* seraient conçues sur le modèle des *sprites*, tout en étant quatre fois plus légères, et porteraient quatre caméras chacune. Au lieu de lourdes lentilles pour la mise au point, une option consiste à utiliser un minuscule réseau de diffraction (*planar Fourier capture array* ou matrice d'acquisition plane de Fourier) installé sur le capteur lumineux. Il décompose la lumière incidente en fonction de la longueur d'onde et les données sont traitées numériquement plus tard pour obtenir une image avec n'importe quelle profondeur focale.

Parmi les autres équipements suggérés pour les puces, on peut citer un spectrographe pour ➤

> étudier la chimie des atmosphères planétaires et un magnétomètre pour mesurer le champ magnétique de l'étoile.

Pour que ces données soient exploitables, les puces doivent pouvoir les renvoyer vers la Terre sur des distances interstellaires. Les satellites utilisent actuellement des diodes laser de un watt pour envoyer de l'information, mais sur des distances plus courtes. Jusqu'à présent, la plus longue distance ainsi couverte a été celle qui nous sépare de la Lune, 100 millions de fois plus proche qu'Alpha du Centaure. Afin de cibler la Terre depuis notre voisine stellaire, le pointage des signaux laser émis devra être extraordinairement précis. Et même ainsi, pendant les quatre années du voyage, le signal s'étalera et se diluera à tel point que quand il nous parviendra, il sera réduit à quelques centaines de photons. En arrivant sur Terre, le signal sera-t-il alors trop faible pour être détecté? Une solution serait d'utiliser des relais, d'envoyer le signal d'une *StarChip* à toute une série d'autres dispersées à intervalles réguliers tout le long du parcours.

LE DÉFI DE LA BATTERIE

L'alimentation des puces est aussi un défi. Des batteries devront alimenter les caméras et les processeurs informatiques qui transmettront les données tout au long du voyage. À ce jour, aucune source d'énergie assez puissante ne fonctionne à la fois dans l'obscurité et dans le froid tout en pesant moins d'un gramme. Une solution serait d'adapter les minuscules piles nucléaires utilisées dans certains implants médicaux. Une autre consisterait à exploiter la chaleur produite par le frottement de la voile contre le gaz et la poussière du milieu interstellaire.

Ce même milieu interstellaire présente aussi des risques pour les puces de *Starshot*. Le milieu est comme une fumée de cigarette très diluée, explique Bruce Draine, astronome à l'université de Princeton et membre du comité. Mais personne ne connaît exactement la densité du milieu ni la taille des grains de poussière. Et avec des collisions à une vitesse proche de celle de la lumière entre les puces et ces grains, le potentiel de destruction est difficile à estimer. Les dégâts pourraient aller de cratères mineurs à la destruction totale.

Un revêtement de quelques millimètres de cuprobéryllium (qui alourdirait la puce) offrirait une protection contre les particules les plus petites, mais des grains de poussière plus gros pourraient entraîner des dégâts catastrophiques. Quelles seront les chances de survie des puces dans ces conditions? D'après les membres de l'équipe, en envoyant des centaines voire des milliers de puces vers notre voisine stellaire, quelques-unes devraient arriver à bon port.

Par ordre de difficulté croissante, la conception de la voile vient après celle de la

puce. Les *StarChips* seraient propulsées par le recul imprimé à la voile lorsque les photons, les particules de lumière, se réfléchissent à sa surface, de la même manière que le rebond d'une balle de tennis sur les cordes pousse une raquette. C'est le principe des voiles solaires propulsées par la lumière du Soleil, mais le flux de photons de ce dernier est trop faible pour amener les *StarChips* aux vitesses voulues.

Plus la quantité de lumière réfléchie est importante, plus la poussée sera importante et plus la voile avancera vite; pour atteindre 20 % de la vitesse de la lumière, les voiles de *Starshot* devront être réfléchissantes à 99,999 %. D'où l'idée d'utiliser un laser puissant, mais «toute lumière qui n'est pas réfléchie échauffe la voile», explique Geoffrey Landis, scientifique au centre de recherche Glenn de la Nasa et membre du comité consultatif; «même si une petite fraction de la puissance du laser venait à chauffer la voile, ce serait désastreux».

Comparée aux voiles solaires déjà testées, qui utilisent le rayonnement du Soleil pour propulser des vaisseaux expérimentaux dans le Système solaire, la voile de *Starshot* devra aussi être beaucoup plus légère, avec à peu près «l'épaisseur d'une bulle de savon», dit Geoffrey Landis. En 2000, dans l'expérience qui s'approche le plus des spécifications requises pour *Starshot*, James Benford a utilisé un faisceau micro-onde pour accélérer une voile constituée d'un feuillet de carbone. Son essai est parvenu à produire une accélération de 13 g (13 fois l'accélération de la pesanteur sur Terre), alors que la voile de *Starshot* devra supporter une accélération de 60 000 g.

La voile, comme la puce, devra aussi résister à la poussière du milieu interstellaire qui risque de la cribler de trous. Jusqu'à présent, il n'existe aucun matériau qui soit à la fois léger, solide, réfléchissant et qui ne coûte pas des millions de dollars. «Un des nombreux miracles que nous devons inventer, c'est le matériau de la voile», conclut Pete Klupar.

D'autres décisions liées à la voile restent à prendre. La voile, de quatre mètres carrés, pourrait être fixée à la puce par des câbles, ou bien la puce pourrait être montée directement sur la voile. Celle-ci pourrait tourner, ce qui lui permettrait de rester centrée sur le faisceau laser de propulsion. Après l'accélération initiale, la voile pourrait se replier comme un parapluie, ce qui la rendrait moins vulnérable au voyage. Et une fois parvenue au niveau d'Alpha du Centaure, elle pourrait se redéployer et ajuster sa courbure afin de servir de miroir de télescope ou d'antenne pour renvoyer les messages de la puce vers la Terre. «Cela paraît bien compliqué, admet Geoffrey Landis, mais nous avons déjà résolu des problèmes plus difficiles.»

Tous ces défis ne sont rien comparés à celui que présente le laser qui poussera la voile. Le



L'entrepreneur et milliardaire russe Yuri Milner a dévoilé la mission *Breakthrough Starshot* lors d'une conférence de presse à New York le 12 avril 2016. Il tient un prototype de la puce *StarChip* qui devrait faire le voyage jusqu'à Alpha du Centaure. Les physiciens Stephen Hawking (au centre) et Freeman Dyson (à droite) participent au projet en tant que conseillers, parmi un groupe rassemblant de nombreux experts de divers horizons.

seul moyen pour *Starshot* d'atteindre une fraction non négligeable de la vitesse de la lumière est l'utilisation d'un laser exceptionnellement puissant d'une centaine de gigawatts. Le Département américain de la défense a produit des lasers plus puissants, dit Robert Peterkin, chef de projet au Laboratoire de recherche de l'Armée de l'air, mais ils n'émettent que pen-

Youri Milner espère que *Starshot* aura un effet fédérateur, capable d'unir les gens

dant quelques milliardièmes ou billionièmes de seconde. Or le laser de *Starshot* devra éclairer chaque voile pendant plusieurs minutes.

Pour atteindre une telle puissance sur des durées aussi longues, une solution est de grouper en réseau de petits lasers à fibre optique, de telle sorte que leurs rayonnements se combinent en un faisceau cohérent. Le Département de la défense a aussi construit des réseaux de lasers en phase, mais les siens comportaient seulement 21 lasers, pour une puissance totale de quelques dizaines de kilowatts. Le laser de *Starshot* devra inclure 100 millions de ces lasers d'environ un kilowatt chacun. Le réseau occupera au sol une surface d'un kilomètre carré.

Et les difficultés ne s'arrêtent pas là. Il faut pouvoir focaliser de façon cohérente ces 100 millions de lasers sur une petite cible, située à 60 000 kilomètres d'altitude. Tout en prenant en compte les turbulences atmosphériques, qui dévieront les faisceaux laser. La lumière pourrait passer complètement à côté de la voile, ou plus probablement l'atteindre de manière inégale, si bien que certaines parties de la voile seraient davantage poussées que d'autres. Cela déséquilibrerait la voile, la ferait tourner ou la déplacerait hors du faisceau.

Là encore, l'équipe de *Starshot* a une solution, mais celle-ci s'accompagne de son propre lot de difficultés: l'optique adaptative, déjà utilisée par les grands télescopes, qui consiste à éliminer les distorsions dues aux turbulences atmosphériques grâce à un miroir déformable. Mais il faudrait apporter à cette technique des avancées majeures pour qu'elle fonctionne avec *Starshot*. Dans le cas du laser, au lieu d'un

miroir déformable, les scientifiques devront ajuster minutieusement chaque fibre laser pour corriger les effets optiques de l'atmosphère. L'optique adaptative actuellement en service sur les télescopes atteint une précision de 30 millisecondes d'angle (unité de mesure de la taille angulaire d'un objet sur le ciel). *Starshot* devrait focaliser le laser avec une précision de 0,3 milliseconde d'angle, un exploit qui n'a jamais été réalisé.

Et même si nous parvenions à développer toutes ces techniques aussi disparates qu'audacieuses, il faudra encore les réunir en un système unique, ce qui, pour les cadres de *Starshot*, revient à créer un puzzle dont les pièces sont en pleine évolution ou n'existent pas encore. Pour les cinq prochaines années, l'objectif est de rassembler les techniques en suivant les conseils des spécialistes du comité. Les membres de l'équipe testeront la faisabilité à l'aide d'expériences à petite échelle et de modèles mathématiques.

Ils ont commencé ce processus à l'hiver 2015-2016 et émettent des appels à projets pour des technologies qui ne sont pas encore développées. Les premiers contrats sont en passe d'être signés, sur des petits projets de quelques centaines de milliers à 1,5 million de dollars chacun. Viendront ensuite les prototypes. Et, à supposer que les tests soient passés avec succès, la construction du laser et des voiles pourrait démarrer au début des années 2030, pour un lancement au milieu des années 2040.

À ce stade, *Starshot* aura déjà vraisemblablement coûté des milliards de dollars, mais il aura peut-être noué de nouveaux partenariats avec des gouvernements, des laboratoires et les agences spatiales d'Amérique, d'Europe et d'Asie. «Je vais défendre la cause du projet, et j'espère que davantage de personnes nous rejoindront», commente Youri Milner.

CAP SUR LES ÉTOILES !

Avec tous ces obstacles, quelles sont les chances de succès? Les chercheurs et les ingénieurs qui ne sont pas liés à *Starshot* tendent à penser qu'elles sont faibles; plusieurs personnes m'ont déclaré catégoriquement: «Ils n'iront pas sur Alpha du Centaure.» David Charbonneau, du centre Harvard-Smithsonian d'astrophysique, pense que le projet sera à terme tellement coûteux que «cela reviendrait à convaincre la population des États-Unis d'y consacrer 5 % du budget fédéral – autant que le programme *Apollo*».

Les scientifiques liés à *Starshot* sont plus optimistes, mais restent pragmatiques. «Nous pouvons certainement utiliser des lasers pour envoyer des vaisseaux vers Alpha du Centaure», dit Greg Matloff du College of Technology de New York, et membre du comité. «Est-ce que nous pourrions les y emmener d'ici à vingt ans, >

> je ne sais pas.» Youri Milner pense que son rôle dans le projet *Starshot* – outre son financement – est de s’assurer qu’il reste réaliste et qu’il s’appuie sur des bases solides. «Si cela devait prendre plus d’une génération, dit-il, nous ne devrions pas travailler sur ce projet.»

Jusqu’à la fin du mois d’août dernier, je pensais que Freeman Dyson avait raison; la technologie *Starshot* était intéressante, mais le choix d’Alpha du Centaure comme destination était idiot. L’étoile est en fait un système binaire, formé de deux étoiles de même type que le Soleil et tout à fait ordinaires. Les astronomes comprennent bien ces étoiles, et bien que comparer leurs éruptions et leur champ magnétique à ceux du Soleil puisse être utile, David Charbonneau considère que «ce que nous apprendrions en matière de physique stellaire en leur rendant visite ne vaut pas l’investissement».

Maintenant que les astronomes savent que la voisine d’Alpha du Centaure a une planète, l’intérêt scientifique est plus convaincant. L’étoile, Proxima du Centaure, est un peu plus proche de la Terre et c’est une naine rouge, le type d’étoiles le plus répandu dans la galaxie. La planète, Proxima Centauri b, est à une distance de son étoile qui la rend potentiellement habitable. Les membres de *Starshot* envisageraient-ils de changer la cible du projet? «Pourquoi pas», répond Youri Milner. «Nous avons encore largement le temps de changer d’avis.»

Mais même la présence de Proxima Centauri b ne suffira pas à garantir le succès scientifique de *Starshot*. Ses puces pourraient prendre des images, peut-être mesurer le champ magnétique de la planète, voire échantillonner l’atmosphère, mais elles devront faire tout cela en quelques minutes, du fait de leur extrême vitesse. Vu le temps de développement du projet et le coût final, souligne David Spergel, astronome à l’université de Princeton, «nous pourrions construire un télescope optique de 12 à 15 mètres dans l’espace, observer la planète pendant des mois et recueillir beaucoup plus d’informations qu’en un bref survol».

UN PROJET HUMANISTE

Mais les milliardaires sont libres d’investir leur argent comme ils le souhaitent, et d’autres sont libres de se joindre à leurs rêves. De plus, même parmi ceux qui mettent en doute l’intérêt scientifique de *Starshot*, beaucoup le soutiennent néanmoins, parce qu’en développant les techniques associées, les ingénieurs feront très certainement des innovations intéressantes. Qui plus est, même si *Starshot* échoue, des missions mettant à profit ses techniques pourraient atteindre d’autres destinations à l’intérieur et hors du Système solaire.

Si Youri Milner s’enthousiasme autant pour ce projet, c’est qu’il espère qu’un tel objectif

aura un effet fédérateur, qu’il sera capable d’unir les gens, de renforcer le sentiment d’appartenir à la même planète et à une unique espèce. «Ces six dernières années, j’ai passé 50 % de mon temps sur la route, en grande partie en Asie et en Europe», dit-il. «J’ai compris qu’un consensus global est difficile à atteindre,



La présence d’une exoplanète ne suffira pas à garantir le succès scientifique de *Starshot*



mais pas impossible.» Mais somme toute, même lui reconnaît que la volonté d’aller vers une autre étoile ne s’explique pas.

Presque tous ceux à qui j’ai posé la question ont donné la même réponse: ils ne savent pas l’expliquer à quelqu’un qui ne le comprend pas déjà; ils veulent juste y aller. Bien qu’il pense que les chances de succès de *Starshot* sont minces et ne prennent pas au sérieux ses motivations scientifiques, James Gunn, astrophysicien émérite de Princeton, affirme: «Je suis rationnel la plupart du temps, mais je ne suis pas particulièrement rationnel concernant les frontières de l’humanité dans le cosmos. Je rêve d’atteindre les étoiles depuis que je suis enfant.» Beaucoup de membres du comité consultatif disent la même chose.

C’est peut-être Freeman Dyson qui exprime le mieux les contradictions inhérentes à de tels rêves. L’idée de puces équipées d’une voile à laser se tient, dit-il, et les personnes qui portent le projet *Starshot* sont intelligentes et «tout à fait sensées». Mais il pense qu’elles devraient revoir à la baisse les objectifs, arrêter d’essayer d’aller voir Alpha ou Proxima du Centaure et se concentrer sur l’exploration du Système solaire, où les *StarChips* seraient propulsées par des lasers moins puissants et plus faciles à réaliser. «L’exploration est dans la nature humaine», conclut-il. Cependant, pour lui, ces expéditions devraient être menées avec des «machines automatiques» qui font ça très bien, surtout quand il n’y a pas de justification scientifique à envoyer des cosmonautes. Mais Freeman Dyson ne serait pas Freeman Dyson s’il n’ajoutait pas, imprévisible comme toujours: «D’un autre côté, j’adorerais y aller.» ■

BIBLIOGRAPHIE

P. Lubin, **A roadmap to interstellar flight**, *Journal of the British Interplanetary Society*, vol. 69, pp. 40-72, 2016.

M. Alpert, **Alpha Centauri or bust**, *Blog Scientific American*, <https://blogs.scientificamerican.com/guest-blog/alpha-centauri-or-bust>

Site web du projet **Starshot**: <https://breakthroughinitiatives.org/Initiative/3>

DÉCOUVREZ LES ARCHIVES DE **POUR LA SCIENCE**



RETROUVEZ TOUS
LES NUMÉROS
DEPUIS 1996

COMPLÉTEZ
VOTRE COLLECTION
SUR www.pourlascience.fr



L'ESSENTIEL

> Plusieurs espèces de poissons de la famille des Poeciliidés colonisent des cours d'eau mexicains malgré une forte concentration en sulfure d'hydrogène.

> Divers traits, dont une tête et une progéniture de plus grande taille, facilitent leur survie dans ces eaux toxiques.

> Leur ADN montre qu'elles ont développé ces

adaptations par des voies moléculaires diverses.

> Les conditions extrêmes régnant dans les eaux sulfureuses conduisent à une spéciation rapide.

LES AUTEURS



RÜDIGER REISCH
enseignant de biologie évolutive à l'université de Londres



MARTIN PLATH
professeur de zoologie à l'université Nord-Ouest A&F à Yangling, en Chine

Sulfureuse évolution chez les poissons mexicains

LES EAUX DE CERTAINES SOURCES MEXICAINES, RICHES EN SULFURE D'HYDROGÈNE, SONT EXTRÊMEMENT TOXIQUES. POURTANT, DES ESPÈCES DE POISSONS S'Y SONT ADAPTÉES. PAR QUELS MÉCANISMES ?



LE MOLLY TAUPE

Petit poisson américain à cycle reproductif court, qui s'est révélé capable de s'adapter à des eaux sulfureuses toxiques.

Le Tabasco est un État du sud du Mexique connu pour ses piments. Récemment, nous sommes allés y étudier de petits poissons caractéristiques de certains cours d'eau de sa forêt tropicale humide. C'est ainsi qu'un après-midi de septembre, nous recherchions dans la forêt un ruisseau, dont nous avions prévu d'étudier les poissons. Guidés par un bruit d'écoulement, nous progressions vers ses eaux sous les arbres tandis que des papillons d'un bleu iridescent voletaient autour de nous et que des singes hurleurs vociféraient depuis la cime des arbres. Ce spectacle aurait pu nous détourner de notre projet, mais un martin-pêcheur nous y ramena: après avoir plongé dans les eaux que nous apercevions, l'oiseau vert se percha pour gober un poisson.

Or il s'agissait d'un molly taupe, le poisson que nous étions venus étudier! De son

nom d'espèce *Poecilia mexicana*, il fait partie des Poeciliidés, une famille de poissons vivipares, c'est-à-dire dont les femelles ne pondent pas d'œufs mais donnent naissance à des petits vivants; les mâles, aux couleurs chatoyantes, sont par ailleurs très appréciés des aquariophiles.

Les jours précédents, nous avions observé des molly taupes dans un site enchanteur, que nous avons nommé l'Arroyo Cristal – c'est-à-dire le « ruisseau de cristal » – en raison de ses eaux particulièrement claires. Assis sur de grandes pierres, nous pouvions tremper nos jambes dans l'eau pour nous rafraîchir, tandis que notre sujet d'étude nageait tranquillement entre nos pieds...

Ce paradis était ce jour-là remplacé par un enfer malodorant: celui de la petite rivière aux eaux chargées de sulfure d'hydrogène (ou H_2S) que nous recherchions. Parvenus sur les rives du cours d'eau que nous venions >

> d'apercevoir, nous avons constaté que les rochers le parsemant étaient tous couverts de films visqueux produits par les bactéries sulfureuses. Y nageaient de nombreux poissons qui, curieusement, maintenaient leurs têtes à la surface, comme s'ils haletaient la bouche grande ouverte pour trouver de l'air.

Un novice ne l'aurait pas cru, mais il s'agissait de poissons de la même espèce qu'à Arroyo Cristal. Comment était-ce possible, étant donné l'énorme différence entre cet habitat frais aux eaux pures et les eaux laiteuses à force d'être chargées en H_2S du gros ruisseau coulant à nos pieds? Ici, les mollusques taupes avaient des têtes bien plus grandes et semblaient ne pouvoir respirer qu'en surface. Pas de doute, nous avons bien trouvé le cours d'eau dont nous étions venus étudier les poissons: une petite rivière du nom d'El Azufre, ce qui en espagnol signifie «le soufre». Les mollusques taupes que nous voyions nager à nos pieds semblaient à l'aise dans ces eaux sulfureuses. Par quels mécanismes évolutifs s'étaient-ils ainsi adaptés?

Le phénomène est d'autant plus intrigant que les milieux riches en H_2S tuent en quelques minutes ou quelques secondes tout organisme non adapté, humains compris. C'est pourquoi la façon dont certains animaux parviennent à vivre dans ces milieux fascine les chercheurs.

On étudie depuis les années 1960 les Poeciliidés adaptés au H_2S , mais le flot de résultats a grossi au cours des quinze dernières années, avec les avancées du séquençage génétique. Les chercheurs sont en effet désormais capables de lire à l'échelle moléculaire comment un organisme s'adapte à telle ou telle contrainte environnementale.

C'est ce que nous avons fait: en combinant nos observations de terrain des Poeciliidés avec l'analyse de leurs gènes, nous avons obtenu de nouveaux aperçus sur le fonctionnement interne de la sélection naturelle, ce mécanisme clé de l'évolution. Cela nous a permis d'explorer les limites de l'adaptation chez les poissons. Ce genre d'information pourrait nous aider à évaluer le devenir d'espèces qui subissent des pollutions ou d'autres altérations de l'environnement dues aux activités humaines.

DES TRÈS NOMBREUX HABITATS EXTRÊMES SUR LA PLANÈTE

Les Poeciliidés sont très loin d'être les seuls organismes capables de s'adapter à un milieu difficile. Notre planète possède en effet toute une variété de tels milieux, qui vont des sources ultrachaudes que l'on rencontre fond de l'océan aux grottes sans lumière, en passant par les déserts salés. Or tous ces habitats abritent des formes de vie.

Parmi eux, les eaux sulfureuses sont particulièrement hostiles. Répandu dans la nature, le H_2S est une substance toxique qui se rencontre dans les eaux de certaines sources, dans les sources hydrothermales océaniques ou encore dans les vasières côtières et autres marais salants. Il est notamment produit par décomposition de grandes quantités de matière organique – les algues vertes de Bretagne par exemple. Surtout, certains phénomènes géologiques libèrent des profondeurs de la Terre. C'est par cette voie que sont apparues les eaux sulfureuses que nous sommes allés étudier au Mexique. Bien entendu, il arrive aussi que des activités humaines – la production de papier, le tannage, l'exploitation du gaz naturel ou de l'énergie géothermique – introduisent du H_2S dans les habitats aquatiques.



Ces poissons passent beaucoup de temps près de la surface, là où l'eau est plus riche en oxygène

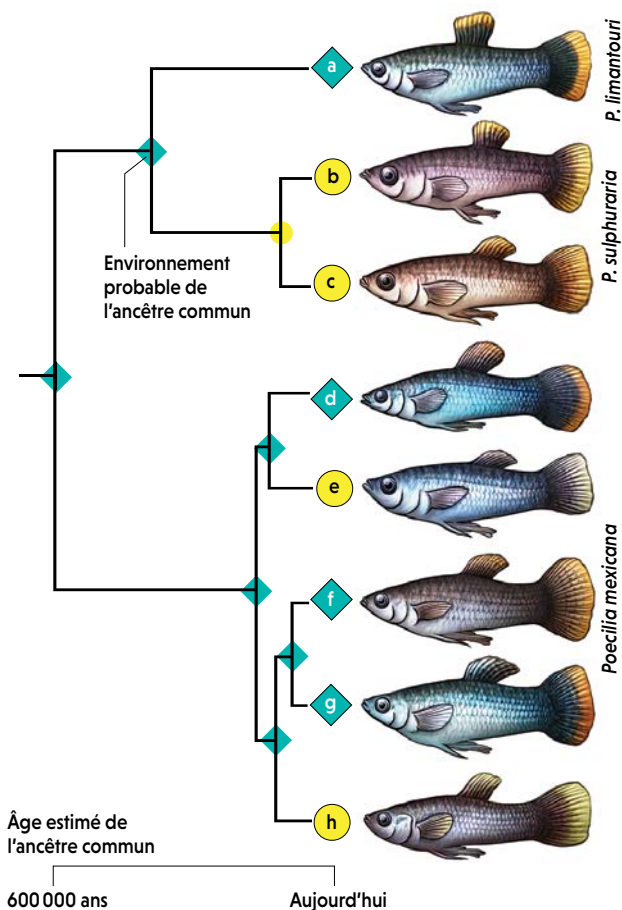
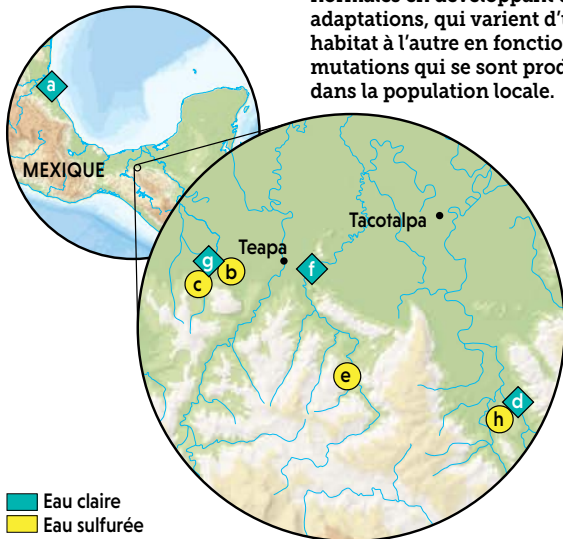


Même en très faibles quantités, le H_2S est extrêmement toxique. Deux raisons l'expliquent: d'une part, il se lie spontanément à l'oxygène disponible, ce qui empêche les animaux de respirer; d'autre part, il bloque l'activité de l'hémoglobine, la protéine qui transporte l'oxygène dans le sang. Son activité provoque donc la mort par suffocation. Le H_2S bloque aussi le processus par lequel les cellules extraient de l'énergie de la nourriture.

Ces inconvénients sont aggravés par le fait que ce composé traverse librement les membranes cellulaires des délicates branchies des poissons, de sorte que ces animaux n'ont pas besoin de l'ingérer pour en pâtir. Les humains aussi courent des risques en inhalant du H_2S ; aussi, lorsque nous travaillons près de sources sulfureuses durant de longues périodes, nous nous protégeons en portant des combinaisons adaptées.

MÊME ESPÈCE, MAIS DIFFÉRENTS

Diverses espèces de Poeciliidés, de petits poissons à reproduction rapide, ont colonisé les eaux riches en H_2S de certains cours d'eau mexicains. Certains traits – têtes et bouches agrandies par exemple – leur permettent de vivre dans ces eaux hautement toxiques. Leur ADN montre qu'ils ont évolué à partir de la forme vivant dans les eaux normales en développant des adaptations, qui varient d'un habitat à l'autre en fonction des mutations qui se sont produites dans la population locale.



Tout cela explique que les irruptions naturelles ou anthropogéniques de H_2S dans la nature créent, un peu partout dans le monde, des mortalités massives dans les habitats aquatiques. Pour autant, divers membres de la classe de poissons prédominante dans la nature – les téléostéens ou poissons à nageoires rayonnées – se sont adaptés à la présence de H_2S dans leur habitat. Parmi eux figurent les Poeciliidés, mais aussi certaines loquettes – des poissons anguilliformes à la peau visqueuse, connus pour leur capacité à « allaiter » leurs embryons – et certains poissons plats vivant autour des cheminées hydrothermales froides ou chaudes du plancher océanique.

L'observation de ces animaux est difficile et coûteuse. Elle requiert l'emploi de sous-marins capables de résister à la pression des grandes profondeurs. Aussi, en pratique, la plupart des travaux expérimentaux qui nous intéresseraient à leur propos n'ont pu être réalisés. D'où l'intérêt de concentrer nos efforts sur les Poeciliidés, des poissons beaucoup plus faciles à observer. Parmi eux, plus de dix espèces, dont les mollys, les guppys, le porte-glaive et autres gambusies (tous des Poeciliidés), ont colonisé indépendamment les unes des autres des dizaines de sources sulfureuses à travers l'Amérique.

Les Poeciliidés adaptés au H_2S ont développé un grand nombre de traits qui leur permettent de survivre dans cet environnement toxique. Certains de ces traits sont comportementaux. Ainsi, ces poissons passent beaucoup de temps près de la surface, où ils pratiquent une respiration de surface, qui donne l'impression qu'ils avalent de l'air; en réalité, ils en sont incapables, mais exploitent plutôt dans leurs ouïes l'eau riche en oxygène de la partie supérieure de la colonne d'eau.

UN COMPORTEMENT CÔUTEUX EN TERMES D'ADAPTATION

En termes d'adaptation, ce comportement est coûteux, car il limite le temps que les poissons peuvent passer à d'autres activités, par exemple la recherche de nourriture. Il aide toutefois les mollys taupes à récupérer l'oxygène dont ils ont besoin.

La disponibilité limitée de l'oxygène dans ces milieux a aussi façonné des traits physiques particuliers. Les individus des populations vivant dans les sources sulfureuses ont des têtes notablement plus grandes que celles de leurs congénères des habitats dénués de soufre. Cette augmentation de la taille de la tête résulte d'une tendance à l'élargissement des ouïes, laquelle favorise la captation de l'oxygène par les poissons.

L'une des espèces adaptées au sulfure, le molly soufre (*Poecilia sulphuraria*) a même d'étranges appendices sur la lèvre inférieure, >

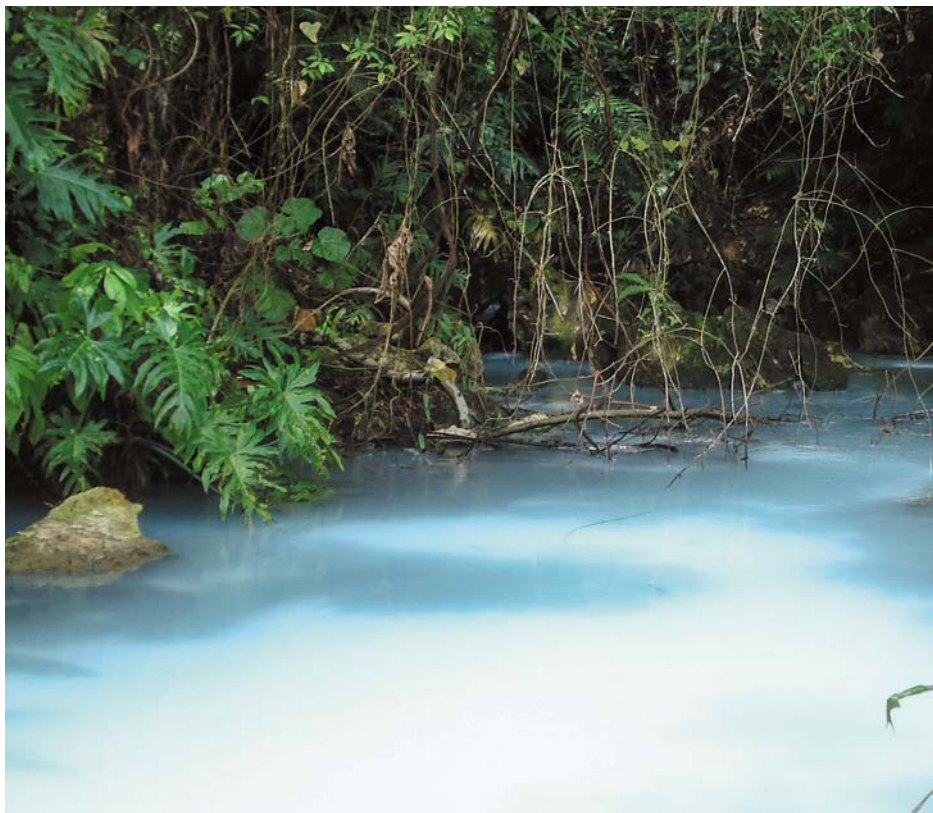
> qui semblent favoriser la prise d'oxygène. On retrouve des protubérances similaires chez divers poissons ne faisant pas partie de la famille des Poeciliidés et provenant de milieux faiblement oxygénés tout autour du globe. Cette convergence évolutive indiquerait que de telles structures ont été sélectionnées parce qu'elles augmentent la surface de la région buccale et favorisent ainsi la captation de l'oxygène dans l'eau superficielle.

Les poissons des eaux sulfureuses ont aussi développé des moyens pour détoxifier le H_2S . Tous les animaux fabriquent une substance nommée sulfure quinone oxydoréductase ou SQR. Cette enzyme se lie aux molécules H_2S et forme des composés non toxiques. Toutefois, lorsque la concentration de H_2S est excessive, ce qui est le cas dans les eaux sulfureuses, l'action des enzymes ne suffit plus à capturer l'ensemble des molécules toxiques, et l'excès de H_2S commence à obérer la capacité des cellules à produire de l'énergie. Chez nos poissons adaptés aux eaux sulfureuses, des modifications de la voie organochimique de production de la SQR ont rendu la détoxification possible, même à concentration élevée de H_2S .

Par ailleurs, ces Poeciliidés donnent naissance à des alevins nettement plus grands que ceux de leurs congénères des milieux aquatiques non toxiques. La taille supérieure de ces bébés implique une progéniture moins nombreuse. Dès lors, se demande-t-on, où est l'avantage de cette stratégie reproductive? L'accroissement en taille entraîne chez ces poissons une diminution du rapport surface/volume du corps. Le flux entrant de H_2S , qui est proportionnel à la surface, est donc moindre relativement au volume de tissus, ce qui facilite la détoxification.

Le point le plus frappant dans ces recherches est que des populations d'espèces différentes de Poeciliidés partagent des adaptations communes à ce milieu toxique. Nous avons en effet constaté que des traits similaires sont apparus au sein de populations d'espèces et d'implantations géographiques différentes, qui n'ont en commun que le fait d'être exposées au H_2S . Or ces caractéristiques n'existaient pas dans les formes ancestrales dont elles sont issues, ou du moins dans les descendants actuels de ces formes vivant dans des eaux non sulfureuses.

Cette similitude entre des lignées de poissons bien distinctes, mais toutes adaptées au H_2S , soulève une question intrigante: les populations de Poeciliidés qui se sont à plusieurs reprises adaptées au H_2S indépendamment les unes des autres ont-elles subi les mêmes modifications de l'ADN ou ont-elles acquis leurs traits adaptatifs par des voies moléculaires différentes?



UN RUISSEAU MORTEL

El Azufre est un cours d'eau du sud du Mexique dont les eaux sont riches en H_2S dissous, ce qui leur donne une apparence laiteuse.

Pour étudier cette question, nous nous sommes associés à Markus Pfenninger, du Centre de recherche sur la biodiversité et le climat de Francfort-sur-le-Main, et à plusieurs autres collègues.

L'ADN DE PLUSIEURS CENTAINES DE MOLLYS TAUPES

Nous avons ainsi pu analyser l'ADN de plusieurs centaines de mollys taupes, appartenant à des paires de populations vivant dans deux bassins-versants distincts du sud du Mexique, une population étant adaptée au H_2S et l'autre vivant dans des eaux non sulfureuses. Une même rivière du Tabasco peut en effet avoir des affluents riches en soufre et d'autres qui en sont dénués.

Une analyse statistique nous a ensuite permis d'estimer le nombre de variants de gènes présents dans le génome; elle nous a aussi permis de déterminer lesquels de ces variants tendent à devenir de plus en plus fréquents dans la population parce qu'ils favoriseraient la survie des individus ou leur reproduction.

Nous avons également découvert que les modifications génomiques d'une population adaptée au soufre tendaient à lui être



spécifiques: elles n'étaient pas partagées avec la population non adaptée.

Nous avons ensuite analysé les gènes modifiés à l'aide d'une base de données listant les fonctions et les interactions génétiques. Il en est ressorti que, même si les gènes modifiés varient d'une population de poissons à l'autre, la plupart d'entre eux sont impliqués dans la régulation des mêmes voies métaboliques (des chaînes de réactions chimiques dont l'organisme vivant est le siège). En ce sens, le terme de métabolisme désigne ici non seulement la façon dont les poissons trouvent de l'énergie dans la nourriture, mais aussi de façon générale l'ensemble des rôles joués par les myriades de protéines dans la machinerie biochimique qui maintient un organisme en vie. Ces rôles pourraient être impliqués dans tous les types d'adaptations. Nos données suggèrent qu'il existe de nombreuses voies génétiques pouvant conduire, face à un certain stress environnemental, à des adaptations similaires.

Une étude récente de Joanna Kelley, de l'université d'État de Washington, Michael Tobler, de l'université d'État du Kansas, et leurs collègues soutient cette idée. Ces chercheurs ont découvert que chez les mollus

Les eaux sulfureuses sont des refuges où l'absence de prédateurs aquatiques et de poissons concurrents est un avantage majeur

taupes tolérants au sulfure du sud du Mexique, les schémas d'expression des gènes – en d'autres termes leurs différentes façons de fabriquer des protéines – différaient d'une population à l'autre. Toutefois, les niveaux d'expression des gènes impliqués dans la régulation des voies métaboliques considérées sont tous comparables.

Ce schéma d'activité des gènes reflète ce que nous observons directement dans l'ADN: les poissons ont suivi différentes voies moléculaires vers les mêmes solutions au problème posé par la vie dans des eaux sulfureuses.

L'étude des Poeciliidés adaptés aux eaux sulfureuses nourrit aussi la discussion sur une autre question fondamentale de la biologie évolutive. Certains généticiens pensent que des populations exposées aux mêmes facteurs de stress évoluent de façon comparable. Mais d'autres soutiennent que le déroulé précis d'un processus d'évolution peut influencer sur son résultat. Le point de vue sous-jacent à cette dernière idée est que si certaines mutations apparues aléatoirement produisent des adaptations clés, elles devraient se répandre rapidement dans la population adaptée au sulfure correspondante. Des jeux initiaux d'adaptations clés différents affecteront alors de différentes façons la trajectoire évolutive d'une population donnée, en altérant les avantages adaptatifs des mutations apparues à un stade tardif.

Nos résultats confortent cette idée. En étudiant trois populations de mollus taupes adaptées au sulfure, nous avons découvert qu'au sein de deux d'entre elles, la résistance au H_2S a évolué dans un gène qui code une protéine clé appelée cytochrome c-oxydase (COX), impliquée dans la production d'énergie par la cellule. La troisième population n'avait pas acquis cette adaptation clé initiale; elle avait donc dû développer une autre solution pour protéger du H_2S sa production d'énergie.

DES FOYERS D'ÉVOLUTION ACCÉLÉRÉE

Les défis posés à la vie par la colonisation de milieux aussi infernaux sont si grands que l'on peut se demander pourquoi la sélection naturelle l'a facilitée. Il y a une raison évidente: les eaux sulfureuses sont en quelque sorte des refuges où tous les prédateurs aquatiques et tous les poissons concurrents sont absents, ce qui constitue un avantage majeur. Dans les cours d'eau chargés en H_2S du sud du Mexique, on observe en effet seulement des Poeciliidés spécialisés, et aucune des nombreuses autres espèces de poissons présentes dans les eaux ordinaires de la région.

Ainsi, pour toxiques que soient les eaux sulfureuses, elles favorisent aussi la vie en faisant apparaître de nouvelles formes. La vision habituelle de la spéciation – c'est-à-dire de l'ensemble des phénomènes de sélection qui font apparaître une nouvelle espèce – veut qu'une séparation prolongée entre deux populations autrefois connectées entraîne leurs évolutions sur deux trajectoires évolutives différentes.

Dans ce scénario classique, la séparation résulte en général de l'apparition d'une >

> barrière géographique. Le cas des bassins-ver-sants mexicains où coulent des eaux tantôt normales, tantôt sulfureuses suggère que des conditions différentes régnant dans des zones différentes du même biotope suffisent parfois à déclencher une spéciation, en l'absence de barrière géographique.

Nos observations sur les Poeciliidés adaptés au H_2S vont-elles dans ce sens? Nous pensons que oui, puisque nous avons découvert que l'adaptation à un habitat donné, qu'il soit sulfuré ou non sulfuré, limite les capacités qu'ont les poissons à passer aisément dans l'autre type d'habitat. Cette forme de sélection naturelle conduit essentiellement à la présence de poissons adaptés au sulfure dans les sites sulfureux, et inversement, même quand les deux habitats ne sont séparés que de quelques dizaines de mètres.

UNE SPÉCIATION EN MOINS DE 100 000 ANS

D'autres facteurs vont dans le même sens, par exemple le fait que hors de leur habitat sulfureux, les poissons spécialisés sont plus facilement victimes de prédateurs. Par ailleurs, si une migration entre habitats se produit, ou si des individus d'un écotype (forme issue d'un certain écosystème) rencontrent des individus d'un autre écotype dans les zones intermédiaires, ils ne se reproduiront pas ensemble. Des expériences sur le choix des partenaires ont en effet montré que les femelles vivant dans les eaux non sulfureuses préfèrent s'accoupler avec des mâles de leur propre écotype.

L'existence et le degré de cette préférence semblent dépendre de la force de la sélection naturelle: nous avons découvert que les préférences des femelles pour leur propre écotype sont plus fortes quand la sélection naturelle des mâles migrants adaptés au sulfure est faible. Il semble que plus une femelle a la possibilité de rencontrer un mâle issu d'un autre écotype et donc de donner naissance à une progéniture hybride, plus elle développe d'aversion envers les étrangers. Au contraire, quand la sélection naturelle des migrants est forte et donc que la probabilité de les rencontrer est faible, les femelles ont moins d'aversion à l'égard des mâles étrangers.

On ignore combien de Poeciliidés ont évolué pour former de nouvelles espèces adaptées aux sources sulfureuses parce que, dans de nombreux cas, nous ne savons pas encore jusqu'où la différenciation génétique a été ou si des croisements avec les populations voisines se produisent encore. Toutefois, certaines des lignées adaptées aux eaux sulfureuses présentant toutes les adaptations sont âgées d'environ 100 000 ans – ce qui est très peu à l'échelle de l'évolution.

Le fait que ces espèces aient pu développer des traits distinctifs en un temps assez court et atteindre, par rapport à leurs voisins vivant dans des eaux non toxiques, un certain degré d'isolement reproductif, suggère que les conditions extrêmes des eaux sulfureuses accélèrent la spéciation. L'une de nos études récentes corrobore cette idée: nous avons découvert que le degré d'isolement reproductif chez les Poeciliidés adaptés au sulfure est corrélé à la concentration de H_2S régnant dans leur écosystème.

La rapidité avec laquelle les Poeciliidés se sont adaptés à cet agent toxique naturel qu'est le H_2S signifie-t-elle que ces poissons seraient aussi capables de s'adapter à une pollution due aux activités humaines? Une étude publiée l'année dernière par Noah Reid, de l'université du Connecticut et des collègues montre que les fondules (des poissons d'une famille différente de celle des Poeciliidés, quoique proche) qui vivent dans certains sites pollués d'Amérique du Nord ont réussi des adaptations évolutives rapides et répétées à la pollution toxique provenant de complexes industriels.

Ces chercheurs suggèrent que cela pourrait résulter de l'existence chez les fondules de nombreuses variations génétiques, parmi lesquelles ils pourraient « piocher » afin de faire face aux pressions de sélection dues à la pollution. On ne sait pas encore bien si les Poeciliidés sont ou non équipés de la même façon, bien que nos recherches suggèrent que chez ces poissons des mutations de l'ADN nouvelles jouent un rôle adaptatif plus important que l'existence ancienne et permanente de nombreuses variations génétiques.

UNE ADAPTABILITÉ MÊME AUX CHANGEMENTS RADICAUX D'ORIGINE ANTHROPIQUE ?

Considérées dans leur ensemble, ces recherches sur les fondules et nos propres découvertes suggèrent que certaines espèces de petits poissons ayant une faible longévité, mais qui produisent plusieurs générations par an, pourraient, sous certaines conditions, s'adapter même aux changements environnementaux radicaux imposés par les activités humaines.

De nombreux points restent à explorer. Par exemple, nous ne comprenons pas pourquoi la présence de H_2S a conduit à des adaptations et à un isolement reproductif dans certains écosystèmes, mais pas dans les autres. Avec le progrès continu du séquençage de l'ADN, la baisse de ses coûts ainsi que la publication récente des génomes de plusieurs espèces de Poeciliidés, nous devrions bientôt comprendre beaucoup mieux les mécanismes génétiques à la base de l'évolution dans l'enfer des eaux sulfureuses. ■

BIBLIOGRAPHIE

A. Meyer, **Cichlidés : les clés d'une spectaculaire évolution**, *Pour la Science*, n° 463, mai 2016.

M. Pfenninger *et al.*, **Unique evolutionary trajectories in repeated adaptation to hydrogen sulphide-toxic habitats of a neotropical fish (*Poecilia mexicana*)**, *Molecular Ecology*, vol. 24(21), pp. 5446-5459, 2015.

R. Riesch *et al.*, **Colonisation of toxic environments drives predictable life-history evolution in livebearing fishes (*Poeciliidae*)**, *Ecology Letters*, vol. 17(1), pp. 65-71, 2014.

M. Pfenninger *et al.*, **Parallel evolution of COX genes in H_2S -tolerant fish as key adaptation to a toxic environment**, *Nature Communications*, vol. 5, art. 3873, 2014.

L'ESSENTIEL

> Avant l'ère de la communication électronique, des villageois ont créé des versions sifflées de leurs langues maternelles afin de se parler à distance.

> De nouvelles études ont découvert la présence de la parole sifflée dans le monde entier. Environ 70 populations réparties à travers le monde

communiquent de cette manière.

> Certaines écoles des îles Canaries, de Turquie ou du Béarn l'enseignent aujourd'hui. Une langue sifflée représente à la fois un patrimoine culturel et un angle intéressant pour étudier comment le cerveau traite l'information.

L'AUTEUR



JULIEN MEYER
linguiste et bioacousticien
du CNRS au GIPSA-lab
de Grenoble

Parler en sifflant un phénomène planétaire

« JE VOUDRAIS MANGER », « CACHE-TOI, LA POLICE ARRIVE »... COMMENT TRANSMETTRE DE TELS MESSAGES SUR DES CENTAINES DE MÈTRES ? EN SIFFLANT ! DANS LE MONDE, DE NOMBREUSES POPULATIONS ONT DÉVELOPPÉ CETTE TECHNIQUE QUI FASCINE LES LINGUISTES.

Un matin de printemps, dans le petit village grec d'Antia, Panagiotis Kefalas est dans la taverne dont il est le propriétaire lorsqu'il reçoit un appel de son amie Kiriakoula Yiannakari. Panagiotis Kefalas avait prévu de prendre son petit déjeuner chez elle, à quelque deux cents mètres de là. Rien que de très banal, si ce n'est que l'appel ne débute pas par la sonnerie d'un téléphone portable, ni d'un fixe : c'est un appel direct de la bouche de Kiriakoula aux oreilles de Panagiotis, sous forme d'une série de sifflements aigus, à laquelle répond le tavernier, en sifflant les lèvres pincées. Et un dialogue s'instaure :

« Bienvenue, que veux-tu ?

– S'il te plaît, je voudrais manger.

– D'accord.

– J'aimerais des œufs brouillés. »

De quoi laisser perplexe un visiteur... À entendre les modulations sifflées qui commencent la première phrase, « bienvenue » (*kalós irthate* en grec romanisé), on pourrait croire qu'une fille se fait siffler, à ceci près que le son de la seconde syllabe à rallonge monte brusquement dans les aigus.

Les récits traditionnels attestent que la pratique de la parole sifflée a représenté pendant des siècles le meilleur moyen pour les bergers et les chevriers de communiquer d'une colline à l'autre. Les sifflements, après tout, portent beaucoup plus loin que les cris et ménagent les cordes vocales. Et aujourd'hui encore, quelques habitants de ce village de la pointe sud de la deuxième plus grande île grecque, Eubée, maintiennent en vie et utilisent de maison à maison cette efficace forme naturelle de télécommunication sans fil pour transmettre des nouvelles, échanger des potins et s'inviter à déjeuner.

J'ai enregistré la conversation entre Panagiotis Kefalas et Kiriakoula Yiannakari en mai 2004. Depuis le début des années 2000, j'étudie la parole sifflée pratiquée par des villageois du monde entier vivant principalement dans des montagnes reculées et des forêts denses, autre type d'environnement où les sifflements sont plus efficaces pour communiquer que la parole ordinaire. Ce faisant, avec des collègues de divers laboratoires, nous avons découvert de nombreuses langues sifflées qui n'avaient pas encore été documentées. Nous avons également mesuré les distances >



Dans le village grec d'Antia, Kiriakoula Yiannakari montre comment siffler un message à destination des voisins.

> stupéfiantes que peuvent parcourir les mots et les phrases sifflés et nous avons étudié comment des langues humaines s'adaptent à ce type de sons, et comment le cerveau des interlocuteurs parvient à décoder les mots.

UN LENT DÉMARRAGE

J'ai commencé à m'intéresser à ces langues il y a près de vingt ans, suite à la lecture d'un article de *Scientific American* datant de 1957 qui en abordait une version nommée Silbo Gomero et toujours parlée sur la Gomera, une des îles Canaries. J'ai décidé que je voulais en savoir plus et j'en ai fait mon sujet de doctorat à partir de 2003.

Au moment de la parution de l'article, très peu de chercheurs s'intéressaient à l'étude des langages sifflés, même si leur existence était connue depuis l'Antiquité: Hérodote mentionnait des Éthiopiens troglodytes qui « parlaient comme des chauves-souris » dans *Melpomène*, le quatrième livre de son œuvre *Les Histoires*. En 2003, on s'y intéressait déjà bien davantage, mais peu de linguistes avaient fait des recherches sur les sons et les significations exprimés par la parole sifflée, et la plupart des études s'étaient cantonnées au Silbo de l'île de la Gomera.

Le terme de « langue sifflée » est une appellation un peu trompeuse. La langue sifflée n'est pas en réalité une langue ou un dialecte distinct de la langue locale mais plutôt une extension de celle-ci. Au lieu d'utiliser la voix pour prononcer les mots grecs *Boró na ého omeléta?* (« Est-ce que je peux avoir des œufs brouillés? »), ces mêmes mots sont articulés sous forme de sifflements. Ainsi, les sons des mots subissent un profond changement; ils sont générés non pas par les vibrations des cordes vocales, mais par un écoulement d'air comprimé dans la bouche qu'on laisse échapper en vortex turbulents au bord des lèvres. Tout comme dans la parole ordinaire, la langue et la mâchoire du siffleur bougent pour former des mots différents, mais l'amplitude du mouvement est plus réduite. Tout ce qui change est la hauteur et l'intensité du sifflement.

En fin de compte, les mots sifflés dans le village d'Antia sont encore du grec. Les linguistes comparent parfois le sifflement au chuchotement, en cela que ce sont tous les deux des façons alternatives de parler la même langue sans utiliser les vibrations des cordes vocales. Le linguiste André Classe, auteur de l'article de *Scientific American* qui m'a inspiré, avait qualifié le discours sifflé de « squelette informationnel » naturel en soutenant que sa structure était réduite à l'essentiel. Il notait que l'intelligibilité du discours sifflé n'égale pas toujours celle du langage parlé, mais elle s'en approche.

Dans mes premières recherches, j'ai trouvé des documents fascinants produits par des voyageurs, des fonctionnaires coloniaux, des missionnaires et des anthropologues qui soit décrivaient une douzaine de langages sifflés, soit produisaient des indices qui m'ont conduit à suspecter que d'autres homologues sifflés de langues parlées existaient ailleurs dans le monde.

Au début des années 2000, j'ai donc entrepris avec ma collègue Laure Dentel des recherches sur le terrain lors d'une première expédition pendant quatorze mois, visitant des lieux où certains éléments suggéraient que cette pratique existait toujours. Nous avons alors constitué un réseau de collègues pour effectuer de nouvelles études sur le terrain aux quatre coins du monde. Dans le cadre de cette initiative, j'ai documenté le discours sifflé des Wayãpi dans la jungle amazonienne, en collaboration avec la linguiste Elissandra Barros da Silva au Brésil et l'anthropologue Damien Davy en Guyane française. Avec Laure Dentel, j'ai étudié les langues akha et hmong en Asie du Sud-Est, et avec le linguiste Rachid Ridouane la langue berbère tamazight dans l'Atlas marocain. De plus, en 2009, nous avons entamé avec le linguiste Denny Moore une collaboration de cinq ans au département de linguistique du musée Emilio Goeldi à Belém, dans l'État de Pará, au Brésil. Notre travail consistait à documenter le langage sifflé du peuple Gavião dans l'État amazonien de Rondônia.

La langue sifflée est une extension de la langue locale et non un dialecte distinct

Nos efforts de recherche ont mis à profit les plus récents outils linguistiques et acoustiques, et utilisé des méthodes empruntées à de nombreux domaines tels que la phonétique, la psycholinguistique, la bioacoustique et la sociolinguistique. Nous avons par exemple utilisé les méthodes d'enregistrement que les bioacousticiens mettent en pratique pour étudier la communication animale dans la nature parce qu'elles sont parfaitement adaptées pour étudier la communication sifflée sur de longues distances.

BIOGRAPHIE



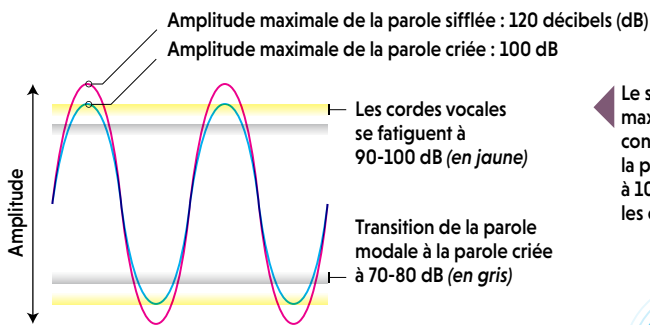
JULIEN MEYER est linguiste et bioacousticien du CNRS au GIPSA-lab de Grenoble. Il a pour thèmes de recherche la phonétique, la cognition du langage et les langues peu décrites pratiquées dans des communautés rurales. Il dirige le projet Icon-Eco-Speech financé par l'Union européenne et est cofondateur de l'association Le Monde Siffle, qui documente et protège les langues sifflées ainsi que d'autres modes de parole traditionnels associés.

LA PHYSIQUE DE LA PAROLE SIFFLÉE

La parole sifflée est une forme particulière d'une langue locale et complémentaire de sa forme parlée dans des contextes où les habitants sont éloignés les uns des autres. Elle exprime les mots au moyen d'un flux d'air comprimé tourbillonnant en petits vortex au

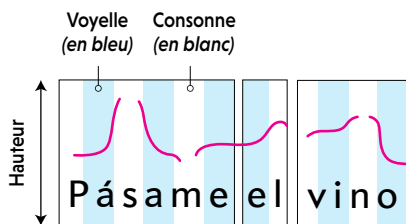
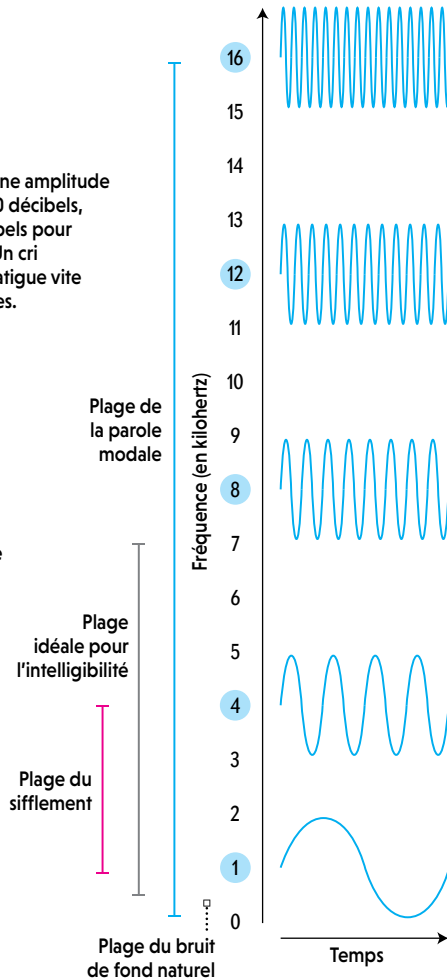
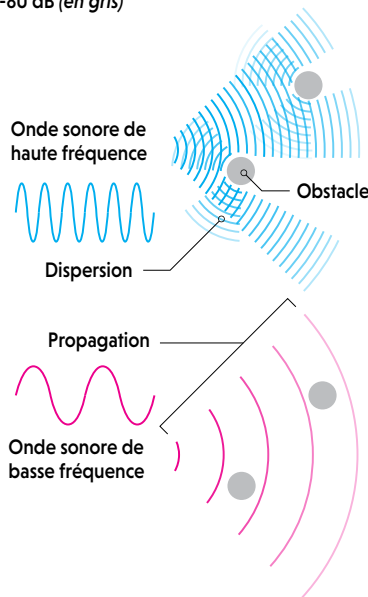
bord des lèvres. Il manque au langage sifflé les harmoniques de la voix. Et pourtant, son étroite bande de fréquences modulées représente assez bien les voyelles et les consonnes d'une langue non tonale (tel le grec) pour transposer les caractéristiques essentielles d'une langue.

Selon les analyses des ingénieurs et des psychologues, les ondes sonores produites en sifflant s'inscrivent dans la plage des fréquences optimales pour la détection par l'oreille humaine. Les ondes complexes produites par la parole ordinaire (dite « parole modale » par les spécialistes du langage) recouvrent une plage de fréquences beaucoup plus large.



Le sifflement a une amplitude maximale de 120 décibels, contre 100 décibels pour la parole criée. Un cri à 100 décibels fatigue vite les cordes vocales.

Quand le son se propage dans des conditions idéales, il perd environ 6 décibels à chaque fois que la distance depuis la source sonore double. De plus, un signal acoustique se réfléchit sur les obstacles, comme le sol et les troncs d'arbre. Le langage parlé est constitué d'un large ensemble de fréquences, et une bande donnée parmi cette plage se disperse différemment d'une autre au contact d'un objet physique. Un sifflement, en revanche, encode toute l'information linguistique communiquée dans une bande étroite à basse fréquence, qui résiste mieux à la dispersion par les barrières physiques (comme une végétation dense), une propriété acoustique qui leur permet de se propager plus loin.



Chaque type de parole sifflée, comme le Silbo espagnol aux îles Canaries, a un système de prononciation des voyelles et des consonnes qui s'approche de la version parlée en faisant varier la hauteur du sifflement ou en interrompant l'écoulement de l'air. De cette façon, l'essentiel de l'information encodée dans les voyelles et les consonnes est exprimé par des variations de fréquence et d'amplitude. La parole ordinaire repose aussi sur le timbre pour identifier les voyelles et les consonnes, lequel s'affaiblit à distance. En revanche, les siffleurs énoncent clairement des phrases telles que « Passe-moi le vin » et sont entendus de très loin.

Grâce aux caractéristiques acoustiques du sifflement, le son se propage jusqu'à dix fois plus loin que la parole criée, une distance qui peut atteindre plusieurs kilomètres dans les vallées et d'autres zones qui transmettent bien le son.



➤ Nous avons ainsi identifié différentes techniques qui servent à parler en sifflant. La personne peut soit arrondir les lèvres pour siffler relativement doucement, soit siffler avec les doigts pour créer plus de pression, ou encore souffler dans une feuille ou une simple flûte en bois pour chanter en sifflant. Dans la plupart des endroits, les locuteurs changent de technique selon la distance à laquelle ils souhaitent envoyer leur message. À partir de ces sons, les mots sont construits différemment selon que la langue parlée dont la parole sifflée est dérivée utilise des changements de ton pour exprimer des différences dans le sens des mots – les linguistes disent des différences lexicales ou grammaticales – (comme en mandarin ou en hmong), ou que l'intonation des syllabes ne sert qu'à mettre l'accent sur un mot, comme en grec ou en espagnol. Dans une langue tonale, l'intonation montante d'un sifflement, par exemple, reflète l'inflexion ascendante du ton portée par la hauteur de la voyelle de la langue parlée. En revanche, dans les langues non tonales, un sifflement de hauteur fixe représente l'identité d'une voyelle et non son intonation: un «i» peut être communiqué avec un sifflement aigu, tandis qu'un «e» sera moins aigu. Dans la première classe de langues comme dans la seconde, le siffleur forme les consonnes en modulant la rapidité avec laquelle le son se modifie au passage d'une voyelle à une autre.

70 POPULATIONS SIFFLENT

À ce jour, notre enquête a identifié environ 70 populations utilisant la parole sifflée, la plupart dans des montagnes isolées ou des lieux à la végétation dense. Cela ne représente qu'une petite fraction des quelque sept mille langues existantes, mais cela dépasse de beaucoup les décomptes précédents. Dans tous ces endroits, les langues sifflées servent principalement, comme le suggéraient les travaux antérieurs, à envoyer des messages à des distances trop grandes pour être couvertes par les cris, mais elles ont également d'autres utilisations. Elles servent à exprimer des poésies amoureuses dans des populations dont la tradition populaire est encore bien vivante. Elles permettent de communiquer dans un environnement bruyant ou à échanger des secrets en présence de non-siffleurs. («Tu dois te cacher parce que la police arrive.») Et, parfois, elles aident les chasseurs à attraper leurs proies; ainsi, dans la jungle amazonienne, les animaux reconnaissent la voix humaine, mais différencient difficilement les sifflements humains des nombreux sifflements animaux de leur environnement.

L'analyse acoustique du sifflement utilisé pour la communication à longue distance montre que, avec des conditions météorolo-



Des initiatives locales visent à faire vivre ces formes uniques de communication



giques et topographiques favorables, un sifflement se propage sur plusieurs kilomètres. La fréquence va de 0,9 à 4 kilohertz, presque exactement la plage considérée par les ingénieurs des télécommunications comme la meilleure pour distinguer précisément les sons élémentaires qui constituent les mots. Dans une expérience que nous avons effectuée dans une vallée proche des Alpes françaises, le discours parlé porte à 40 mètres et les cris à 200 mètres, alors qu'un sifflement était encore intelligible à 700 mètres. Bien que ce ne soit pas un record en matière de sifflement, cette mesure prouve l'avantage relatif du sifflement dans des conditions moyennes qui incluaient un bruit de fond naturel très léger et un vent presque absent.

Pour les linguistes, l'étude de la parole sifflée a aidé à mettre en évidence la capacité du cerveau humain à reconnaître des mots et des phrases dans un signal qui comporte moins d'information que celui produit par la voix humaine. Il manque à la fréquence unique d'un sifflement donné les harmoniques de la voix. Et pourtant, cette seule fréquence modulée suffit à remplir les principales exigences d'une langue réelle pour transmettre une information claire. La parole sifflée est donc un moyen important et naturel d'explorer les capacités cognitives de nos cerveaux à s'adapter pour communiquer l'information contenue dans le langage humain.

Il y a plusieurs décennies, le bioacousticien René-Guy Busnel, avec qui je collabore depuis le début de mes recherches doctorales, a étudié la perception de la parole sifflée chez les villageois de Kusköy dans les montagnes du nord-est de la Turquie. Utilisant la forme sifflée du turc qu'on appelle «la langue des oiseaux», les villageois siffleurs étaient capables de reconnaître des mots individuels environ 70% du temps, contre 95% pour les mots parlés ordinaires prononcés fortement, dans une situation où les personnes étaient suffisamment éloignées pour ne pas distinguer clairement le visage de leur interlocu-

À ÉCOUTER

Reportage de l'Unesco sur le Silbo Gomero, la langue sifflée de l'île de la Gomera
http://bit.ly/PLS476_Siffle1

Reportage de l'AFP sur la langue sifflée dans le Béarn
http://bit.ly/PLS476_Siffle2

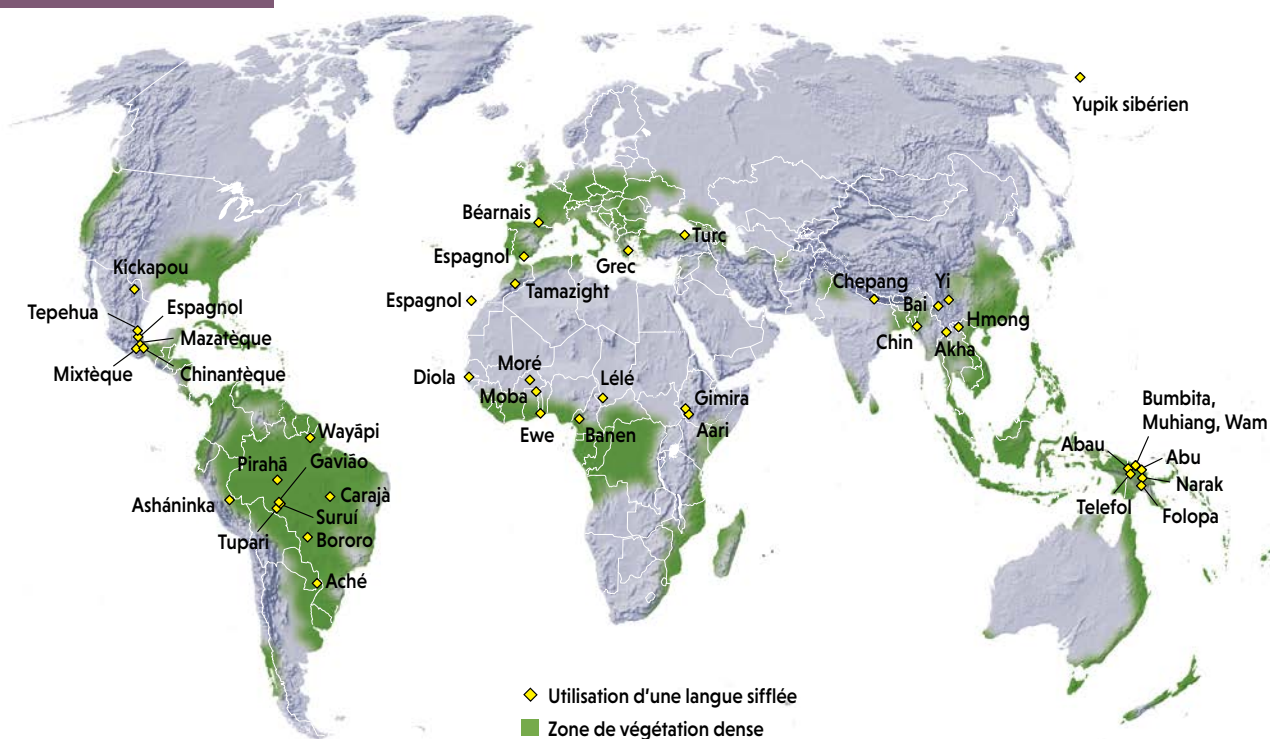
teur. Ils parvenaient même à détecter une phrase sifflée entière environ huit fois sur dix. Inspiré par cette étude, j'en ai entrepris une autre, en 2013, dans laquelle avec mes collègues nous quantifions l'intelligibilité des mots parlés ordinaires sachant que l'auditeur s'éloignait progressivement du locuteur qui lui parlait toujours avec la même force. Les résultats montraient qu'à une distance de 17 mètres, la reconnaissance des mots chute à 70%. Nous avons également trouvé que les consonnes les mieux reconnues (les sifflantes, dont – comme leur nom l'indique – le son s'apparente à un sifflement) sont encore reconnues à plus de 90% jusqu'à 33 mètres d'éloignement. Combinés aux travaux de Busnel sur le turc sifflé, ces résultats suggèrent que le discours sifflé est plus efficace que le discours parlé ordinaire (non crié) quand les interlocuteurs communiquent sur des distances moyennes, de l'ordre de 20 à 30 mètres.

Également dans le domaine de la linguistique, nous nous sommes demandé avec quelle facilité une personne est capable d'apprendre les rudiments de la parole sifflée. Traditionnellement, cette compétence est enseignée activement à l'enfant peu après l'apprentissage du langage classique, mais nous avons décidé d'explorer les étapes initiales de l'apprentissage du langage sifflé chez les adultes. Nous avons demandé à 40 étudiants francophones et hispanophones d'écouter du Silbo Gomero. Nous avons trouvé que les étudiants distinguaient facilement une composante évidente de n'importe quel mot espagnol sifflé – les voyelles «a», «e», «i» ou «o» (le «u» est sifflé comme un «o» en Silbo Gomero) – et que les étudiants espagnols étaient un peu plus précis que les français. Les deux groupes d'étudiants catégorisaient correctement les voyelles bien plus souvent que s'ils procédaient au hasard, mais pas aussi bien qu'un locuteur entraîné au Silbo.

LA PLANÈTE DE LA PAROLE SIFFLÉE

Ces quinze dernières années, le nombre de langues sifflées connues a dépassé 70, bien plus que la douzaine initialement identifiée alors par divers anthropologues, missionnaires, voyageurs, et autres découvreurs. Celles qui ont été étudiées ou enregistrées sont indiquées sur la carte.

Davantage de langues sifflées pourraient être découvertes, à condition toutefois que les modes de vie traditionnels associés ne soient pas menacés par la modernité. Souvent, elles sont utilisées pour communiquer sur de longues distances dans des zones montagneuses ou forestières.

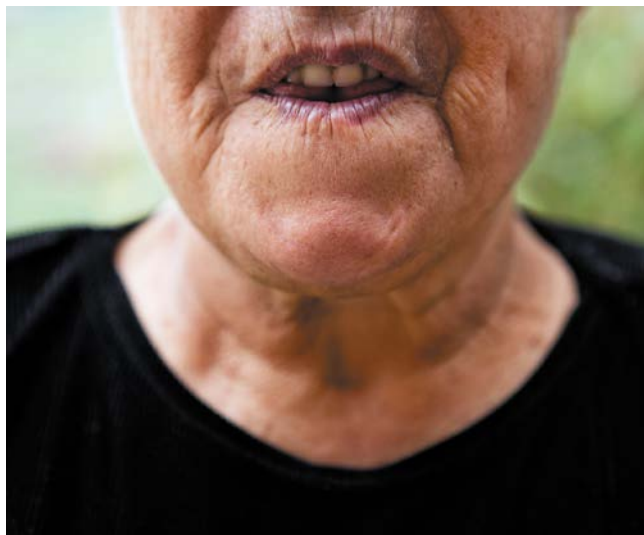


➤ C'est notre «flexibilité perceptive», la capacité de reconnaître des unités linguistiques dans des prononciations nouvelles comme des accents régionaux ou des registres de parole différents, qui expliquerait les résultats que nous avons obtenus. Cette flexibilité est essentielle pour le développement du langage chez l'enfant, mais aussi lors de l'apprentissage d'une seconde langue ou pour comprendre une prononciation particulière. Elle expliquerait pourquoi nous sommes tous capables d'apprendre à parler en sifflant.

CERVEAU GAUCHE ET DROIT

La neurobiologie du sifflement est un domaine qui reste largement inexploré. Les chercheurs ne font que commencer à observer ce qui se passe dans les centres du langage du cerveau quand une personne parle au moyen de sifflements. En 2005, Manuel Carreiras, alors à l'université La Laguna de Tenerife, aux îles Canaries, et ses collègues ont rapporté que les zones du cerveau relatives à la compréhension du langage (principalement les régions temporales de l'hémisphère gauche) sont activées chez les siffleurs bien entraînés quand ils écoutent de l'espagnol sifflé. Le résultat impliquait que ces zones déjà connues pour être liées au langage pouvaient traiter des mots à partir d'une entrée auditive consistant simplement en des changements de hauteur (comme une mélodie musicale) chez les siffleurs expérimentés, mais pas chez les personnes non familiarisées avec la parole sifflée.

Onur Güntürkün, de l'université de la Ruhr, à Bochum, en Allemagne, a voulu en savoir plus sur les mécanismes du cerveau liés à la parole sifflée. Il a recruté des locuteurs de la langue turque sifflée afin de tester la notion classique selon laquelle l'hémisphère gauche du cerveau est le lieu où se fait la majorité du traitement du langage. Des études antérieures avaient montré que l'hémisphère gauche est, en fait, le centre dominant du langage à la fois pour les langues tonales et atonales et les langues non vocales (clics et signes). Onur Güntürkün était curieux de savoir dans quelle mesure l'hémisphère droit (associé au traitement des mélodies et de la hauteur) serait également mis à contribution pour une langue sifflée. Lui et ses collègues ont rapporté en 2015 que les habitants de Kusköy, lors de simples tests auditifs, utilisaient presque autant les deux hémisphères quand ils écoutaient des syllabes sifflées, mais principalement le gauche quand ils entendaient des syllabes parlées normalement. Ce résultat nécessite une confirmation dans le cadre d'autres langues sifflées, mais il est important car il bouscule l'idée assez établie selon laquelle l'hémisphère gauche est dominant dans la compréhension du langage. Ces études montrent que les langues sifflées peuvent contribuer à élargir



Avec une rétroflexion de la langue, Kiriakoula Yiannakari peut parler à d'autres villageois en grec sifflé. Si la technique semble difficile, tout le monde peut apprendre la langue sifflée.

notre connaissance des mécanismes de traitement de l'information dans le cerveau.

Je poursuis mon travail de recherche et de préservation de la parole sifflée grâce à mes activités au sein de mon laboratoire mais aussi en tant que membre d'une association de recherche, Le Monde Siffle, qui existe depuis 2002. En effet, en parallèle des études académiques, des initiatives locales et récentes visent à faire vivre ces formes uniques de communication qui représentent un patrimoine culturel rare inventé et préservé par différentes populations à travers le monde. Les îles Canaries ont été des précurseurs à cet égard. En 1999, les autorités y ont rendu obligatoire l'enseignement du Silbo Gomero à l'école primaire sur l'île de la Gomera. Elles ont également mis en place un programme gouvernemental officiel pour former des professeurs de sifflement. Le désir de faire renaître le Silbo a depuis inspiré une série d'initiatives – par exemple, l'association culturelle et de recherche de Silbo Canario Hautacuperche, une organisation qui propose des cours de langue sifflée, y a même contribué en lançant une application appelée Yo Silbo permettant de s'entraîner en écoutant des phrases sifflées correctement.

Dans les Pyrénées françaises, l'association Lo Siular d'Aas a fait renaître le béarnais sifflé en s'inspirant des initiatives canariennes. Il était autrefois pratiqué dans le village d'Aas de la vallée d'Ossau et il est maintenant enseigné à l'école primaire de Bilhères, au collège de Laruns et à l'université de Pau dans les cours de langue béarnaise, une des langues d'Oc. En Turquie, il existe aussi des séances de pratique de la parole sifflée à l'école primaire du village de Kusköy. Des écoles où on a le droit de siffler en travaillant ! ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Meyer, **Whistled Languages : A Worldwide Inquiry on Human Whistled Speech**, Springer-Verlag, 2015.

O. Güntürkün et al., **Whistled turkish alters language asymmetries**, *Current Biology*, vol. 25(16), pp. R706-R708, 2015.

J. Meyer et al., **The study of tone and related phenomena in an Amazonian tone language : Gavião of Rondônia**, *Language Documentation & Conservation*, vol. 8, pp. 613-636, 2014.

J. Meyer, **Typology and acoustic strategies of whistled languages : Phonetic comparison and perceptual cues of whistled vowels**, *Journal of the International Phonetic Association*, vol. 38(1), pp. 69-94, 2008.

Dès l'Antiquité, la céruse était utilisée dans l'art cosmétique, comme en témoigne ce pot à fard contenant des pastilles de céruse, trouvé dans une tombe grecque du V^e siècle avant notre ère.



L'ESSENTIEL

> Au XIX^e siècle en Europe, la céruse ou blanc de plomb était le pigment blanc le plus répandu dans la peinture en bâtiment.

> Pourtant, on savait déjà depuis le XVII^e siècle qu'il s'agissait d'un puissant poison, responsable d'une intoxication parfois très violente, le saturnisme.

> Or un produit de substitution inoffensif, le blanc de zinc, existait alors...

> Mais un groupe de pression se constitue au sein de l'industrie de la céruse. Très organisé, il multiplie les actions pour maintenir ce produit sur le marché, semant le doute sur la toxicité du blanc de plomb.

L'AUTEURE



JUDITH RAINHORN
historienne, professeure
à l'université Paris-1-
Panthéon-Sorbonne, Centre
d'histoire sociale du XX^e siècle

La céruse, un poison ? Et alors !

AU XIX^e SIÈCLE, LA TOXICITÉ DE LA CÉRUSE, UNE POUDRE À BASE DE PLOMB LARGEMENT UTILISÉE DANS LA PEINTURE EN BÂTIMENT, NE FAISAIT AUCUN DOUTE. POURTANT, SON USAGE EST RESTÉ LÉGAL EN EUROPE JUSQU'EN 1993: LES INDUSTRIELS DE LA CÉRUSE VEILLAIENT AU GRAIN...

« **V**otre céruse est loin d'être un sel innocent: elle durcit les os, elle corrompt le sang; et comment voulez-vous qu'elle

vous fasse grâce, quand vous la maniez comme le vent qui passe travaille dans les cieus les fluides épars? Que de gens, à trente ans, sont déjà des vieillards pour avoir respiré le blanc poison qui vole dans la lumière, avec le souffle et la parole! » Ainsi le poète et journaliste Clovis Hugues dénonçait-il en 1906, dans un long poème intitulé *L'Empoisonné*, les méfaits de ce pigment blanc à base de plomb qui, au XIX^e siècle, était devenu le composant de toutes les peintures, couvrant les bâtiments d'une Europe qui s'urbanisait à grande vitesse. Il avait de bonnes raisons: ce produit chimique était alors parfaitement identifié comme toxique.

Comment la céruse a-t-elle pu bénéficier d'une telle bienveillance collective? Pendant

près de deux siècles, cette substance, sa fabrication et son usage, ont donné lieu à des milliers de pages de controverses scientifiques et techniques, à des journées entières de débats parlementaires, à des tentatives répétées de réglementation, à une mobilisation internationale en faveur de leur interdiction, sans toutefois être véritablement interdits avant... 1993. C'est l'histoire de cet accommodement collectif et durable au poison que nous racontons ici. Toute ressemblance avec des situations actuelles... est malheureusement tout à fait possible.

LA POUDRE BLANCHE DES COSMÉTIQUES ANTIQUES

La céruse n'est pas un produit chimique comme les autres. Le botaniste grec Théophraste, au IV^e siècle avant notre ère dans son *Traité des pierres*, puis Pline le Jeune, au I^{er} siècle, dans son *Histoire naturelle*, décrivent déjà la recette de sa fabrication: des plaques de plomb plongées dans du vinaigre subissent >

> un processus d'oxydation qui produit des écailles de carbonate de plomb ($PbCO_3$), lesquelles sont aisément réduites en une fine poudre blanche. Depuis l'Antiquité, cette poudre prend place dans les pharmacopées et l'art cosmétique pour onguents, fards et potions. À la Renaissance, elle est, avec le verre, les miroirs et les fourrures, l'un des luxueux produits d'exportation qui assurent la domination commerciale de Venise sur l'Europe.

C'est dans la Hollande du milieu du XVIII^e siècle que son procédé de fabrication s'industrialise, tant en termes d'organisation du travail que de quantités produites. Ce que l'on nomme bientôt le procédé hollandais n'est que l'ingénieux perfectionnement du procédé antique, destiné à accroître le rendement et à rentabiliser l'espace occupé. Ainsi, à Amsterdam, Rotterdam ou Utrecht, on remplace les plaques de plomb par des spirales du même métal, offrant davantage de surface à oxyder, que l'on dépose dans des creusets en terre; des milliers de ces petits pots sont superposés au-dessus d'un lit de fumier de cheval, dont la douce chaleur accélère l'oxydation du métal. Ils y restent six à huit semaines. L'efficacité de ce procédé lui assure une rapide suprématie: il est adopté par la plupart des fabricants anglais et français dès le début du XIX^e siècle.

Grâce à ses qualités techniques – en particulier sa grande opacité, son caractère couvrant, sa bonne siccativité (sa capacité à sécher) et sa résistance aux intempéries –, la céruse, déjà appréciée des peintres d'art qui en font la matière première de nombreuses couleurs et le fond adhérent de leurs toiles, s'impose bientôt sur le continent européen comme le pigment blanc le plus répandu dans la peinture en bâtiment, en navires et en voitures (à cheval et, bientôt, de chemin de fer).

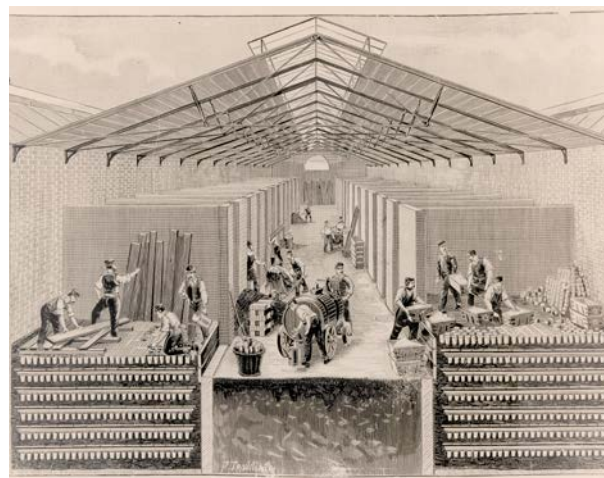
Après la Hollande, sa production se répand en Angleterre et en Belgique dans les années 1800, puis en France, en Allemagne et aux États-Unis au cours de la décennie 1820, au rythme d'une révolution urbaine qui nécessite de plus en plus de matériaux de construction, à mesure que l'Europe, puis l'Amérique du Nord, voient grossir l'emprise des villes dans les paysages. Au milieu du XIX^e siècle, la France compte une douzaine d'usines de céruse, employant en tout entre 500 et 1000 ouvriers.

D'ATROCES « COLIQUES DE PLOMB »

Là est donc le paradoxe initial de l'histoire de la céruse. D'un côté, la fabrication s'opère à grande échelle, la conquête des marchés de consommation s'étend à l'ensemble du continent européen, les usages du produit concernent désormais de nombreux secteurs de l'économie artisanale et industrielle: la peinture, pour les neuf dixièmes, mais également

FABRIQUER LA CÉRUSE

Le procédé dit hollandais consistait à laisser, pendant plusieurs semaines dans des milliers de pots de grès clos, comme ici dans une usine lilloise vers 1880, des lames de plomb en contact avec du vinaigre et de l'acide carbonique produit par du fumier de cheval. Sous l'effet de la chaleur dégagée, l'acide acétique oxydait les lames, transformant le plomb en écailles de carbonate de plomb, qui étaient alors détachées à la main et broyées.



les glaçures de porcelaine et de céramique, le blanchiment des dentelles, le lissage des cartons glacés et des cartes de visite, la teinture des toiles cirées tapissant les voitures d'enfant, la coloration des papiers peints et des papiers bigarrés de confiseries...

Mais, dans le même temps, la toxicité du produit ne fait aucun doute. Déjà connus au XVII^e siècle, les effets délétères des composés de plomb et, en particulier, de la céruse sur la santé font l'objet de dénonciations tout au long de son développement industriel. Et si, dans son ouvrage *Des maladies des artisans*, publié à Padoue en 1700 et traduit en français en 1776, le médecin italien Bernardino Ramazzini se contente de remarquer que « la principale cause qui rend les peintres malades, c'est la matière de leurs couleurs, qu'ils ont continuellement dans les mains et sous le nez », à compter des années 1820, la dénonciation des dangers du « blanc poison » devient un *leitmotiv* de la littérature médicale et hygiéniste.

Les ouvriers cérusiers, qui fabriquent le toxique et évoluent dans d'incessants nuages de poussière de plomb, et les peintres en bâtiment, qui utilisent la poudre blanche dans la préparation de leurs couleurs, sont désignés comme les principales victimes d'une épidémie de saturnisme dont on peine à définir l'ampleur avec précision. Essentiellement absorbé par les voies digestives et respiratoires, le plomb a pour cibles

privilegiées le système nerveux central, le système nerveux périphérique et le rein. Ses symptômes les plus connus et les plus évidents sont les « coliques de plomb » – d'atroces douleurs de l'abdomen – et, à un stade plus avancé de la maladie, la posture caractéristique en crabe avec atteinte des muscles extenseurs (voir la photo ci-dessous).

Grâce au procédé Leclaire, le blanc de zinc pouvait désormais concurrencer la céruse



Si l'irruption de cette réalité pathologique paraît tellement brutale à cette époque, c'est parce qu'elle était jusqu'alors restée silencieuse à cause de sa faible prévalence et, surtout, de l'absence d'outils pour l'évaluer. La maladie, tout comme ses causes, n'est clairement définie par les médecins qu'à compter de la décennie 1830-1840, et l'estimation statistique de son impact est plus tardive encore.

Au milieu du XIX^e siècle, cependant, les critiques de la céruse prennent une autre dimension. Le militantisme hygiéniste fait place à une controverse à la fois scientifique, économique, politique et sanitaire. En effet est apparu un produit de substitution inoffensif, le blanc de zinc (oxyde de zinc, ZnO), qui change la donne et met le blanc de plomb en danger. Il est l'œuvre de l'entrepreneur de peinture parisien Jean-Edme Leclaire.

Ancien ouvrier peintre empreint de saint-simonisme – un courant d'idées qui prône une nouvelle organisation plus fraternelle de la société –, Leclaire a été témoin de la révolte silencieuse de ces ouvriers des céruseries parisiennes qui quittaient l'atelier en écrivant sur la porte le mot ABATTOIR. Il s'est alors ingénié à trouver un substitut inoffensif à la dangereuse céruse: en 1845, il met au point un procédé de fabrication industrielle du blanc de zinc qui offre toutes les qualités d'innocuité souhaitées, pour ceux qui le fabriquent comme pour ceux qui le manipulent. Le blanc de zinc était connu depuis la fin du XVIII^e siècle, mais son prix prohibitif l'empêchait de concurrencer la céruse. Grâce au procédé Leclaire, il peut désormais se battre sur le même terrain qu'elle.

S'associant avec la Société des Mines et Fondures de la Vieille-Montagne, une multinationale liégeoise à la tête de la métallurgie du zinc dans le monde et qui dispose de puissants établissements de production et réseaux de commercialisation, Leclaire contribue à lancer sur le marché européen une innovation scientifique et industrielle qui vient concurrencer la séculaire céruse. Au sein de la peinture en bâtiment, « ce fut une révolution dans les habitudes du métier; on se divisa en deux camps: d'un côté les consommateurs de poison, attachés à la vieille routine, avec des ouvriers maigres, pâles, épuisés par la maladie; en face d'eux, les partisans du blanc de zinc, à la tête d'un personnel d'hommes gros et gras, le teint fleuri et l'air triomphant », décrit l'écrivain Charles Robert dans une biographie de Leclaire, en 1879.

Leclaire est récompensé en 1849 d'une médaille d'or par la Société d'encouragement pour l'industrie nationale, en 1850 par le prix Montyon de l'Académie des sciences et la Légion d'honneur. Une action publique volontariste accompagne cette pluie de récompenses: dès août 1849, un décret du ministre des Travaux publics de la Seconde République prescrit l'utilisation du blanc de zinc pour l'ensemble des travaux effectués dans les bâtiments publics, avec comme unique argument la protection de la santé des ouvriers.

UNE TIMIDE LOI... PASSÉE INAPERÇUE

Ainsi, au mitan du siècle, tout porte à croire à l'abandon imminent du blanc de plomb et à l'apothéose du blanc de zinc. Et pourtant, jusqu'au milieu du XX^e siècle, le blanc de zinc peine à contrarier la position dominante de la céruse sur le marché de la peinture et des travaux. Il faut attendre un demi-siècle, vers 1900, pour que la nocivité de la céruse soit de nouveau évoquée sur la place publique: syndicalistes, hommes politiques de premier plan tels que René Viviani ou Georges Clemenceau, fonctionnaires des offices et bureaux ministériels préoccupés du travail, experts en santé publique et parlementaires œuvrent de concert pour ériger cette question lancinante en cause politique et sociale de premier ordre.

En 1909, après de très âpres débats et de longs méandres parlementaires, une timide loi est votée pour interdire partiellement l'usage de la céruse dans la plupart des travaux de peinture en bâtiment. Toutefois, perturbée par l'entrée en guerre, la mise en application de la loi reste lettre morte. La question renaît au début des années 1920, dans le cadre de l'Organisation internationale du travail (OIT), qui cherche à établir une législation sociale à l'échelle mondiale, considérée comme une œuvre de paix. Mais la treizième convention internationale, adoptée par l'OIT en 1921, est >



LES RAVAGES DE LA CÉRUSE

L'intoxication par le plomb, nommée saturnisme, provoque des douleurs abdominales aiguës et des troubles neurologiques graves entraînant la paralysie des membres, comme chez ce peintre de Saint-Quentin, dans l'Aisne. Elle peut être fatale.

> plus timide encore que la loi française: elle interdit l'usage de la céruse dans certains travaux de peinture seulement.

Pourquoi et comment l'industrie de la céruse parvient-elle à maintenir sa domination sur le marché de la peinture au détriment du blanc de zinc jusque dans l'entre-deux-guerres, alors même que médecins, hygiénistes, ouvriers et pouvoirs publics attestent de sa nocivité? Comment expliquer, par conséquent, que les préoccupations sanitaires soient reléguées à l'arrière-plan par la plupart des acteurs, qu'il s'agisse des pouvoirs publics, des responsables de l'incitation au développement de l'industrie ou de l'immense majorité des fabricants et usagers de la peinture?

Pour comprendre cette chronologie en dents de scie et l'amnésie périodique qui semble saisir les acteurs sur les empoisonnements industriels,

dont la céruse est devenue emblématique, il faut s'intéresser aux creux du savoir, à l'ignorance et à sa construction sociale et politique dans l'histoire, mais également aux conditions d'édification des problèmes publics. En effet, chaque réinvestissement de la question semble l'exhumer et la replacer sur un terrain vierge, comme s'il n'y avait aucun cumul des savoirs scientifiques et techniques récoltés lors des épisodes précédents, comme s'il fallait convoquer de nouveau chimistes et médecins pour prouver une fois encore la dangerosité du produit, comme s'il était besoin d'entendre de nouveau les experts techniques de la peinture assurer que le blanc de zinc peut avantageusement remplacer le blanc de plomb, comme s'il était nécessaire de mobiliser de nouveau les troupes autour de la cause: il y a un perpétuel bégaiement de l'argumentation. Pendant un siècle et demi, au moins, plusieurs facteurs permettent de comprendre l'invisibilité relative de la question dans le débat public.

LE TOURNANT DE 1853

Après le décret de 1849 prescrivant l'utilisation du blanc de zinc pour la peinture des bâtiments publics et jusqu'en 1853, la céruse paraît au bord du gouffre. En mars 1853 encore, le médecin Ambroise Tardieu rend un rapport péremptoire pour le compte d'une commission d'hygiène publique: « Les préparations de plomb [...] constituent un poison subtil et lent, qui, introduit par le simple contact ou par les voies respiratoires au sein de l'organisme, y détermine les accidents les plus funestes et peut causer la mort. » Toutefois, le soutien dont bénéficie l'industrie de la céruse en haut lieu a raison de l'offensive anticéruse, et les mesures de prohibition demeurent lettre morte. Certains industriels, cependant, constatant la dangerosité du travail de leurs ouvriers, tentent de perfectionner les techniques afin d'en diminuer l'insalubrité. Ils développent le travail de la céruse « à l'humide » et mettent au point des machines produisant

moins de poussière pour décaper les plaques de plomb et embariller la céruse. Ce qui fait écrire à Tardieu, toujours en 1853, dans les *Annales d'hygiène publique et de médecine légale*: « Il n'y a pas lieu d'interdire la fabrication de la céruse, les perfectionnements introduits dans cette fabrication lui ayant enlevé, d'une manière à peu près complète, son insalubrité et ses dangers. » Mais la disparité est grande parmi les industriels. Selon les sites, ils envoient encore, à la fin du XIX^e siècle, entre 4 et 50 % de leurs ouvriers à l'hôpital pour des lésions souvent irréversibles. Quant aux peintres en bâtiment, ils continuent de s'intoxiquer au contact de la céruse en poudre qu'ils mélangent à l'huile pour leurs préparations. Pendant ce temps, en 1902, la Chambre syndicale des entrepreneurs de peinture et vitrerie de Tourcoing écrit: « Supprimer la céruse sous prétexte qu'elle engendre des maladies ! Mais à ces conditions il faudra supprimer toutes les industries susceptibles des mêmes inconvénients ; et pour être logique il faudra décréter qu'il est interdit à un puisatier de descendre dans un puits parce qu'il pourrait contracter une fluxion de poitrine ; il faudra empêcher à un déchargeur, à un homme de peine, etc. de lever un fardeau sous prétexte qu'il pourrait s'en suivre une hernie ou un lumbago ? »

J. R.

UN GROUPE DE PRESSION TRÈS ORGANISÉ

Tout d'abord, jusqu'au milieu du XIX^e siècle, le discours dénonçant la dangerosité du produit demeure confiné aux étroites sphères hygiénistes et médicales, sans parvenir à franchir les frontières de cette arène spécialisée. Le saturnisme fait l'objet de recherches importantes qui s'amorcent dans la décennie 1830 et se multiplient à partir de 1870: après l'ouvrage fondamental du médecin Louis Tanquerel des Planches, en 1839 (*Traité des maladies du plomb ou saturnines*), il faut attendre le dernier quart du XIX^e siècle pour que se stabilisent les savoirs médicaux sur l'intoxication par le plomb. Cependant, en raison de leur caractère technique, le discours clinique et les controverses médicales sont très peu relayés hors du milieu hospitalier, ce qui contribue à l'invisibilité du problème dans l'espace public. Le savoir médical sur le saturnisme professionnel ne s'est diffusé qu'à l'aube du XX^e siècle, quand médecine et politique sont entrées en résonance à travers les réseaux républicains et francs-maçons, notamment, grâce à des personnalités comme le pasteurien Paul Brouardel, professeur de médecine légale, membre de l'Académie de médecine et doyen de l'École de médecine de Paris.

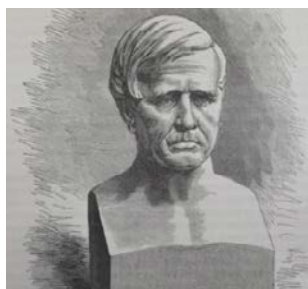
Par ailleurs, sous le Second Empire, un puissant groupe de pression se constitue au sein de l'industrie de la céruse. S'il est extrêmement difficile de mettre au jour la nature et la fabrication des réseaux qui la constituent, la coalition apparaît très active dès le milieu du XIX^e siècle pour contrer l'offensive prohibitionniste. Les industriels français de la céruse sont peu nombreux, mais géographiquement très structurés *via* des réseaux économiques que renforcent des liens familiaux – en particulier avec la puissante industrie textile du Nord. Ils

Les cérusiers s'attachent à semer le doute sur la toxicité supposée du blanc de plomb

sont aussi solidement organisés pour peser auprès de certains acteurs décisifs comme les Chambres de commerce et d'industrie. Conjurant tous ces moyens de pression, ils multiplient les actions pour maintenir la prééminence de leur produit sur un marché qui s'internationalise et se libéralise.

Charles Expert-Bezançon, grand cérusier parisien, se charge de promouvoir l'industrie de la céruse jusqu'au sommet de l'État. Courant les expositions universelles et multipliant médailles et prix industriels fièrement arborés sur les papiers à en-tête, les cérusiers s'attachent, dans de nombreuses publications et interventions publiques, à semer le doute sur la toxicité supposée du blanc de plomb. Ils insistent sur les précautions «souhaitables» d'usage et incriminent le comportement négligent des ouvriers, qui, souvent, ne les appliqueraient pas. Brandissant les efforts incontestables d'amélioration technique de l'industrie de la céruse depuis le milieu du XIX^e siècle, qui témoigneraient de leur volonté d'améliorer l'environnement au travail, les producteurs s'emploient ainsi à jeter le doute sur la dangerosité de leur industrie (voir l'encadré page ci-contre).

Le débat technique sur la valeur intrinsèque des produits est lui aussi fondamental dans l'immobilisme vis-à-vis de l'utilisation de la céruse. Devant la volonté de l'État d'interdire ou, du moins, de réguler son usage, les industriels proclament leur credo anti-interventionniste avec des arguments tel celui-ci, cités par le député Jules-Louis Breton en 1903 dans le rapport d'une enquête qu'il avait menée pour préparer la future loi sur la céruse: «Lorsque les chemins de fer ont été inaugurés, ils ont entraîné la suppression des diligences; celles-ci sont mortes de leur belle mort. Si le blanc de zinc a une supériorité réelle sur le blanc de céruse, il nous fera mourir commercialement, mais que l'État n'intervienne pas.» En d'autres termes, les industriels défendent une position économique libérale, selon laquelle les lois du marché doivent s'autoréguler au nom des lois de la concurrence,



JEAN-EDME LECLAIRE (1801-1872)

Ouvrier peintre en bâtiment, puis entrepreneur, Jean-Edme Leclaire, soucieux de la santé des ouvriers, mit au point un procédé pour produire du blanc de zinc, non toxique, à l'échelle industrielle.

qui détermineront seules lequel des deux pigments doit dominer le marché de la peinture.

Un autre aspect est l'immobilisme des marchands de couleurs et des peintres en bâtiment eux-mêmes à l'égard du poison. La peinture au blanc de zinc, plus difficile à manier que celle au blanc de plomb, contraint en effet l'ouvrier à une plus grande attention pour homogénéiser sa peinture. Il faut un certain entraînement, un «tour de main», qui explique en partie l'hostilité de nombreux peintres, attachés à une certaine routine du métier, à ce changement.

Enfin, l'absence de structuration du mouvement ouvrier naissant contribue à l'occultation globale du problème sanitaire lié aux poisons industriels. Aucune organisation syndicale ne structure les ouvriers de la céruse. Il faut attendre les premières années du XX^e siècle et l'émergence d'une organisation professionnelle de métier au sein des peintres en bâtiment pour voir ériger en cause l'empoisonnement au plomb dans les discours syndicaux, et encore sur un mode minoritaire.

Après l'interdiction partielle de 1909 et la ratification par la France de la convention internationale adoptée par l'OIT en 1926, on aurait pu penser que la céruse disparaîtrait. Il n'en fut rien, si l'on en croit les réglementations de 1930, 1934 et 1948, qui proscrirent à nouveau l'usage du produit dans la peinture en bâtiment, réitérant les précédentes. C'est seulement en 1993 qu'un arrêté a interdit la vente de la peinture à la céruse, afin de mettre la France en conformité avec la réglementation européenne récente.

CÉRUSE, AMIANTE: VARIATIONS SUR UN MÊME THÈME

L'histoire de la longue controverse entre blanc de plomb et blanc de zinc dans l'usage de la peinture en bâtiment illustre la puissante imbrication des déterminants économiques, sociaux, techniques et politiques de la question du risque industriel aux XIX^e et XX^e siècles. Objet de recherche scientifique, de débats techniques, de rivalités économiques et de joutes politiques, la céruse apparaît ainsi comme un laboratoire privilégié pour observer la révélation et le confinement des discours sur le risque industriel et, partant, le processus historique de fabrication d'un poison industriel.

Tirer le fil d'Ariane de la céruse à travers le labyrinthe de l'histoire constitue à bien des égards un moyen de réfléchir aux rapports complexes et souvent ambigus que nos sociétés contemporaines entretiennent avec les poisons qui les habitent. Amiante, industrie nucléaire, nanoparticules, pesticides dans l'agriculture, particules fines dans l'atmosphère des grandes villes et pollutions diverses sont les terrains contemporains de la longue histoire de l'accommodement des hommes aux poisons qu'ils produisent. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Rainhorn, **Poussières de plomb et pollution de l'air au travail : la céruse en question sur le temps long (France, XIX^e-XX^e siècles), Pollution atmosphérique, n° 222, 2014.**

R. Proctor et L. Schiebinger, **Agnology. The Making and Unmaking of Ignorance**, Stanford University Press, 2008.

C.-F. Robert, **Biographie d'un homme utile. Leclaire, peintre en bâtiments**, Sandoz et Fischbacher, 1879.

R

ENDEZ-VOUS

P.80 *Logique & calcul*
 P.86 *Art & science*
 P.88 *Idées de physique*
 P.92 *Chroniques de l'évolution*
 P.96 *Science & gastronomie*
 P.98 *À picorer*

LES PARTAGES ÉQUITABLES D'UNE TARTE

Il est facile de découper un disque en parts égales et identiques en partant de son centre. Mais deux géomètres britanniques ont récemment montré qu'il existe pléthore de découpages équitables plus élaborés... et moins symétriques.

L'AUTEUR



JEAN-PAUL DELAHAYE
 professeur émérite
 à l'université de Lille
 et chercheur au Centre
 de recherche en
 informatique, signal
 et automatique de Lille
 (Cristal)

Le dernier ouvrage
 de J.-P. Delahaye :
**Mathématiques
 et mystères**,
 une sélection de ses
 chroniques parues
 dans *Pour la Science*
 (Belin, 2016).



Les plus beaux problèmes mathématiques ont un énoncé facile à comprendre et une solution difficile. C'est le cas du grand théorème de Fermat, sujet de la rubrique du mois dernier: pour ce théorème comme pour d'autres, la solution (la démonstration) est si ardue et complexe que seuls quelques spécialistes la comprennent: il faut faire confiance aux experts quand ils affirment que le théorème est démontré.

Lorsque, de surcroît, tout le monde comprend la solution, on a alors affaire à une merveille mathématique absolue. C'est le cas des constructions géométriques que nous allons présenter et dont on n'arrive pas à saisir pourquoi personne avant le XXI^e siècle n'en a découvert l'existence.

DES PARTS ÉGALES

Quand on découpe une tarte ou une pizza, il est évident que si, en allant du centre vers le bord, on dessine des courbes toujours identiques faisant un angle constant entre elles de $2\pi/n$ (ou $360^\circ/n$), il s'ensuit que les n parts découpées sont égales au sens géométrique le plus fort: elles sont superposables et ont donc la même aire. Il existe une infinité de tels découpages.

Nous les nommerons «découpages radiaux en parts superposables», ou simplement «découpages radiaux». Le parcours de la frontière d'une part radiale se fait en trois étapes: une courbe continue C joignant le centre du disque à son bord, un arc de cercle correspondant à $1/n$ du périmètre du disque, et C' la courbe C parcourue en sens inverse du bord

vers le centre. Les courbes C et C' se rejoignent au centre (voir l'encadré ci-contre).

Une question vient à l'esprit:

Q1. Existe-t-il d'autres méthodes de découpage d'un disque en parts superposables?

Tous les découpages radiaux ont les deux propriétés suivantes: 1) le centre du disque est un sommet de chaque part, et donc se trouve sur la frontière de chaque part; 2) le découpage en n parts présente une symétrie de rotation: une rotation d'angle $2\pi/n$ laisse le découpage inchangé. Il en résulte qu'une série d'autres questions se posent au cas où l'on répondrait oui à la première.

Q2. Existe-t-il des découpages du disque en parts superposables tels que le centre du disque ne soit pas un sommet de certaines parts?

Q3. Existe-t-il des découpages du disque en parts superposables tels que le centre du disque ne soit le sommet d'aucune part?

Q4. Existe-t-il des découpages du disque en parts superposables tels que le centre du disque soit à l'extérieur de certaines parts?

Q5. Existe-t-il des découpages du disque en parts superposables tels que le centre du disque soit à l'intérieur d'une part (et donc ne soit sur la frontière d'aucune part)?

Q6. Existe-t-il des découpages du disque en parts superposables ne présentant aucune symétrie de rotation?

Q7. Peut-on proposer une classification complète de tous les découpages du disque en parts superposables et démontrer qu'elle n'en omet aucun?

Il est probable que ceux dont l'esprit a été effleuré par de telles questions aient considéré comme évident que les réponses étaient

LES DÉCOUPAGES RADIAUX D'UN DISQUE

1

A. DÉCOUPAGES SIMPLES
En traçant une courbe fermée constituée d'un arc de cercle et deux lignes identiques, en la plaçant convenablement entre le centre d'un disque et le bord (1), puis en la dupliquant n fois en tournant à chaque fois de $2\pi/n$, on obtient des découpages du disque en parts superposables (2). On montre ici deux exemples d'un tel découpage

radial, l'un avec un secteur (3), l'autre avec une spirale (4).

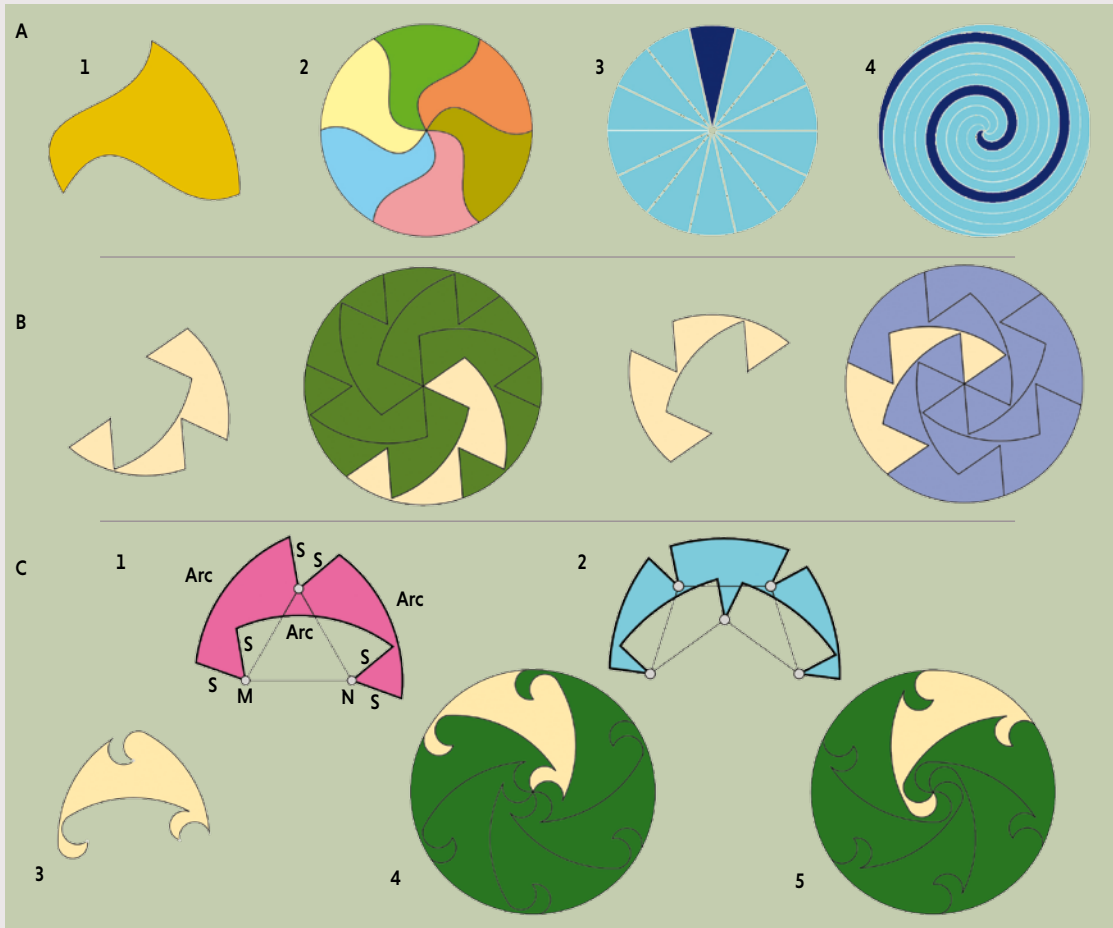
B. PARTS RADIALES À DOUBLE POSITION

Certaines formes radiales découpant un disque en parts superposables peuvent paver le disque de 2 façons (cas de la forme en jaune clair). On a démontré qu'il n'existe pas

de forme radiale qui pave le disque de 3 façons différentes ou plus.

C. CONTRAINTES SUR LES PARTS À DOUBLE POSITION

Les parts radiales à double position doivent avoir des formes très particulières (ici, la forme 3 est obtenue de la forme 1 en remplaçant le segment S par un arc de cercle ; voir le texte principal).



négatives et qu'il n'y avait qu'une seule catégorie de découpages du disque en parts superposables, celle des découpages radiaux. Nous verrons que c'est faux.

Nous avons affaire là à un piège bien connu en mathématiques: considérer comme évident quelque chose qui ne l'est pas, et du coup ne pas réfléchir et passer à côté de résultats intéressants par absence d'interrogation.

Un exemple ancien de telles «évidences» trompeuses concerne le calcul des chiffres du nombre π : toutes les méthodes qu'on utilisait jusqu'en 1995 avaient la propriété que, pour calculer les chiffres de π jusqu'à la position n ,

il fallait d'abord, ou en même temps, calculer les chiffres précédents. Simon Plouffe a découvert et prouvé que cette «évidence», jamais clairement énoncée et bien sûr jamais démontrée, est fautive. Il a proposé une méthode de calcul des chiffres de π en écriture binaire qui permet de connaître le n -ième chiffre binaire sans passer par le calcul de ceux qui précèdent. Cette méthode permet d'ailleurs aujourd'hui de connaître les chiffres binaires de π autour de la position 10^{15} alors que lorsqu'on veut tout calculer, on n'a pour l'instant pas été aussi loin.

Avant de poursuivre notre examen des >

> découpages du disque, précisons que nous ne voulons considérer que ceux assez réguliers et simples. On exige plusieurs conditions sur les parts superposables recherchées (vous pouvez passer leur formulation si vous trouvez que ces précisions topologiques sont trop alambiquées):

(a) chaque part doit être d'un seul tenant (plus précisément, «connexe par arc»): on doit pouvoir rejoindre deux points d'une même part par un chemin continu entièrement inclus dans la part;

(b) chaque part doit contenir sa propre frontière: la limite d'une suite convergente de points d'une part P doit toujours appartenir à P;

(c) chaque point de la frontière d'une part doit être infiniment proche de points de l'intérieur. Autrement dit, en prenant la frontière des points intérieurs à une part P, on doit obtenir P. Cette condition évite les parts qui auraient des fils infiniment fins comme le dessin d'une cerise avec sa queue;

(d) la frontière d'une part doit être une courbe continue qui revient à son point de départ sans se croiser.

PARTS À DOUBLE POSITION RADIALE

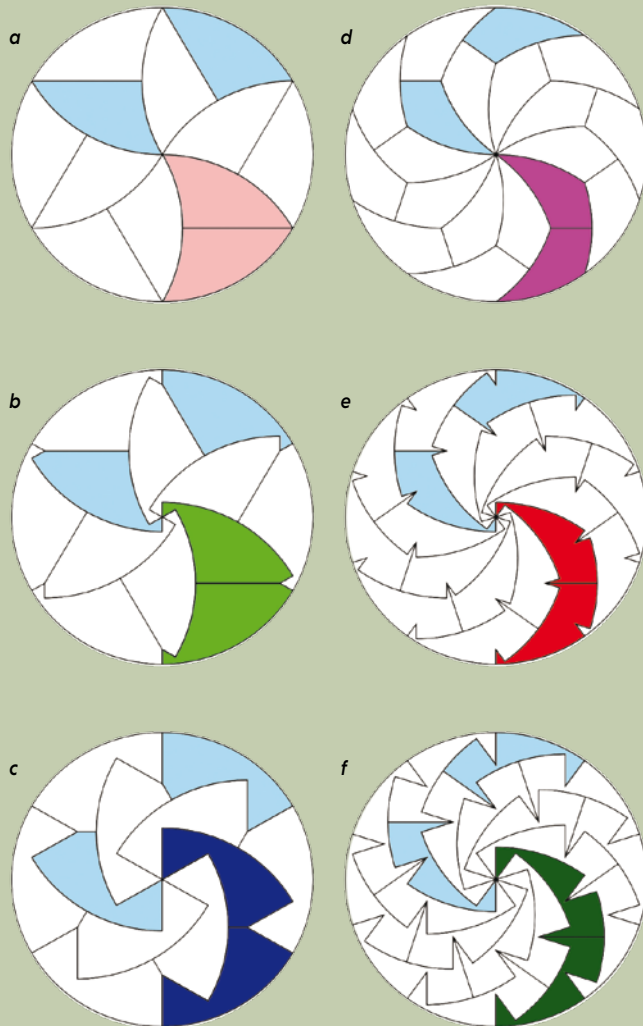
Joel Haddley et Stephen Worsley, de l'université de Liverpool, ont pris au sérieux les questions mentionnées plus haut concernant les découpages en parts superposables du disque. Leur article, qui a connu plusieurs versions à mesure des progrès de leurs travaux, annonce une première surprise, qui est la clé de leurs découpages non radiaux du disque: il existe des découpages radiaux particuliers dont les parts reconstituent le disque de 2 façons (voir l'encadré 1, B).

Comme ces parts ont 2 positions radiales possibles, nous les dénommerons «parts à double position radiale». Leur construction mérite d'être étudiée soigneusement. Cela permettra à la fois de comprendre que la construction est exacte, qu'il n'y a pas d'entourloupe, et de concevoir une famille infinie de tels découpages. Ceux-ci amèneront des réponses à certaines questions énoncées plus haut.

2

DÉCOUPAGES NON RADIAUX EN PARTS SUPERPOSABLES

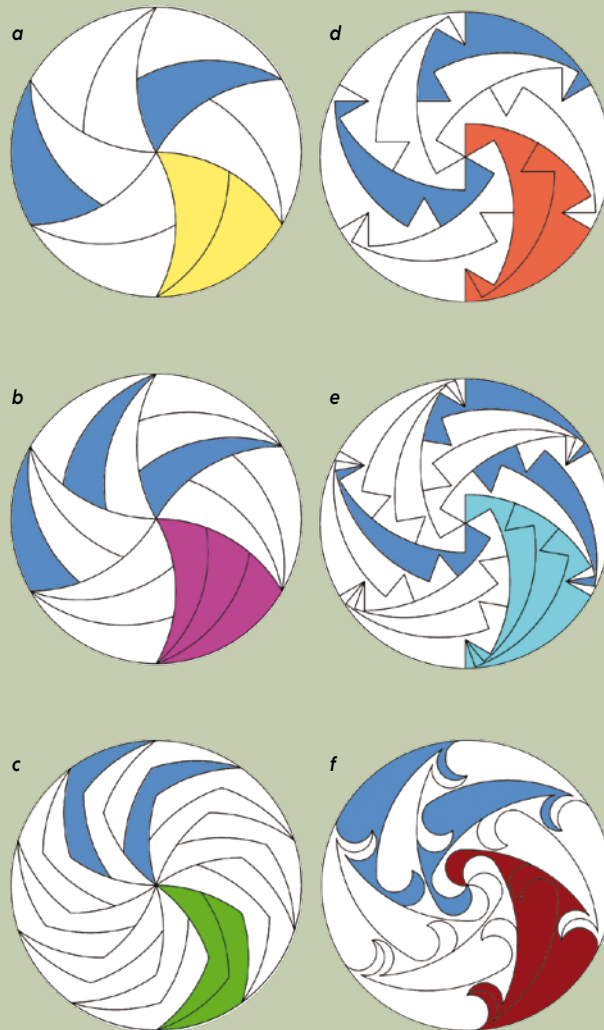
Lorsqu'on dispose d'un découpage radial du disque en parts superposables à double position radiale, où la forme de la part a un axe de symétrie, on peut obtenir un découpage non radial en parts superposables en coupant chaque part selon cet axe de symétrie. Ainsi, dans le découpage a, on est parti du découpage radial en 6 parts où chacune est délimitée par 3 arcs de cercle. Cette part (en rose) a un axe de symétrie. En coupant les 6 parts selon leur axe de symétrie, on obtient un découpage non radial du disque en 12 parts superposables (2 d'entre elles sont indiquées en bleu). Le même principe est appliqué ici aux autres découpages radiaux.



3

DÉCOUPAGE EN TRANCHES, AVEC OU SANS AXE DE SYMÉTRIE

Dans les découpages non radiaux représentés dans l'encadré 2, les parts sont superposables, mais la moitié d'entre elles doivent être retournées (symétrie miroir). Avec le découpage en tranches, on évite de tels retournements. Ainsi, partant du découpage radial en 6 parts sous-jacent à la figure a de l'encadré 2, on obtient un découpage (a) en 12 parts (deux sont indiquées en bleu) en faisant deux tranches identiques dans chacune des parts initiales (dont l'une est indiquée en jaune). Le même principe a été appliqué pour les autres découpages montrés ici. Dans les découpages a à e, la forme découpée possède un axe de symétrie. Ce n'est pas le cas de la forme utilisée dans le découpage f.



Dans l'encadré 1, la figure C1 représente une telle part, en faisant apparaître ses éléments de symétrie et les contraintes de construction. Selon que l'on place les points M ou N au centre du disque, on obtient le double positionnement de la part dans le disque. Le pourtour de la part doit se diviser en 3 parties superposables, car ces parties se trouvent collées dans les deux versions du disque rempli. En conséquence, les 3 sommets (*petits ronds sur le dessin*), sont aux sommets d'un triangle équilatéral. Chaque tiers du périmètre de la part est dans le dessin composé d'un segment rectiligne S, d'un arc de cercle Arc et d'un segment rectiligne S identique au premier.

Puisque la part est utilisée 6 fois dans notre exemple pour recouvrir le disque, l'arc de cercle correspond exactement à $1/6$ de la circonférence du cercle, et l'angle entre les deux segments rectilignes est de $2\pi/6$ (60°). Pour que différentes versions de la part s'emboîtent convenablement, le parcours du périmètre est donc, en partant du centre du disque: (S-Arc-S)-(S-Arc-S)-(S-Arc-S).

Un peu de réflexion suggère deux façons de généraliser ce premier exemple de part à double positionnement radial.

Dans la figure C1 de l'encadré 1, on peut remplacer les segments rectilignes S par une même courbe continue C (chacun des 6 segments S est remplacé par la même courbe C exactement, qui tourne d'un multiple de $2\pi/6$), par exemple un arc de cercle ou un zig-zag. Le périmètre d'une part devient: (C-Arc-C)-(C-Arc-C)-(C-Arc-C).

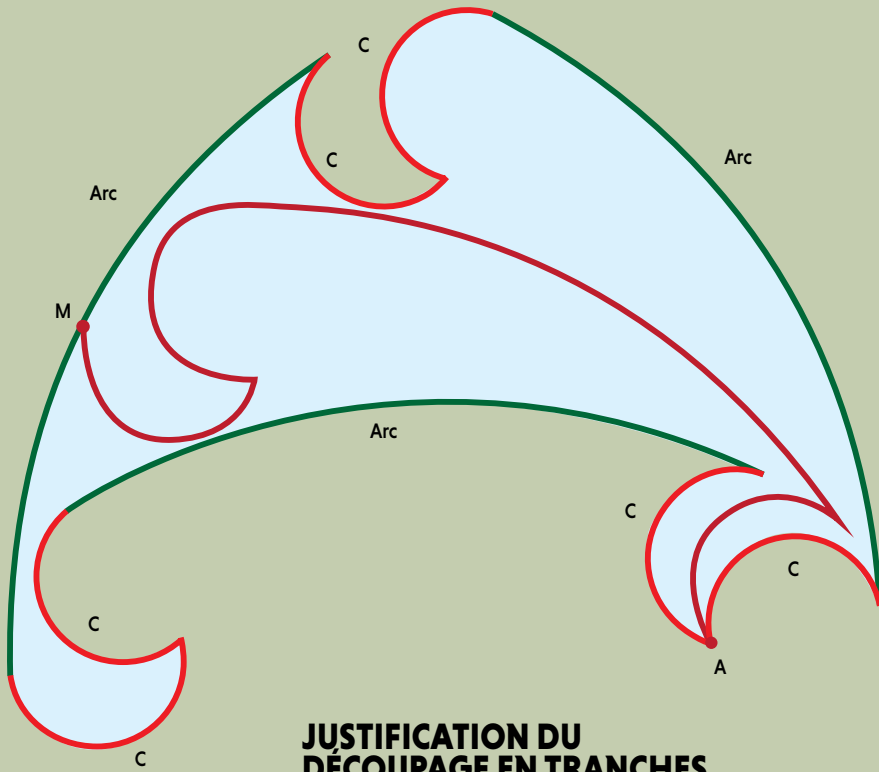
La courbe choisie ne doit pas trop s'écartier du segment qu'elle remplace pour éviter les rencontres des périmètres des parts quand on les dispose dans le disque, mais il y a néanmoins une infinité de façons de choisir la courbe C qui remplace le segment. Notons aussi que l'on peut jouer sur la longueur des segments (ou des courbes qui les remplacent) ainsi que sur l'angle qu'un couple de segments ou de courbes fait par rapport au triangle équilatéral.

Le dessin de la figure C1 avec son découpage en 3 parts, organisé sur un triangle >

BIBLIOGRAPHIE

J. Haddley et S. Worsley, **Infinite families of monohedral disk tilings**, prépublication arXiv:1512.03794, 2016.

J. Condliffe, **Mathematicians have found crazy new ways to cut pizza into equal slices**, *Gizmodo*, 2016 (<http://bit.ly/1SdPLFn>).



JUSTIFICATION DU DÉCOUPAGE EN TRANCHES

4

Que le découpage en tranches donne bien des parts parfaitement superposables demande un raisonnement qu'on peut faire soi-même juste en observant attentivement le dessin ci-dessus.

La part représentée (en bleu) est à double position radiale. En commençant à parcourir son périmètre par le point A, le parcours s'écrit : (C-Arc-C)-(C-Arc-C)-(C-Arc-C). On peut voir ce parcours autrement : (C-Arc-C-C)-Arc-(C-C-Arc-C), c'est-à-dire de la forme X-Arc-X. Il est alors évident que si l'on prend le point milieu M de l'Arc entre les deux X, et qu'on dessine une nouvelle courbe X entre A et M, le découpage opéré de la part à double position radiale donne deux parts parfaitement superposables, chacune ayant pour périmètre le parcours X-Arc/2-X.

Ce raisonnement s'adapte sans difficulté quand on découpe en k tranches au lieu de 2,

pourvu que ces tranches ne se touchent pas. De nouveau, la démonstration que la construction proposée est géométriquement correcte n'a demandé qu'un regard attentif.

Notons que dans le cas où la part à double position radiale prise au départ n'est pas symétrique (et dans cette situation, il y a vraiment 2 façons distinctes de remplir le disque en l'utilisant), alors on obtient des parts superposables par découpages en tranches qui remplissent le disque d'au moins 2 façons très différentes.

Notons aussi que ces découpages en tranches donnent des parts superposables qui remplissent le disque, et dont une proportion aussi grande qu'on le veut ne passe pas par le centre. Cela ne répond pas parfaitement à la question Q5, mais suggère que la réponse pourrait être positive.

▷ équilatéral, se généralise aussi en un découpage en 5 organisé autour des points d'un pentagone régulier, dont un sommet a été replié vers le centre (voir la figure C2). Le périmètre d'une part est maintenant :

(S-Arc-S)-(S-Arc-S)-(S-Arc-S)-(S-Arc-S)-(S-Arc-S).

Là encore, les segments rectilignes peuvent être remplacés par une courbe et on peut jouer sur certains angles. Des figures analogues à partir d'un polygone régulier à n côtés, pourvu que n soit impair, généralisent encore le schéma. Les angles entre deux segments (ou deux courbes qui se rejoignent aux sommets du polygone régulier) dans le cas n impair, $n \geq 3$, valent π/n . Les parts obtenues découpent le disque en $2n$ parts superposables (n impair). Pour remplir le disque, ces parts se placent de deux façons différentes, sauf dans le cas particulier où la part a un axe de symétrie, les deux placements conduisant alors au même découpage.

L'assurance que toutes ces parts et variantes remplissent exactement le disque de deux façons différentes (ou d'une seule en cas de symétrie) s'obtient simplement en examinant les dessins. On peut éventuellement s'aider de schémas supplémentaires ou de découpages de pièces en carton, mais aucun raisonnement compliqué n'est nécessaire pour contrôler cette combinatoire géométrique et être certain que tout s'ajuste comme il faut. Les démonstrations se font par le regard.

Joel Haddley et Stephen Worsley avancent un autre raisonnement qui, lui, ne se réduit pas à une observation attentive de quelques dessins. Il établit un énoncé négatif: s'il existe de très nombreuses variantes de parts à double position radiale, il n'existe aucune part à k positions radiales pour $k \geq 3$.

PREMIÈRES RÉPONSES PAR LA SYMÉTRIE

Nous disposons maintenant d'une méthode simple pour répondre à quelques-unes des questions énoncées au début de l'article.

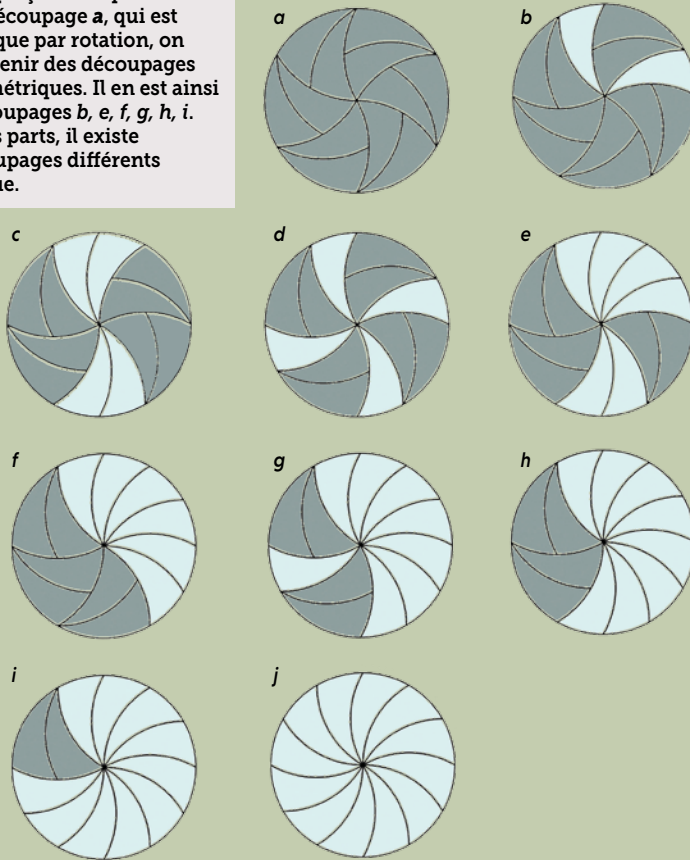
Si l'on s'arrange pour qu'une part à double position radiale soit symétrique par rapport à une droite (dans ce cas, nous l'avons déjà signalé, les deux dispositions sont identiques), alors en coupant cette part en deux selon l'axe de symétrie, on transformera le découpage radial en n parts superposables en un découpage non radial en $2n$ parts superposables. Dans ce découpage non radial, certaines parts ne contiendront pas le centre du disque et donc n'auront pas ce centre sur leur frontière (voir l'encadré 2 pour des exemples).

Le dessin a de l'encadré 2 est le cas extrême du découpage en 6 parts quand les 3 parties du périmètre d'une part sont simplement 3 arcs de cercle (les segments rectilignes S de la figure C1 de l'encadré 1 ont été réduits à des

5

DÉCOUPAGES SANS SYMÉTRIE DE ROTATION

En déplaçant des parts du découpage *a*, qui est symétrique par rotation, on peut obtenir des découpages non symétriques. Il en est ainsi des découpages *b*, *e*, *f*, *g*, *h*, *i*. Avec ces parts, il existe 62 découpages différents du disque.



points). Cette part découpée en 2 par le milieu donne le plus élémentaire des découpages non radiaux, en 12 parts superposables.

Les dessins *b* et *c* correspondent encore à des situations où, dans la figure C1, on s'est arrangé pour avoir une part radiale symétrique à double position découpant le disque en 6, qu'on a ensuite séparée en 2, d'où un découpage non radial du disque en 12 parts superposables.

Les dessins *d*, *e* et *f* correspondent à des parts du type représenté à la figure C2: une part radiale symétrique à double position avec un périmètre composé de 5 morceaux superposables, qu'on coupe en 2, d'où un découpage non radial en 20 parts superposables.

Ces constructions répondent aux questions

Q1, Q2 et Q4 en proposant une infinité de découpages non radiaux en parts superposables, dont certaines parts ne contiennent pas le centre du disque.

PAS DE RETOURNEMENT, MAIS DES TRANCHES FINES

Les découpages obtenus sont tels que les parts recouvrant le disque sont superposables, mais la moitié d'entre elles doivent être retournées pour remplir le disque. Est-il possible d'éviter ces retournements? La réponse est donnée par un autre principe de découpage surprenant du disque en parts superposables: le découpage en tranches.

Pour se persuader que le principe fonctionne et donc que les découpages qu'on obtient sont géométriquement parfaits, pas besoin de connaissances expertes: un examen attentif des figures découvertes par les deux chercheurs de l'université de Liverpool assure qu'elles sont correctes.

On prend des parts à double position radiale (ayant un axe de symétrie ou non) et, à la condition que les courbes utilisées pour remplacer les segments ne soient pas trop éloignées des segments qu'elles remplacent, on découvre qu'un découpage en 2, parfois 3 ou plus, parties superposables est possible (voir les encadrés 3 et 4).

Nous allons maintenant pouvoir répondre à la question Q6 sur les découpages en parts superposables n'ayant pas de symétrie de rotation. Le découpage *a* de l'encadré 3 autorise des déplacements de parts qui rompent la symétrie de rotation (voir l'encadré 5).

De tels jeux sont possibles pour tous les découpages en parts superposables provenant d'une part radiale symétrique à double position. On a donc une infinité de découpages du disque dépourvus de symétrie de rotation. Un décompte précis du nombre de façons dont on peut placer les 12 parts de la figure 3a dans le disque indique qu'il y en a 62.

On le voit, non seulement les deux géomètres britanniques ont proposé plusieurs nouvelles familles infinies de découpages du disque en parts superposables, mais ces familles donnent aussi une grande variété de dispositions pour les parts.

Restent trois questions irrésolues: Q3, Q5 et Q7. Les auteurs de l'article conjecturent que les constructions trouvées avec les découpages radiaux sont les seules possibles qui découpent le disque en parts superposables. Si cette conjecture est vraie, alors leur travail donne la réponse à la question Q7, et les questions Q3 et Q5 ont des réponses négatives. Qui saura démontrer ou infirmer la conjecture proposée, si possible à l'aide d'une démonstration accessible à tous? ■

L'AUTEUR



LOÏC MANGIN
rédacteur en chef adjoint
à *Pour la Science*

LA 3D COMME VOUS NE L'AVEZ JAMAIS VUE

Dans les espaces tridimensionnels, la géométrie euclidienne, celle qui nous est familière, n'est qu'une géométrie parmi huit possibles. À quoi ressemblent les autres? Une exposition vous invite à les visualiser, la plupart étant représentées pour la première fois.

La légende raconte qu'à 16 ans, en 1895, Albert Einstein s'est imaginé à califourchon sur un rayon de lumière pour mieux en comprendre le comportement. Cette expérience de pensée l'aurait conduit sur le chemin de la théorie de la relativité. Qu'a-t-il vu? Qu'a-t-il perçu? Qu'a-t-il senti? On l'ignore, mais cette anecdote montre que l'on a beaucoup à apprendre en se mettant dans des conditions réputées hors d'atteinte. Dans un autre registre, c'est ce que propose aujourd'hui le mathématicien Pierre Berger, de l'université

Paris 13, dans l'exposition *Esthétopies* qu'il organise à l'institut Henri-Poincaré (IHP), à Paris, avec sa consœur Jimena Royo-Letelier et les artistes Pierre-Yves Fave, Sergio Krakowski, Vincent Martial.

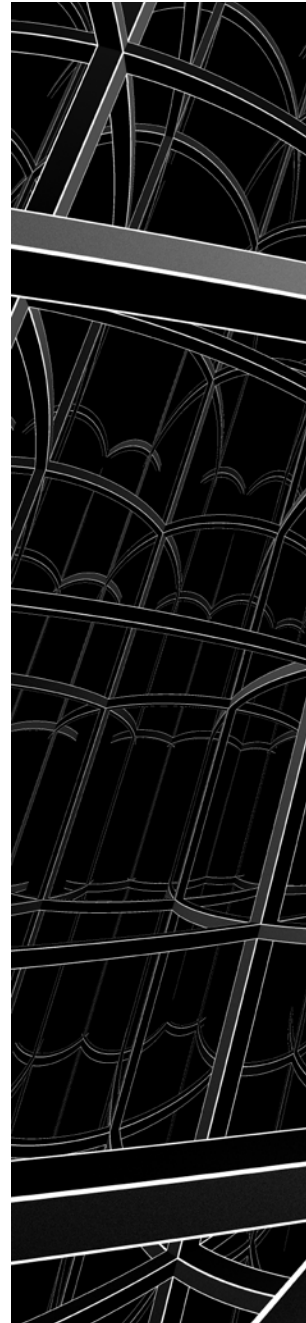
Comment? En invitant à explorer des espaces mathématiques imaginaires encore mal compris à travers un ensemble d'installations sonores et visuelles. Attardons-nous sur les « Paysages des géométries de Thurston ». De quoi s'agit-il? Formulé en 1907, le théorème de Klein, Poincaré et Koebe stipule que toute surface (les mathématiciens parlent de variété de dimension 2) peut être munie de l'une des trois géométries suivantes: euclidienne, sphérique ou hyperbolique.

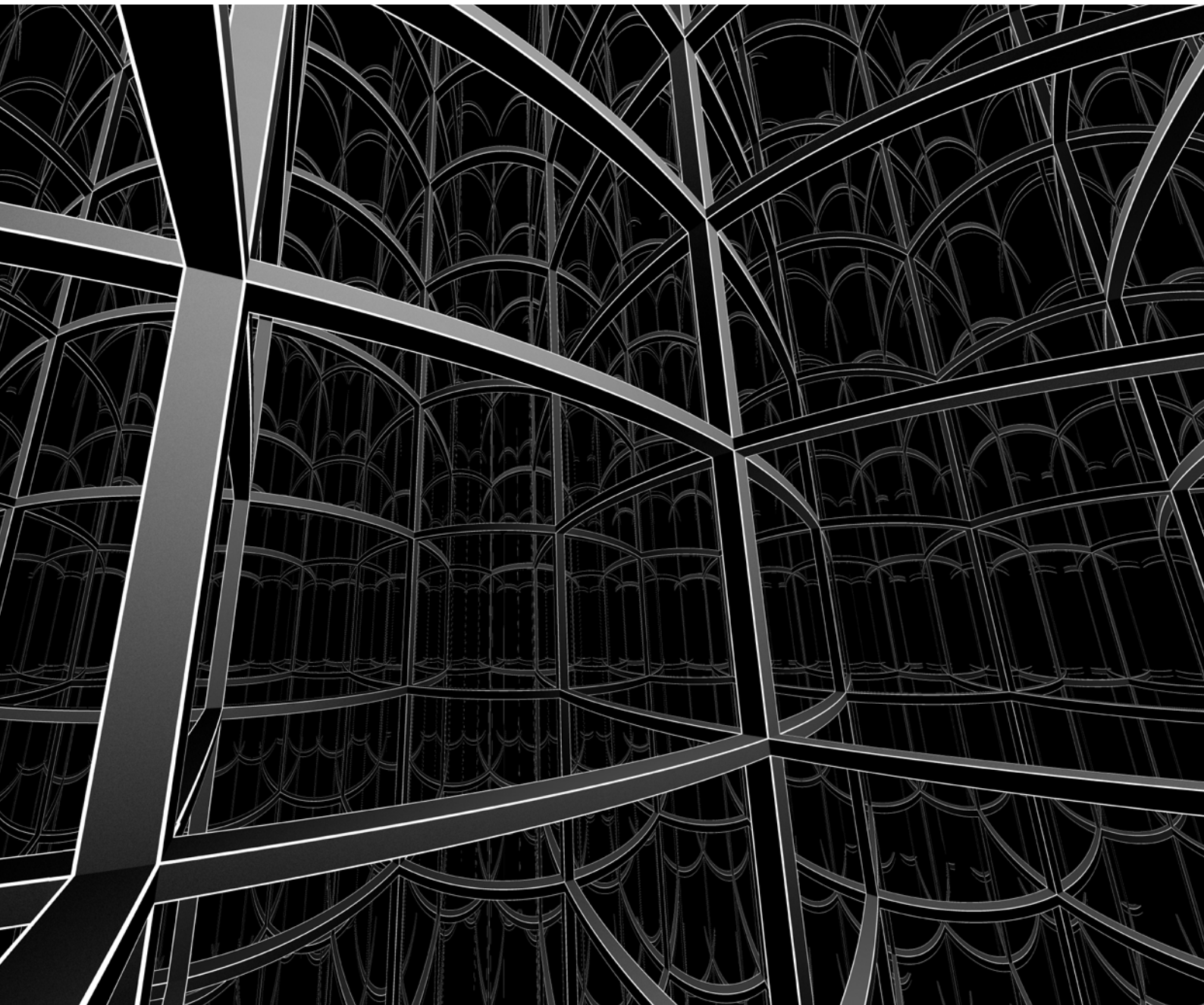
L'affaire se complique quand on s'intéresse aux variétés de dimension 3. En 2003, le Russe Grigori Perelman démontrait une conjecture émise par l'Américain William Thurston selon laquelle il est possible de découper toute variété de dimension 3 en

La géométrie H^2E^1 telle que vous ne l'avez jamais vue! Elle est une des huit géométries qui permettent de décrire des variétés tridimensionnelles.

fragments que l'on peut décrire à l'aide d'une géométrie parmi huit. Aux trois précédentes, notées (en trois dimensions) respectivement E^3 , S^3 et H^3 , s'ajoutent S^2E^1 , H^2E^1 , SOL , NIL et SL_2 .

Ces géométries décrivent ainsi huit espaces fondamentaux qui s'offrent aux explorations des mathématiciens. Dans les années 1990, l'école de William Thurston, au Geometry Center, à l'université du Minnesota, aux États-Unis, avait proposé de représenter ces géométries en dessinant les paysages que verrait un visiteur à l'intérieur de ces espaces. Cette école était parvenue à simuler numériquement trois des géométries (sphérique S^3 , euclidienne





E^3 et hyperbolique H^3). Les cinq autres géométries sont restées durant plus de vingt ans des problèmes ouverts, jusqu'aux travaux récents de Pierre Berger, à l'interface des mathématiques fondamentales et numériques. Dans cette exposition sont présentés des paysages dans les huit géométries de Thurston, sept d'entre elles étant traitées rigoureusement par un logiciel créé à cet effet. À l'instar d'Einstein sur son rayon, on comprend mieux les espaces en se plaçant à l'intérieur.

Cette visualisation d'espaces totalement abstraits nécessite d'y insérer des objets élémentaires, en l'occurrence une série de polyèdres identiques. On peut aussi

suivre le trajet d'un rayon lumineux qui respecte la géométrie de l'espace: rectiligne dans E^3 , la lumière est déviée dans les autres géométries et peut, selon la courbure, s'enrouler. Devant chaque photographie, qui est plus qu'une simple simulation numérique, le public est confronté à une architecture intrigante qui le conduit à s'interroger sur son propre espace.

Une autre installation propose une démarche similaire, mais avec du son. Au centre d'un cube dont des tableaux noirs constituent certaines faces, l'auditeur perçoit les sons captés par 60 micros répartis dans l'institut, puis traités mathématiquement et informatiquement pour simuler le

plongement du bâtiment dans l'espace mathématique noté $\mathbb{R}^3/\mathbb{Z}^3$. Une sélection de modèles mathématiques de l'institut, de courtes vidéos définissant les variétés d'espaces et d'autres installations encore complètent l'exposition. En fin de compte, elle vous offre l'occasion de confronter votre imagination à celle des mathématiciens. Laquelle des deux est la plus illimitée? ■

*Esthétopies, à l'institut Henri-Poincaré,
Paris, du 8 mars au 8 juillet 2017.
<http://esthetopies.ihp.fr>*



Retrouvez la rubrique
Art & science sur
www.pourlascience.fr

LES AUTEURS



JEAN-MICHEL COURTY
professeur de physique
à l'université
Pierre-et-Marie-Curie, à Paris



ÉDOUARD KIERLIK
également professeur
de physique à l'université
Pierre-et-Marie-Curie

UNE VISION PROGRESSIVE... PAS SI NETTE

Les verres progressifs sont pour les presbytes une grande invention. Mais quelle que soit leur qualité, il leur est impossible de corriger complètement les défauts de la vision.

Dès le Moyen Âge, on savait corriger, à l'aide de lunettes constituées de verres grossièrement polis, la myopie ou l'hypermétropie – pour lesquelles l'œil voit flou respectivement de loin ou de près. Mais que faire face à la presbytie, qui vient avec l'âge et qui est due à la perte progressive de la capacité de « mise au point » de l'œil, l'accommodation ? Depuis une cinquantaine d'années, on réalise des verres dits progressifs – et plus récemment encore des lentilles de contact multifocales – qui améliorent beaucoup le confort de vision des personnes atteintes de ces troubles. Mais de tels dispositifs sont difficiles à concevoir. De plus, ils ne sauraient nous rendre une vue parfaite. Pourquoi ?

CORRIGER LA MISE AU POINT

Idéalement, lorsque l'œil est au repos, l'effet combiné de l'interface courbe air-cornée et de la lentille que constitue le cristallin focalise l'image d'un objet lointain (nous dirons « à l'infini ») sur la rétine.

En déformant son cristallin, l'œil fait varier sa puissance optique (les fameuses « dioptries ») et peut ainsi former l'image d'objets plus proches. C'est l'accommodation. Pour un œil jeune, le point le plus distant de vision nette, ou *punctum remotum*, se situe à l'infini, tandis que le point de netteté le plus proche, ou *punctum proximum*, est à environ 7 centimètres.

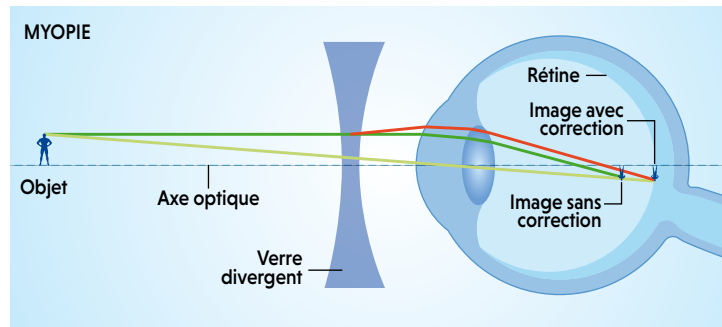
Chez les myopes, l'œil focalise trop : ils voient trouble au-delà d'une certaine distance, mais voient net de plus près. On corrige facilement ce défaut en ajoutant une lentille divergente devant l'œil.

Inversement, les hypermétropes ont des yeux qui ne focalisent pas assez. Même pour voir à l'infini, leurs yeux doivent travailler et ils voient mal de près. La correction consiste alors à ajouter une lentille

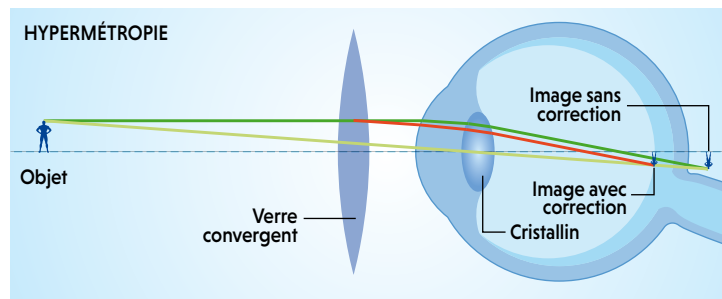


VUE CORRIGÉE

Des verres divergents, plus épais en leur périphérie qu'en leur centre, permettent de corriger la vision d'un myope. Chez une telle personne, l'œil non corrigé focalise trop et forme l'image en avant de la rétine. Chez un hypermétrope, dont l'œil ne focalise pas assez et forme donc l'image en arrière de la rétine, ce sont des verres convergents (analogues à des loupes, plus minces en leur périphérie qu'en leur centre) qui assurent la correction.



- Trajet du rayon lumineux sans verre correcteur
- Trajet du rayon lumineux avec verre correcteur
- Trajet d'un rayon lumineux passant par le centre optique (non dévié, avec ou sans verre correcteur)



Même les superhéros peuvent avoir des défauts de vision ! Les verres corrigeant la myopie sont des lentilles divergentes, et font donc apparaître les yeux plus petits. L'effet est inverse avec les verres corrigeant l'hypermétropie, qui sont convergents, comme les loupes.

convergente. Mais, avec l'âge, les capacités d'accommodation diminuent et le *punctum proximum* s'éloigne. À plus de 50 centimètres, il devient impossible de lire dans de bonnes conditions. C'est la presbytie. Et que dire quand, après une opération de la cataracte, qui remplace le cristallin opacifié par un cristallin artificiel, l'accommodation n'est plus du tout possible ?

Ainsi, nombre de personnes ont besoin d'au moins deux corrections différentes : une pour la vision de près et une pour la vision de loin. Que faire dans ce cas ? Changer de lunettes selon ses besoins ? Ce n'est plus nécessaire aujourd'hui, grâce à des dispositifs qui assurent simultanément plusieurs corrections.

C'est le cas des lentilles de contact multifocales. Dans leur version de base, la

région centrale de la lentille assure la correction de loin tandis que la périphérie se charge de la correction de près. Lorsqu'on regarde une scène lointaine (plus de 5 mètres) ou proche (30 centimètres), deux images, correspondant aux rayons lumineux qui traversent le centre ou la périphérie de la lentille, se superposent alors sur la rétine. Si l'une est nette, l'autre est très floue : le cerveau fait le tri et ne conserve que l'image nette.

Cette solution, utile pour ceux qui ont besoin de fortes corrections, a toutefois quelques désavantages : d'une part, la présence d'un halo dû à l'image floue ; d'autre part, aux distances intermédiaires, la présence simultanée de deux images un peu floues que le cerveau peine à discriminer.

Lorsque les corrections nécessaires ne sont pas très fortes, il y a une solution plus simple. La plupart du temps, pour voir de loin, le regard traverse la partie supérieure du champ de vision. Et pour voir de près, le regard traverse généralement sa partie inférieure. On peut donc concevoir un dispositif qui corrige différemment dans sa partie supérieure et dans sa partie >

Les auteurs ont dernièrement publié : **En avant la physique!**, une sélection de leurs chroniques (Belin, 2017).



> inférieure. Ce sont par exemple les demi-lunettes, qui ne couvrent que la partie basse du champ de vision et corrigent donc uniquement de près, ou encore les lunettes à double foyer, qui corrigent à la fois de près et de loin.

Une stratégie analogue est possible pour les lentilles de contact, mais il faut qu'elles restent orientées correctement. À cette fin, le bas de la lentille est légèrement lesté. Lorsque l'œil bouge dans son orbite, il glisse sur la lentille qui reste à peu près en place. Cette dernière se déplace donc relativement à la cornée. Ainsi, une partie différente de la lentille corrige la vision selon la direction du regard.

Le souci avec les verres ou lentilles à double foyer est que la démarcation entre les deux zones est brutale. En outre, il se peut pour les presbytes que le *punctum proximum* de la vision de loin soit plus éloigné que le *punctum remotum* de la vision de près. Autrement dit, aux distances intermédiaires, par exemple celle qui correspond à un écran d'ordinateur ou à bout de bras, c'est trop près pour la vision de loin, mais trop loin pour la vision de près!

CORRECTION GRADUELLE

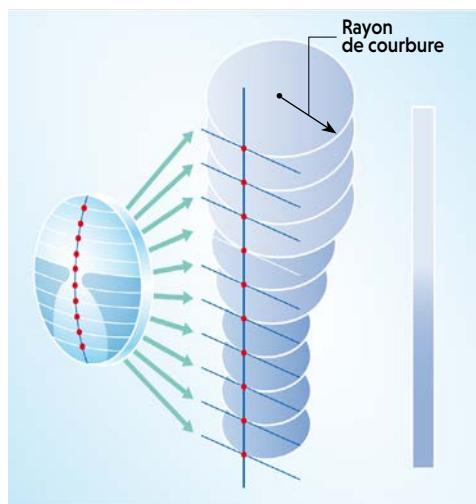
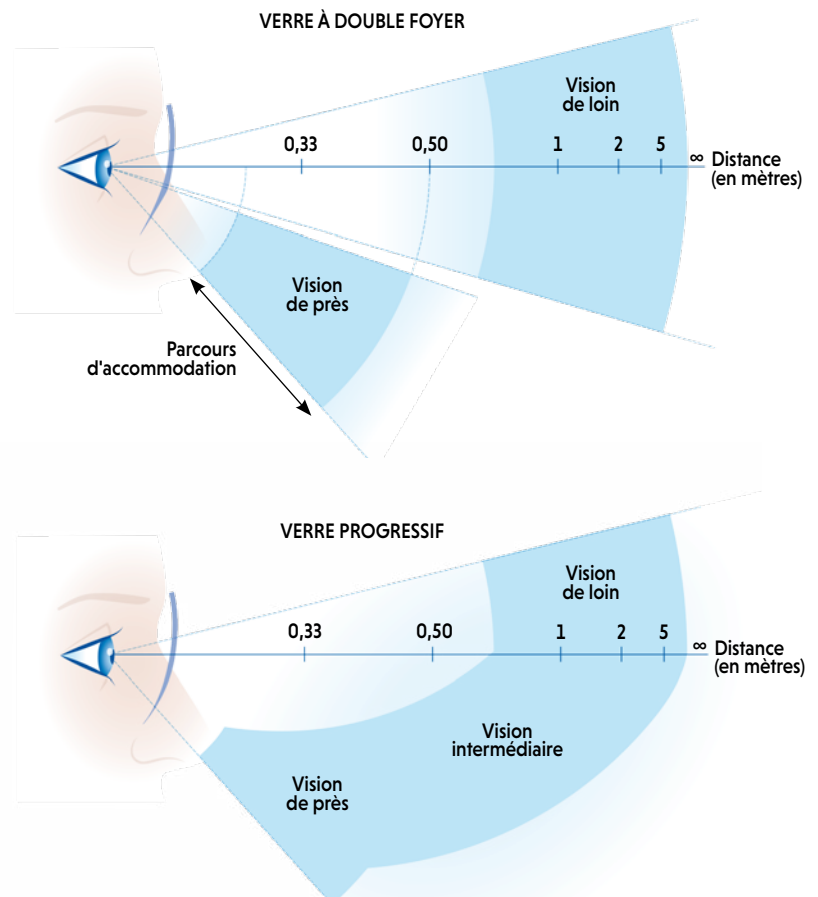
Pour y remédier, on a conçu des verres ou lentilles à triple foyer. Mais aujourd'hui, avec les progrès techniques, on fait mieux: on fabrique des verres dont la puissance optique varie progressivement le long de leur surface. Cela signifie que le rayon de courbure des interfaces air-verre (ou lentille-cornée) évolue continuellement à la surface du verre.

La conception et la fabrication d'un tel verre n'est pas facile. Pourquoi? En chacun de ses points, une surface quelconque est similaire à celle d'un ovoïde: elle présente différents rayons de courbure selon la direction considérée. Les valeurs minimale et maximale définissent les «rayons de courbure principaux» au point considéré. Or un ovoïde n'est pas une surface adéquate du point de vue optique, car cette forme engendre de l'astigmatisme: les images produites sont brouillées selon certaines directions. C'est pourquoi les verres et les lentilles les plus simples ont des surfaces sphériques, où les deux rayons de courbure principaux ont la même valeur.

Essayons maintenant de concevoir un verre progressif. Pour simplifier, considérons seulement une seule interface air-verre. Intéressons-nous aux deux zones du verre que traverse le regard pour voir de loin et de près. La seconde est plus basse que la première et, à cause de la

DU BIFOCAL AU PROGRESSIF

Un verre à double foyer, ou bifocal, assure dans sa partie supérieure la vision de loin d'un œil presbyte et dans sa partie inférieure la vision de près. Mais en général, il reste une gamme de distances intermédiaires pour lesquelles l'œil ne peut pas accommoder et voit donc flou. Un verre progressif comble cette lacune sur une partie du champ de vision; cette partie est assez étroite dans la direction latérale (voir la figure du bas). Les deux schémas ci-dessous indiquent (en bleu) les zones de netteté possible en fonction de la direction du regard dans le plan vertical.



Le rayon de courbure d'un verre progressif est représenté ci-contre (par des disques de rayon correspondant) en différents points du verre le long d'une verticale centrale. La courbure varie progressivement, de faible en haut à forte en bas. Les zones du verre représentées en bleu foncé correspondent à des zones non sphériques qui brouillent les images (astigmatisme).

convergence des yeux pour la vision de près, n'est pas à sa verticale, mais plus proche du nez. Sur le couloir qui relie ces deux zones, il est tout à fait envisageable de modeler la surface pour qu'elle soit localement proche d'une calotte sphérique et que son rayon de courbure passe continûment de la valeur requise pour la correction de loin à celle requise pour la correction de près.

IMPOSSIBILITÉ GÉOMÉTRIQUE

En revanche, il est impossible d'imposer que les deux rayons de courbure principaux soient égaux sur l'ensemble de la surface. Par conséquent, sur une partie du verre, les rayons de courbure principaux seront nécessairement différents, ce qui produira de l'astigmatisme. C'est donc au verrier de trouver le compromis pour garantir le meilleur confort visuel possible.

Il y a deux grandes options. L'une est d'avoir, entre les zones de visions proche et lointaine du verre, un couloir où l'astigmatisme est très faible. Cela implique qu'en s'éloignant de ce couloir, ce défaut

BIBLIOGRAPHIE

D. Keeports, **Building a multifocal lens**, *The Physics Teacher*, vol. 51(4), pp. 250-251, 2013.

Collectif, **Les verres progressifs**, *Les Cahiers d'Optique Oculaire*, Essilor Academy Europe, 2006, disponible sur www.essiloracademy.eu

S. S. Lane et al., **Multifocal intraocular lenses**, *Ophthalmology Clinics of North America*, vol. 19(1), pp. 89-105, 2006.

deviendra rapidement très important et aura un impact négatif sur la vision périphérique. L'autre option est de s'autoriser des défauts plus également répartis sur toute la surface, mais qui seront d'amplitudes plus faibles. Le verre progressif qui corrige parfaitement tout le champ de vision des presbytes n'existe pas!

Un autre problème, d'ordre plus pratique, est lié à l'épaisseur du verre: comme la courbure de la partie supérieure du verre est différente de celle de sa partie inférieure, le haut du verre sera en général plus épais qu'en bas.

Pour obtenir des verres plus minces dans leur partie haute et plus légers, les opticiens ont une astuce qui consiste à incliner verticalement la surface postérieure du verre. On peut le faire de telle façon que la correction optique ne soit pas modifiée; mais cela décale légèrement et verticalement tout le champ de vision. Avec l'existence du couloir de vision sans astigmatisme, c'est l'une des raisons pour lesquelles il vaut mieux s'habituer progressivement aux verres... progressifs. ■

Direction de l'innovation et des relations avec les entreprises

Organisme de formation continue

cnrs
formation
entreprises

→ 200 formations technologiques courtes proposées par le CNRS sur ses plateformes de recherche pour les ingénieurs et les techniciens

→ Domaines de formation

Big data, robotique, énergie, matériaux, biologie, microscopie, spectrométrie, RMN... et plus encore

+ de 1100 stagiaires formés chaque année



Découvrez nos stages sur cnrsformation.cnrs.fr



contact : cfe.contact@cnrs.fr ou +33 (0)1 69 82 44 55

@CNRS_CFE

L'AUTEUR



HERVÉ LE GUYADER
professeur émérite de biologie
évolutive à l'université
Pierre-et-Marie-Curie, à Paris

COMMENT L'OURS POLAIRE A CONQUIS L'ARCTIQUE

Prenez une population ancestrale d'ours bruns sur le déclin, plongez-la dans une période interglaciaire bien chaude, et vous obtiendrez un mammifère aux capacités plus qu'étonnantes.

L'ours polaire (*Ursus maritimus*) est un excellent nageur. L'utilisation de colliers GPS sur des femelles a révélé que certaines parcourent plusieurs centaines de kilomètres dans l'eau glacée en quelques jours! En 2005, des biologistes de l'université d'Anchorage, en Alaska, ont ainsi suivi les déplacements d'une vingtaine d'ourses dans le nord de l'Alaska. Partie le 20 juin de la péninsule de Point Hope, une ourse a nagé 210 km jusqu'au 25 juin, s'est reposée une journée sur un petit iceberg, puis a repris sa traversée, parcourant 144 km avant d'atteindre la banquise, le 30 juin. Soit 354 km parcourus en 9 jours, à une vitesse moyenne de 1,6 km/h, dans une mer à moins de 4°C et sans ravitaillement.

Cet exploit met en évidence les principales adaptations que l'ours polaire a acquises au fil de l'évolution: protection contre le froid, capacités musculaire et

cardiaque étonnantes, gestion énergétique optimale... Aujourd'hui, les études de son génome nous content les originalités de cet athlète extraordinaire, dont les prouesses, connues des Inuits, ont longtemps été considérées comme des exagérations par les Occidentaux. Analysées dans un cadre évolutif, ces données non seulement étayent le scénario d'une adaptation rapide à un milieu extrême, mais invitent aussi à revisiter la différence entre le normal et le pathologique.

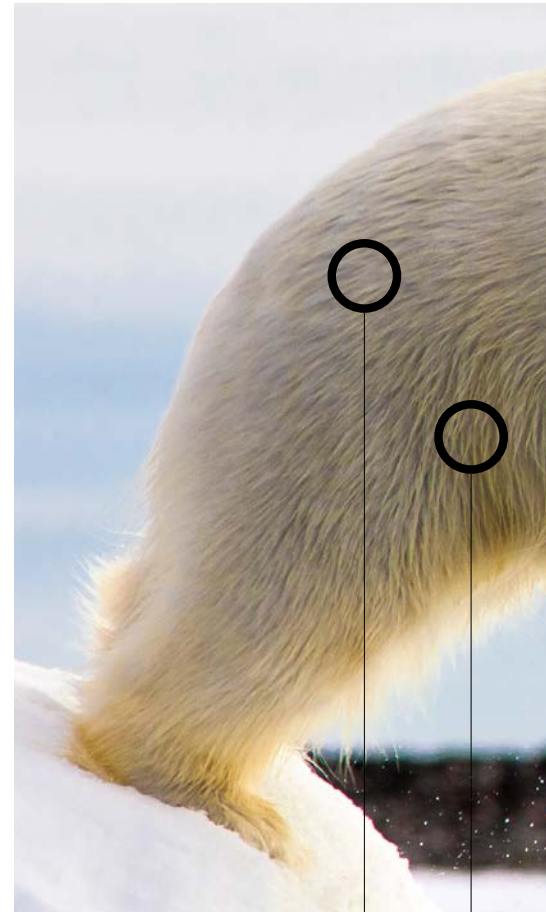
En 2014, un consortium international a précisé l'origine évolutive d'*Ursus maritimus* en étudiant les phylogénies moléculaires de cette espèce et de l'ours brun *Ursus arctos* – le grizzly américain –, c'est-à-dire en recherchant des liens de parenté à l'aide de séquences de gènes communs aux deux espèces. Résultat: l'ours polaire s'est différencié de l'ours brun il y a environ 400 000 ans. D'un point de vue évolutif, cette séparation

*Ursus maritimus*

Poids : entre 400 et 600 kg (mâle),
entre 200 et 350 kg (femelle)

Taille : 2 à 3 m (mâle), 1,8 à 2 m (femelle)

Durée de vie moyenne : 25 à 30 ans



3 à 4 g/l de cholestérol et 2 à 3 g/l de triglycérides dans le sang : une charge lipidique sanguine qui serait fatale à la plupart des mammifères (le sang humain porte de l'ordre de 1 g/l de cholestérol et 1,5 g/l de triglycérides).

Couche de graisse sous-cutanée comparable à celle des autres mammifères, malgré le froid polaire

Grande taille, tête profilée, fourrure claire. Ces traits ont pu être vite acquis, les ours étant très plastiques, comme les chiens : parmi les grizzlys, la sous-espèce kodiak atteint plus de 3 m, alors que l'ours des Alpes mesure environ 1,70 m – une différence du même ordre que celle entre un saint-bernard et un chihuahua.

EN CHIFFRES

687 km

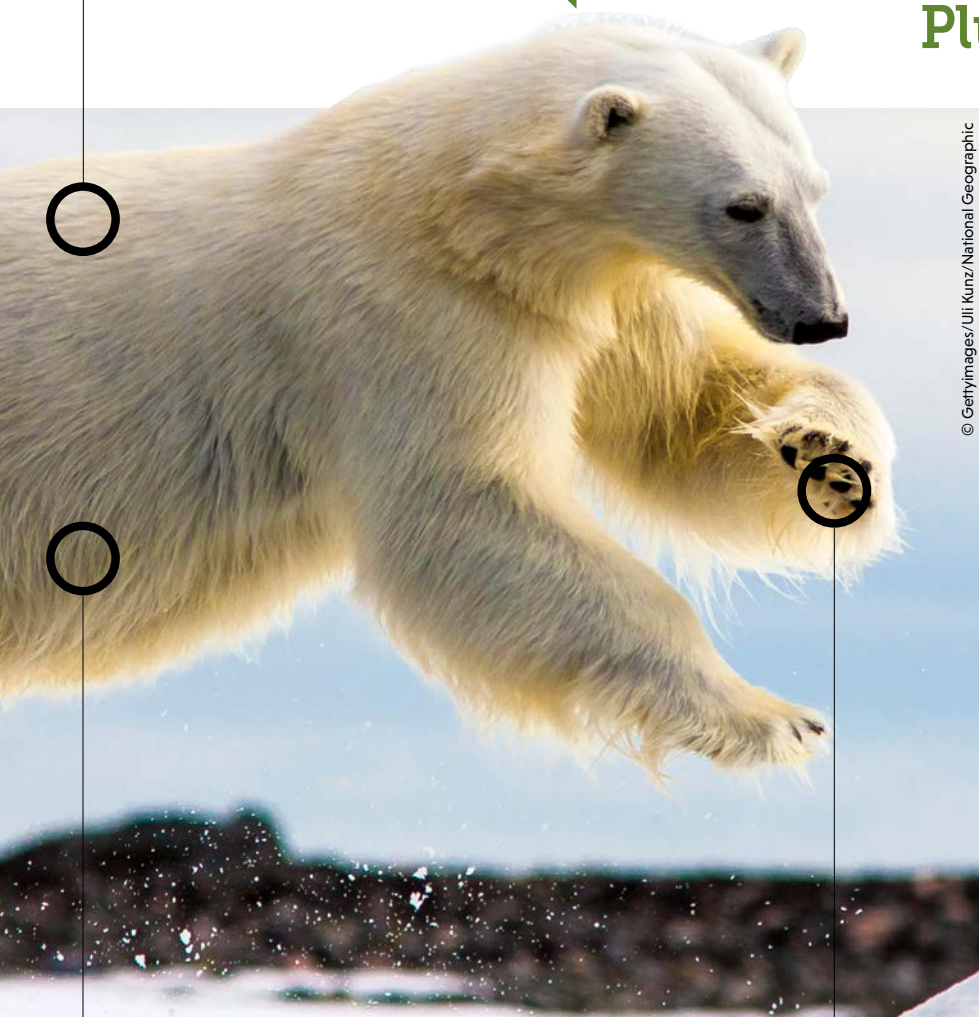
C'est la distance qu'a parcourue en neuf jours une femelle à la nage dans la mer de Beaufort en 2008.

26 000

ours polaires environ dans le monde, répartis en 19 sous-populations.

Plus de 1 million

de km² de banquise arctique en moins en mars 2017 par rapport à la moyenne des relevés effectués en mars sur la période 1981-2010.



© Gettyimages/Uli Kunz/National Geographic

Peau noire et poils blancs.

L'ours polaire est un animal leucique : les cellules pigmentaires – les mélanocytes – colonisent sa peau, mais pas les follicules pileux, tandis que chez un animal albinos, les mélanocytes colonisent bien les poils, mais ne produisent pas leur pigment, la mélanine.

Capable de jeûner plusieurs jours, puis d'ingérer jusqu'à 20 % de son poids en viande et graisse.

est très récente : elle s'est produite il y a environ 20 000 générations. D'ailleurs, entre les deux espèces, le flux de gènes n'a jamais été interrompu.

Deux événements ont pu favoriser cette spéciation. D'une part, la date de divergence correspond à une période chaude – le plus long interglaciaire (50 000 ans) de ce dernier demi-million d'années. D'autre part, grâce à de récents algorithmes, les chercheurs ont estimé la taille des populations d'ours avant et après la divergence. Ils ont constaté qu'avant la divergence, la population d'ours bruns s'est effondrée. Une

hypothèse est que, profitant du recul de la banquise, une population ancestrale d'ours bruns aurait colonisé des régions septentrionales, auparavant inhabitables. La raréfaction des animaux aurait alors favorisé l'isolement de petites populations au fur et à mesure que la banquise s'étendait à nouveau durant le refroidissement climatique.

UN TISSU ADIPEUX... NORMAL

Comme chez beaucoup d'animaux polaires, l'isolation thermique est réalisée par une couche sous-cutanée de graisse. Mais, si le tissu adipeux des cétacés et des phoques – le « blanc » –, riche en collagène et très vascularisé, constitue un isolant d'une grande efficacité, celui des ours polaires n'a rien de particulier : sa fonction est avant tout de stocker de l'énergie, comme chez l'ours brun et les autres mammifères non polaires. La spéciation de l'ours polaire serait-elle trop récente pour qu'une nouveauté anatomique de cette importance ait pu être sélectionnée ?

Néanmoins, les ours polaires se nourrissent surtout du blanc des phoques, qu'ils assimilent à plus de 80%. Comment survivent-ils à un régime alimentaire si gras ? C'est là qu'interviennent deux adaptations clés. Leur charge lipidique sanguine semble hors du commun : entre 3 et 4 grammes de cholestérol par litre et entre 2 et 3 grammes de triglycérides par litre, ce qui serait fatal à la plupart des mammifères. Parallèlement, l'ours polaire passe par plusieurs états physiologiques : l'hibernation, le jeûne, l'appétit et l'hyperphagie (l'ingestion de très grandes quantités de nourriture).

Le jeûne est essentiel : l'animal reste actif, mais sans sensation de faim, ce qui >

> lui permet de nager si loin d'une traite. Puis il devient hyperphagique, restaurant ainsi ses réserves en un minimum de temps. Cette alternance se produit à plusieurs reprises, le jeûne s'installant après dix jours de diète. L'animal peut donc nager longtemps en attendant la formation de la banquise, puis y faire ses réserves quand les phoques sont abondants et faciles à chasser.

Lors de l'étude de 2014, le séquençage de plusieurs génomes d'ours polaires a permis de mieux comprendre les processus évolutifs. Les biologistes ont recherché les gènes dits « sous sélection positive forte », c'est-à-dire qui présentent des mutations amenant un avantage sélectif. Ils ont ensuite déterminé leurs fonctions, puis les ont comparés avec les gènes homologues d'autres mammifères : l'ours brun, le panda, mais aussi, bien sûr, l'homme.

Neuf des vingt gènes les plus fortement sélectionnés sont associés aux fonctions cardiovasculaires. Parmi eux, le gène *TTN* code une protéine, la titine, responsable de la stabilité mécanique et de l'élasticité de l'unité musculaire de base, le sarcomère. On ne sait pas quel avantage précis les mutations sur ce gène ont apporté à l'ours, mais chez l'homme, des mutations sont associées à des cardiomyopathies dilatées : les ventricules, dilatés, n'assurent plus efficacement leur rôle de pompe, entraînant une insuffisance cardiaque.

De même, deux gènes jouent sur la couleur de la fourrure. En particulier, le gène *LYST* est impliqué dans le trafic des pigments dans le cytoplasme des mélanocytes – les cellules qui pigmentent la peau, les poils et l'iris des yeux. Chez l'homme, les mutations spécifiques à l'ours polaire sont associées à une maladie causant la dépigmentation des poils et des yeux, la maladie de Chediak-Higashi.

UN GÈNE «ANTIMALBOUFFE»?

Sans surprise, de nombreux gènes sont associés au développement du tissu adipeux et au métabolisme des graisses. Le gène phare est l'*APOB*, qui code l'apolipoprotéine-B, un constituant de la lipoprotéine LDL, transporteur de triglycérides et de cholestérol dans le sang surnommé « mauvais » cholestérol à cause du risque associé de maladie cardiovasculaire. Or, quand on compare la séquence du gène de l'ours polaire avec celle du grizzly, on remarque que cinq des neuf mutations surviennent dans une région du gène impliquée dans le transport des lipides.

L'ARCTIQUE DE L'OURS POLAIRE

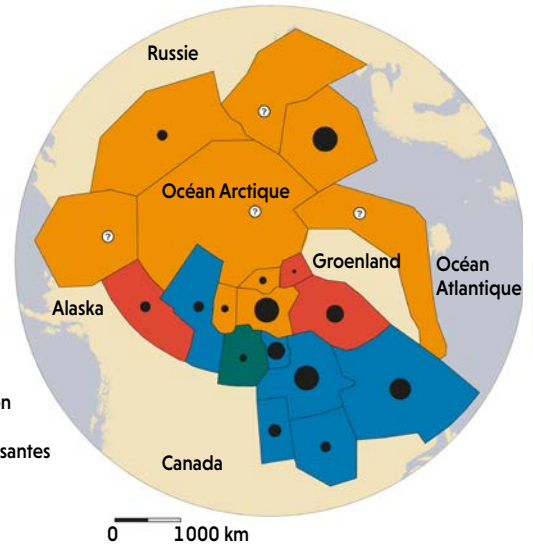
Embématique de l'Arctique, l'ours polaire est le mammifère qui souffre le plus du réchauffement climatique. En 2017 en effet, l'étendue maximale annuelle (atteinte en mars) de son territoire de chasse, la banquise, est la plus faible enregistrée ces 38 dernières années.

Taille des populations
(en nombre d'ours)

- inférieur à 200
- 200-500
- 500-1000
- 1000-1500
- 1500-2000
- 2000-2500
- 2500-3000
- ⊙ inconnu

Tendances

- Stable
- En augmentation
- En déclin
- Données insuffisantes



Les physiologistes postulent que ces mutations favorisent l'évacuation rapide du cholestérol du sang, comme si l'ours polaire portait un gène « antimalo bouffe » lui permettant de survivre à ce régime alimentaire.

A-t-on pour autant expliqué les principales adaptations de l'ours polaire ? Le raisonnement simpliste serait : les gènes sont les seuls responsables. Or, on peut maintenant réaliser une expérience de pensée : comme on connaît les mutations originales spécifiques à l'ours polaire et les fonctions des principaux gènes sous sélection positive, on peut prédire, avec une assez bonne confiance, l'impact fonctionnel qui résulterait si on remplaçait les gènes humains par ces gènes d'ours polaire. Le résultat est fascinant. Dans plus de la moitié des cas, il s'ensuivrait des dommages sévères, avec athérosclérose et cardiomyopathie !

Ainsi, le fonctionnement des gènes dépend de leur « environnement » – c'est-à-dire des autres gènes du génome et des caractéristiques physiologiques générales de l'animal. Ce qui est normal d'un côté devient pathologique de l'autre. Les sectateurs du posthumanisme, qui veulent jouer avec le génome humain, devraient y réfléchir à deux fois ! ■

BIBLIOGRAPHIE

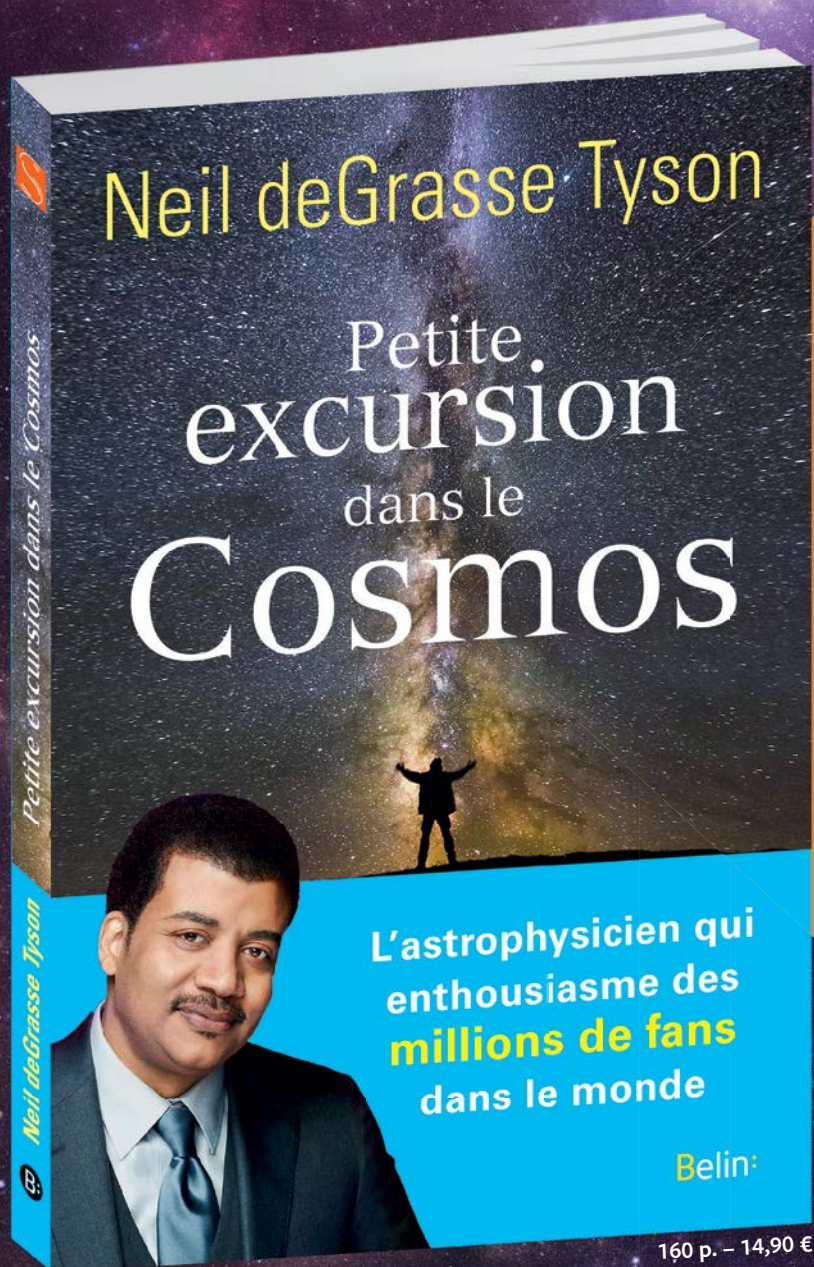
S. Liu *et al.*, **Population genomics reveal recent speciation and rapid evolutionary adaptation in polar bears**, *Cell*, vol. 157, pp. 785-794, 2014.

J. A. Cahill *et al.*, **Genomic evidence for island population conversion resolves conflicting theories of polar bear evolution**, *PLoS Genet.*, 2013.

W. Miller *et al.*, **Polar and brown bear genomes reveal ancient admixture and demographic footprints of past climate change**, *PNAS*, 2012.

A. M. Pagano *et al.*, **Long-distance swimming by polar bears (*Ursus maritimus*) of the southern Beaufort Sea during years of extensive open water**, *Can. J. Zool.*, vol. 90, pp. 663-676, 2012.

Explorez les mystères de l'univers avec la star de l'astrophysique !



Quelle est l'histoire de l'univers?
Quelles sont les lois physiques
et les forces qui gouvernent
la matière? Qu'y a-t-il entre les
galaxies? Et entre les planètes?
Que sait-on sur la mystérieuse
matière noire et l'étrange énergie
sombre? Et d'où viennent les
éléments qui nous constituent tous?

Avec la verve, l'humour et l'esprit
qui le caractérisent, Neil deGrasse
Tyson, en digne héritier de Carl
Sagan, rend accessible à tous
les principes les plus compliqués
de l'astrophysique. Une invitation
irrésistible à lever la tête pour
admirer l'immensité de l'univers.

Dans la collection

S SCIENCE
À PLUMES

Belin:
ÉDITEUR

belin-editeur.com • [f /EditionsBelin](https://www.facebook.com/EditionsBelin) • [@editions_belin](https://twitter.com/editions_belin)

L'AUTEUR



HERVÉ THIS
physicochimiste, directeur
du Centre international
de gastronomie moléculaire
AgroParisTech-Inra
et directeur scientifique
de la fondation Science
et culture alimentaire
(Académie des sciences)



Retrouvez le blog
Vive la connaissance!
d'Hervé This sur
[www.scilogs.fr/
vivelaconnaissance/](http://www.scilogs.fr/vivelaconnaissance/)

BEURRE ET SUCRE: LE BONBON ULTIME

Pour des raisons liées à l'évolution, nous avons un très fort penchant pour le sucré et le gras. Assumons-le pour confectionner une friandise jusqu'au-boutiste.

Les humains, malgré leurs prétentions intellectuelles, conservent une composante animale: ils mangent, boivent, excrètent, se reproduisent... Mieux, ce sont des primates, et, comme tels, ils consomment des fruits parce qu'ils ont coévolué avec les plantes: en contrepartie du sucre (de l'énergie pour l'organisme) obtenu avec les fruits, ils disséminent les graines, donc assurent la propagation des espèces végétales.

Il n'est alors pas étonnant qu'un nouveau-né humain et un bébé singe fassent les mêmes mimiques de plaisir quand on leur met sur les lèvres des solutions sucrées: leur organisme est programmé pour reconnaître les sucres comme bénéfiques.

Et le goût que nous avons pour les féculents? La digestion des polysaccharides que sont les amyloses et les amylopectines de l'amidon conduit à la libération prolongée de glucose, qui passe dans le sang. À nouveau, il y a du sucre... On suppose que l'individu, qui n'a pas de récepteurs sensoriels pour des polysaccharides (ces derniers n'ont pas de goût), acquiert rapidement un réflexe conditionné qui le conduit à apprécier ces ingrédients alimentaires.

Quant aux matières grasses, l'évolution nous a également dotés de mécanismes pour les reconnaître et les consommer: les lipides sont essentiels à la construction des membranes des cellules. Là encore, un conditionnement a sans doute lieu. Cependant, il y a une dizaine d'années, on a découvert dans la bouche des récepteurs pour des acides gras insaturés à longues chaînes, associés à des enzymes de type lipase qui détachent

Au beurre et au sucre,
on peut ajouter des
colorants, des arômes...



des acides gras des triglycérides, dont sont constituées les graisses (rappelons qu'il n'y a pas d'acides gras dans les graisses, huiles, etc., mais presque uniquement des triglycérides). Finalement, le goût des humains pour les graisses est si puissant qu'ils en consomment en excès, ce qui explique au moins en partie l'actuelle pandémie d'obésité.

DEUX PILIERS DU PLAISIR

Que faire de ces données? Observer nos penchants alimentaires, et bien voir que, dans tout ce que nous aimons – le chocolat, les glaces, les rillettes, les viandes persillées, la sauce mayonnaise, le foie gras et tant d'autres délices –, il y a en abondance les deux piliers du plaisir que sont les sucres et les graisses.

Par exemple, la sauce mayonnaise est une préparation des plus hypocrites, l'huile y étant cachée sous la forme d'une émulsion: manger de l'huile serait intellectuellement inacceptable, mais on accepte de manger de la mayonnaise, pourtant faite de 90 % d'huile. Le chocolat? Sa composition se résume presque entièrement à du gras et du sucre. Certes, il y a des matières végétales et ce peu de magnésium qui donne bonne conscience à certains, mais cette contribution à la composition est extrêmement réduite.

Pourrait-on aller encore plus loin pour satisfaire nos goûts innés? Au mépris des règles hygiénistes ou diététiques, et en faisant l'hypothèse que nous saurons nous raisonner, je propose les «bonbons ultimes», faits uniquement de graisse et de sucre (*voir la recette ci-dessous*).

Bien sûr, il n'est pas interdit d'embellir un peu la préparation avec des colorants, des molécules sapides (un peu de sel, de l'acide citrique...) ou des molécules odorantes (qui se dissoudront parfaitement dans les matières grasses). Ce faisant, nous aurons été un peu hypocrites... mais pas tellement plus que ceux qui mangent du chocolat! ■



LA RECETTE

- 1 Dans un mortier ou dans le bol d'un mixeur, on place environ 50 grammes de beurre.
- 2 Puis, au pilon (ou au mixeur), on incorpore autant de sucre glace que l'on peut, soit environ 200 grammes.
- 3 On étale la pâte obtenue en une galette de un centimètre d'épaisseur.
- 4 On met cette galette au réfrigérateur pendant environ une demi-heure, pour lui donner de la tenue.
- 5 On la découpe ensuite en petits dés de un centimètre de côté.

TOUTES LES RICHESSES DE LA BIOLOGIE



Biologie de Peter Raven est une référence internationalement reconnue pour l'apprentissage et l'enseignement de la biologie.

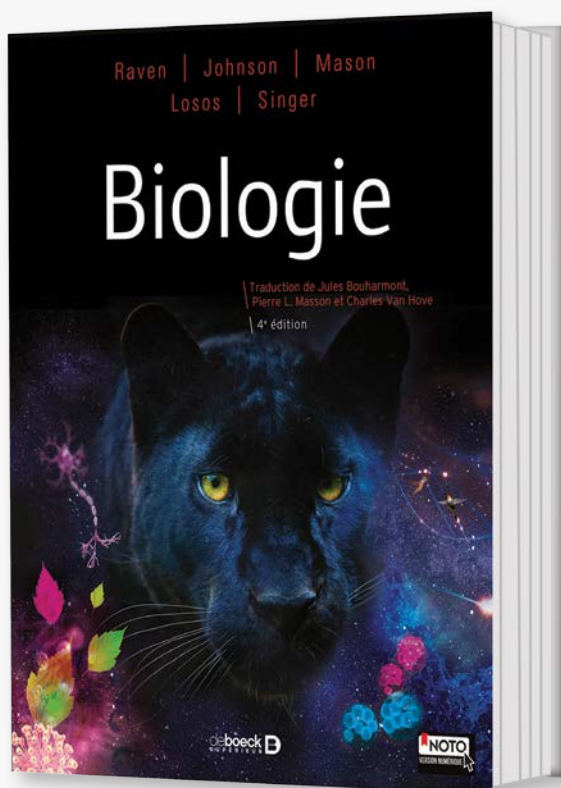
Très didactique, il propose une approche progressive et complète de cette discipline en permanente évolution.

Cette nouvelle édition, actualisée et encore améliorée, a été relue par des équipes belges (ULB, ULG, U.Namur) et française (UPMC Paris VI).

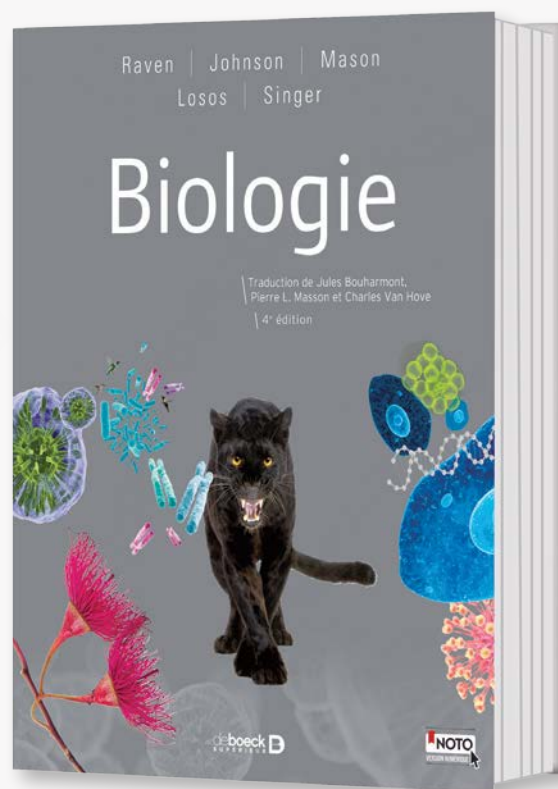
Vous enseignez la biologie dans le supérieur et souhaitez découvrir cet ouvrage ?

Contactez-nous via notre site.

- + de 2500 photos et schémas en couleurs
- de nombreux exercices corrigés
- un glossaire de plus de 800 termes



Broché cousu • 9782807306158 • 1480 p. • 75 €



Couverture cartonnée • 9782807306097 • 1480 p. • 89 €



Emportez votre ouvrage partout avec vous grâce à la version numérique offerte !

A PICORER



Retrouvez tous
nos articles sur
www.pourlascience.fr

P.58

POÉCILIIDÉS

Tel est le nom savant d'une famille de petits poissons d'eau douce très appréciés des aquariophiles, famille à laquelle appartiennent les mollys, les guppys, les porte-épée...

P.24

1 000 000 £

C'est le prix affiché d'une œuvre d'Ilma Gore exposée dans une galerie londonienne l'année dernière. Intitulé *Make America Great Again*, le tableau représente Donald Trump dans le plus simple appareil et doté de caractéristiques physiques peu avantageuses. La censure haineuse dont il a fait l'objet sur les réseaux sociaux a fait s'envoler la cote de l'artiste.

P.7

« Nous observons que les performances cognitives, en termes de vitesse et de complexité, augmentent jusqu'à 25 ans et sont relativement stables jusqu'à 60 ans, puis déclinent. »

NICOLAS GAUVRIT
mathématicien et psychologue à l'EPHE, à Paris

P.40

5 %...

... **d**es injections médicales dans le monde ne sont pas réalisées dans des conditions stériles, d'après l'OMS ; qui estime que 315 000 personnes ont été ainsi infectées par le virus de l'hépatite C en 2014.

P.92

687 KILOMÈTRES

Une ourse polaire a parcouru à la nage cette distance en 9 jours en mer de Beaufort, dans l'océan Arctique – une observation qui date de 2008. Il subsiste aujourd'hui environ 26 000 individus de cette espèce (*Ursus maritimus*) remarquablement adaptée, qui s'est différenciée de l'ours brun américain (*Ursus arctos*) il y a quelque 400 000 ans.

P.32

ROBOT RACISTE

En 2016, Tay, un *chatbot* développé par Microsoft pour converser avec des jeunes sur la plateforme Twitter, était doté d'une capacité d'apprentissage en continu pour s'adapter aux habitudes de ses interlocuteurs. L'essai a tourné court : au bout de vingt-quatre heures seulement, Tay s'est mis à poster sur la plateforme des tweets à caractère raciste et nazi !

P.66

PORTÉE

Une expérience effectuée dans une vallée des Alpes françaises a montré que la parole ordinaire porte à 40 mètres ; les cris, à 200 mètres ; et le sifflement, à 700 mètres. D'où l'avantage des langues sifflées quand on a oublié son téléphone portable.

**IMAGINÉE PAR LES ÉCRIVAINS,
RÉALISÉE PAR LES PLUS GRANDES NATIONS ...**

LA CONQUÊTE DE L'ESPACE FAIT TOUJOURS RÊVER

Jean-François Clervoy, astronaute,
et **Frank Lehot**, médecin et instructeur des vols
en apesanteur, racontent ici l'histoire fantastique
de l'homme dans l'espace, ponctuée d'anecdotes
originales et de témoignages inédits sur le
quotidien des astronautes.
Hôtels en orbite, conquête de Mars, exploitation
des ressources extraterrestres, ascenseur
spatial... L'aventure ne fait que commencer !

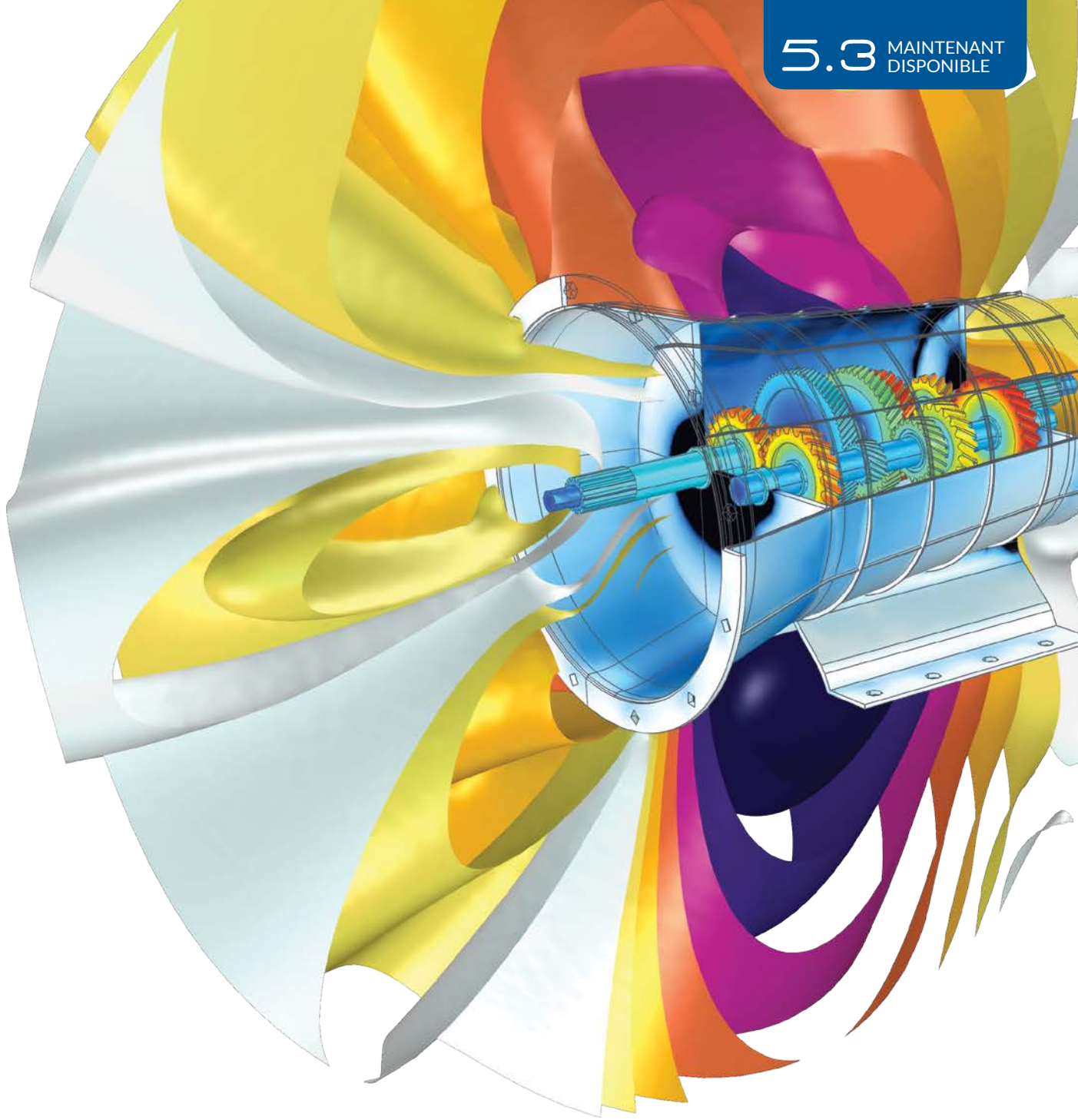


ISBN 9782807315105 - 2^e éd. 2017 - 224 pages - 25 €

Superbe iconographie tout en couleurs

En librairie et sur
www.deboecksuperieur.com

deboeck **B**
SUPÉRIEUR



LA MULTIPHYSIQUE POUR TOUS

avec COMSOL Multiphysics®

Les outils de simulation numérique
viennent de franchir une étape majeure.

Dépassez les défis de la conception avec COMSOL Multiphysics®. Avec ses puissants outils de modélisation et de résolution, obtenez des résultats de simulation précis et complets.

Développez des applications personnalisées à l'aide de l'Application Builder, et déployez-les au sein de votre organisation et auprès de vos clients partout dans le monde, avec une installation locale de COMSOL Server™.

N'attendez plus. Bénéficiez de la puissance des simulations multiphysiques.

comsol.fr/products