

■ POUR LA

SCIENCE

Mars 2016 - n° 461

lascience.fr

Édition française
de Scientific American

La planète X

Comment
une hypothèse farfelue
est devenue crédible



SACRÉE SCIENCE!

16 FÉVRIER > 16 AOÛT 2016

Une exposition étonnante
pleine d'expériences...

QUAI
DES SAVOIRS

39, allées Jules-Guesde Toulouse

www.quaidessavoirs.fr

Tél. : 05 67 73 84 84

Du mardi au dimanche de 10:00 à 18:00

toulouse
métropole

Toulouse en grand !

MUSÉUM
DU DÉPARTEMENT
NEUCHÂTEL



l'Usine
culture et sciences



POUR LA SCIENCE

www.pourlascience.fr

8 rue Férou - 75278 Paris Cedex 06

Groupe POUR LA SCIENCE

Directrice des rédactions : Cécile Lestienne

Pour la Science

Rédacteur en chef : Maurice Mashaal

Rédactrice en chef adjointe : Marie-Neige Cordonnier

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

Dossier Pour la Science

Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin

Développement numérique : Philippe Ribeau-Gésippe

Directrice artistique : Céline Lapert

Maquette : Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy

Correction et assistance administrative : Anne-Rozenn Jouble

Marketing : Laurence Hay et Ophélie Maillet,

assistées de Marie Chaudy

Direction financière et direction du personnel : Marc Laumet

Fabrication : Marianne Sigogne et Olivier Lacam

Presse et communication : Susan Mackie

Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé

Anciens directeurs de la rédaction : Françoise Pétry

et Philippe Boulanger

Conseiller scientifique : Hervé This

Ont également participé à ce numéro :

Maud Bruguère, Damien Chaussende, Aurélien Crida,

Sébastien Guenneau, Éveline Host-Platret, Anne-Lise Lamy,

Anne Masé, Christine Petit, Christophe Pichon, Christine Proust,

Daniel Tacquenot, Loïc Villain

PUBLICITÉ France

Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin

(j.f.guillotin@pourlascience.fr)

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

ABONNEMENTS

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

Courriel : pourlascience@abopress.fr

Téléphone : 03 67 07 98 17

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

COMMANDES DE LIVRES OU DE MAGAZINES :

Pour la Science, 628 avenue du Grain d'Or, 41350 Vineuil

DIFFUSION DE POUR LA SCIENCE

Contact kiosques : À Juste Titres ; Benjamin Boutonnet

Tel : 04 88 15 12 41

Information/modification de service/réassort :

Magazine disponible sur www.direct-editeurs.fr

Canada : Edipresse : 945 avenue Beaumont, Montréal,

Québec, H3N 1W3 Canada.

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

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

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

Tarifs d'abonnement 1 an - 12 numéros

France métropolitaine : 59 euros Europe : 71 euros

Reste du monde : 85,25 euros

SCIENTIFIC AMERICAN

Editor in chief : Mariette DiChristina.

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

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

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

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

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public

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

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

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

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

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

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

duction, d'adaptation et de représentation

réservés pour tous les pays. La marque et le

nom commercial « Scientific American » sont

la propriété de Scientific American, Inc. Li-

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

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

dit de reproduire intégralement ou partiellement

la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du

Centre français de l'exploitation du droit de co-

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



Maurice Mashaal
rédacteur en chef

Une planète de moins, puis une de plus

Une certaine confusion guette depuis quelque temps l'honnête homme qui voudrait juste savoir combien de planètes compte le Système solaire. Depuis 1930 et jusqu'en 2006, c'était clair : il y en avait neuf, à savoir Mercure, Vénus, la Terre, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune et Pluton (de la plus proche du Soleil à la plus lointaine).

En 2006, patatras ! L'Union internationale d'astronomie exclut Pluton, découverte en 1930, du club. Pour quel motif ? Trop petite, d'autant que l'on venait de dénicher, l'année précédente, un corps lointain un peu plus massif, Éris. Voilà donc Pluton déclassée en « planète naine ». Et le Système solaire de se retrouver avec huit planètes...

Lorsqu'on l'aura observée, la planète X devra porter le numéro... 9

Fin de l'histoire ? Que nenni ! Dix ans après, en janvier 2016, deux astronomes travaillant en Californie, Konstantin Batygin et Michael Brown, publient des résultats qui font la une des journaux : leurs simulations numériques et d'autres arguments suggèrent fortement la présence, aux confins du Système solaire, d'une planète environ dix fois plus massive que la Terre (voir pages 26 à 35).

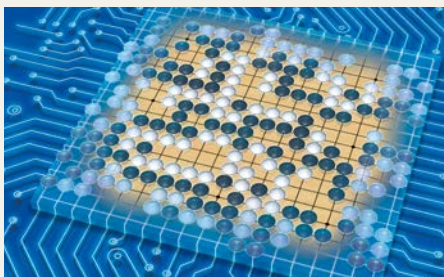
Une neuvième planète, donc ? C'est probable. Mais il faudra l'observer directement pour en être sûr – d'ici à cinq ans espère-t-on. L'astronome amateur américain Percival Lowell en avait déjà cherché une au début du XX^e siècle. Il l'avait nommée « planète X ». Le nom est resté, mais le X se révèle malencontreux si on le lit comme un chiffre romain !

Cette si longue quête d'une planète autour de notre soleil peut surprendre, aujourd'hui que l'on détecte des milliers d'exoplanètes à des dizaines ou centaines d'années-lumière de distance. Comme quoi ce qui est proche, mais dans l'ombre, n'est pas ce que l'on connaît le mieux. ■

3 **Édito**

Actualités

- 6 Des particules d'énergie nulle pour résoudre le paradoxe des trous noirs
- 7 Ampoules à incandescence : vers un retour en grâce ?
- 8 Hominidés : l'Asie avant l'Afrique ?
- 11 Jeu de go : une intelligence artificielle bat un joueur professionnel



Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

Réflexions & débats

- 14 **Point de vue**
Science et laïcité : des lacunes dans la formation
Benoît Urgelli et Charlène Ménard
- 16 **Entretien**
« Les politiques et acteurs de la santé doivent se mobiliser pour redonner sa place au vaccin »
Odile Launay
- 20 **Homo sapiens informaticus**
Quelle conscience pour les ordinateurs ?
Gilles Dowek
- 22 **Cabinet de curiosités sociologiques**
Se masquer pour faire le mal
Gérald Bronner
- 24 **Lu sur SciLogs.fr**
Une bibliothèque numérique cunéiforme
Cécile Michel

En couverture : © Hon Millel

À LA UNE

26

ASTROPHYSIQUE

La longue traque de la planète X

Michael Lemonick

Existe-t-il une planète géante aux confins du Système solaire ? Des simulations numériques et des études théoriques suggèrent que oui. Il ne manque qu'une observation directe pour confirmer cette hypothèse ancienne !

34

« Les nouveaux arguments en faveur de l'existence d'une neuvième planète sont convaincants »

Entretien avec Alessandro Morbidelli

Une planète dix fois plus massive que la Terre serait présente bien au-delà de Pluton. Elle expliquerait les orbites des objets les plus lointains du Système solaire. Un scénario en accord avec les modèles de formation des planètes.

36

ARCHÉOLOGIE

La cité oubliée de Jinsha

Mayke Wagner et Pavel Tarasov

La découverte fortuite au Sichuan, en Chine, d'une ancienne cité atteste de l'existence d'une riche culture qui révérait l'éléphant, il y a plus de deux mille ans.

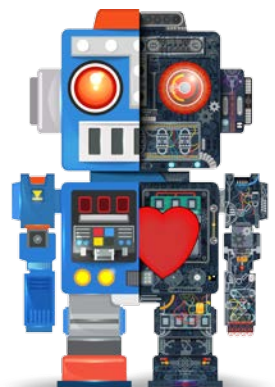
44

TECHNOLOGIE

Robot, as-tu du cœur ?

Pascale Fung

Avant de côtoyer des robots au quotidien, il va nous falloir leur apprendre à comprendre les émotions humaines... Ou, du moins, à les imiter.



50 **ÉCOLOGIE****Madagascar au secours de ses grenouilles***Franco Andreone, Angelica Crottini et Herilala Randriamahazo*

L'île de Madagascar abrite de nombreuses espèces d'amphibiens menacées d'extinction. Comment sauver ce trésor naturel ? Un projet international regroupant institutions, scientifiques et populations locales relève le défi.

58 **NEUROPHYSIOLOGIE**
Le fléau des pertes auditives cachées*Charles Liberman*

Marteaux-piqueurs, concerts et même tondeuses à gazon causent parfois à nos oreilles des dommages irréparables. Et mal diagnostiqués, car indétectables par un examen classique de l'audition.

66 **PHYSIQUE**
**Séismes, tempêtes...
Bientôt des capes de protection***Gregory Gbur*

Si la cape d'invisibilité n'est encore qu'une perspective lointaine, son principe inspire des dispositifs de protection contre d'autres types d'ondes que la lumière.

72 **HISTOIRE DES SCIENCES**
**John Wilkins,
l'avocat du peuple de la Lune***Claire Bouyre*

Au XVII^e siècle, le jeune savant anglais John Wilkins est convaincu que la Lune est habitée. Conscient qu'il ne peut rien prouver, cet érudit ecclésiastique construit son argumentation sur les découvertes astronomiques, mais aussi sur les connaissances du vivant.

Rendez-vous78 **Logique & calcul****Vie ou intelligence : comment en repérer les traces ?***Jean-Paul Delahaye*

Savoir mesurer la complexité aiderait à identifier des traces de vie ou d'intelligence.

84 **Science & fiction****De l'origine des espèces... extraterrestres***J. Sébastien Steyer et Roland Lehoucq*86 **Art & science****L'Univers dans une assiette***Loïc Mangin*89 **Idées de physique****Des valves à lumière dans les écrans***Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik*92 **Question aux experts****La dopamine est-elle la molécule du plaisir ?***Jean Costentin*94 **Science & gastronomie****Opération beurre feuilleté***Hervé This*96 **À lire**98 **Bloc-notes****Les chroniques de Didier Nordon****SCIENCE.fr****LETTRE D'INFORMATION**

Ne manquez pas
la parution
de votre magazine
grâce à la NEWSLETTER

- Notre sélection d'articles
- Des offres préférentielles
- Nos autres magazines en kiosque



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

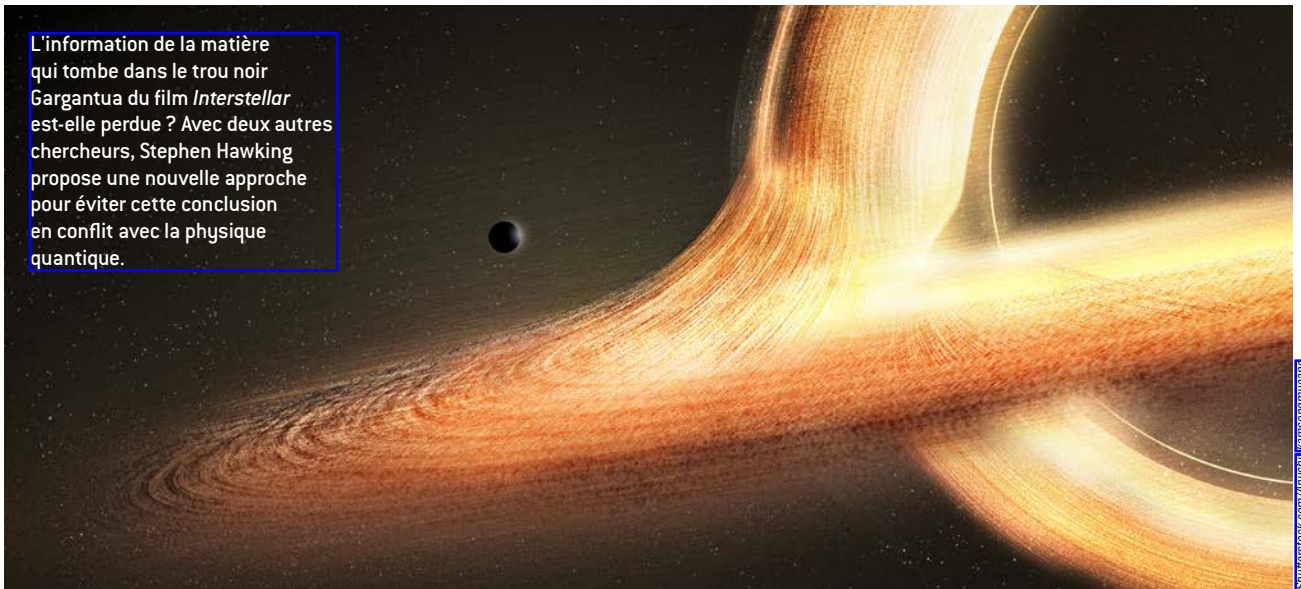
Actualités

Physique théorique

Des particules d'énergie nulle pour résoudre le paradoxe des trous noirs

L'information contenue dans la matière qui tombe dans un trou noir serait irrémédiablement détruite, résultat en contradiction avec les principes de la physique quantique. Stephen Hawking, Andrew Strominger et Malcolm Perry proposent une nouvelle voie pour résoudre ce paradoxe.

L'information de la matière qui tombe dans le trou noir Gargantua du film *Interstellar* est-elle perdue ? Avec deux autres chercheurs, Stephen Hawking propose une nouvelle approche pour éviter cette conclusion en conflit avec la physique quantique.



Que devient une lettre que vous jetez dans un trou noir ? Selon la théorie de la relativité générale, lorsque votre message franchit une certaine limite – l'horizon des événements –, il ne pourra pas ressortir, même s'il se déplace à la vitesse de la lumière. Votre texte semble définitivement perdu... Est-ce vraiment le cas ? Le théoricien britannique Stephen Hawking et deux collègues viennent d'apporter une nouvelle contribution à cette question ancienne.

Dans les années 1970, Stephen Hawking s'est intéressé aux effets quantiques qui se manifestent près de l'horizon des événements du trou noir. Il a montré théoriquement que, malgré les principes de la relativité générale, un rayonnement s'échappe de l'astre : ce dernier « s'évapore »

en perdant peu à peu sa masse. Ainsi, toute la matière initiale du trou noir, ou tombée dedans ultérieurement, finit par en ressortir sous forme d'un rayonnement. Le message serait-il récupérable par ce biais ?

Le rayonnement prédit par Stephen Hawking est un rayonnement thermique : l'information qu'il véhicule ne dépend que de la température du trou noir et n'a aucun lien avec la matière tombée dans l'astre. Ainsi, votre message semble irrémédiablement perdu. Or cette conclusion se heurte aux principes de la physique quantique : l'information peut être transformée, mais elle n'est jamais perdue. En théorie, il devrait toujours être possible de reconstituer le message initial.

Comment résoudre cette contradiction ? Les physiciens

se penchent sur ce problème depuis quarante ans. Dans les années 1990, les travaux du physicien argentin Juan Maldacena ont convaincu de nombreux chercheurs, dont Stephen Hawking, que l'information tombée dans le trou noir doit être préservée. Il restait alors à expliquer comment elle s'en échappe si le rayonnement de Hawking est thermique et ne dépend que de la température de l'astre. Malgré plusieurs pistes, le paradoxe demeurait irrésolu.

Et voilà que Stephen Hawking, lors d'une conférence à Stockholm en août 2015, a présenté les idées d'une nouvelle approche qu'il a étudiée avec Malcolm Perry, de l'université de Cambridge au Royaume-Uni, et Andrew Strominger, de l'université Harvard aux États-Unis.

Comme toute communication de Stephen Hawking, celle-ci a été très relayée dans les médias, mais les physiciens, eux, attendaient de voir les calculs pour en évaluer les promesses. L'article est finalement paru début janvier 2016 sur le serveur de prépublication arXiv.

L'idée au cœur de cette étude provient de travaux antérieurs d'Andrew Strominger. Ce dernier s'est intéressé à des symétries mathématiques, nommées supertranslations, dont serait doté l'espace-temps. Ces symétries de supertranslation, introduites dans les années 1960, impliqueraient l'existence de particules qui sont toutes d'énergie nulle, nommées gravitons *soft* et photons *soft*, mais se distinguant les uns des autres par leurs moments cinétiques. L'état de plus basse énergie, le « vide », d'un système physique

Nanotechnologie

Ampoules à incandescence : vers un retour en grâce ?

En 2012, les pays de l'Union européenne ont abandonné les ampoules à incandescence, trop énergivores, au profit des lampes à basse consommation. Une équipe du MIT, aux États-Unis, améliore l'efficacité de ces ampoules en leur associant des techniques nanophotoniques. Georges Zissis, du laboratoire Laplace à Toulouse, nous explique ce résultat.

n'est ainsi pas unique : il peut être rempli de ces particules *soft* d'énergie nulle, créant une multiplicité de vides possibles qui se distinguent par les moments cinétiques de leurs particules *soft*.

Quand Andrew Strominger a appliqué ce résultat à un trou noir qui s'évapore totalement, il s'est aperçu que dans ce cas également, le vide obtenu n'est pas unique et dépend de son contenu en particules *soft*, contenu qui constitue une information en soi.

Les observations d'Andrew Strominger sur les supertranslations indiqueraient l'existence d'un lien entre ces transformations de l'espace-temps, les particules *soft* et le paradoxe de l'information. Stephen Hawking, Malcolm Perry et Andrew Strominger ont voulu préciser le mécanisme fondé sur ces supertranslations qui assurerait la conservation de l'information. Ils ont étudié un modèle simplifié de supertranslations appliquées à l'interaction électromagnétique et ont ébauché leur application dans le cas de la gravitation, plus complexe à formaliser.

Les chercheurs ont montré que les particules *soft* sont créées sur l'horizon des événements du trou noir et enregistrent l'information de chaque particule qui franchirait l'horizon dans sa chute sur l'astre, assurant ainsi la conservation de l'information.

Les premiers calculs sont encourageants, mais certains spécialistes soulignent qu'il reste dans le modèle bien des zones d'ombre et des points techniques à éclaircir. Toutefois, d'autres s'accordent déjà à dire que l'approche est intéressante et mérite d'être explorée plus avant.

Sean Bailly

<http://arxiv.org/abs/1601.00921>

Quels étaient les défauts des ampoules à incandescence qui ont justifié leur retrait du commerce ?

Georges Zissis : Une ampoule à incandescence est composée d'un filament de tungstène chauffé à 2700 °C. Ce filament émet un rayonnement dont le spectre est proche de celui d'un corps noir. Cette source de lumière a une couleur chaude très appréciée des utilisateurs. Cependant, 90 % de l'énergie consommée est convertie en rayonnement infrarouge et en chaleur, ce qui en fait une source de lumière peu économe.

Quelles sont les solutions alternatives ?

G. Z. : Les ampoules classiques ont une efficacité énergétique de 2 à 5 % – des valeurs inférieures à celles des lampes fluocompactes (de 25 à 30 %) et à celles des LED (entre 30 et 40 %). Le remplacement des ampoules à incandescence a permis d'importantes économies en termes de consommation électrique. Cependant, ces sources ne sont pas toujours du goût de l'utilisateur.

Quelle idée propose l'équipe de Marin Soljačić, du MIT ?

G. Z. : Le dispositif étudié par les chercheurs du MIT est une ampoule à incandescence améliorée. Il est composé de deux parties, le filament d'une ampoule

classique et un dispositif nanophotonique. Ce dernier procède à un recyclage de la lumière, pour reprendre l'expression des chercheurs.

Comment fonctionne ce recyclage de la lumière ?

G. Z. : Le filament émet, comme d'habitude, une petite part de lumière visible et beaucoup d'infrarouge. Entourant le filament, le cristal photonique, constitué d'un empilement de couches d'oxydes, joue le rôle de



Georges Zissis, laboratoire Laplace, univ. de Toulouse

filtre. Il laisse passer la lumière visible et, par des effets d'interférences, agit comme un miroir vis-à-vis du rayonnement infrarouge. Celui-ci est renvoyé vers le filament et contribue à son chauffage. En recyclant une part de l'infrarouge, le dispositif nanométrique s'affranchit de la loi du corps noir qui définit le spectre d'émission du filament dans le monde macroscopique.

Quelle est l'efficacité du dispositif ?

G. Z. : L'équipe annonce une efficacité énergétique

théorique d'environ 40 %, comparable à l'efficacité des meilleures LED commerciales actuelles. Leur prototype atteint déjà 6,6 %. Il confirme le principe, mais il reste du chemin pour rattraper les LED, dont l'amélioration se poursuit.

S'agit-il là d'un dispositif qui pourrait arriver sur le marché ?

G. Z. : Les matériaux utilisés pour ces nouvelles ampoules sont bon marché et les techniques de fabrication sont classiques, de quoi espérer avoir des ampoules à un prix compétitif. Mais il faut savoir que les industriels ont investi des dizaines de milliards d'euros dans la technologie des LED. De nombreux laboratoires, dont le mien, continuent à en améliorer les performances. Je ne pense pas qu'un industriel investira dans les techniques d'éclairage par incandescence. En revanche, d'autres applications sont possibles, aux panneaux thermophotovoltaïques par exemple.

Et pour les nostalgiques de la lumière chaude des ampoules à incandescence ?

G. Z. : On dispose déjà de LED à l'aspect vintage et à lumière chaude. De quoi redonner des couleurs aux nostalgiques !

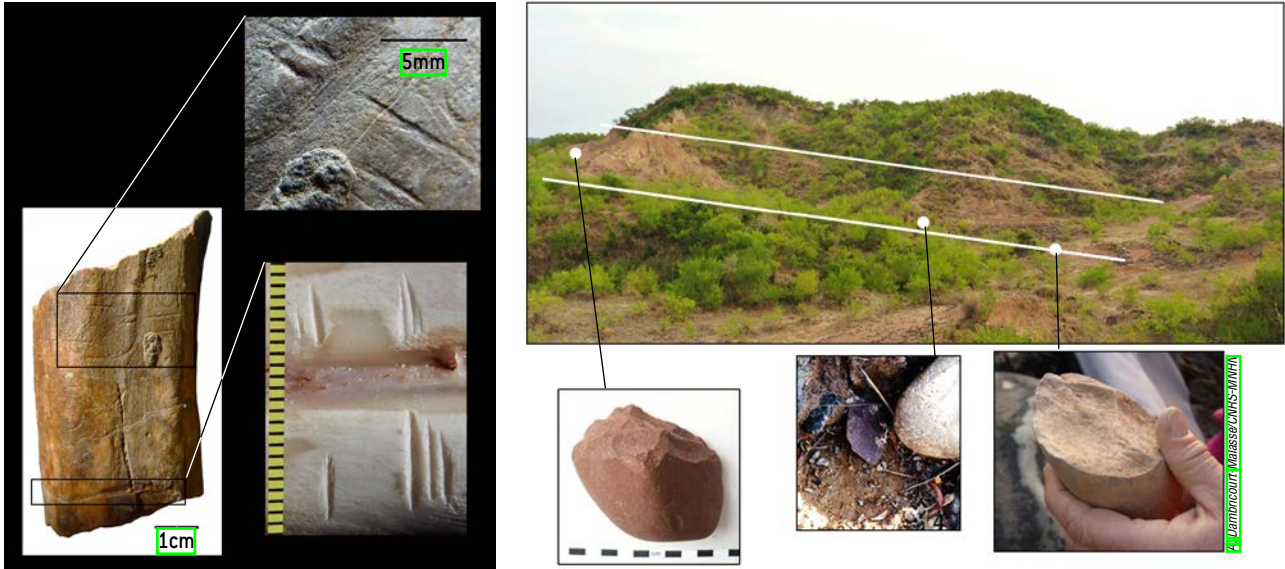
S. B.

O. Ilic et al., *Nature Nanotechnology*, 11 janvier 2016

Paléontologie humaine

Hominidés : l'Asie avant l'Afrique ?

Au pied de l'Himalaya, il y a 2,6 millions d'années, des carcasses ont été découpées avec une habileté comparable à celle des membres du genre *Homo*, censé être apparu en Afrique...



Ci-dessus, les stries marquant une diaphyse de bovidé (*gauche*) sont montrées à la loupe (*droite*).

À droite, la couche fossilifère de limon de la butte de Masol est repérée par les traits blancs. Sont aussi montrés deux choppers et un éclat en quartzite laissés par les charognards humains.

Out of Asia? L'origine africaine du genre *Homo* est très plausible, sinon probable. Mais depuis que des preuves de la présence de préhumains ou de premiers humains au piémont indien de l'Himalaya ont été publiées par une équipe franco-indienne dirigée du côté français par Anne Dambricourt-Malassé, du Muséum national d'histoire naturelle, une origine asiatique du genre *Homo* redevient envisageable.

Redevient? En fait, cette possibilité est évoquée depuis longtemps – dès les années 1930, après la découverte de l'espèce hominoïde *Sivapithecus* dans le piémont himalaya. Cependant, la mise au jour en Afrique d'un nombre croissant de restes d'australopithèques, puis des plus anciens fossiles humains, ainsi que d'industries lithiques et de vestiges de découpages de boucherie attestant d'une habileté grandissante, a imposé l'idée que c'est en Afrique que s'est déroulée l'hominisation.

Selon cette idée, il y a quelque 2,5 millions d'années, le climat aurait orienté l'évolution de certains australopithèques grâces,

qui auraient acquis la bipédie et de plus gros cerveaux.

Les découvertes de l'équipe franco-indienne défient ce paradigme. Depuis plusieurs années, ces chercheurs fouillent la formation de Masol. La structure de cette butte, située non loin de la ville de Chandigarh, au Pendjab, donne accès à des couches de limon et de grès très fossilifères, qui sont datées avec certitude à plus de 2,58 millions d'années. Ces couches illustrent un phénomène toujours en cours dans l'Himalaya : les rivières donnent parfois lieu à de violentes inondations dues à la mousson, noyant ainsi des animaux que les charognards exploitent à la dérive.

Elles montrent aussi que certains charognards étaient des humains ou des préhumains, qui ont laissé des outils en quartzite. Fouillant le limon en trois endroits, les chercheurs ont de plus récolté 1500 os fossilisés, dont plusieurs striés par des outils.

Pour les analyser, ils ont d'abord caractérisé précisément les stries à l'aide du microscope numérique 3D et du microscanner du Muséum. Puis, à l'aide d'outils en quartzite similaires à

ceux de Masol, ils ont découpé de la viande attachée aux mêmes os que ceux trouvés striés sur le site paléontologique. Ils ont constaté le même genre de marques : fines, rectilignes avec des barbelures, ordonnées selon les zones d'insertion de tendons qu'il faut arracher pour atteindre l'os et le briser afin d'en consommer la moelle, riche en protéines et lipides.

Jusque-là, les capacités cognitives que dénote cette façon de faire n'ont été attribuées qu'au genre *Homo*, du moins quand on les observe en Afrique sur des scènes comparables, vieilles de 2,5 millions d'années.

Les chercheurs soulignent que leur découverte n'est pas isolée en Asie : dans la grotte de Longgupo, en Chine du Sud, des traces de boucherie et de l'industrie lithique, ainsi qu'un fragment de mandibule d'apparence humaine, ont été datés à 2,48 millions d'années. Si l'équipe d'Anne Dambricourt-Malassé a raison, l'Asie du Sud a aussi pu être le siège d'une hominisation, voire de l'hominisation. Intrigant.

François Savatier

Comptes Rendus Palevol, 27 janvier 2016

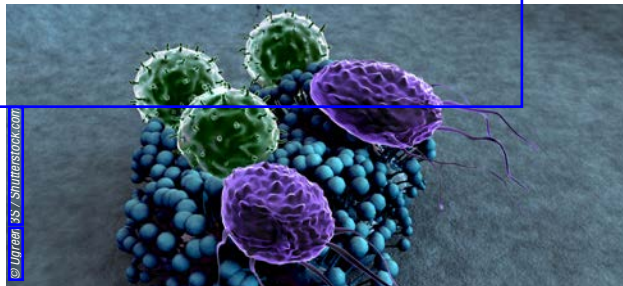
Immunothérapie

Se défendre contre la maladie d'Alzheimer

Dans la maladie d'Alzheimer, certains neurones du cerveau meurent prématurément, de sorte que les patients perdent la mémoire. Depuis quelques années, les chercheurs ont découvert un nouvel acteur en jeu dans cette pathologie : le système immunitaire, qui combat les organismes étrangers ou détruit les cellules malignes. Mais ce système agit aussi « autour » des régions cérébrales malades (présentant des amas de peptides amyloïdes dits A β), où il provoque une inflammation, sans que l'on sache vraiment si cette inflammation constitue un ennemi ou un allié pour l'organisme.

Or une équipe dirigée par Guillaume Dorothée, à l'Inserm, vient de mettre en évidence une piste d'immunothérapie pour ralentir l'apparition des troubles de la mémoire : elle consiste à moduler cette neuro-inflammation.

Notre système immunitaire est beaucoup plus compliqué qu'il n'y paraît. Il dispose d'une grande variété de fantassins, dont les lymphocytes T et les cellules microgliales. Alors que



Des cellules de notre système immunitaire s'attaquent ici à un amas de champignons ; correctement régulés, ils « protégeraient » aussi notre mémoire dans la maladie d'Alzheimer.

certaines présentent surtout des activités « pro-inflammatoires » potentiellement neurotoxiques, d'autres ont des fonctions majoritairement « anti-inflammatoires » avec des effets neuroprotecteurs. Mais une autre catégorie de cellules T existe : les « régulateurs », notés Treg, qui jouent un rôle critique dans la régulation de ces réponses immunitaires.

Guillaume Dorothée et ses collègues ont donc modulé la quantité de cellules Treg dans un modèle murin de maladie d'Alzheimer. En injectant aux souris de faibles quantités d'interleukine-2, ce qui permet

d'amplifier sélectivement les Treg, ils ont favorisé une réponse neuro-inflammatoire bénéfique autour des plaques amyloïdes, via le recrutement de cellules microgliales, et ralenti la perte des fonctions cognitives.

À l'inverse, en diminuant la quantité de Treg, ils ont accéléré le développement de la maladie. L'interleukine-2 étant déjà utilisée dans d'autres protocoles cliniques, un essai clinique pilote chez l'homme est d'ores et déjà envisagé.

Bénédicte Salthun-Lassalle

C. Dansokho et al., *Brain*, en ligne le 1^{er} février 2016

Érection cellulaire

Après l'ablation de la prostate à la suite d'un cancer de cet organe, de nombreux patients souffrent de troubles de l'érection : la chirurgie lèse souvent des vaisseaux et nerfs accolés à la prostate et dont dépend l'érection. L'équipe de René Yiu, du service d'urologie de l'hôpital Henri-Mondor, à Créteil, a mené un essai clinique consistant à injecter des cellules souches dans le pénis de 12 patients souffrant de troubles sévères de l'érection à la suite d'une prostatectomie. Les cellules souches, prélevées dans la moelle osseuse des patients, se sont transformées en cellules endothéliales, musculaires lisses et conjonctives dans la zone endommagée et ont aussi sécrété des substances favorisant la réparation des vaisseaux sanguins et des nerfs. Après six mois, les patients, médicamenteux ou non, ont rapporté une amélioration significative de l'érection, de la rigidité du pénis et de la qualité des rapports sexuels. Des résultats que devront confirmer de futurs tests.

Histoire des sciences

Les Babyloniens, forts en mécanique céleste

Les prêtres de Babylonie de l'époque hellénistique (entre 331 et 141 avant notre ère) étaient des astronomes compétents. Ils utilisaient des méthodes arithmétiques pour calculer le mouvement des planètes et consignaient leurs observations sur des tablettes d'argile.

Mathieu Ossendrijver, de l'université Humboldt, à Berlin, a découvert qu'ils utilisaient aussi une approche géométrique fondée sur des concepts abstraits qui ne sera découverte en Europe qu'au XIV^e siècle de notre ère, par un groupe de penseurs de Merton College, à l'université

d'Oxford, et surnommés les « calculateurs d'Oxford ».

Les travaux de Mathieu Ossendrijver se sont concentrés sur cinq tablettes d'argile couvertes de textes cunéiformes, datant de 350 à 50 avant notre ère, qui appartiennent à la collection du British Museum, à Londres. C'est en recoupant les informations parcellaires des tablettes que le chercheur a compris qu'il s'agissait d'une technique pour étudier le mouvement de Jupiter.

Pour calculer le déplacement de la planète dans le ciel, les Babyloniens ont mis au point une méthode géométrique qui revient

à tracer la vitesse de déplacement en fonction du temps. Entre deux points de mesure, on obtient alors un trapèze dont l'aire correspond au déplacement total entre les deux dates.

Contemporains des prêtres de la Babylonie hellénistique, les Grecs utilisaient d'autres types de raisonnements géométriques, en particulier la géométrie dans l'espace, pour imaginer les orbites des planètes, mais ils ne semblent pas avoir utilisé des constructions aussi abstraites reliant la vitesse et le temps pour calculer une distance.

S.B.

Science, vol. 351, pp. 482-484, 2016



Sur cette tablette d'argile, un astronome babylonien a détaillé une méthode géométrique pour calculer la progression de Jupiter dans le ciel.

Bactérie antidouleur

Calmer les douleurs abdominales chroniques à l'aide d'une bactérie : c'est ce que proposent Philippe Langella (Inra/AgroParisTech), Frédéric Carvalho (Inserm/université d'Auvergne) et leurs collègues. Ils ont montré que les douleurs associées aux maladies inflammatoires chroniques de l'intestin sont concomitantes à une diminution de l'abondance d'une bactérie, *Faecalibacterium prausnitzii*, dans l'intestin, et qu'en administrant cette bactérie à des modèles animaux de ces maladies, ils restaurent une sensibilité normale des intestins.

Peut-on lire plus vite ?

Les techniques pour lire plus vite connaissent un nouvel essor à l'ère du numérique. Partant du principe que les mouvements des yeux ralentissent la lecture, certaines applications font par exemple défiler les mots un par un au centre de l'écran pour neutraliser ces mouvements. Mais selon l'équipe d'Elizabeth Schotter, de l'université de Californie à San Diego, qui a passé en revue les recherches sur le sujet, notre vitesse de lecture est surtout limitée par les processus cognitifs liés au traitement du langage et des informations. L'accélération se fait alors au détriment de la compréhension.

Vieille chasse en Arctique

Le jeune mammouth n'avait jamais vu d'hommes. Quand leurs traits commencèrent à le lacérer, il fuit, mais les chasseurs le poursuivirent, l'accablèrent contre une rivière et continuèrent à le transpercer de toutes parts. 45 000 ans plus tard, Alexei Tikhonov, de l'Académie russe des sciences, a retrouvé ce mammouth toujours couché sur la rive d'une rivière sibérienne tout près de la mer de Bara. Cette découverte est notable, car cette scène de chasse figée dans le pergélisol traduit la présence de chasseurs dans l'Arctique bien plus tôt que soupçonné.

Archéologie

Embuscade au Paléolithique tardif

L'équipe de Marta Mirazón Lahr, de l'université de Cambridge, vient de documenter un cas très impressionnant de guerre au Paléolithique : il y a quelque 10 000 ans, à Nataruk, un endroit situé à une trentaine de kilomètres à l'ouest du lac Turkana au Kenya, pas moins de 27 hommes, femmes et enfants sont morts sous des coups très violents à la tête. Parmi eux,

12 sont tombés dans l'eau à côté de la rive vaseuse du lac, qui s'étendait alors jusque-là. Certains d'entre eux ont été faits prisonniers avant d'être massacrés : tout indique qu'ils sont morts les mains liées. Phénomène rarissime en Afrique, leurs squelettes ont vite été recouverts de sédiments et se sont conservés, de sorte qu'ils nous apportent un témoignage riche et fiable sur la

violence entre groupes humains à l'âge de pierre.

Il semble ainsi qu'à la fin du Paléolithique africain, un groupe de chasseurs-cueilleurs en a attaqué un autre d'abord par une volée de flèches, puis par une charge brutale à la massue. Détail notable : des tessons de poterie ont été découverts. Or, comme l'a souligné l'anthropologue français Alain Testart, disparu en 2013, quand des chasseurs-cueilleurs trouvent sur un territoire des ressources régulières et périodiquement assurées, ils tendent à pratiquer une prédation semi-nomade accompagnée de stockage et d'une semi-sédentarité. Ils deviennent donc territoriaux – l'une des sources possibles de conflit.

F. S.

Nature, vol. 529, pp. 394-398, 2016

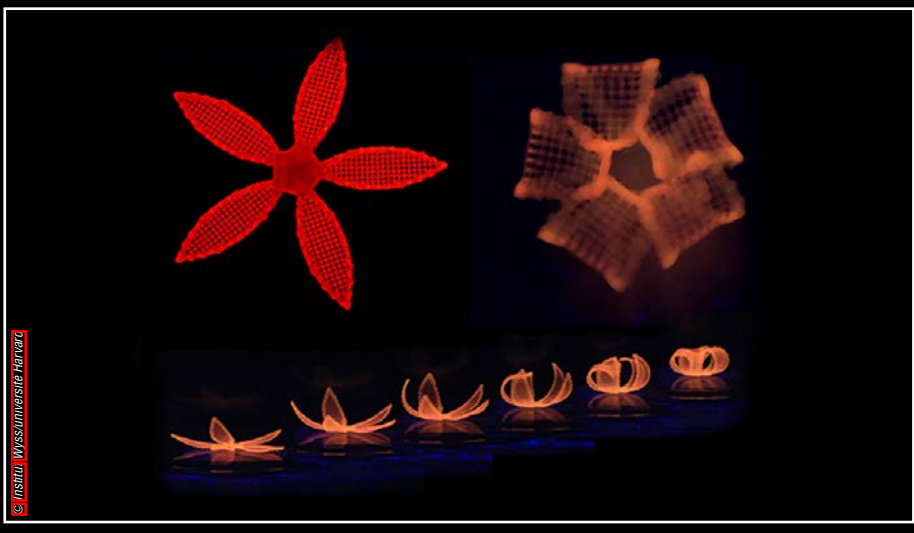


Cette victime d'une guerre paléolithique est morte d'un violent coup sur l'occiput.

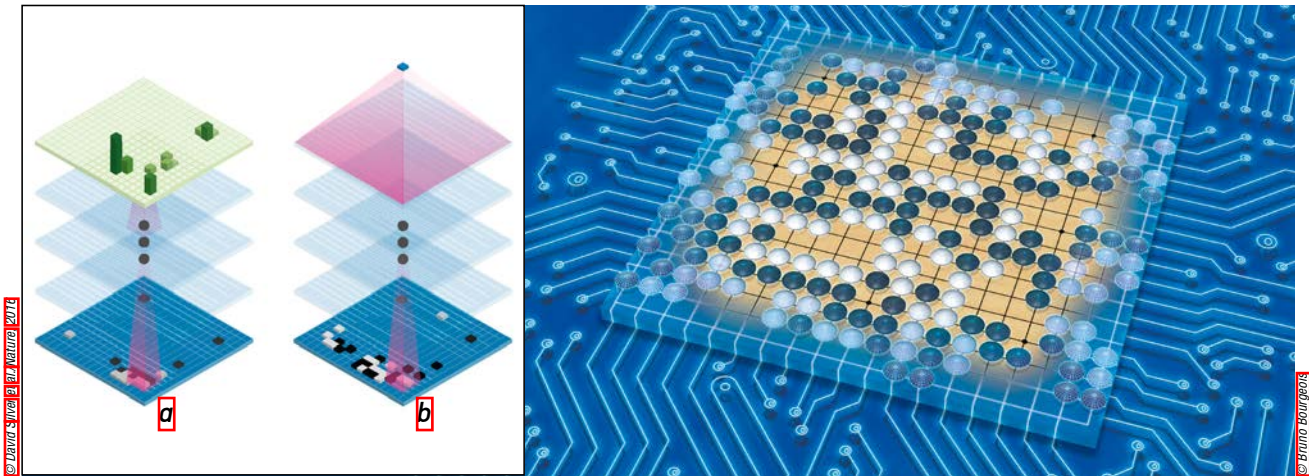
Insolite

Des fleurs en impression 4D

Produits par impression 3D, les objets de l'équipe de Jennifer Lewis, de l'université Harvard, changent aussi de forme au cours du temps (la quatrième dimension). Les chercheurs se sont inspirés de structures végétales qui évoluent en fonction des conditions d'humidité et de température. Ainsi, l'hydrogel utilisé pour l'impression 3D contient des fibrilles de cellulose. Un modèle mathématique détermine comment structurer l'objet de sorte que, plongé dans l'eau, l'objet gonfle selon certaines directions, se replie ou se tord. Les chercheurs envisagent déjà des applications dans le domaine biomédical.



Informatique



Jeu de go : une intelligence artificielle bat un joueur professionnel

Concevoir un logiciel capable de battre les meilleurs joueurs de go était un défi. AlphaGo, fondé sur la méthode de l'apprentissage profond, vient de vaincre le champion d'Europe.

En octobre dernier, lorsque Fan Hui, un Français d'origine chinoise et champion d'Europe, aborde ses matches contre AlphaGo, le programme de la société DeepMind, une filiale de Google, il est convaincu qu'il va gagner. Il a déjà joué contre des intelligences artificielles, et celles-ci restaient bien en dessous du niveau des joueurs professionnels humains. Pourtant, cette fois, il en va tout autrement. Le score est sans appel : le champion d'Europe s'incline face à la machine par 5 à 0. Pour vaincre l'humain, AlphaGo s'est appuyé sur une technique récente dans le domaine de l'intelligence artificielle, l'apprentissage profond.

Malgré la simplicité de ses règles, le jeu de go, apparu il y a près de 4 000 ans en Chine, est un défi pour les informaticiens qui veulent développer un programme informatique capable de jouer avec un bon niveau. En effet, il y a environ 10^{170} configurations possibles de jeu et un programme est incapable de les passer toutes en revue pour trouver la meilleure stratégie. De la même façon, le jeu d'échecs offre trop de possibilités

pour l'attaquer par la force brute, mais il est suffisant d'estimer, à l'horizon de quelques tours, les coups qui mettent le joueur en position de force. Au go, il est bien plus difficile d'évaluer si une position est avantageuse ou non, l'impact d'une pièce pouvant se répercuter très loin sur le plateau de jeu, le goban.

La plupart des logiciels de go atteignent le niveau d'un bon joueur amateur. Ils reposent sur une recherche arborescente de type Monte-Carlo. Cet algorithme consiste à choisir aléatoirement un certain nombre de coups possibles et à évaluer pour chacun les chances de finir la partie sur une victoire ou une défaite, puis à sélectionner le coup le plus efficace et à explorer plus en profondeur cette partie de l'arbre des coups. En augmentant le nombre de simulations, on affine les pronostics. Cependant, cette approche requiert un important temps de calcul.

Les chercheurs de la société DeepMind ont optimisé cette approche en y associant l'apprentissage profond de réseaux de neurones. Dans AlphaGo, l'idée est en partie de créer une représentation

abstraite du goban en vue d'en extraire des informations qui seront utilisées pour réduire le nombre de choix dans l'arbre de recherche Monte-Carlo. La puissance des réseaux de neurones est qu'un tel système se renforce à partir d'exemples et d'expériences. Dans un premier temps de la phase d'apprentissage, AlphaGo a analysé 30 millions de parties jouées par des professionnels. Il a alors défini des politiques de sélection et d'évaluation des coups les plus performants. Dans une deuxième phase, le programme a joué contre lui-même sur 50 ordinateurs, améliorant sa stratégie de jeu à chaque itération.

La communauté des joueurs et les développeurs de DeepMind attendent avec impatience la rencontre qui opposera AlphaGo au champion du monde, Lee Sedol, en mars. De nombreux observateurs pensent que le joueur coréen pourrait donner plus de fil à retordre au programme informatique que le joueur français. Le suspense est entier.

S. B.

D. Silver et al., *Nature*, vol. 529, pp. 484-489, 2016

Le goban, le plateau du jeu de go (à droite), offre un grand choix de mouvements, de sorte qu'il est difficile pour un programme informatique d'évaluer l'efficacité d'un coup. Pour y parvenir, AlphaGo s'appuie sur un ensemble de réseaux de neurones ; certains définissent des politiques de coups à jouer (a) – ils estiment la probabilité de chaque coup –, d'autres évaluent les chances de victoire pour chaque configuration des pièces sur le goban (b).

Astronomie

La plus brillante supernova

Parmi les supernovæ, les plus lumineuses sont les SLSNe (pour *Super Luminous Supernovæ*), mais on ignore les mécanismes d'une telle brillance. La supernova ASASSN-15lh n'en est que plus énigmatique, car elle bat tous les records ! Son intensité lumineuse, au moins deux fois plus élevée que celle des supernovæ connues, équivaldrait à près de vingt fois l'émission lumineuse de l'ensemble des étoiles de la Voie lactée.

ASASSN-15lh a été repérée dans le cadre du projet ASAS-SN (un relevé automatisé du ciel pour les supernovæ) de l'université d'État de l'Ohio. Selon Subo Dong, de l'université de Beijing, et ses collègues, elle serait à rapprocher de la famille des SLSNe pauvres en hydrogène, mais elle en serait un membre aux conditions extrêmes. Le centre de l'objet est peut-être un magnétar en rotation rapide, mais d'autres scénarios sont en lice. À suivre...

Lisa Picot

S. Dong et al., *Science*, vol. 351, pp. 257-260, 2016

Neurosciences

Quand la voix change l'émotion

Lorsque nous parlons, nous prêtons peu attention au son de notre voix. Et pourtant, une combinaison d'aires cérébrales en analysent le timbre, les inflexions et même l'émotion dont il est porteur. Tout cela se fait inconsciemment, mais avec des effets qui viennent d'être mesurés par une équipe internationale dont des spécialistes de l'Ircam, à Paris, et de l'université de Dijon.

Ces chercheurs ont enregistré des volontaires à l'aide d'un micro, ont modifié leur timbre vocal de façon à lui donner toutes les caractéristiques sonores d'une voix joyeuse, et leur ont fait entendre (avec un décalage de 30 millisecondes) cette voix modifiée grâce à un casque audiophonique.

Grâce à des questionnaires, les chercheurs ont constaté que l'humeur des volontaires était modifiée. Les personnes se sentaient plus allègres qu'en l'absence de manipulation. Leur cerveau refaçonnait leur émotion interne à partir de la voix qu'elles croyaient produire ! Les chercheurs indiquent que de nombreuses pathologies mentales sont caractérisées par des dérèglements émotionnels et que ce type de modulation pourrait se révéler précieux.

Sébastien Bohler

J.-J. Aucouturier et al., *PNAS*, vol. 113(4), pp.948-953, 2016

Microbiologie

Tuberculose : un bacille rugueux

Le bacille de la tuberculose, *Mycobacterium tuberculosis*, a augmenté sa virulence... en se dénudant un peu. C'est ce qu'ont montré Eva Boritsch, de l'institut Pasteur, à Paris, et ses collègues, en comparant son génome à celui de ses proches cousines, les bactéries *Mycobacterium canettii*.

Les souches connues de cette espèce sont moins virulentes et moins persistantes que *M. tuberculosis*. Les biologistes ont d'abord recherché des différences visibles – « phénotypiques » – et se sont concentrés sur l'une d'elles : en culture sur un milieu nutritif solide, *M. canettii* forme des colonies lisses, tandis que celles de *M. tuberculosis* sont rugueuses.

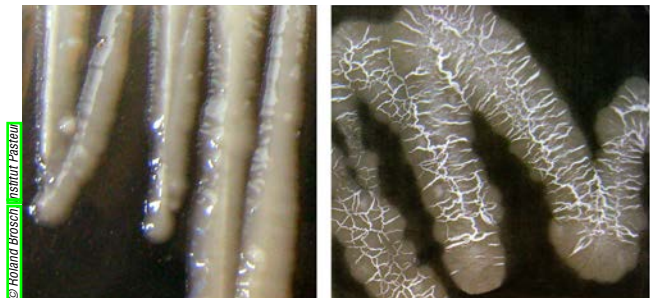
En comparant les génomes d'une souche de *M. canettii* lisse et de deux mutants spontanés de *M. canettii* devenus rugueux, ils ont identifié une différence dans une région du génome qui, chez d'autres mycobactéries, est impliquée dans la synthèse d'un

glycolipide habillant l'enveloppe des bactéries, le lipopolysaccharide. Non seulement les mutants rugueux ne produisaient plus ce glycolipide, mais leur virulence était supérieure, tant dans des cellules humaines que dans des souris rendues immunodéficientes. De plus, en corrigeant la région modifiée du génome des souches rugueuses, les biologistes les ont rendues lisses, preuve qu'elle commandait bien la rugosité.

Chez *M. tuberculosis*, ils ont ensuite retrouvé une modification similaire dans la même région du génome et montré que le glycolipide était absent de l'enveloppe bactérienne. Ainsi, la transformation de l'ancêtre de *M. tuberculosis*, peu virulent, en un bacille pathogène s'est accompagnée d'une modification importante de son enveloppe qui a peut-être avantage le bacille lors des infections.

Marie-Neige Cordonnier

E. C. Boritsch et al., *Nature Microbiology*, en ligne le 27 janvier 2016



Sur un milieu de culture solide, les colonies du bacille de la tuberculose sont rugueuses (à droite), tandis que celles de ses cousines, *M. canettii*, sont lisses (à gauche). Virulence de la bactérie rimerait avec rugosité...

Record du plus grand nombre premier

Curtis Cooper, professeur à l'université de Central Missouri, a battu le record du plus grand nombre premier découvert (ces nombres qui ne sont divisibles que par un ou eux-mêmes). Ce nouveau nombre premier comporte 22338618 chiffres et s'écrit sous la forme compacte : $2^{74\ 207\ 281} - 1$. Pour le découvrir, le chercheur a utilisé un programme collaboratif, GIMPS, qui traque un type particulier de nombres premiers, dits de Mersenne. Ces nombres sont de la forme $2^p - 1$, où p est lui-même un nombre premier.

Césarienne et microbiote

À la naissance, les bébés acquièrent leur microbiote – l'ensemble des microorganismes qui peuplent le corps – lors de la traversée du vagin. Mais la césarienne court-circuite ce processus et le microbiote acquis diffère alors, ce qui augmente peut-être le risque de développer un

trouble métabolique ou immunitaire. En exposant quatre bébés nés par césarienne aux fluides vaginaux de leurs mères, Maria Dominguez-Bello, de l'université de New York, et ses collègues ont partiellement restauré leur microbiote. Un premier résultat encourageant, même si l'effet à long terme doit encore être étudié.

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



Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

PARTEZ À L'ASSAUT DU CIEL!



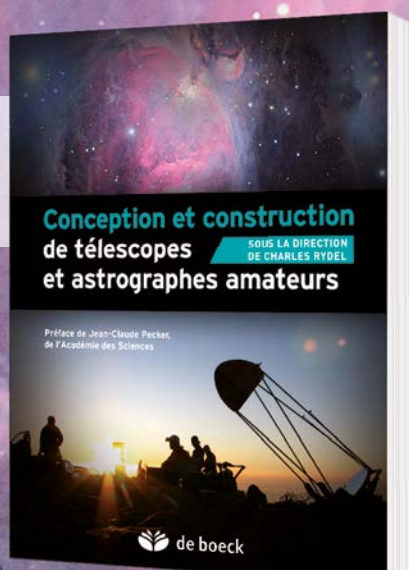
Vous rêvez de concevoir votre télescope mais vous ne savez pas par où commencer? Les amateurs les plus pointus vous prennent par la main pour vous guider, au travers de leurs réalisations, vers les meilleures techniques de construction. Soleil, étoiles, galaxies, analyse spectrale, rien n'est oublié des activités de l'astronome amateur dans cet ouvrage collectif qui réunit pour la première fois des amateurs français et européens.

Avec eux, partez à l'assaut du ciel !

Sous la direction de Charles Rydel
1^{re} édition • Janvier 2016 • 240 p.
• 55€ • 978-2-8041-9077-4

Déjà paru:

Sous la direction de Charles Rydel
1^{re} édition • Juin 2012



En librairie et sur www.deboecksuperieur.com

POINT DE VUE

Science et laïcité : des lacunes dans la formation

Comment répondre à un élève qui conteste la théorie de l'évolution ou l'âge de la Terre sur la base de ses convictions religieuses ? Pour réagir correctement, l'enseignant doit avoir une bonne compréhension de la nature de l'activité scientifique et de la distinction entre sciences et croyances. Ce n'est pas toujours le cas.

Benoît URGELLI et Charlène MÉNARD

Depuis quelques années en France, la contestation des connaissances enseignées à l'école, notamment en classe de sciences ou d'histoire, est une problématique que les médias évoquent régulièrement. De plus en plus d'élèves, d'étudiants, de familles refuseraient certains contenus scolaires qu'ils estimerait en opposition avec leurs convictions personnelles – principalement religieuses ou liées à des théories du complot, à des propos négationnistes...

La question est revenue à la une de l'actualité avec les attentats terroristes de janvier et novembre 2015 à Paris. Ceux-ci ont été revendiqués par l'organisation État islamique (ou Daesh), dont la dernière parution du magazine de propagande en français *Dar al Islam* vilipendait avec violence l'enseignement de la théorie de l'évolution et la charte de la laïcité.

L'ampleur de cette contestation dans les établissements publics est mal connue, par manque d'enquêtes fiables de grande ampleur. Citons néanmoins l'enquête conduite dans l'enseignement supérieur par l'Observatoire de la laïcité et qui a fait l'objet d'un avis publié le 15 décembre 2015. Selon cette étude, moins de 30 cas de contestations d'enseignements pour des raisons religieuses ont été rapportés (sur une population de quelque 2 millions d'étudiants).

Cet avis de l'Observatoire de la laïcité ainsi que quelques chiffres fournis en 2007 par le ministère de l'Éducation nationale suggèrent

que le phénomène est sporadique : même s'il ne faut pas en nier l'existence, il constituerait plutôt un épiphénomène artificiellement grossi par la couverture médiatique.

Cependant, nous constatons sur le terrain que cette médiatisation est anxiogène pour les enseignants. Elle les conduit parfois à adopter des stratégies consistant à éviter les sujets sensibles pour ne pas avoir à se confronter à de possibles contestations. Par exemple, dans l'enseignement de l'histoire, la crainte de voir des élèves tenir des discours antisémites empêche certains enseignants d'aborder le thème du génocide des juifs et d'autres populations lors de la Seconde Guerre mondiale. Cette attitude n'est pas justifiée, ni sur le plan de l'éthique professionnelle ni sur le plan pédagogique : les enseignants qui traitent ces questions sont souvent surpris de voir à quel point les élèves y sont réceptifs et sensibles.

En sciences de la vie et de la Terre, comme le soulignait en 2004 le rapport Obin, des élèves contestent parfois ce qu'on leur enseigne dans les cours sur la maîtrise de la reproduction humaine ou sur l'évolution des espèces. Ici aussi, une diversité de stratégies éducatives se dessine.

À propos de l'évolution des espèces par exemple, les enseignants agissent différemment en fonction de l'idée qu'ils se font de la capacité des élèves à comprendre et à accepter d'autres modes de pensée. Ainsi, la peur de la contestation conduit certains enseignants de sciences à adopter la stratégie

de l'évitement. D'autres s'engagent dans l'explicitation de la diversité des modes de connaissance du monde : ils tentent ainsi de montrer à leurs élèves ce qui différencie les savoirs des croyances, et ce qui caractérise la nature des sciences.

Certaines attitudes sont plus dangereuses. Par exemple, pour éviter tout conflit avec leurs élèves, il arrive que des enseignants tentent de relativiser et de présenter la science comme une croyance parmi d'autres. Une autre attitude inappropriée consiste à sacraliser le savoir scientifique, comme si c'était un dogme (alors que le principe même de la démarche scientifique s'oppose au dogmatisme). Certains enseignants s'aventurent même à tenter de réfuter des croyances, au risque d'opposer un dogme des sciences à celui des religions.

Ni relativisme ni positivisme à l'école

En outre, certains malentendus sont à dissiper. L'école ne peut forcer les élèves à « croire » aux savoirs qu'elle transmet. Mais selon les principes de l'école laïque, si les élèves ont le droit d'adhérer ou non aux savoirs scolaires, ils ne peuvent pas en refuser l'apprentissage, comme le stipule l'article 12 de la Charte de la laïcité (2013), bien que ce texte n'ait pas de valeur juridique.

La laïcité n'est pas non plus le positivisme, c'est-à-dire la « foi » dans le progrès des sciences comme moteur de l'émancipation

de l'humanité. Elle permet d'être positiviste, ou libéral, ou partisan de la décroissance, etc. Et, plus que cela, la laïcité fait le pari que tous peuvent construire ensemble une société dans laquelle chacun a sa place et la possibilité de s'exprimer.

Quoi qu'il en soit, l'éventail des postures enseignantes nous amène à constater que l'éducation aux sciences peut prendre des formes pédagogiques diverses, en lien avec des interprétations différentes de ce qu'est la laïcité et en fonction des contextes. Cependant, l'enseignant qui n'adopte pas la stratégie de l'évitement n'est que rarement armé, par sa formation et sa culture, pour répondre de façon appropriée aux objections de nature non scientifique des élèves.

Former à la nature des sciences

Un consensus se dessine parmi le corps enseignant et les spécialistes du monde éducatif. Il s'est notamment exprimé lors d'une rencontre organisée en janvier 2016 par l'Association française des professeurs de sciences de la vie et de la Terre sur le thème « L'enseignement des SVT à l'épreuve du principe de laïcité ». De façon générale, la formation des élèves, mais aussi celle des enseignants, des scientifiques, des journalistes, etc. devrait davantage s'intéresser à la nature des sciences.

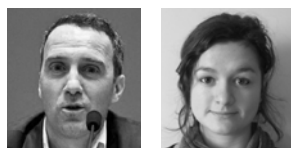
Dans ce registre, la formation consisterait à montrer que l'activité scientifique produit de façon collective des énoncés acceptés par les pairs à un moment donné, mais réfutables. Elle montrerait également qu'elle produit des modélisations du réel fondées sur l'observation et l'expérimentation, permettant d'appréhender le passé et le présent, et de penser l'avenir. Il faudrait aussi comprendre que, lorsqu'il s'agit d'expliquer un phénomène réel, la méthode scientifique exclut les options métaphysiques et le recours à un principe extranaturel (providence, miracle...). Selon Guillaume Lecointre, chercheur au Muséum de Paris, les connaissances scientifiques seraient donc par essence laïques.

D'un point de vue pédagogique, l'histoire des sciences est une porte d'entrée, à condition qu'on ne néglige pas de s'intéresser aux



LA DISTINCTION ENTRE SCIENCES ET CROYANCES est une question clé rarement abordée par les personnes exerçant un métier en lien avec les sciences ou leur enseignement – faute d'une formation appropriée.

LES AUTEURS



Benoît URGELLI est enseignant-chercheur au laboratoire Éducation, cultures et politiques de l'université de Lyon.

Charlene MENARD est doctorante dans ce même laboratoire.

BIBLIOGRAPHIE

C. Fortin, *L'enseignement de l'évolution face aux croyances religieuses, Histoire, monde et cultures religieuses*, vol. 4(32), pp. 67-78, 2014.

J. L. Wolfs, *Sciences, religions et identités culturelles. Quels enjeux pour l'éducation ?*, De Boeck, 2013.

G. Lecointre, *Les sciences face aux créationnismes*, Quæ, 2012.

contextes sociohistoriques dans lesquels se sont élaborés les savoirs. D'autres stratégies sont parfois explorées par les enseignants, notamment en pluridisciplinarité, avec pour objectifs d'apprendre à distinguer sciences et croyances, ou encore de débattre d'éthique et de la place des sciences en société.

Des discussions entre professionnels de l'éducation, mais également avec des professionnels de la médiation des sciences (journalistes scientifiques, animateurs de musée, etc.) seraient utiles pour faire avancer les réflexions sur une formation au traitement de questions scientifiques socialement vives.

L'école laïque a pour mission de transmettre les savoirs scientifiques, mais elle permet aussi de tout questionner (croyances et savoirs) dans le respect de la loi et de l'État de droit. Ainsi, l'éducation devrait permettre à chacun de comprendre et de reconnaître les différentes visions du monde, les différentes logiques de construction de la pensée, sans pour autant les relativiser. Ce serait probablement la plus belle contribution des sciences à la démocratie et à la laïcité. ■



Réagissez au
Point de vue sur
www.pourlascience.fr

ENTRETIEN

« Les politiques et acteurs de la santé doivent se mobiliser pour redonner sa place au vaccin »

Faut-il se faire vacciner et faire vacciner ses enfants ? De plus en plus de personnes doutent des bénéfices de la vaccination – tout en ignorant les risques importants que fait courir la non-vaccination...



Odile LAUNAY, médecin, dirige le Centre d'investigation clinique Cochin-Pasteur, à Paris.

Entre le 1^{er} janvier et le 31 mai 2015, 199 cas de rougeole ont été déclarés en France, selon l'Institut de veille sanitaire, signe que le virus circule toujours. De fait, la couverture vaccinale de la rougeole stagne depuis quelques années. Or cette maladie n'a rien d'anodin. Sur les 23 500 cas répertoriés en France du 1^{er} janvier 2008 au 31 mai 2015, près de 1 500 ont présenté une pneumopathie grave, 34 une complication neurologique et 10 sont décédés. Cette situation préoccupante est une manifestation de la défiance croissante envers la vaccination. Pour contrer cette dérive, le gouvernement a mis en place, début 2016, un plan de rénovation de la politique vaccinale et a lancé, de mars à octobre, une concertation nationale sur l'obligation de la vaccination. Le point avec Odile Launay, coordinatrice du réseau national d'investigation clinique en vaccinologie (I-Reivac) et professeure à l'université Paris-Descartes.

POUR LA SCIENCE

En 2015, la vaccination a fait l'objet de nombreuses controverses en France. Pourquoi cette multiplication de polémiques ?

ODILE LAUNAY : La campagne de vaccination de 2009 en prévention d'une épidémie de grippe A (H1N1)

a probablement été un facteur aggravant, mais ce n'est pas propre à la France. Le fait que les personnes remettent en cause l'intérêt de la vaccination pour elles-mêmes ou pour leurs enfants est un phénomène assez répandu aujourd'hui, même s'en France, la polémique est particulièrement prégnante. Cette « réticence à la vaccination » (*vaccine hesitancy*) fait l'objet de nombreux débats et est devenue, depuis 2014, une problématique de l'Organisation mondiale de la santé.

PLS

Quels sont les autres facteurs de ce mouvement de réticence à la vaccination ?

O. L. : Les épidémiologistes en ont listé plusieurs. D'abord, les vaccins sont victimes de leur succès : comme ils sont efficaces, les maladies ont quasiment disparu et on a oublié leur gravité. Ensuite, il y a eu les polémiques sur les effets indésirables. On a accusé les vaccins de causer l'autisme, le diabète, l'allergie, des maladies auto-immunes et même la maladie d'Alzheimer. Les études et les données de pharmacovigilance ont toutes démonté ces polémiques, mais elles persistent dans les esprits.

Un autre facteur est le manque de confiance dans les autorités de santé. Et envers les industriels : nombre de personnes sont persuadées qu'ils

font du profit sur les vaccins, alors qu'ils n'ont pas un grand intérêt pour eux, leur coût de fabrication étant élevé. Il y a aussi la mouvance des médecines douces, voire des vaccins homéopathiques : des pharmacies proposent de petites doses de vaccin ou des produits homéopathiques qui auraient des vertus immunisantes. Or l'efficacité de ces produits n'a jamais été prouvée.

Autre facteur : de nos jours, les patients ont besoin qu'on leur explique pourquoi on leur prescrit tel ou tel médicament. Les médecins ne sont pas toujours bien formés pour répondre aux questions, ce qui contribue au doute. La part d'Internet, enfin, est importante. Les groupes antivaccin sont très présents sur la Toile, où ils ont la possibilité de communiquer rapidement sur des événements observés après un vaccin et qui, du coup, sont rapportés comme potentiellement liés à lui. La rumeur alarmiste se diffuse alors très vite.

PLS

Vous dites que les études ont démonté les polémiques. Même celles autour du syndrome de Guillain-Barré ?

O. L. : Dans ce cas, c'est différent, car le virus de la grippe est une des causes identifiées de cette maladie auto-immune qui touche les nerfs périphériques. Plus ou moins en fonction des virus et des

années, le virus déclenche la maladie. Donc par construction, il y a un risque que le vaccin contre la grippe, qui utilise le virus sous une forme inactivée, entraîne le syndrome. Mais ce risque est infime par rapport à celui d'avoir la grippe et que celle-ci déclenche le syndrome (selon l'ANSM, l'agence nationale de sécurité du médicament, le syndrome touche 4 à 7 personnes sur 100 000 sujets grippés, ce qui correspond déjà à un faible risque). En d'autres termes, on a beaucoup moins de risque de présenter un syndrome de Guillain-Barré si on est vacciné que si on ne l'est pas.

PLS

Le vaccin contre la grippe est-il le seul susceptible de causer le syndrome de Guillain-Barré ?

O. L. : Une étude récente de l'ANSM et de l'Assurance maladie suggère que le vaccin contre les infections à papillomavirus humains (HPV) peut entraîner, dans de rares cas (1 à 2 cas pour 100 000 jeunes filles), le syndrome de Guillain-Barré. Mais ces données, encore préliminaires et qui n'ont pas été retrouvées ailleurs qu'en France, doivent être confirmées.

PLS

Le scepticisme est très fort vis-à-vis de la vaccination contre les HPV. Y a-t-il des facteurs de réticence spécifiques à ce cas ?

O. L. : Un facteur supplémentaire ici est peut-être le fait que l'infection est sexuellement transmissible. La vaccination est recommandée chez les jeunes filles à l'adolescence et vise à les protéger des maladies provoquées par ces virus. Ce n'est pas forcément un sujet facile à aborder à cet âge-là. Pourtant, c'est un vaccin pour lequel les données de suivi sur la pharmacovigilance sont particulièrement détaillées. Ce suivi montre, en tout cas dans les pays où la couverture vaccinale est correcte, tels que l'Australie et le Royaume-Uni (en France, elle est trop faible), que le nombre d'infections par HPV diminue fortement. À tel point que ces pays ont proposé de vacciner les garçons.

Chez les filles, les HPV produisent des infections génitales, en particulier du col de l'utérus, avec des risques de dysplasie et de cancer, ainsi que des condylomes (verrues génitales). Actuellement, on compte en France environ 1 000 décès par an liés au cancer du col de l'utérus, et dans 75 % des cas, ce cancer est lié aux génotypes du virus compris



dans le vaccin. Donc avec la vaccination, on espère éviter 75 % des cancers. Bien sûr, cela signifie que pour prévenir les 25 % restants, il faut continuer à faire des dépistages et des frottis. Chez les garçons, les HPV entraînent parfois un cancer anal ou du pénis, voire un cancer ORL, mais le risque de ces complications est bien moindre que chez les filles. Ils produisent aussi des condylomes quelquefois très gênants. Mais si on propose de les vacciner, c'est aussi pour protéger les filles.

PLS

Même pour eux, les risques d'effets indésirables restent nettement inférieurs aux bénéfices ?

O. L. : Bien sûr. Quand on recommande un vaccin, on prend toujours en compte ce qu'on appelle le rapport bénéfice/risque. On sait qu'il y a des risques et on essaye de les évaluer de la façon la plus précise possible. Pour ce faire, on regarde les effets indésirables enregistrés pendant le développement clinique d'un vaccin, puis les données de pharmacovigilance que l'on continue à recueillir après sa commercialisation. En pratique, ce suivi porte sur plusieurs milliers de personnes lors des essais cliniques, puis sur les millions de gens vaccinés après la commercialisation du vaccin. Cette surveillance se poursuit en permanence et permet de réévaluer le rapport bénéfice/risque et de modifier les recommandations si l'on pense que les risques sont trop élevés.

PLS

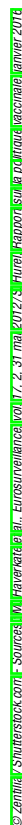
Autre sujet polémique : les adjuvants. Augmentent-ils le risque d'effet indésirable, comme on a pu l'entendre lors de la campagne de vaccination contre le virus H1N1, en 2009 ?

O. L. : Les adjuvants sont des substances qui augmentent la réponse immunitaire à un vaccin. Ils sont indispensables pour la majorité des vaccins qui ne sont pas des microbes atténués. Un adjuvant est utilisé depuis longtemps, l'aluminium, mais il ne fonctionne pas pour le vaccin contre la grippe. Les industriels ont donc opté pour un nouvel adjuvant. *A posteriori*, plusieurs études en Europe, dont une menée en France en 2013, ont montré un lien entre la campagne de vaccination contre H1N1 et des cas de narcolepsie (60 en France sur les 5,7 millions d'individus vaccinés durant l'hiver 2009), mais le recul est insuffisant pour déterminer si ces cas sont dus au vaccin, à l'adjuvant ou à leur combinaison. Les recherches se poursuivent sur les adjuvants et les risques associés à leur utilisation.

PLS

Selon vous, est-il préférable que la vaccination soit obligatoire ou recommandée ?

O. L. : Il y a des arguments pour et contre. Les obligations sont historiques. Elles ont été mises en place pour les premiers vaccins disponibles, afin d'enrayer des épidémies – diphtérie, tétanos, poliomyélite – responsables d'une forte mortalité.



DOSSIER POUR LA SCIENCE

ARMAGEDDON

D'ici à 2032, nous pourrions éviter la destruction de la planète Terre par un astéroïde

TCHOUKI

Les toutes dernières actualités des missions Rosetta et New Horizons

Actuellement
en kiosque

DOSSIER POUR LA SCIENCE - ASTRONOMIE - PLANÈTE X - HISTOIRE DE LA TERRE - PLANÉTOLOGIE

Planètes naines
Météorites
Astéroïdes
Comètes



CES OBJETS CÉLESTES
QUI NOUS RACONTENT

LES DÉBUTS DU
SYSTÈME SOLAIRE

N° 90 Janvier-Mars 2016

pouirlascience.fr

H780 - DQyqyq - jds abnmdn 2, 80 8

www.pouirlascience.fr

Le site de référence de l'actualité scientifique internationale

HOMO SAPIENS INFORMATICUS chronique de Gilles Dowek

Quelle conscience pour les ordinateurs ?

La notion d'opération consciente telle que l'avait définie Leibniz s'applique parfois aux ordinateurs.



Comme beaucoup de termes de la langue, les mots « conscience » et « conscient » ont plusieurs sens, qui demandent à être démêlés : conscience de soi, conscience morale, conscience d'un danger... Intéressons-nous à l'une des significations de l'adjectif « conscient », attribuée au philosophe Gottfried Wilhelm Leibniz et popularisée par la psychanalyse : le désir d'une personne (ou une action, une perception) est « conscient » quand cette personne sait que ce désir existe. Pour cette notion, nous pouvons donner un sens à la question du caractère conscient ou non des opérations effectuées par un ordinateur, pourvu que nous précisions ce que nous entendons par « un ordinateur sait qu'il exécute une certaine opération ».

Prenons l'exemple des programmes qui démontrent des propositions logiques. Donnons à un tel programme les axiomes « tous les hommes sont mortels », « tous les philosophes sont des hommes » et « Socrate est philosophe ». Demandons-lui alors de démontrer la proposition « Socrate est mortel ». Ce programme effectuera – après, possiblement, quelques tentatives infructueuses – deux opérations successives : déduire la proposition « Socrate est un homme » des deuxième et troisième axiomes, puis déduire la proposition « Socrate est mortel » de ce résultat et du premier axiome. Certains programmes se contentent d'indiquer que la proposition « Socrate est mortel » est bien une conséquence de ces trois axiomes,

mais d'autres indiquent également la suite des opérations qui les ont menés à cette conclusion. Nous qualifierons les opérations effectuées par les programmes du premier type d'« inconscientes » et celles effectuées par les programmes du second de « conscientes ».

Nous préférons souvent utiliser des programmes conscients : par exemple, les logiciels d'aide au diagnostic et à la prescription médicale, qui délivrent une ordonnance en indiquant pourquoi les symptômes observés permettent de diagnostiquer une certaine maladie et en quoi

Un programme peut être qualifié de conscient lorsqu'il indique les opérations qui conduisent au résultat

les médicaments prescrits la soigneront, sont en général préférés par les patients à ceux qui ne donnent pas les explications.

Cependant, la conscience a un coût : par exemple, enregistrer systématiquement l'historique des opérations effectuées par un programme qui démontre des propositions logiques le ralentit considérablement.

De plus, la conscience ne peut être que partielle. Ceux qui tiennent un journal quotidien le savent : ils peuvent écrire dans leur journal qu'ils ont mangé un œuf à la coque au petit-déjeuner, ils peuvent aussi y écrire qu'ils y ont écrit qu'ils ont mangé

un œuf à la coque, ils peuvent aussi y écrire qu'ils y ont écrit qu'ils y ont écrit... mais à un moment, ils doivent s'arrêter et donc renoncer à écrire toutes leurs actions. De même, un ordinateur ne peut pas enregistrer toutes les opérations microscopiques qu'il effectue, comme lire ou écrire un mot en mémoire, car enregistrer une telle opération demande des milliers d'opérations similaires, qu'il faudrait, à leur tour, enregistrer. Les opérations microscopiques sont donc nécessairement inconscientes ; seules des opérations macroscopiques, composées d'un grand nombre d'opérations microscopiques, peuvent être conscientes. Il en est de même pour le cerveau, qui ne peut être conscient de chaque influx nerveux produit par l'un de ses neurones.

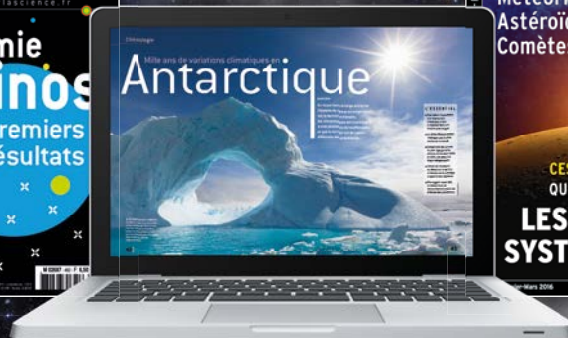
Enfin, la conscience est parfois impossible. Quand un programme effectue des milliards d'opérations, intégrant une multitude d'informations, pour prévoir le temps qu'il fera demain, il est incapable d'expliquer, de façon synthétique, comment il est parvenu à ce résultat.

En affirmant que nombre de nos perceptions et de nos actions sont inconscientes et en se démarquant de l'idée d'une conscience parfaitement consciente d'elle-même, Leibniz a provoqué un scandale philosophique. Avec quatre siècles de recul et l'exemple des ordinateurs, il nous donne plutôt l'impression d'avoir enfoncé une porte ouverte. ■

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

ABONNEZ-VOUS À **POUR LA SCIENCE**

43%
d'économie



OFFRE INTÉGRALE

8,20€/mois

DURÉE LIBRE

- ✓ **Le magazine mensuel**
Pour la Science (12n°/an)
- ✓ **Le thématique trimestriel**
Dossier Pour la science (4n°/an)
- ✓ **L'accès illimité** aux archives
depuis 1996

BULLETIN D'ABONNEMENT

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

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

☐ En durée libre par prélèvement automatique de 8,20€ par mois et je complète l'autorisation ci-contre. **J'économise 43% par mois (IPV8E20)**

☐ Pour une durée d'un an et je joins mon règlement de **99€**

au lieu de 173,45€ (prix de vente en kiosque) (11A99E)

☐ Chèque à l'ordre du groupe Pour la Science

☐ CB N°

Clé*

Expire le

*Les 3 derniers chiffres figurant au dos de votre carte bancaire

Date et signature obligatoires

Nom :

Prénom :

Adresse :

Code postal

Ville :

E-mail obligatoire :

@

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

Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 31/03/16 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site www.pourlascience.fr. Conformément à la loi "Informatique et libertés" du 6 janvier 1978, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification aux données vous concernant en adressant un courrier à Pour la Science. Votre abonnement en prélèvement est reconduit automatiquement et peut être interrompu par simple lettre.

PAS461

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

TYPE DE PAIEMENT : PAIEMENT RÉCURRENT

Titulaire du compte

Nom :

Adresse :

Code postal

Ville :

Désignation du compte à débiter

BIC (Identification internationale de la banque)

IBAN

(Numéro d'identification international du compte bancaire)

Établissement teneur du compte

Nom :

Adresse :

Code postal

Ville :

Date et signature

Organisme Créancier

Pour la Science - 8 rue Férou - 75006 Paris

N° ICS FR92ZZZ426900

N° de référence unique de mandat (RUM)

Joindre un RIB

Partie réservée au service abonnement. Ne rien inscrire

CABINET DE CURIOSITÉS SOCIOLOGIQUES par Gérald Bronner

Se masquer pour faire le mal

En recourant à une identité de substitution, l'internaute se sent moins responsable de ses actes – d'où la levée de ses inhibitions vis-à-vis de la violence verbale.



En février 2015, en France, la CNCDH (Commission nationale consultative des droits de l'homme) émettait un avis sur les discours malveillants sur Internet. Dès les premières lignes de son texte, elle dénonçait la « prolifération des contenus haineux sur la Toile ».

L'idée qu'Internet représente un risque de radicalisation des points de vue n'est pas neuve. Elle a bien souvent été confirmée, tant à travers le constat de la diffusion de propos racistes que de la visibilité publique de déclarations tombant sous le coup de l'apologie d'actes de terrorisme.

Plus généralement, et beaucoup moins grave reconnaissons-le, quiconque a fréquenté les réseaux sociaux sait qu'une simple conversation virtuelle peut facilement, et parfois sur un simple malentendu, dériver vers des fâcheries, voire des insultes ou des menaces. Le pire est probablement atteint sur les forums des divers sites d'information où ceux qui échangent des commentaires ne sont même pas censés être « amis ».

La violence des discussions et la façon dont s'apostrophent, souvent par des noms d'oiseaux, ceux qui participent à ces échanges doivent sans doute beaucoup au fait qu'ils ne sont pas physiquement en contact les uns avec les autres et que cette distance peut inspirer des audaces que la vie réelle n'autoriserait pas. Un peu comme l'automobiliste, protégé par l'habitacle de son véhicule, hurle plus volontiers contre ses congénères que s'il les croisait sur le trottoir. Une certaine distance physique rend un peu irréel le danger qu'implique toute interaction.

Pour aggraver les choses, sur le réseau Internet, beaucoup profitent de l'anonymat que confère un pseudonyme protecteur pour s'abandonner à l'outrance. Cet anonymat fait partie de l'idéologie fondatrice du Web qui se voulait un projet d'émancipation par les communautés virtuelles, ce sur quoi



MASQUES OU MAQUILLÉS, les guerriers sont plus enclins aux exactions. De même, l'internaute « désindividué » se laisse facilement aller à la violence verbale.

insistait, dès les années 1980, l'écrivain et enseignant américain Howard Rheingold, l'un des gourous d'Internet alors naissant.

Dès lors, ces communautés vous offraient la possibilité d'être « un autre » afin de vous extraire des contraintes de votre identité géographique. Personne ne songeait alors que, protégés par des avatars virtuels, les individus en profiteraient pour laisser libre cours aux manifestations les plus obscures de leur personnalité.

Pourtant, dans un tout autre domaine, l'anthropologie avait montré les risques de l'anonymat et du travestissement de son identité. En effet, en 1973, John Watson, un anthropologue de l'université Harvard, eut l'idée de comparer 23 tribus différentes en se demandant si le fait que les combattants revêtaient des peintures de guerre ou des masques changeait leur attitude vis-à-vis de leurs prisonniers.

La réponse qu'il obtint est sans appel : les tribus où les guerriers modifient leur apparence en utilisant des masques, des peintures ou n'importe quel stratagème pour dissimuler leur identité sont, dans 80 % des cas (12 tribus sur 15 dont les guerriers changent d'apparence, contre 1 sur 8 pour les autres tribus), plus enclines à tuer, mutiler ou torturer que les autres. Ce qu'il appela une « désindividuation » paraissait de nature à réveiller les instincts les plus sombres de l'homme.

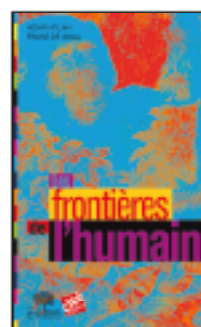
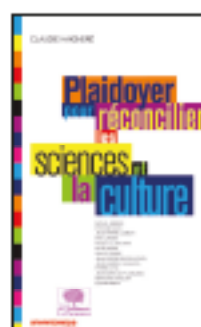
Il est ainsi possible que le recours à des identités de substitution permette plus facilement de lever les inhibitions vis-à-vis de la violence physique ou verbale en nous soulageant de la responsabilité de la conséquence de nos actes. Nous sommes donc au-delà de la simple protection que confère l'anonymat. Ce qui est vrai pour le monde réel l'est pour le virtuel. Il n'y a donc pas lieu de s'étonner que, sous le masque de l'avatar, le guerrier des forums et des réseaux sociaux répande son venin plus souvent que la raison n'y invite. ■

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

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

Une coédition
Le Pommier / Cité des sciences

Nouveauté



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



Une bibliothèque numérique cunéiforme

par Cécile Michel, sur le blog Brèves mésopotamiennes

Alors que le Proche-Orient est à feu et à sang, les sites antiques pillés, les objets archéologiques détruits ou vendus, un groupe international d'assyriologues bâtit depuis un peu plus de quinze ans une gigantesque bibliothèque numérique de textes cunéiformes : Cuneiform Digital Library Initiative (CDLI, <http://cdli.ucla.edu>), dans le cadre d'un projet commun entre l'université de Californie à Los Angeles et l'institut Max Planck d'histoire des sciences, à Berlin. Il s'agit de rendre accessibles à tous, sur Internet, les textes en caractères cunéiformes imprimés sur l'argile fraîche, ou plus rarement gravés sur pierre, écrits par les habitants du Proche-Orient ancien entre 3400 avant notre ère et 75 de notre ère.

On a découvert entre un demi-million et un million de ces textes, dont plus de 300 000 sont déjà catalogués dans cette bibliothèque numérique. Les fiches les plus complètes contiennent des photos de l'objet, une translittération et une traduction en anglais, allemand ou français. Cette base de données unique permet aux assyriologues d'accéder depuis chez eux aux textes cunéiformes conservés dans les musées et collections privées à travers le monde. Des outils de recherche par collection, par période, par site, par type de texte, voire par séquence de signes dans les translittérations leur permettent de mener des études historiques, philologiques ou thématiques, dont les résultats ont vocation à être publiés dans le *CDLI Journal* ou le *CDLI Bulletin*.

Le projet du CDLI est financé par des fondations depuis une quinzaine d'années. Depuis 2015, un nouvel outil, le RTI viewer (*Reflectance Transformation Imaging*), permet d'explorer les images en très haute



Cette tablette cunéiforme du XIX^e siècle avant notre ère, référencée dans la CDLI, retranscrit la gestion d'un troupeau de bovins et la production de beurre et de fromage attendue en fonction de normes fixées à l'avance.

résolution en changeant la direction de l'éclairage. Depuis l'an passé, un catalogue complet de la collection du musée du Louvre, soit 12 520 entrées, est également en ligne.

Le CDLI est destiné aux assyriologues, mais aussi à un public plus large qui peut se promener dans ce musée virtuel des textes cunéiformes. Une application pour iPad permet même de se familiariser avec la production écrite mésopotamienne, grâce à des fiches présentant de très nombreux objets et des techniques de numérisation.

En lien avec le CDLI, le projet *Open Richly Annotated Cuneiform Corpus* (ORACC, <http://oracc.museum.upenn.edu/>), présente des corpus ciblés de textes cunéiformes définis par périodes, archives ou thématiques spécifiques. On peut ainsi découvrir la correspondance reçue par les rois assyriens, et lire les lettres envoyées par les

astrologues tentant, par différents subterfuges, de détourner les mauvais présages de la personne royale. On trouve aussi les listes de vocabulaire antique utiles aux scribes qui devaient apprendre le sumérien, une langue morte aux II^e et I^{er} millénaires.

Egalement liée au CDLI, l'encyclopédie numérique bilingue intitulée *cdli.wiki* (<http://cdli.ox.ac.uk/wiki>) est en cours de construction par une équipe franco-britannique de chercheurs. Outre des notices thématiques, cette encyclopédie comprend des entrées sur les différents systèmes numériques et métrologiques, sur la chronologie et les calendriers en usage, ou encore une présentation des cent objets inscrits en cunéiforme les plus importants pour les historiens d'aujourd'hui, dont la liste commence par le célèbre Code de Hammurabi (XVIII^e siècle avant notre ère), conservé au musée du Louvre.

Même si cela ne remplace pas le travail en musée, la bibliothèque numérique du CDLI permet aux assyriologues de continuer leur travail de déchiffrement sur les textes cunéiformes conservés dans les musées du Proche-Orient, en particulier de Syrie, inaccessibles depuis plusieurs années. Et d'offrir au grand public un accès à l'un des patrimoines les plus remarquables de l'humanité !



Cécile MICHEL
est assyriologue et directrice de recherche CNRS au laboratoire Archéologies et sciences de l'Antiquité, à Nanterre. Elle tient le blog Brèves mésopotamiennes (www.scilogs.fr/brevs-mesopotamiennes).



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

Objets D'ici & D'ailleurs



Bijoux solaires



Météorites



Cadrams solaires



Montres solaires



 bijouxsolaires.com

La Clef des ÉTOILES

Boutique à Toulouse
& sur internet

laclefdesetoiles.com

Votre spécialiste du
matériel d'observation
astronomie & nature

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



La longue traque de la PLANÈTE X

Michael Lemonick

Existe-t-il une planète géante aux confins
du Système solaire ? Des simulations numériques
et des études théoriques suggèrent que oui.
Il ne manque qu'une observation directe pour confirmer
cette hypothèse ancienne !



L'ESSENTIEL

■ La trajectoire étonnante de certains corps glacés en orbite lointaine autour du Soleil suggère qu'il existe une neuvième planète dans le Système solaire.

■ Selon des travaux récents, cette planète serait dix fois plus massive que la Terre et son orbite la placerait loin au-delà de Neptune.

■ L'observation directe devra confirmer la présence de cet objet lointain. Celui-ci défie les télescopes actuels, mais il sera peut-être à la portée des prochains observatoires.

Foto: Nasa

L'AUTEUR



Michael LEMONICK est journaliste scientifique et éditeur pour *Scientific American*. Il est

l'auteur de nombreux ouvrages sur l'astronomie.

« Nous observons des choses étonnantes dans le Système solaire que nous ne savons pas encore expliquer »

Nathan Kaib

Combien y a-t-il de planètes dans le Système solaire ? La plupart d'entre nous ont appris qu'il y en avait neuf. Cela incluait Pluton, qui a été déclassée en planète naine en 2006. Il y aurait donc huit planètes dans le Système solaire, mais ce décompte pourrait changer. En effet, l'étude de certains objets aux confins du Système solaire suggère qu'une neuvième planète, dix fois plus massive que la Terre, pourrait se cacher dans cette région éloignée.

Ces objets appartiennent à un vaste nuage de corps glacés qui forment la ceinture de Kuiper. Mais ils se démarquent par des trajectoires très étranges : leur orbite est particulièrement étirée autour du Soleil (alors que la plupart des planètes ont une trajectoire quasi circulaire) et, même au plus proche du Soleil, ces corps restent au-delà de l'orbite de Neptune.

Toutefois, l'originalité de ce petit groupe, qui a éveillé la curiosité des astronomes, porte sur une autre caractéristique de leur orbite. La plupart des objets de la ceinture de Kuiper, nommés KBO pour *Kuiper Belt Objects*, se déplacent chacun suivant une ellipse dans un plan incliné par rapport à celui de l'écliptique (le plan défini par l'orbite de la Terre autour du Soleil) et sont tantôt au-dessus du plan de l'écliptique, tantôt au-dessous. L'« argument du périhélie », un angle qui relie la position du périhélie (le point de l'orbite le plus proche du Soleil) et le point où l'orbite croise le plan de l'écliptique permet de décrire ces trajectoires. Les KBO qui intéressent les astronomes ici (de quatre à douze selon qui les répertorie) ont la particularité d'avoir un argument du périhélie proche de l'angle zéro : leur périhélie se situe sur le plan de l'écliptique.

En raison des interactions gravitationnelles complexes dans le Système solaire, les arguments du périhélie de ces objets auraient dû varier et devenir quasi aléatoires au cours du temps. Scott Sheppard, un astronome de l'institut Carnegie pour les sciences, aux États-Unis, a estimé que la probabilité que ces objets de la ceinture de Kuiper présentent fortuitement cette même caractéristique est de l'ordre du pourcent.

Cette probabilité équivaut à celle d'obtenir dix fois *pile* d'affilée avec une pièce de monnaie. C'est rare, mais pas impossible. Mais une telle série de *pile* pourrait aussi signifier que la pièce est truquée. Et il en va de même pour ces objets de la ceinture

de Kuiper : un mécanisme à identifier est peut-être à l'œuvre et aurait conduit à cette configuration orbitale. L'une des hypothèses est la présence d'une planète inconnue et bien plus massive que la Terre. Si un tel objet, qui a été surnommé « planète X », existe, il pourrait être dix fois plus distant du Soleil que Neptune et il serait alors trop peu lumineux pour être observé par un télescope. Situé dans les confins du Système solaire, son influence gravitationnelle expliquerait les anomalies observées dans les orbites des KBO qui s'aventurent le plus loin du Soleil.

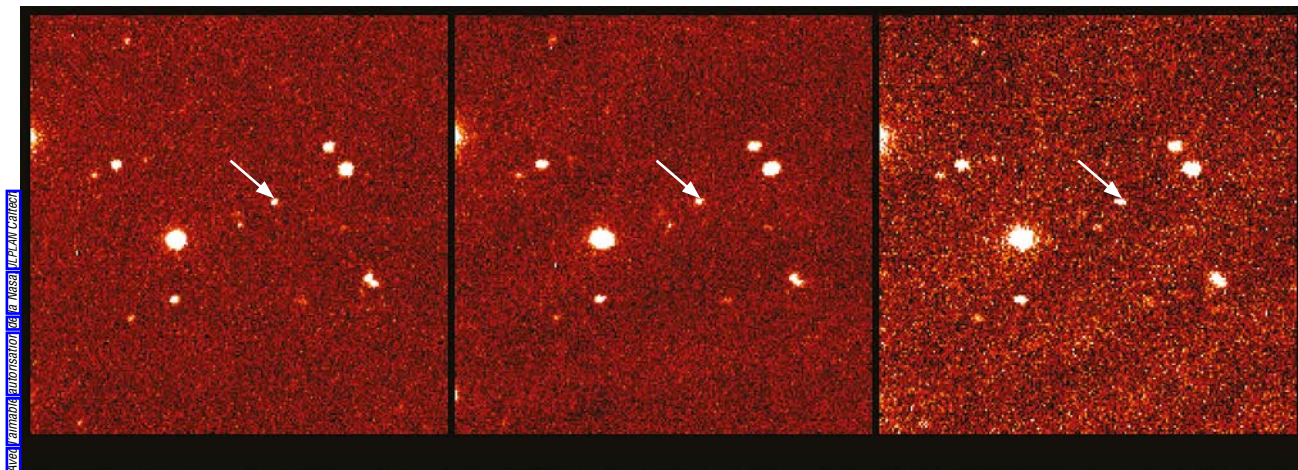
Cette hypothèse ancienne est revenue à la une de l'actualité. En janvier 2016, Konstantin Batygin et Michael Brown, de l'institut de technologie de Californie, ont présenté des arguments théoriques issus de simulations numériques qui renforcent sérieusement l'idée de la planète X.

Des observations inexplicables

Nathan Kaib, de l'institut Carnegie pour les sciences, explique la situation actuelle : « Nous n'avons pas la preuve définitive qu'une telle planète se cache aux confins du Système solaire. Mais nous observons des choses étonnantes que nous ne savons pas encore expliquer. » Si de plus en plus d'astronomes envisagent que la solution est la planète X, de nombreux spécialistes continuent de douter et demandent à être convaincus par une observation directe de l'astre caché. En effet, cette hypothèse a été longtemps tournée en ridicule car l'histoire de l'astronomie est parsemée de cas de planètes mystérieuses dont l'existence était déduite d'anomalies dans les orbites d'autres objets, des propositions qui se révélaient incorrectes. Pourtant, certaines de ces annonces sont devenues des découvertes majeures.

Le premier cas de recherche d'une planète cachée date du XIX^e siècle, lorsqu'on a remarqué que l'orbite d'Uranus (découverte par hasard par William Herschel en 1781) ne respectait pas scrupuleusement les lois de la gravitation de Newton. Plusieurs scientifiques ont imaginé qu'une planète inconnue, voisine d'Uranus, perturbait celle-ci. L'histoire leur a donné raison. En 1846, l'astronome allemand Johann Galle découvrit Neptune dans la région du ciel indiquée par les calculs du Français Urbain Le Verrier.

Au début du XX^e siècle, l'astronome amateur Percival Lowell, issu d'une riche famille de Boston, s'est mis à chercher une



SEDNA EST UN OBJET TRANSNEPTUNIEN d'environ 1 000 kilomètres de diamètre. Sous l'œil du télescope Palomar, en Californie, il est identifié sur ces trois clichés pris à une heure et demie d'écart. Découvert

en 2003, Sedna ne s'approche jamais du Soleil à moins de 76 unités astronomiques (76 fois la distance moyenne Terre-Soleil). Son orbite hors norme pourrait être soumise à l'influence gravitationnelle de la planète X.

autre planète cachée depuis son observatoire privé à Flagstaff, dans l'Arizona. Son projet était motivé par des anomalies relevées dans les orbites d'Uranus et de Neptune. En 1930, Clyde Tombaugh, assistant à l'observatoire Lowell, a trouvé Pluton pratiquement là où les calculs l'indiquaient.

Ce succès semblait reproduire exactement les principes qui ont conduit à la découverte de Neptune. Cependant, la détection de Pluton était le fruit d'un heureux hasard. En effet, pour expliquer les anomalies, Pluton devait avoir la taille de Jupiter, alors qu'elle s'est révélée plus petite que la Lune. La contradiction a fini par disparaître : les anomalies étaient en fait dues à des erreurs de calcul. Pluton était juste au bon endroit au bon moment.

Et Pluton fut déclassée

Dans les années 1980, les planétologues ont suspecté que Pluton n'était peut-être pas seule dans cette région du Système solaire, mais juste le premier membre connu d'un vaste nuage de débris. En 1992, le deuxième corps de la ceinture de Kuiper a été découvert, et l'on a dénombré depuis plus de 1 500 planétoïdes. La découverte d'Éris en 2005, d'une taille équivalente à Pluton et un peu plus massive, souleva la question du statut planétaire de Pluton. Si la ceinture de Kuiper cachait d'autres objets aussi importants, il y aurait une profusion de nouvelles planètes. En 2006, l'Union internationale d'astronomie a alors décidé de reclasser Pluton dans la catégorie des planètes naines.

En étudiant ces planétoïdes de la ceinture de Kuiper, les astronomes se sont interrogés sur le scénario de leur formation. Ils sont trop massifs pour se former aussi loin du Soleil, où le disque protoplanétaire contenait peu de gaz et de poussière. À partir de simulations numériques, les chercheurs ont montré que ces corps seraient nés dans la région occupée aujourd'hui par Neptune. Comment ont-ils migré ? Peu après sa formation, le Système solaire était soumis à un régime chaotique et les planètes géantes gazeuses (Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune) ont probablement changé d'orbite et migré sur des centaines de millions de kilomètres. Leur influence gravitationnelle aurait alors déstabilisé les KBO, les éjectant vers les confins du Système solaire. Dans certaines simulations de ce processus, une planète géante est éjectée ; certains pensent donc qu'il y aurait eu cinq planètes géantes, et celle qui a été perdue serait la planète X.

Ainsi, une super-Terre (une planète de quelques masses terrestres) formée dans les premiers temps du Système solaire pourrait se cacher au-delà de l'orbite de Neptune. La notion même de super-Terre n'est pas si exotique : de telles planètes ont été découvertes en nombre autour d'autres étoiles ces vingt dernières années. À tel point que certains planétologues s'interrogent sur l'absence d'un tel objet dans le Système solaire.

À partir des années 2000, Ben Bromley, de l'université de l'Utah, et Scott Kenyon, du centre d'astrophysique Harvard-Smithsonian, ont simulé le destin d'une super-Terre qui se serait formée dans la région occupée actuellement par Jupiter

et Saturne. Dans la plupart des scénarios, la dynamique globale du système conduit l'orbite de cette planète à s'étirer de plus en plus, jusqu'à ce que la super-Terre soit éjectée du Système solaire. Mais si le phénomène se produit très tôt, quelque 10 millions d'années après la naissance des planètes, le gaz du disque protoplanétaire, pas encore complètement dissipé, freine la super-Terre, qui adopte une orbite quasi circulaire aux confins du Système solaire.

Lorsque Ben Bromley et Scott Kenyon ont entamé leurs travaux sur les super-Terres, personne n'avait encore imaginé la présence d'une telle planète au-delà de la ceinture de Kuiper. La situation a commencé à changer lorsque, en 2003, Mike Brown, Chad Trujillo, de l'observatoire Gemini, à Hawaï, et David Rabinowitz, de l'université Yale, ont découvert Sedna (voir la figure ci-dessus). Malgré de nombreux points communs avec Pluton, Éris et les autres KBO, ce corps glacé hors norme, d'un diamètre de 1 000 kilomètres, se distingue par sa trajectoire. Sedna ne s'approche pas à plus de 76 unités astronomiques du Soleil (l'UA désigne la distance moyenne Terre-Soleil, environ 150 millions de kilomètres) ; c'est plus du double de la distance Neptune-Soleil. Sedna s'en éloigne jusqu'à 930 UA sur son orbite allongée, qu'elle met 11 400 ans à parcourir.

Comme le souligne Chad Trujillo, les chercheurs étaient surpris par cette découverte, car rien ne permettait d'expliquer l'existence de Sedna. Sa trajectoire étirée rappelle celle des comètes, mais, contrairement à ces dernières, Sedna n'est pas soumise à l'influence gravitationnelle des planètes géantes.

Les objets lointains du Système solaire

Bien au-delà des huit planètes, de la ceinture d'astéroïdes et même de la ceinture de Kuiper, les astronomes ont découvert une dizaine d'objets dont les orbites sont atypiques. Ces corps glacés suivent tous des trajectoires très allongées autour du Soleil et restent bien au-delà de l'orbite de Neptune.

Ils partagent une autre caractéristique : ils atteignent leur périhélie – le point de l'orbite le plus proche du Soleil – quand ils croisent le plan de l'écliptique (le plan défini par l'orbite de la Terre autour du Soleil). L'influence gravitationnelle d'une super-Terre très distante du Soleil expliquerait ces propriétés.

DIX AUTRES OBJETS

Les astronomes ont trouvé dix autres objets qui présentent des points communs avec Sedna et 2012 VP113. Leur distance moyenne au Soleil est supérieure à 150 unités astronomiques (UA). On peut les classer en trois catégories : ceux associés au nuage d'Oort interne, qui n'approchent pas à moins de 50 UA, ceux qui s'approchent entre 40 et 50 UA et ne sont pas soumis à l'influence gravitationnelle de Neptune, et ceux qui frôlent l'orbite de Neptune, vers 30 UA.

Trois catégories d'objets lointains

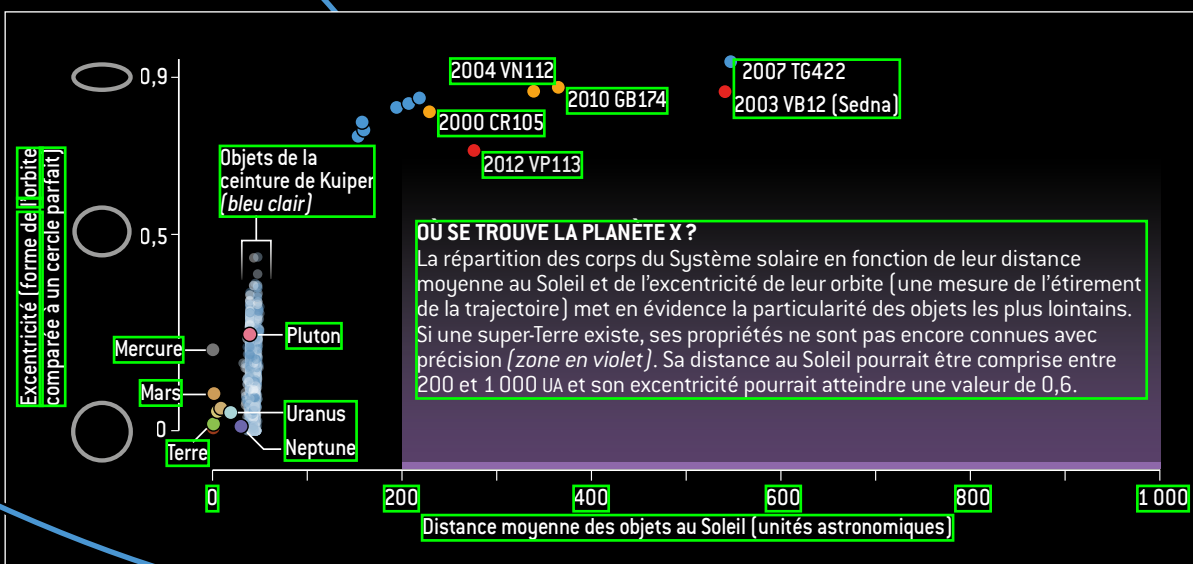
- Objets du nuage d'Oort interne
- Objets non soumis à l'influence de Neptune
- Objets épars

2003 VB12 (Sedna)

2010 GB174

DÉCOUVERTE CLÉ : SEDNA

Repéré en 2003, Sedna est un des objets connus les plus éloignés dans le Système solaire. Son orbite est très étonnante. Ce planétoïde gelé, de 1 000 kilomètres de diamètre, s'éloigne jusqu'à 930 unités astronomiques du Soleil et ne s'en approche pas à moins de 76 unités astronomiques. Il met 11 400 ans pour décrire un tour complet.





Une nouvelle piste pour la planète X

Les planétologues Mike Brown (à gauche) et Konstantin Batygin (à droite), de l'institut de technologie de Californie, ont étudié une poignée de corps de la ceinture de Kuiper dont les orbites présentent des anomalies. Grâce à des simulations numériques, ils confortent l'hypothèse qu'une planète cachée est à l'origine de ces singularités. Konstantin Batygin nous explique leurs travaux.

POUR LA SCIENCE

Les objets que vous avez étudiés étaient déjà ceux au cœur des travaux de Chad Trujillo et Scott Sheppard en 2014. Quelle est la nouveauté dans vos résultats ?

Konstantin Batygin : Chad Trujillo et Scott Sheppard ont remarqué que les objets de la ceinture de Kuiper les plus distants (au-

delà de 250 unités astronomiques) avaient un argument du périhélie (angle qui relie le périhélie et le point de l'orbite qui coupe le plan de l'écliptique) du même ordre de grandeur. Ils l'ont expliqué par la présence d'une planète inconnue en orbite circulaire. Cette planète participe à un effet de résonance gravitationnelle, nommé mécanisme de Kozai, qui influe sur la forme des orbites, leur inclinaison par rapport à l'écliptique et leur ellipticité. Cependant, les deux chercheurs ont constaté qu'ils pouvaient reproduire correctement l'orbite de l'objet 2012 VP113, mais pas celle des autres. Leur solution était incorrecte, mais nous nous en sommes inspirés pour attaquer le problème.

PLS

Quelle a été votre approche ?

K. B. : L'argument du périhélie n'est pas la seule anomalie liée à ces objets. Quand on regarde leur position dans le Système solaire, on voit que les orbites sont toutes concentrées dans une certaine région de l'espace et qu'elles sont toutes dans un même plan. Nous avons effectué des simulations numériques pour en comprendre l'origine.

PLS

Et le phénomène serait lié à une planète X ?

K. B. : Tout à fait ! Nos simulations montraient que nous pouvions expliquer toutes les caractéristiques des orbites si une planète de dix masses terrestres, dotée d'une orbite assez allongée, évoluait loin du Soleil, entre 250 et 1 150 unités astronomiques.

PLS

Votre modèle prévoyait aussi l'existence d'objets qui suivent une trajectoire très inclinée. Qu'en est-il ?

K. B. : Nous pensons que ce point du modèle allait tuer notre scénario, car nous ne connaissions pas de tels objets. Imaginez notre surprise lorsque nous avons appris qu'il en existait ! On en connaît cinq, dont Drac, découvert en 2008.

PLS

Quels sont les obstacles pour observer la planète X et confirmer cette hypothèse ?

K. B. : La planète est très distante. Mais certains des plus grands télescopes (*Subaru*, *Keck*) pourraient la détecter. Nos travaux limitent la zone du ciel à explorer et nous pensons que cinq ans seront nécessaires pour la trouver.

UNITÉ PLOUVIS - ANCIEN

Durant la décennie suivante, dix autres objets aux orbites allongées et restant à bonne distance de Neptune ont été découverts. Plus petits que Sedna, ils n'étaient pas non plus aussi extrêmes dans leurs caractéristiques orbitales, ni par l'éirement de leur trajectoire ni par la distance du périhélie au-delà de Neptune. Mais tous partageaient cette spécificité de la position du périhélie par rapport au plan de l'écliptique. Et cette coïncidence était étrange.

« Sedna aurait pu être une anomalie unique, placée sur cette orbite par un événement inconnu », explique Chad Trujillo, « mais nous ne pouvions pas vraiment le savoir avant d'en trouver un autre. » Or, en 2014, après dix ans de recherche, Chad Trujillo et Scott Sheppard ont annoncé la découverte d'un objet aux propriétés très proches de celles de Sedna.

Ils avaient désormais un deuxième Sedna. Connu sous le nom provisoire de 2012 VP113, cet objet a une orbite située entre 80 et 446 UA, qu'il parcourt en 4 300 ans. Comme Sedna, 2012 VP113 n'est pas soumis

BIBLIOGRAPHIE

K. Batygin et M. E. Brown, **Evidence for a distant giant planet in the solar system**, *The Astronomical Journal*, vol. 151 (2), article 22, 2016.

A. Doressoundiram, **La mystérieuse planète X : mythe ou réalité**, *Dossier Pour la Science*, n° 90, janvier-mars 2016.

C. A. Trujillo et S. S. Sheppard, **A Sedna-like body with a perihelion of 80 astronomical units**, *Nature*, vol. 507, pp. 471-474, 2014.

à l'influence gravitationnelle de Neptune. Et la position de son périhélie par rapport au plan de l'écliptique est similaire à celle de la poignée de KBO de type Sedna.

Chad Trujillo et Scott Sheppard en ont conclu qu'un corps massif extérieur au Système solaire avait en partie façonné les orbites de ces objets. Le perturbateur pouvait être une super-Terre en orbite circulaire à plus de 250 UA du Soleil. Pour Meg Schwamb, de l'université Yale, personne n'avait jugé crédible l'hypothèse de la planète X jusqu'à la publication de l'article de Chad Trujillo et Scott Sheppard.

Mais est-ce la seule explication possible ? Par exemple, Hal Levison, du Centre de recherche américain du Sud-Ouest, a proposé que Sedna, 2012 VP113 et les autres corps étaient sur des orbites différentes à l'époque où le Soleil jeune se trouvait encore au sein de l'amas d'étoiles où il s'est formé. Et avant que l'amas ne se soit dispersé, les étoiles les plus proches du Soleil ont pu influencer sur les orbites des corps qui atteignaient les confins du Système solaire, les renvoyant

vers le cœur du système sur des orbites très étroites et étirées. Scott Sheppard a aussi imaginé des effets de marée galactiques – des forces se manifestant lorsque le Soleil passe dans des régions plus ou moins denses lors de son périple autour de la Voie lactée. L'astronome concède que les simulations numériques d'un tel phénomène n'ont rien donné de probant. Mais d'autres scénarios de ce genre sont encore à explorer.

Ainsi, plusieurs effets sont susceptibles d'avoir envoyé ces corps glacés hors norme sur des orbites oblongues, mais seule l'hypothèse de la super-Terre reproduit les caractéristiques de ces objets lointains. Cette hypothèse ou le hasard !

Les indices sont finalement peu nom-

breux. Les douze objets étudiés par Scott Sheppard et Chad Trujillo ne sont que bien peu de corps parmi les millions que compterait la ceinture de Kuiper. Le phénomène est vraiment marginal et le devient d'autant plus si l'on suit le point de vue de Meg Schwamb et de son collègue Ramon Brasser, de l'institut de technologie de Tokyo. Selon Meg Schwamb, leurs travaux montrent que, parmi les douze objets, seuls quatre sont vraiment similaires à Sedna ; les autres s'approchent assez de Neptune pour subir un effet gravitationnel qui expliquerait leurs propriétés. « L'alignement des quatre autres », ajoute Ramon Brasser, « pourrait alors être le fruit du hasard avec une probabilité d'environ 1 % ». Cependant, un tel résultat ne permet ni d'exclure ni de confirmer l'hypothèse d'une planète X.

Les planétologues ont appris à être prudents. Dans les années 1980, le physicien Richard Muller, de l'université de Californie à Berkeley, pensait expliquer les extinctions massives des espèces sur Terre en invoquant une étoile peu lumineuse ou une naine brune – un objet de masse intermédiaire entre une étoile et une grosse planète – en orbite autour du Soleil à une distance de 10 000 UA. Ainsi, tous les 26 millions d'années environ, cet astre, que le chercheur a surnommé Némésis, perturberait quelques comètes du nuage d'Oort (une ceinture de corps glacés située bien au-delà de l'orbite de Sedna) et les propulserait vers la partie interne du Système solaire. La collision de ces comètes et de la Terre aurait provoqué la disparition de nombreuses espèces vivantes.

Toutes les recherches de Némésis se sont soldées par un échec. Le programme d'observation *Wide-field Infrared Survey Explorer* (WISE) de la Nasa n'a rien détecté. Kevin Luhman, qui a conduit l'étude, explique : « Nous aurions dû voir tout objet de la taille de Jupiter présent jusqu'à une distance d'environ 30 000 à 40 000 UA du Soleil. Et nous devrions voir un objet de la taille de Saturne s'il se trouve jusqu'à 10 000 à 15 000 UA. » Ils n'ont rien vu. Une super-Terre telle que la planète X serait plus proche, mais aussi

« Il faudra environ cinq ans pour trouver la planète X avec un télescope tel que Subaru »

Mike Brown et Konstantin Batygin

moins brillante et plus petite, de quoi échapper à l'œil affûté de WISE.

Avec seulement une poignée d'objets pour se mettre sur la bonne voie, les planétologues ne peuvent pas encore dire si une super-Terre se cache dans le Système solaire. L'observation d'autres objets ayant les mêmes caractéristiques orbitales est cruciale. En novembre 2015, les astronomes ont donc été très enthousiastes à l'annonce de la découverte de V774104, dont le périhélie est encore plus éloigné du Soleil que celui de Sedna.

Pour Scott Sheppard, qui était à la tête de l'équipe ayant découvert cet objet, il est trop tôt pour dire si son orbite confirme ou infirme l'hypothèse d'une planète géante cachée. Et il est prématuré de se prononcer sur les quarante autres objets que l'équipe a repérés dans ce qui est

« la plus vaste étude des confins du Système solaire jamais menée ». Mais plus ils accumuleront de données, plus les chercheurs pourront conclure quant à la présence d'un corps massif.

Début janvier 2016, Mike Brown et Konstantin Batygin ont conforté l'hypothèse d'une planète X de type super-Terre d'une dizaine de masses terrestres (voir l'entretien page ci-contre). Leurs simulations numériques expliquent plusieurs caractéristiques des orbites des KBO, mais elles décrivent aussi d'autres objets connus dont les orbites sont très inclinées par rapport au plan de l'écliptique. C'est le cas de Drac, découvert en 2008, dont l'orbite est inclinée de 108 degrés par rapport à l'écliptique. Alessandro Morbidelli, de l'observatoire de la Côte d'Azur et spécialiste du Système solaire trouve ces arguments convaincants (voir l'entretien pages 34 et 35).

Il reste à observer cette planète ! Les planétologues ont hâte de disposer du LSST (*Large Synoptic Survey Telescope*), un télescope en cours de construction au Chili et qui devrait être opérationnel en 2021. Il ne sera pas plus grand que les télescopes actuels, mais son champ de vision lui permettra de scruter de plus vastes régions du ciel.

Pour l'instant, indique Chad Trujillo, les astronomes ont fouillé environ 10 degrés carrés du ciel – la pleine lune, par comparaison, couvre un quart de degré carré – à la recherche d'objets peu brillants. Le LSST pourra surveiller des dizaines de milliers de degrés carrés. Si une super-Terre se cache dans un recoin du Système solaire, et si elle est assez grande et lumineuse, le LSST pourra la débusquer.

Faudra-t-il attendre 2021 ? Pas sûr. En décembre dernier, des astronomes ont annoncé qu'ils avaient peut-être pris des images d'une super-Terre en utilisant le système *Alma* (*Atacama Large Millimeter/submillimeter Array*) au Chili, mais la plupart de leurs collègues restent sceptiques. Par ailleurs, les résultats récents de Mike Brown et Konstantin Batygin restreignent la zone du ciel à étudier. D'après eux, il faudra cinq ans environ pour fouiller ce champ avec un télescope déjà opérationnel tel que *Subaru*, au Japon. La chasse est ouverte ! ■

« Les nouveaux arguments en faveur de l'existence d'une neuvième planète sont convaincants »

Des simulations suggèrent qu'une planète dix fois plus massive que la Terre serait située bien au-delà de Pluton.

Elle expliquerait les orbites des objets les plus lointains du Système solaire. Un scénario en accord avec les modèles de formation des planètes.

Entretien avec Alessandro Morbidelli



Alessandro MORBIDELLI est astronome à l'observatoire de la Côte d'Azur et spécialiste de la dynamique du Système solaire.

SI

Cent soixante-dix ans après la découverte de Neptune – et dix ans après que Pluton a été déclassée en planète naine –, le Système solaire compte-t-il enfin une planète de plus ? Dans un article publié le 20 janvier dans *The Astronomical Journal*, Mike Brown et Konstantin Batygin, de l'institut de technologie de Californie, affirment qu'une planète massive se cache dans les confins du Système solaire. Bien que l'annonce ait fait sensation, cette « planète 9 » est loin d'avoir été observée ! Les astronomes ont déduit sa présence de l'analyse des orbites de certains petits corps glacés situés au-delà de Neptune. Mais pour Alessandro Morbidelli, chercheur à l'observatoire de la Côte d'Azur et spécialiste de la dynamique du Système solaire, cette neuvième planète a de fortes chances d'être bien réelle. Il nous explique pourquoi.

POUR LA SCIENCE

Quelles sont les caractéristiques de la planète supposée ?

ALESSANDRO MORBIDELLI : Elle serait environ dix fois plus massive que la Terre et située sur une orbite très lointaine et très elliptique : au plus près, elle passerait à environ 250 unités

astronomiques du Soleil (l'unité astronomique, ou UA, est la distance moyenne Terre-Soleil, soit 150 millions de kilomètres) – soit 8 fois plus loin que Neptune –, et s'éloignerait au-delà de 1 200 UA. Son orbite serait très inclinée, d'environ 30 degrés par rapport à l'écliptique (le plan de révolution de la Terre). Les calculs ne disent rien sur sa composition, mais étant donné sa masse, on peut penser qu'elle ressemblerait à une petite Neptune, avec un noyau rocheux et une enveloppe de gaz. Si elle existe, ce n'est pas une planète naine, on peut vraiment parler de neuvième planète !

PLS

Puisqu'elle n'a pas été observée directement, qu'est-ce qui suggère son existence ?

A. M. : L'alignement étrange des orbites de certains petits objets situés aux confins du Système solaire. Au-delà de l'orbite de Neptune (à 30 UA), il existe une vaste population de petits corps : la ceinture de Kuiper. Son plus célèbre représentant – mais pas le plus gros – est Pluton. Mais en 2003, une équipe dirigée par Mike Brown a découvert Sedna, un objet encore plus lointain, dont l'orbite s'étend entre 76 et 950 UA, hors de l'influence de Neptune. On a découvert depuis treize objets semblables, qui s'approchent au plus près au niveau de Neptune et s'éloignent au moins jusqu'à 300 UA.

PLS

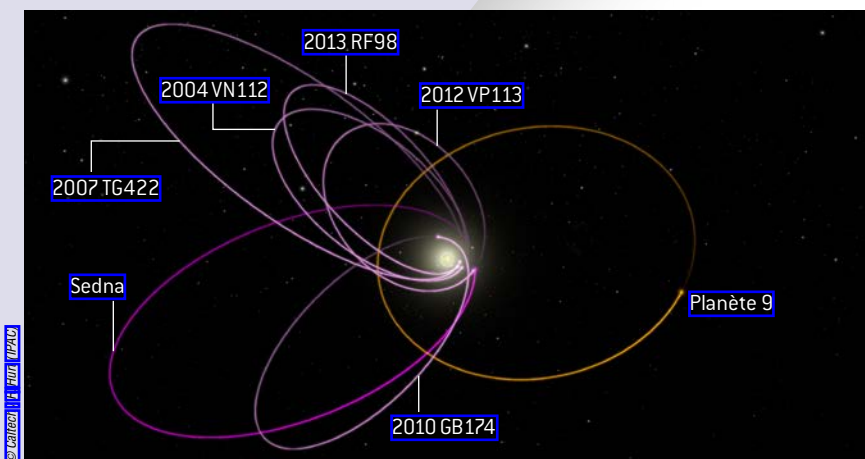
Qu'est-ce qui peut expliquer les orbites de ces objets distants ?

A. M. : En 2014, après avoir découvert le dernier connu, VP 113, Scott Sheppard, de l'institut Carnegie pour les sciences, à Washington, et Chad Trujillo, de l'observatoire Gemini, à Hawaï, ont remarqué que tous ces objets ont une caractéristique commune : ils passent à leur périhélie (le point de l'orbite le plus proche du Soleil) quand ils croisent le plan de l'écliptique et en se déplaçant du sud vers le nord. Les deux astronomes ont alors imaginé que cette configuration pouvait résulter de l'influence de planètes massives et lointaines, mais sans parvenir à le démontrer.

PLS

Que manquait-il pour y parvenir ?

A. M. : Mike Brown et Konstantin Batygin ont poussé plus loin l'analyse des objets distants et ont fourni des arguments convaincants. Ils ont montré que sept d'entre eux ont en fait une orbite chaotique, et se trouvent dans un « alignement » de circonstance. En revanche, les six autres objets, dont Sedna et VP 113, sont dans un véritable alignement physique : leurs orbites sont dans un même plan, incliné d'environ 20 degrés, et sont d'orientations voisines. Le duo



LES ORBITES DES SIX OBJETS LES PLUS DISTANTS DU SYSTÈME SOLAIRE (en violet) sont regroupées dans la même région et dans un même plan incliné par rapport au plan du Système solaire. Une telle configuration serait maintenue par l'influence d'une planète de 10 masses terrestres sur une orbite « anti-alignée » (en orange).

a calculé que cela n'avait que 0,007 % de chance d'être dû au hasard. Il doit donc y avoir un corps massif dont l'influence gravitationnelle maintient ces objets dans cette configuration.

PLS

Comment les deux astronomes ont-ils déterminé les caractéristiques de ce corps ?

A. M. : Tester toutes les masses et orbites possibles serait beaucoup trop lourd. Konstantin Batygin a d'abord réduit le problème à des configurations planes pour déterminer certains paramètres, puis est « remonté en sens inverse » en élaborant des modèles plus complexes. Il a abouti à un modèle qui prend en compte l'évolution de tous les corps en jeu sur plus de 4 milliards d'années.

Les simulations numériques de ce modèle indiquent qu'avec une planète de 10 masses terrestres placée au départ sur une orbite entre 250 et 1 200 UA, les seuls corps distants qui subsistent après 4 milliards d'années évoluent sur des orbites similaires à celles des six objets observés. L'orbite de la neuvième planète supposée est dans le même plan, mais dans la direction opposée.

En outre, le modèle prédit que cette planète injecte aussi un autre groupe d'objets sur des orbites presque perpendiculaires au plan de l'écliptique, voire rétrogrades. Or depuis 2002, on a découvert cinq objets qui correspondent à cette description et dont l'origine restait inexpliquée.

PLS

Mais d'où viendrait cette planète ? Il paraît peu probable qu'elle ait pu se former au-delà de la ceinture de Kuiper.

A. M. : En effet. Mais mes collègues André Izidoro et Sean Raymond, de l'observatoire de Bordeaux, et moi avons justement étudié un scénario sur la formation d'Uranus et de Neptune qui s'accorde bien avec l'hypothèse de la neuvième planète.

Revenons dans le premier million d'années du Système solaire. Jupiter et Saturne sont déjà formées, mais pas Uranus et Neptune. Or l'axe de rotation de ces deux planètes est très incliné (respectivement 98° et 30°). Seules des collisions majeures peuvent expliquer un tel basculement.

Nous avons donc imaginé un modèle où Uranus et Neptune se sont formées à partir de protoplanètes de 5 à 7 masses terrestres. Perturbées par Jupiter et Saturne, certaines entrent en collision et fusionnent pour engendrer des planètes plus massives, comme attendu. Mais dans ce jeu de billard cosmique, il y a toujours d'autres protoplanètes qui sont repoussées par les deux géantes et éjectées du Système solaire.

Or le Soleil est né dans un amas stellaire en même temps que des centaines d'étoiles sœurs, qui se sont depuis dispersées. Dans ces conditions, des chercheurs ont calculé que ces proches voisines auraient empêché 15 à 20 %

des protoplanètes éjectées de s'échapper en les confinant sur des orbites très elliptiques.

Ce scénario, déjà avancé pour Sedna, fonctionne bien pour la neuvième planète. Une autre possibilité, avancée par Konstantin Batygin, est que le gaz du disque protoplanétaire aurait pu freiner la protoplanète éjectée au point qu'elle finisse par se stabiliser sur une orbite elliptique, mais cela reste à montrer.

PLS

Cette découverte rappelle celle de Neptune : en 1846, Urbain Le Verrier avait prédit son existence et sa position en analysant les perturbations de l'orbite d'Uranus. À la différence près que Neptune avait été immédiatement observée là où Le Verrier l'avait indiquée. Quelles sont les chances d'observer la neuvième planète ?

A. M. : Il s'agit d'un objet très peu lumineux. Si l'on suppose que son albédo (la façon dont elle réfléchit la lumière) est similaire à celui de Neptune, sur la partie la plus éloignée de son orbite, la neuvième planète doit avoir une magnitude de 23, soit 1 500 fois plus faible que celle de Pluton !

En outre, on ignore où elle se trouve sur son orbite. Sa période est de l'ordre de 20 000 ans, et elle passe la majorité de son temps sur la partie de son orbite éloignée du Soleil. En 2013, le relevé du ciel *Wise* (*Widefield Infrared Survey Explorer*) a permis d'écarter l'existence d'une planète de la taille de Saturne ou plus à moins de 10 000 UA, mais cela n'exclut pas l'existence d'une planète plus petite que Neptune. D'autres observations semblent écarter la présence de la neuvième planète vers son périhélie.

Autre problème : les grands télescopes capables de détecter un objet si faible (*Hubble*, *Keck*, etc.) ont des champs de vision très étroits. Mike Brown et Konstantin Batygin, ainsi que Scott Sheppard et Chad Trujillo, se sont tournés vers le télescope de 8 mètres de diamètre *Subaru*, à Hawaï, dont le champ est plus large, pour chercher la neuvième planète. Mais il faudra peut-être attendre l'entrée en service en 2021 du LSST, un télescope 8,5 mètres doté d'un champ de 9,6 degrés carrés. Avec cet instrument, si l'on n'a pas observé la neuvième planète d'ici à 2030, on pourra conclure qu'elle n'existe pas ! ■

Propos recueillis par Philippe RIBEAU-GESIPPE

La cité oubliée de Jinsha

Mayke Wagner et Pavel Tarasov

La découverte fortuite au Sichuan, en Chine, d'une ancienne cité atteste de l'existence d'une riche culture qui révérait l'éléphant, il y a plus de deux mille ans.

Les érudits chinois de l'Antiquité écrivaient beaucoup. Ils écrivaient tellement qu'il semble qu'à partir du III^e siècle avant notre ère, aucune question historique chinoise ne soit restée sans réponse. Aucune ? Pas vraiment. Les chroniqueurs des trois premières dynasties chinoises – les dynasties Xia (2100-1600 avant notre ère), Shang (1600-1046) et Zhou (1046-771) – passaient sous silence les cultures voisines, qu'ils tenaient pour négligeables. L'étaient-elles ? Manifestement pas, puisque l'on a découvert au Sichuan la cité de Jinsha, où florissait une culture riche et complexe au début du I^{er} millénaire avant notre ère. Les anciens Chinois pouvaient-ils vraiment ignorer son existence ?

Leur ignorance apparente est d'autant plus étonnante que les chroniqueurs chinois ont écrit sur tout ce qui a précédé l'Empire du Milieu jusqu'au XXI^e siècle avant notre ère. Or dès la première grande fouille chinoise en 1928, ces sources se sont révélées fiables : c'est en se fondant sur leurs écrits que l'on a découvert Yin Xu (littéralement les « ruines des Yin »), la capitale de la dynastie Shang, que l'on nomme aussi la dynastie Yin. À partir du XVI^e siècle avant notre ère, les rois Yin (ou Shang) ont régné depuis cette ancienne ville sur une grande partie de la plaine chinoise orientale. La frontière sud de leur royaume était la rive du cours moyen du Changjiang, aussi appelé le Yangtsé.

L'ESSENTIEL

■ Les cultures voisines de la Chine antique ne sont jamais mentionnées par les chroniqueurs chinois. De ce fait, les archéologues les ont cru négligeables...

■ ... jusqu'à ce qu'ils découvrent leur complexité, comme par exemple sur le site de Jinsha, au Sichuan.

■ Dans cette cité fondée à la fin du II^e millénaire avant notre ère s'était développée une culture riche et singulière.

■ Jinsha était peut-être la capitale d'un royaume disparu, jamais mentionné mais connu des anciens Chinois.

CE DISQUE SOLAIRE mis au jour à Jinsha est devenu le symbole de sa culture.





LE NOYAU HISTORIQUE CHINOIS occupe les plaines du nord-est de la Chine actuelle, tandis que le bassin du Sichuan occupe le piémont himalayen, à l'ouest. Il y a plus de trois millénaires, des cultures prospéraient déjà dans cette riche région agricole, de sorte qu'il est étonnant que les chroniqueurs chinois ne les aient jamais mentionnées. De fait, en 2001, les archéologues chinois ont eu la surprise de découvrir dans la banlieue de Chengdu, la capitale du Sichuan, toute une cité, qui fut peut-être la capitale d'un ancien royaume aujourd'hui complètement oublié (à droite).



© Spektrum der Wissenschaft / Ernie Grant

Cette richesse des anciens écrits a créé en Chine une situation singulière : toute recherche archéologique y commence par la lecture des textes. Les archéologues chinois posent de cette façon des hypothèses qu'ils vérifient sur le terrain. Une méthode qui a fait ses preuves, du moins en ce qui concerne le noyau historique de l'Empire du Milieu.

Rien hors du noyau historique ?

Toutefois, hors de ce noyau, les choses sont plus compliquées, du moins s'agissant des époques anciennes. C'est particulièrement le cas pour la période des trois premières dynasties chinoises (2100-771 avant notre ère). Les territoires des Xia, des Shang et des Zhou étaient certainement bordés de royaumes étrangers ; mais aucune inscription ni aucun texte chinois ne les mentionnent.

Ce désintérêt traduit l'élitisme des érudits chinois : le monde civilisé s'arrêtait pour eux au Yangtsé. Au-delà, il n'existait que des espaces sauvages peuplés d'incultes barbares... Ce n'est qu'avec l'expansion de la dynastie Han (206 avant notre ère-220 de notre ère) que, pour des raisons pratiques, les chroniqueurs chinois se sont vraiment intéressés aux régions limitrophes du noyau historique chinois.

Leur manque d'intérêt pour les cultures voisines de la Chine a longtemps influencé la vision des archéologues chinois sur l'histoire de ces régions dans l'Antiquité : rien

de très complexe ne pouvait y avoir existé. Cette attitude condescendante concerne en particulier la province actuellement la plus peuplée de Chine : le Sichuan (107 millions d'habitants). C'est étonnant, sachant que dans cette région un peu plus grande que la France métropolitaine, une culture importante a longtemps existé : le royaume de Shu, qui était contemporain de la dynastie Zhou.

Ce n'est qu'à la fin de cette époque, pendant la période dite des Royaumes combattants (476-221 avant notre ère), que le royaume de Shu finira par être mentionné par les chroniqueurs chinois. Pour une raison évidente : la dynastie Qin (prononcé « tchinne »), entrée en expansion, était en train de le conquérir, ce qui sera accompli en 316 avant notre ère. Les Qin ont ensuite continué à conquérir territoire après territoire, jusqu'à ce qu'en 221 leur roi se déclare empereur et fonde ainsi la première dynastie impériale chinoise.

En Occident, l'empereur Qin, le premier grand souverain « chinois », est surtout connu par les statues de soldats en terre cuite grandeur nature qui gardent son tombeau. Du reste, le terme de « Chine » pourrait être un dérivé de « Qin », bien que ce point reste controversé. Comme les autres peuples déjà dominés, celui de Shu a été complètement assimilé : les Shu ont perdu leur identité culturelle et même leur langue.

Après la conquête, les nouveaux maîtres firent réaliser des prouesses techniques à Chengdu, la capitale du Sichuan : on régula

LES AUTEURS



Mayke WAGNER est directrice adjointe du département Asie de l'Institut archéologique allemand, à Berlin.

Pavel TARASOV est professeur invité de palynologie à l'université libre de Berlin.



les eaux des fleuves descendant du plateau tibétain par un barrage et l'on construisit un réseau de canaux pour irriguer la plaine. Des personnages sculptés placés à l'entrée de ces canaux indiquaient la hauteur d'eau, tandis que des hippopotames de pierre indiquaient la profondeur du lit. Cette installation, qui a été placée par l'Unesco dans la liste du patrimoine mondial de l'humanité, fonctionne toujours.

Ainsi, Chengdu s'est développée sous la domination chinoise. Au III^e siècle de notre ère, elle était devenue un important centre de production de soie et de brocart. La grande capacité d'innovation qui a toujours caractérisé Chengdu s'illustre par exemple par l'émission dans cette ville des premiers billets de banque d'État au monde, en 1023 de notre ère. Hormis la période chinoise, Chengdu semblait cependant n'avoir aucun intérêt archéologique; le peuple des Shu et ses ancêtres étaient tombés dans la trappe de l'histoire.

Un échangeur qui change tout

Ils en sont ressortis il y a quinze ans, quand les archéologues ont eu la surprise de mettre au jour toute une cité dans un quartier de Chengdu nommé Jinsha : le 8 février 2001, des ouvriers travaillant sur le chantier d'un échangeur autoroutier découvrirent des défenses d'éléphant et des objets de jade. Une période passionnante commença alors pour les archéologues de la ville : ils mirent au jour plus d'une tonne d'ivoire,

ce qui en soi était déjà sensationnel... mais aussi de nombreux objets d'or, de bronze et de pierre (voir la figure page 42). Parmi eux, quelque neuf cents armes, sceptres, objets de jade et autres œuvres ostentatoires servant à l'apparat et à la représentation, le tout remontant à environ mille ans avant notre ère.

Un centre urbain de 5 kilomètres carrés

Les chercheurs mirent ensuite au jour un centre urbain de plusieurs milliers de mètres carrés. Ils ont peu à peu compris que la zone habitée, traversée par le Modi, un affluent du Yangtsé, couvrait environ cinq kilomètres carrés. Au sud de cette zone, ils découvrirent une série de fosses rituelles, où avaient été jetées des défenses d'éléphant et des objets de bronze et de jade. Le grand nombre d'anneaux de pierre, de dents brisées de sangliers et de bois de cerf retrouvés suggère la présence d'un sanctuaire. Distant de seulement 30 mètres, un quartier habité se reconnaît à ses trous de poteaux, ses milliers de tessons de poterie et son four à céramique. Non loin de là se trouvait un cimetière.

Les fouilles ne sont toujours pas achevées, mais elles ont déjà mis en évidence le haut niveau de développement de la société qui a précédé le royaume de Shu. La découverte du site de Jinsha a aussi éclairé d'un jour différent de grandes maisons allongées comprenant plusieurs pièces que l'on avait découvertes en 1995 au nord du Modi. Les archéologues pensent aujourd'hui qu'il s'agit de sortes de palais faisant partie de l'agglomération. Le plus grand mesure 55 mètres sur 8 et se compose de cinq pièces alignées, chacune dotée d'une porte communiquant avec l'extérieur.

Comportant des palais, des quartiers d'habitation et des cimetières, Jinsha était donc un grand centre urbain. Sa céramique montre qu'il faisait partie de la culture de Shi'erqiao (1200-800 avant notre ère environ), elle-même suivant une société plus ancienne : celle de Sanxingdui (2000-1200 avant notre ère environ). Comme nous allons le voir, certains des objets de prestige découverts à Jinsha suggèrent cette continuité.

Les objets ostentatoires de Jinsha sont souvent des chefs-d'œuvre. Le plus célèbre est un disque doré figurant un

soleil entouré d'oiseaux stylisés (voir la figure page 37). La figurine de bronze d'un noble de Jinsha comporte aussi un tel disque. Pour représenter son sceptre ainsi que certains éléments de son habit, les artisans préférèrent employer du jade d'une grande finesse. Les statuettes nous renseignent non seulement sur la façon dont l'élite s'habillait à Jinsha, mais aussi

Un petit masque d'or relie Jinsha à certains objets découverts sur le site archéologique de Sanxingdui

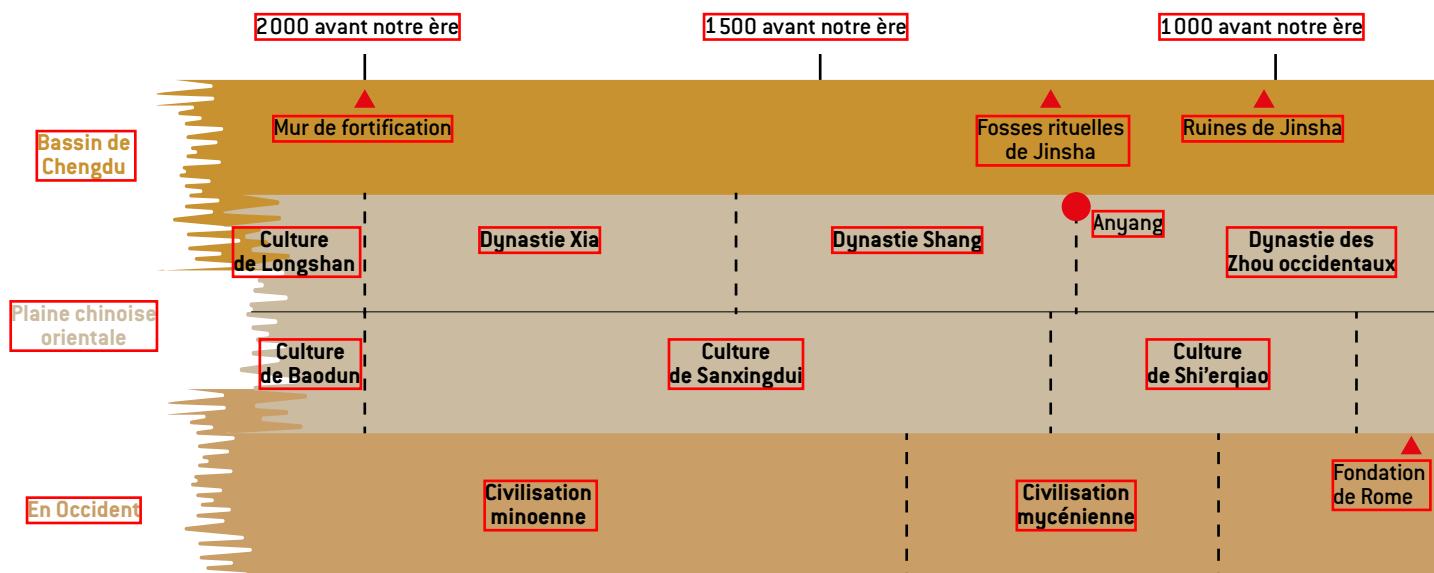
sur les coiffures de ses membres: il semble qu'étaient à la mode de longues tresses ainsi qu'une sorte de coupe à l'iroquoise. Les représentations animales illustrent, pour leur part, un haut niveau d'abstraction et une grande habileté dans l'art de mettre à profit les veines de la pierre.

C'est en particulier un petit masque d'or (voir la figure page 42) qui relie Jinsha à certains objets découverts sur le site archéologique de Sanxingdui. Découverte en 1986, cette ancienne agglomération située 40 kilomètres au nord de Chengdu aurait été fondée vers 2000 avant notre ère (voir la chronologie ci-dessous) et habitée durant près d'un millénaire. Les céramiques que l'on y a découvertes l'associent à une culture plus ancienne encore: celle de Baodun qui a prospéré dans la plaine de Chengdu entre 2500 et 2000 avant notre ère environ.

Étant donné la communauté de style de certains objets, les archéologues chinois pensent aujourd'hui que Jinsha est une refondation de Sanxingdui. Lors de la découverte de cette agglomération en 1986, deux fosses rituelles ont été mises au jour. Creusées et remplies entre 1300 et 1000 avant notre ère, elles étaient pleines de masques de bronze et de fragments de statues. Deux têtes de bronze portent des impressions d'or évitant la zone des yeux, comme ce que l'on voit sur le masque doré découvert à Jinsha. Par ailleurs, la statuette d'un homme debout sur un socle de crânes d'éléphants a fait le tour du monde, devenant l'objet le plus célèbre de Sanxingdui. Il pourrait s'agir d'un grand chamane, d'un prêtre d'État, d'un roi déifié, ou d'une représentation rituelle d'un dieu ou d'ancêtres...

Cette trouvaille et les nombreuses défenses d'éléphant découvertes dans les fosses rituelles de Jinsha attirent l'attention sur un autre point commun entre Sanxingdui et Jinsha: la grande importance symbolique des éléphants dans les deux villes.

Cela pourrait étonner, puisqu'en Chine actuelle, on ne rencontre d'éléphants que dans les jungles de la frontière de la Chine avec la Birmanie. Ils font partie de l'espèce asiatique *Elephas maximus*, menacée d'extinction. Ils habitent des forêts montagneuses s'étendant jusqu'à 3000 mètres d'altitude et atteignant la limite des neiges dans l'Himalaya. En réalité, ces animaux ne sont vraiment dans leur environnement que dans le maquis herbeux et plein de bambous de régions plus chaudes.



C'était le cas de la plaine de Chengdu et des montagnes environnantes dans l'Antiquité. Si, en été, la température dépassait les 25 °C, ils se retiraient dans les forêts tropicales des montagnes, tandis qu'en hiver, lorsque la température descendait à 5 ou 6 °C, ils séjournaient plutôt dans les forêts marécageuses de la plaine. Bien avant que les champs créés par les hommes n'aient réduit partout l'habitat des éléphants, les hommes les employaient comme bêtes de somme. Lorsque, dans les années 1370, Chengdu fut attaquée par les troupes de la dynastie Ming (1368-1644), ses défenseurs employèrent des éléphants de guerre. Ce n'est qu'à l'apparition des armes à feu que l'on a cessé de recourir aux pachydermes.

Dans les cultures de Jinsha et de Sanxingdui, ces grands animaux servaient-ils au transport, au combat ? Nous l'ignorons. Leur importance symbolique est en tout cas évidente. De la statue d'un homme debout sur des crânes d'éléphants stylisés découverte à Sanxingdui, dont les mains tenaient à l'origine une défense d'éléphant, soixante exemplaires ont été retrouvés dans la même fosse. Une tôle d'or exhumée à Jinsha suggère une scène similaire. Certes, les mains de la statue étaient vides lors de sa découverte, mais environ soixante défenses d'éléphant non travaillées se trouvaient dans la fosse.

Un masque mis au jour lors de la même fouille suggère clairement une signification religieuse des éléphants : vaguement anthropomorphe, il est en effet orné d'une

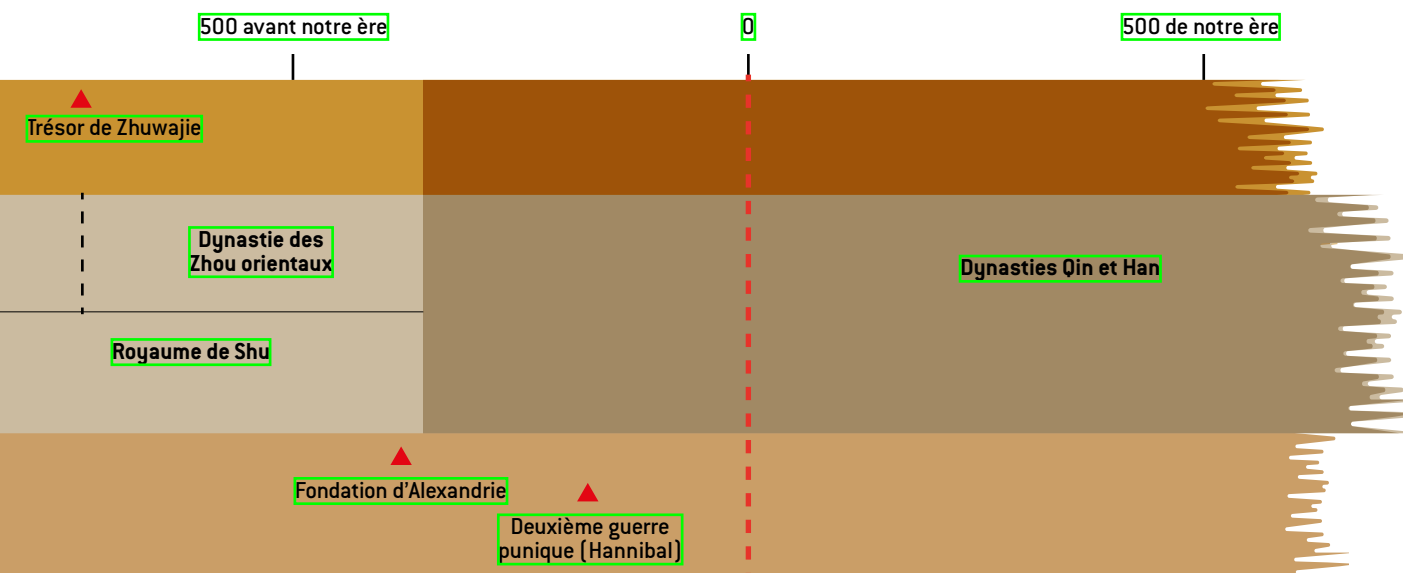
trompe et d'oreilles d'éléphant. Ces détails suggèrent que les prêtres ou chamanes de Jinsha et de Sanxingdui se paraient, lors des cérémonies, de symboles éléphanthesques et offraient aux dieux ou aux ancêtres des défenses, qu'ils déposaient dans des fosses la pointe orientée vers le sud. Cette interprétation des masques majestueux n'est cependant qu'hypothétique : l'éléphant et l'homme paraissent y fusionner pour former la figure d'un ancêtre mâle mythique, ou peut-être celle d'un dieu-éléphant, qui recevait de l'ivoire en remerciement des services de ses créatures. Curieusement, il semble que cette matière précieuse qu'est l'ivoire n'ait jamais été travaillée, comme s'il faisait l'objet d'un tabou.

Un culte de l'éléphant

Même si les habitants de Jinsha et ceux de Sanxingdui avaient ce culte de l'éléphant en commun, les différences entre les deux cultures traduisent une évolution. À Jinsha, les fosses rituelles contiennent par exemple nettement plus de défenses. Les sculptures y sont aussi bien plus petites. Et les symboles célestes et les oiseaux ont plus de place.

Pourquoi Sanxingdui a-t-elle été abandonnée en faveur d'une ville nouvelle ? On ne peut qu'émettre des conjectures. Il est possible que la fondation de Jinsha corresponde à une réorientation religieuse sur les forces célestes, peut-être motivée par la fondation d'un royaume. L'état et le contexte des objets sacrés de Sanxingdui

LA CHRONOLOGIE CHINOISE s'étend sur plus de 3 000 ans ; elle est compliquée par des transitions entre grandes dynasties au cours desquelles il arrive fréquemment que la Chine soit divisée entre des pouvoirs différents, mais tous chinois. Les pouvoirs non chinois, mais présents sur des terres qui allaient devenir chinoises avec l'expansion des Han, sont mal connus.





LES OBJETS DE PRESTIGE découverts sur le site de Jinsha sont en jade, en or ou en pierre. À gauche, un cong de jade, c'est-à-dire un objet tubulaire à section carrée puis ronde, qui remplissait une fonction rituelle inconnue. Au centre, un petit masque d'or dont les contours sont caractéristiques du style de Jinsha ou de Sanxingdui. À droite, une figurine de pierre représente un prisonnier nu accroupi les mains liées dans le dos, ce qui atteste d'une activité guerrière. Sa coiffure typique indiquait probablement son appartenance ethnique aux habitants de Jinsha.

© AFP / L. VANDERKAM, L. GARDIN, J. SARRAZIN, J. L. LAFITE

vont dans le sens d'une transplantation planifiée : les statues, les masques et autres objets probablement rituels ont été détruits et enterrés ; d'après les archéologues, le temple et son autel ont été déplacés.

Comment situer Jinsha par rapport aux cultures qui lui sont antérieures et postérieures ? Ce centre urbain faisait partie de la culture de Shi'erqiao, mais ses racines remontent, par celles de Sanxingdui, jusqu'au III^e millénaire avant notre ère, à la culture de Baodun.

La cité de Jinsha était-elle la capitale d'un royaume ?

Par ailleurs, le fait que la culture matérielle de Shi'erqiao persiste à l'époque suivante va dans le sens d'une continuité entre Jinsha et le royaume de Shu, qui domine le Sichuan depuis Chengdu dans la seconde moitié du I^{er} millénaire avant notre ère, ce qui suggère aussi une forme de passation politique entre la capitale que semble avoir été Jinsha et Chengdu, la capitale Shu. Bref, Jinsha aurait été le cœur d'un ancien royaume qui se serait établi dans le Sichuan avant l'an 1000.

Est-il possible que les Chinois aient ignoré l'existence de ce « royaume de Jinsha » et de ce qui l'a précédé à Sanxingdui ? Ces cultures étaient pourtant présentes à l'époque des dynasties chinoises Xia, Shang et Zhou. En outre, les archéologues ont mis au jour à Sanxingdui des

vases de bronze de style Shang, c'est-à-dire du style de la deuxième dynastie (1600-1046 avant notre ère). Cela prouve bien que l'on se connaissait...

Du reste, le cuivre utilisé pour réaliser les masques de bronze de Sanxingdui provenait de mines Shang. La découverte de trésors, tel celui de Zhuwajie, ou encore le contenu de tombes trouvées non loin de Jinsha, ont prouvé que Jinsha entretenait des contacts avec l'empire Zhou, dont le territoire central se trouvait à 600 kilomètres seulement. Certains historiens vont même jusqu'à penser que les souverains de Jinsha ont non seulement toléré, mais activement soutenu les conquêtes des entrepreneurs Zhou. Mais les textes ne laissent rien transparaître de ces possibles alliances nord-sud.

On peut supposer que la plaine de Chengdu cache encore bien des surprises archéologiques sous sa luxuriante végétation. Celle-ci est si vigoureuse que les archéologues qui fouillent dans le Sichuan peuvent regarder les bambous pousser à vue d'œil. Aussi la mairie de Chengdu a-t-elle décidé de protéger le site de Jinsha dans un musée inhabituel : un immense hangar couvrant une partie des fouilles de façon à préserver les horizons archéologiques.

Le cas du site de Jinsha illustre les efforts de l'archéologie chinoise depuis vingt ans pour sortir des frontières définies par les anciens chroniqueurs. Un mouvement qui va se poursuivre et nous révéler de plus en plus de cultures avancées hors du noyau historique chinois. ■

BIBLIOGRAPHIE

A. Thote, Chine, l'énigme de l'homme de bronze : archéologie du Sichuan (XII^e-III^e siècle av. J.-C.), Paris-Musées, 2003.

L. von Falkenhausen, The external connections of Sanxingdui, *Journal of East Asian Archaeology*, vol. 5, cahiers 1-4, p. 191, 2003.

C. Shen, Anyang and Sanxingdui : Unveiling the Mysteries of Ancient Chinese Civilizations, Royal Ontario Museum, 2002.

france culture C'EST POUR VOUS

LA MARCHÉ DES SCIENCES

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

AURÉLIE LUNEAU
CHAQUE JEUDI
16H - 17H



en partenariat avec **POUR LA SCIENCE**

Écoute, réécoute, podcast
franceculture.fr



Robot, as-tu du cœur ?

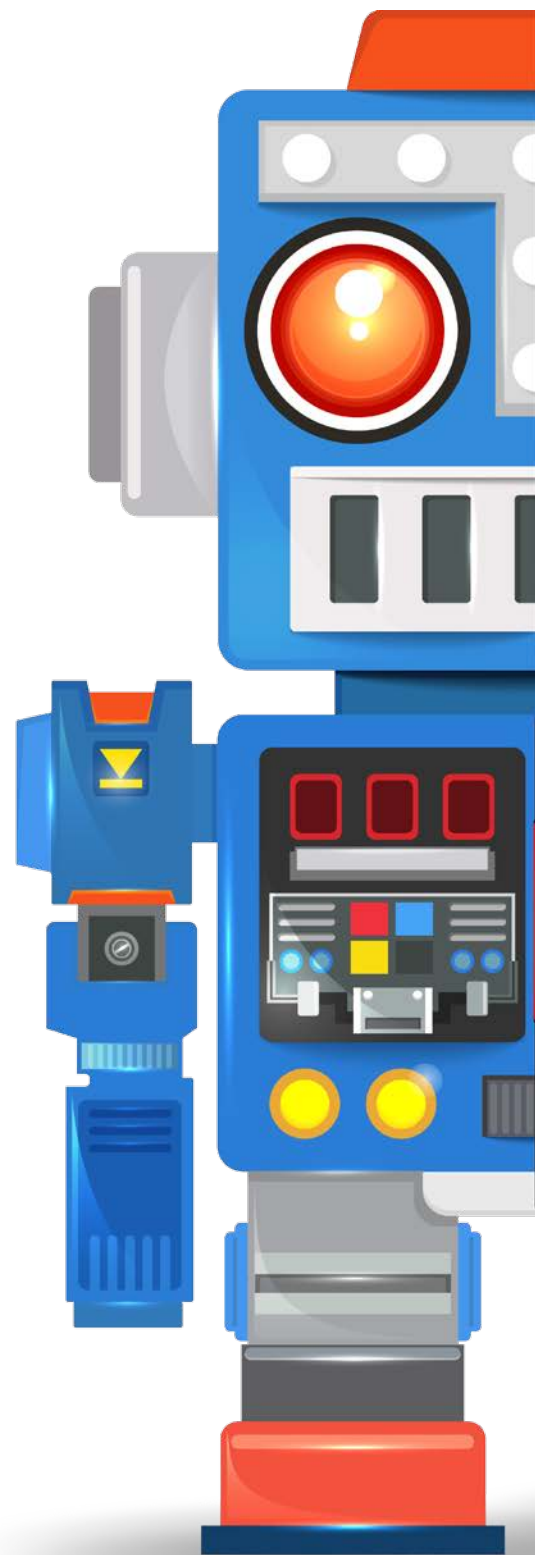
Pascale Fung

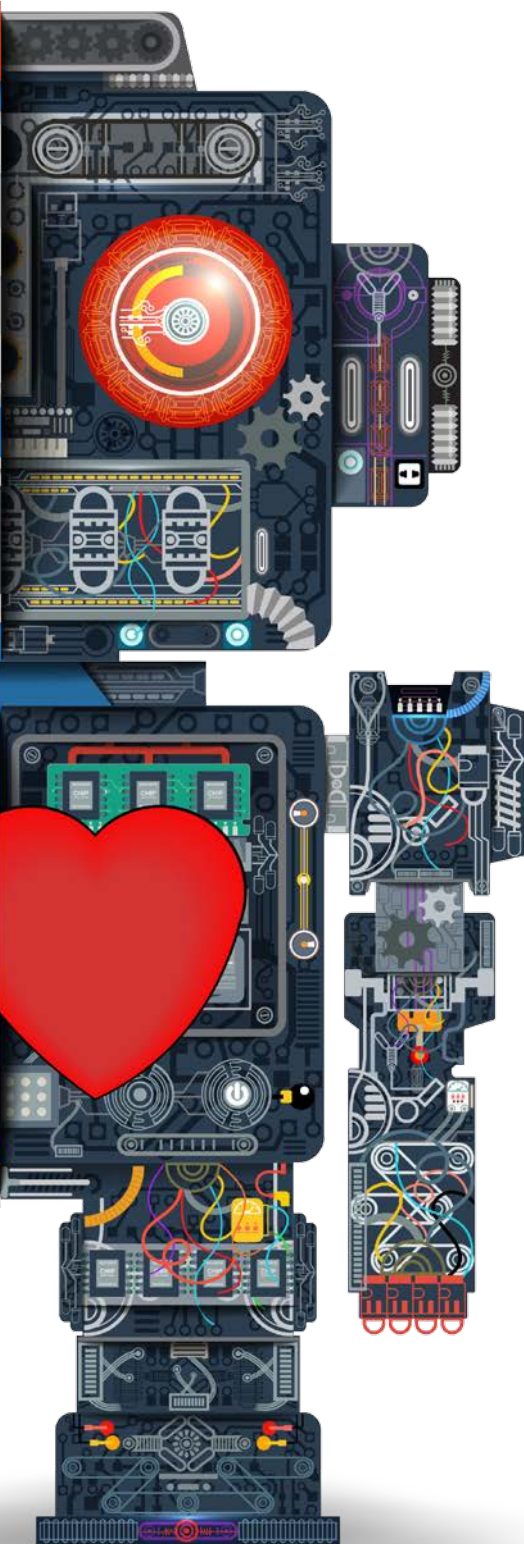
**Avant de côtoyer des robots au quotidien,
il va nous falloir leur apprendre à comprendre
les émotions humaines... Ou, du moins, à les imiter.**

Les robots intelligents sont aujourd'hui répandus et ils sont parfois étranges. Demandez à votre téléphone: « Siri, est-ce que tu m'aimes ? ». Il vous répond: « Disons que vous avez toute mon estime... ». Siri est l'agent conversationnel développé par la société Apple pour aider nos iPhones à nous trouver un restaurant, une information ou encore à appeler un ami lorsque nous avons les mains prises. Tous les téléphones de dernière génération intègrent désormais de tels agents, mais la présence de ces derniers dans nos vies n'est pas nouvelle. Depuis longtemps, que vous appeliez la Fnac ou la SNCF, vous avez d'abord affaire à une machine parlante.

Pour autant, ces intelligences artificielles ne répondent pas toujours de façon... intelligente, notamment parce que les logiciels de reconnaissance de la parole ne sont pas encore assez performants; et elles ne saisissent pas non plus les émotions, l'humour, les sarcasmes ou encore l'ironie. Or nous allons avoir de plus en plus souvent affaire à de telles machines; et bientôt, certaines auront des corps! Nous connaissons déjà les aspirateurs robots, nous aurons probablement bientôt des robots infirmiers... C'est pourquoi il est important que ces intelligences artificielles progressent dans leur compréhension de nos mots et qu'elles nous « comprennent ». Il faut donc parvenir à les doter de moyens efficaces d'appréhender, de partager et de traiter les émotions humaines: en deux mots, nous avons besoin de robots empathiques.

Quelques robots imitant l'émotion humaine sont déjà sur le marché: Pepper, par exemple, est un petit compagnon humanoïde





L'ESSENTIEL

■ Les gens interagissent de plus en plus souvent avec des machines commandées par la voix.

■ Ils attendent d'elles spontanément qu'elles saisissent leurs émotions, y compris les plus complexes, tels l'humour ou la moquerie.

■ C'est pourquoi des chercheurs travaillent à doter les intelligences artificielles de logiciels capables d'extraire des émotions de la voix et des mots.

■ Même si ces recherches débutent, de premiers robots empathiques existent et s'améliorent de jour en jour.

fabriqué par la société française Aldebaran Robotics afin d'accueillir les visiteurs dans les points de vente de l'opérateur téléphonique japonais Softbank Mobile. Autre cas, Jibo est un assistant personnel domestique de 2,7 kilogrammes. La « robotique empathique » n'en est encore qu'à sa naissance, mais les outils et les algorithmes qui amélioreront spectaculairement les machines en les dotant d'une « empathie artificielle » de qualité sont en cours de développement.

C'est ce sur quoi travaillent les équipes du laboratoire que je dirige à l'université des sciences et technologies de Hong Kong. Mon intérêt pour les robots empathiques est né il y a six ans, lorsque j'ai lancé mon équipe dans la mise au point de l'équivalent chinois de Siri. D'emblée, la façon dont les utilisateurs développent naturellement des réactions émotionnelles vis-à-vis des assistants personnels et leur frustration lorsque ces machines n'arrivent pas à les comprendre m'a fascinée. J'ai vite pris conscience que la clé de la conception de machines empathiques est la mise au point d'algorithmes efficaces de reconnaissance de la parole. Or je venais justement de passer vingt-cinq ans de ma carrière à en développer...

Le module d'empathie

Toute machine intelligente est, par essence, un ensemble de composants logiciels, tels des bases de données, des fichiers de configuration, des programmes... Chacune des composantes d'un tel « système logiciel » remplit une fonction unique. Ainsi, un robot intelligent pourra être doté d'un module de traitement de la parole, d'un programme de reconnaissance des objets présents dans les vidéos qu'il a enregistrées, etc. Toutefois, le « cœur » d'un robot empathique sera le composant logiciel conçu pour analyser les signaux faciaux et acoustiques des humains, puis le contenu du discours afin d'en dégager les émotions humaines... C'est ce « module d'empathie » qui traitera les informations émises par les humains et dictera au robot ses réactions.

Ces informations sont complexes. Deux humains qui communiquent envoient et reçoivent de nombreux signaux émotionnels. Qu'ils en aient conscience ou pas, chacun

© Logovirad / Shutterstock.com

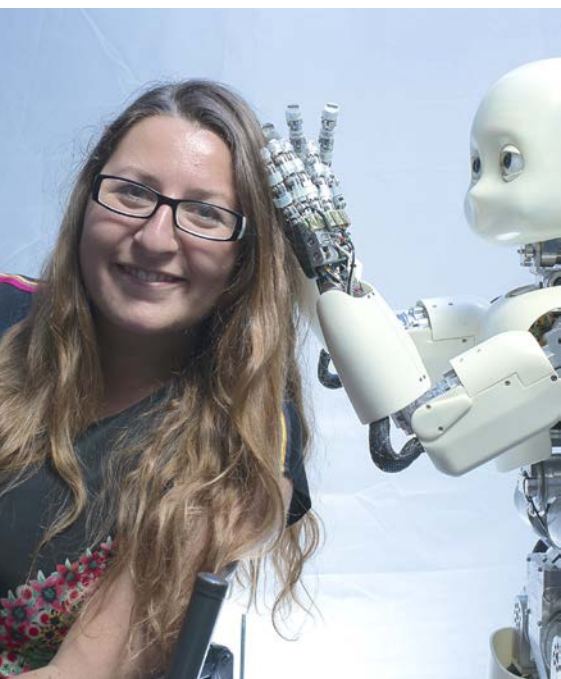
L'AUTEURE



Pascale FUNG est professeure d'électronique et de génie informatique à l'université des sciences et technologies de Hong Kong.

LES ROBOTS EMPATHIQUES

seront-ils un jour sympathiques ? La réponse dépendra de la qualité atteinte dans le développement de logiciels d'empathie artificielle et du sens du mot « amitié ». Pour certains, l'amitié avec une machine est par définition impossible. Pour d'autres, elle sera évidente. Comment vivrons-nous avec nos amis les gentils robots ?



les exploite pour saisir l'état émotionnel de l'autre et pour lui faire comprendre le sien. Ces signaux sont notamment les mimiques faciales, tous les éléments du langage corporel (attitude, gestes...), le ton de la voix, mais aussi, évidemment, le contenu du discours. La mise au point d'un module empathique implique donc d'identifier les traits de la communication humaine exploitables par les machines, puis d'« entraîner » des algorithmes d'apprentissage automatique.

Du moins est-ce ainsi que s'y est prise mon équipe pour développer des machines capables non seulement d'identifier les mots et leur sens, mais aussi d'extraire plusieurs caractéristiques fondamentales du signal acoustique qu'est la voix. Ainsi, même si nous la considérons peu sous cet angle, la communication entre humains est aussi une forme de traitement du signal. Le cerveau est entraîné à détecter les émotions convoyées par la voix à partir des caractéristiques des signaux acoustiques qui leur sont associés, qu'il s'agisse de stress, de joie, de peur, de colère, de dégoût... Une personne joyeuse parlera plus vite et sur un ton aigu ; stressée, elle adoptera au contraire une voix plate et sèche. Doté d'un algorithme d'apprentissage automatique convenablement entraîné, un ordinateur peut, comme un cerveau, détecter ce genre de caractéristiques, un peu comme un détecteur de mensonges mesure la tension artérielle, les pulsations cardiaques et la conductivité de la peau.

Pour obtenir une machine ayant, par exemple, la capacité de détecter le stress, nous avons supervisé l'entraînement d'un algorithme en lui faisant analyser des enregistrements de la voix de personnes stressées.

Décoder la détresse dans la voix

C'est ainsi que nous avons commencé à apprendre aux machines à décoder la détresse dans des extraits vocaux d'étudiants de notre université, lesquels s'y connaissent puisque, entre eux, ils surnomment notre établissement l'« université du stress et de la tension de Hong Kong ». Pour obtenir ces extraits, nous leur avons posé une série de 12 questions de plus en plus stressantes et avons obtenu ainsi un premier corpus de signaux vocaux stressés en anglais, mandarin et cantonais. Dix heures d'enregistrement ont suffi pour que nos algorithmes reconnaissent le stress dans 70 % des cas où il est présent

dans la voix. Ce niveau de performance est comparable à celui des auditeurs humains.

Pendant que nous effectuions ces travaux, une autre équipe du groupe apprenait aux machines à reconnaître l'humeur exprimée par la musique d'un morceau de musique de variété, indépendamment des paroles. Contrairement à l'émotion, l'humeur est une ambiance qui reste généralement pendant toute la durée d'un morceau. Nos chercheurs ont commencé par rassembler quelque 5000 morceaux en tous genres dans les principales langues européennes et asiatiques. Les musicologues avaient d'ailleurs déjà classé plusieurs centaines de ces morceaux en 14 catégories d'humeur.

À l'aide d'ordinateurs, nous avons extrait de ces chansons 1000 caractéristiques fondamentales – par exemple l'énergie ou des propriétés acoustiques telles la fréquence fondamentale, les harmoniques... –, puis nous avons utilisé ce corpus pour entraîner 14 programmes « classificateurs », chacun spécialisé dans une humeur particulière. L'un d'eux décèle par exemple l'humeur mélancolique d'une chanson, un autre l'humeur joyeuse, etc. Comme ces 14 classificateurs peuvent être employés en même temps, leurs résultats peuvent être combinés, mais il arrive qu'ils se contredisent, par exemple que le détecteur d'humeur joyeuse trouve joyeuse une chanson mélancolique. Dans un tel cas, nous le réentraînons au cycle d'apprentissage suivant. D'anomalie en anomalie, nous avons ainsi fini par rendre performant le système formé des 14 détecteurs d'humeur. Nous avons ainsi obtenu une machine capable d'extraire l'humeur de n'importe quel morceau de musique juste en « l'écouter ».

Depuis, nous nous sommes appuyés sur ces recherches pour fonder avec d'anciens étudiants la société Ivo Technologies de développement de machines empathiques utilisables à domicile. *Moodbox*, son premier produit, sera un centre de contrôle d'ambiance, qui réglera la musique et la lumière de chaque pièce en fonction des émotions de ses utilisateurs.

Toutefois, pour saisir l'humour, le sarcasme, l'ironie et d'autres caractéristiques complexes de la communication verbale interhumaine, une machine aura besoin de plus que juste un logiciel de reconnaissance des émotions véhiculées dans le son. Il lui faudra aussi comprendre la signification sous-jacente d'un discours et en comparer le contenu avec l'émotion qui le baigne.

Depuis les années 1980, des chercheurs ont développé des systèmes perfectionnés de reconnaissance de la parole, de sorte que cette technologie atteint sa maturité. Pour autant, il y a loin entre transcrire un discours et le comprendre ! Songez à la complexité de la chaîne d'événements cognitifs, neurologiques et musculaires qui se combinent quand deux personnes se parlent. L'un des interlocuteurs formule ses pensées, choisit des mots puis articule, tandis que l'autre reçoit les sons et les autres signaux envoyés, avant d'y déchiffrer le message qui y est enfoui.

La chaîne qui s'établit lors d'un dialogue entre un humain et une machine est plutôt la suivante : les ondes sonores associées à la parole sont d'abord numérisées, puis de nombreux paramètres caractérisant le discours sont extraits de la série numérique obtenue ; ensuite, un logiciel de reconnaissance de la parole convertit ces paramètres en mots et un décodeur sémantique transforme la série de mots ainsi extraite en sens.

Au début de nos recherches sur les robots empathiques, nous nous sommes aperçus que des algorithmes similaires à ceux conçus pour analyser les émotions exprimées par des utilisateurs dans leurs commentaires en ligne pourraient nous aider. Ces algorithmes d'apprentissage automatique traquent la présence, dans leur contenu, de signaux révélateurs de la présence d'émotions. Des mots-clés tels que « chagrin » et « crainte » suggèrent la solitude. L'utilisation répétée d'expressions familières (« *Let's go !* », par exemple) révèle qu'une chanson est énergique. L'information donnée par le style du discours est aussi à prendre en compte : les réponses d'une personne sont-elles assurées et claires, ou hésitantes, parsemées de silences et de formulations non compromettantes ? Élaborées et détaillées, ou brèves et sèches ?

Au cours de nos recherches sur la reconnaissance de l'humeur dans la musique, nous avons entraîné des algorithmes à repérer des signaux émotionnels dans les paroles. Au lieu d'extraire des signatures sonores de chaque morceau de musique, nous avons tiré, à partir des paroles, des séries de mots – des *n*-grammes – dont nous nous sommes servis pour entraîner 14 classificateurs, chacun responsable de la détection d'une des 14 humeurs définies précédemment.

« Nous avons obtenu une machine capable d'extraire l'humeur de n'importe quel morceau de musique »

Nous avons aussi défini ce que nous nommons des « étiquettes de partie de discours », que nous avons prises en compte dans nos définitions des signatures de telle ou telle humeur. Sur la base d'une collection suffisante de jeux de ces paramètres extraits de discours humains, un ordinateur peut inférer des approximations statistiques des règles grammaticales de n'importe quelle langue. Ce sont ces règles élaborées au cours d'un entraînement qui permettent à des programmes tels *Siri* de comprendre à leur manière un discours ou encore à un programme tel *Google Translate* de traduire un texte.

Dès qu'une machine peut comprendre le contenu d'un discours, elle peut comparer ce contenu avec la façon dont il est émis. Un algorithme pourra détecter la contradiction entre le sens d'un discours et les signaux émotionnels qui l'accompagnent. C'est le cas, par exemple, quand la phrase « Je suis si heureux de passer le week-end à travailler » est accompagnée d'un soupir. Dans un tel cas, l'ordinateur calculera la probabilité que la déclaration humaine soit en réalité un sarcasme.

Intentions complexes

Afin de détecter les intentions plus complexes, une machine capable d'appréhender le contenu d'un discours et les émotions qui le baignent pourra aussi associer les informations recueillies à des données extérieures susceptibles d'aider à son interprétation. Si quelqu'un s'exclame « J'ai faim ! », elle tiendra compte, pour déterminer la meilleure réponse à apporter, de l'heure ou du lieu ainsi que de sa mémoire des usages et préférences de la personne. Au milieu du Sahara, elle s'abstiendra de proposer la recherche d'une « pizzeria dans le quartier » ; à la maison à l'heure du déjeuner, en revanche, elle pourrait répondre : « Souhaitez-vous que je vous prépare un en-cas ? »

Début 2015, des étudiants et des chercheurs postdoctoraux de mon laboratoire ont commencé à réunir nos différents modules de reconnaissance de la parole et de reconnaissance de l'émotion pour créer une machine empathique prototype que nous appelons *Zara la Supergirl*. Il a fallu des centaines d'heures de données pour entraîner *Zara*, mais aujourd'hui, ce programme tourne

Quels obstacles à l'insertion de robots en société ?

Membre de l'équipe Larsen (de l'anglais *Life-long Autonomy and Interaction Skills for Robots in a Sensing Environment*) à Nancy, Serena Ivaldi travaille sur les interactions humains-robots. Elle nous parle des principaux obstacles déjà identifiés s'opposant à l'acceptation des robots par les humains.



Serena IVALDI, roboticienne, travaille chez Inria dans l'équipe Larsen, à Nancy.

POUR LA SCIENCE

Pensez-vous que les robots vont se multiplier dans la société ?

S.I.: Il est certain que ce phénomène est pour bientôt. La situation est comparable à celle qui a précédé l'introduction des ordinateurs et des téléphones portables : leur usage par chacun a paru superflu jusqu'à ce qu'il s'impose de façon explosive, et aujourd'hui plus personne ne s'interroge sur l'utilité de ces technologies.

PLS

Comment testez-vous l'acceptation des robots par les humains ?

S.I.: Nous étudions d'abord les interactions entre robots et humains au sein de notre laboratoire en faisant appel à des personnes ordinaires, puis nous recommençons dans le milieu où les robots doivent être insérés, où les gens ont des particularités. Par exemple, nous étudions l'insertion de robots aides soignants dans un établissement d'hébergement pour personnes âgées dépendantes.

PLS

Quels sont les principaux obstacles à l'insertion de robots dans la société ?

S.I.: Il y en a de plusieurs sortes. À ce stade, le principal obstacle est simplement le coût prohibitif des robots ! Sinon, le problème principal est qu'il nous faut apprendre à bien organiser les interactions des personnes avec les robots que l'on va introduire. Un robot peut être vu comme un ordinateur doté d'un corps. Toutefois, quand un ordinateur est personnifié par un corps, les interactions humains-robots deviennent comparables aux interactions humaines, qui sont multimodales et complexes. En particulier, un corps c'est physique, et cela entraîne des interactions physiques !

PLS

Quels éléments interviennent au cours d'une interaction humain-robot ?

S.I.: Quand un humain est en présence d'un robot – surtout humanoïde – maints détails influencent profondément la façon dont il va tenter de communiquer avec lui : sa distance par rapport à lui ; l'apparence de la machine ; son « regard » ; les attentes de l'humain, notamment sur le rôle de la machine ; les forces développées par chacun d'eux dans la situation ; etc.

PLS

De quelles forces parlez-vous ?

S.I.: Traditionnellement, les robots industriels étaient séparés des ouvriers, car ils développent des forces considérables ; aujourd'hui on tolère davantage de proximité, afin de rendre possibles des gestes, voire du travail collaboratif. De là l'importance de parfaitement contrôler les forces en jeu.

PLS

Pouvez-vous décrire une expérience que vous avez menée pour caractériser les difficultés de la communication humain-robot ?

S.I.: À l'Isir, l'Institut de robotique de l'université Pierre-et-Marie-Curie, nous avons fait interagir iCub – un petit robot en forme d'enfant – avec une cinquantaine d'adultes non versés en robotique. Nous leur avons demandé par exemple de collaborer avec iCub pour désigner le plus lourd de deux objets ou encore l'objet le plus approprié (le plus utile par exemple) dans une certaine situation. Nous avons constaté que les humains adoptent avec le robot des attitudes variables – détachées, pédagogiques, parentales... –, qui traduisent à quel degré ils sont prêts à le considérer comme un véritable agent social.

PLS

Qu'est-ce qui détermine l'attitude de l'humain ?

S.I.: Soit un humain tend à considérer un robot comme « un porteur de capteurs », auquel cas il tend à accepter ses décisions comme on accepte le verdict du thermomètre. Soit quelque chose fait qu'il considère plus ou moins inconsciemment le robot comme un agent social et, dans ce cas, il tend à penser que, la machine ne pouvant avoir son expérience sociale, ses décisions sont invalides. Par exemple, si l'on demande à une personne et à un robot : « Que faut-il mettre dans son sac pour aller à la piscine ? », l'humain, qui tendra à ressentir que son compagnon « n'allant pas à la piscine, ne peut pas savoir », rejettera sa décision. Son attitude change quand il a l'impression d'enseigner au robot quel comportement adéquat avoir en société ou avec lui... Nous avons même constaté avec stupéfaction que certaines personnes se mettent à essayer de convaincre le robot, comme s'il n'avait pas encore appris...

PLS

Ainsi, la question essentielle semble être celle de la confiance ?

S.I.: Oui, beaucoup se méfient encore des machines qui jouent un rôle social.

PLS

Dès lors, comment leur faire mieux accepter les robots dans la société ?

S.I.: En leur donnant assez de contrôle sur la façon dont les robots se comporteront autour d'eux, tout particulièrement si ces derniers jouent un rôle social et encore plus s'ils sont humanoïdes !

Propos recueillis par François Savatier

sur un ordinateur de bureau. Pour l'instant, Zara est un robot virtuel, représenté sur un écran par un personnage de dessin animé.

Au début de toute conversation, elle demande toujours : « Patientez s'il vous plaît pendant que j'analyse votre visage. » Les algorithmes de Zara exploitent en effet les images prises par une caméra afin de déterminer le sexe et l'origine ethnique de son interlocuteur. Elle tente d'en déduire sa langue (Zara comprend l'anglais et le mandarin, et apprend le français) afin de l'interroger dans celle-ci : « Quel est votre plus ancien souvenir ? Parlez-moi de votre mère. Comment se sont passées vos dernières vacances ? Racontez-moi une histoire mettant en scène une femme, un chien et un arbre. » Exploitant les expressions du visage de son interlocuteur, les caractéristiques acoustiques de sa voix et le contenu de ses réponses, Zara évolue ainsi vers une forme d'empathie artificielle à l'égard de son interlocuteur.

Après cinq minutes de conversation, elle jauge à sa manière la personnalité de son interlocuteur, qu'elle interroge ensuite sur son attitude envers les machines empathiques.

Zara n'est qu'un prototype, mais comme elle est constituée d'algorithmes d'apprentissage automatique, elle ne peut que devenir plus « intelligente » et donc plus empathique à mesure que ses interactions avec de plus en plus de personnes l'entraîneront. Pour l'heure, sa « connaissance » des humains découle du seul entraînement que représentent ses interactions avec les étudiants de troisième cycle de mon laboratoire. Cette année, nous prévoyons de donner un corps à Zara en l'installant dans un robot humanoïde.

Il serait prématuré de dire que nous entrons dans l'ère des robots empathiques. Même quand les premiers descendants de Zara seront sur le marché, ils seront loin d'être parfaits. Du reste, j'en suis venue à penser que se concentrer sur la fabrication de machines parfaites nous éloignerait du but. L'important est de rendre nos robots plus humains, même s'ils sont imparfaits, ce qui, après tout, est très humain ! Si nous y parvenons, les robots empathiques ne deviendront pas les machines dominatrices que certains redoutent. Ils seront au contraire nos soignants, nos enseignants et une nouvelle sorte d'amis. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

D. Su, P. Fung et N. Auguin, **Multimodal music emotion classification using Adaboost with decision stumps**, présentation à la conférence ICASSP 2013 (International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing), Vancouver, 26 au 31 mai 2013.

X. Zuo, T. Li et P. Fung, **A multilingual database of natural stress emotion**, présentation à LREC 2012 (8th International Conference on Language Resources and Evaluation), Istanbul, 21 au 27 mai 2012.

M. Anderson et S. Leigh Anderson, **Robot be good**, *Scientific American*, n° 303, octobre 2010.

Dans l'interêt de la science

france

mathieu vidard

la tête au carré
14:05-15:00

france
intervenez
franceinter.fr

Madagascar au secours de ses grenouilles

Franco Andreone, Angelica Crottini et Herilala Randriamahazo

L'île de Madagascar abrite de nombreuses espèces d'amphibiens menacées d'extinction.

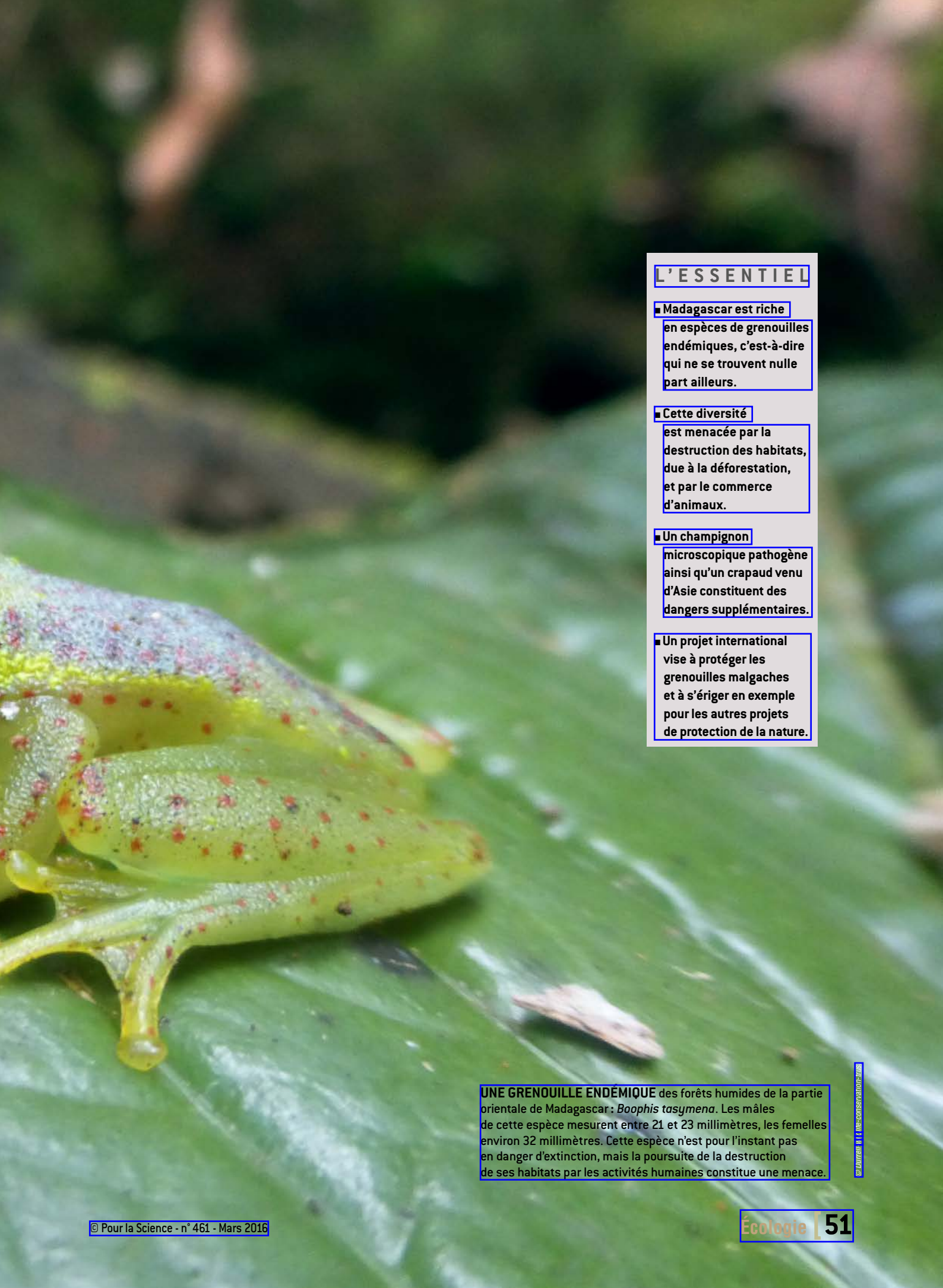
Comment sauver ce trésor naturel ? Un projet international regroupant institutions, scientifiques et populations locales relève le défi.

Dans certaines régions du globe, l'évolution du monde vivant a donné le meilleur d'elle-même, en engendrant une profusion d'espèces de plantes et d'animaux endémiques, c'est-à-dire que l'on ne trouve nulle part ailleurs. Il s'agit souvent de régions isolées, comme l'Australie et les Galápagos. Il en est ainsi de Madagascar, la quatrième plus grande île au monde. Elle occupe une place particulière dans le cœur des naturalistes : c'est un territoire unique en son genre en raison de la variété d'espèces endémiques qu'elle abrite – lémuriens, baobabs, orchidées, reptiles et... grenouilles.

On dénombre actuellement sur la planète plus de 7500 espèces d'amphibiens, dont plus de 6600 grenouilles et crapauds. À Madagascar, seul le groupe des grenouilles et crapauds est représenté. L'île compte plus de 300 espèces observées (dont plus de 99 % sont endémiques), un nombre déjà tout à fait respectable – par exemple, la France métropolitaine, qui est de superficie équivalente, n'a que 43 espèces d'amphibiens. Mais la taxinomie intégrée, méthode qui intègre une variété d'outils et de méthodologies, dont la morphologie, la génétique, le comportement et l'écologie, a mis en évidence au moins 200 espèces supplémentaires qu'il reste à décrire... et à préserver.

Dans l'imaginaire collectif, Madagascar est un territoire couvert de forêts. En réalité, cette île de l'océan





L'ESSENTIEL

■ Madagascar est riche

en espèces de grenouilles endémiques, c'est-à-dire qui ne se trouvent nulle part ailleurs.

■ Cette diversité

est menacée par la destruction des habitats, due à la déforestation, et par le commerce d'animaux.

■ Un champignon

microscopique pathogène ainsi qu'un crapaud venu d'Asie constituent des dangers supplémentaires.

■ Un projet international vise à protéger les grenouilles malgaches et à s'ériger en exemple pour les autres projets de protection de la nature.

UNE GRENOUILLE ENDÉMIQUE des forêts humides de la partie orientale de Madagascar : *Boophis tasymena*. Les mâles de cette espèce mesurent entre 21 et 23 millimètres, les femelles environ 32 millimètres. Cette espèce n'est pour l'instant pas en danger d'extinction, mais la poursuite de la destruction de ses habitats par les activités humaines constitue une menace.

© L'Université de la Réunion - M. L. (m.l.)

Protéger des animaux sans valeur économique évidente dans ce pays très pauvre est justifié, la nature étant l'une des rares ressources de Madagascar

LES AUTEURS



Franco ANDREONE est biologiste et zoologiste au Musée régional des sciences naturelles de Turin, en Italie. Coprésident du Groupe spécialiste des amphibiens de Madagascar à l'UICN, il a conçu et promu l'initiative ACSAM.



Angelica CROTTINI est chercheuse au centre de recherche CIBIO-InBIO situé dans les murs de l'université de Porto, au Portugal.



Herilala RANDRIAMHAZO est ancien coprésident du Groupe spécialiste des amphibiens de Madagascar à l'UICN.

Indien est l'un des lieux les plus durement frappés par la déforestation.

Depuis l'arrivée de l'homme sur l'île à la suite de migrations originaires de l'Indonésie et de l'Afrique, il y a environ 2 000 ans, les forêts primaires ont commencé à laisser la place aux cultures et à l'élevage des zébus. Ce processus s'est accéléré dans les récentes décennies et bien peu de zones forestières ont survécu. Malheureusement, la fragilité du terrain tropical et des écosystèmes malgaches fait que, une fois déforestés, ils ne permettent plus une croissance immédiate des forêts originelles. Celles-ci sont devenues de plus en plus petites et fragmentées, avec un impact évident sur la diversité de leur flore et de leur faune.

Les amphibiens, en particulier, ont été frappés de plein fouet par cette altération, car ils comptent parmi les vertébrés les plus sensibles au monde. Les raisons de cette sensibilité sont bien connues. Citons notamment le double cycle de vie qui les lie tant à l'eau qu'à la terre (puisque, de têtards aquatiques, ils deviennent des adultes terrestres). Cette caractéristique explique que le tiers environ des espèces connues dans le monde est de plus en plus menacé d'extinction.

On peut également évoquer la sensibilité à la modification des habitats, aux polluants et aux divers prédateurs introduits. Plus récemment, une maladie « émergente » au niveau mondial, due au champignon microscopique *Batrachochytrium dendrobatidis*, la chytridiomycose, a provoqué le déclin rapide, et dans certains cas l'extinction, de populations et d'espèces d'amphibiens à travers le monde – à l'exception, pour l'instant, de Madagascar.

Un plan d'action concerté

Au vu de la richesse extraordinaire de sa faune d'amphibiens et de l'attention particulière que l'île reçoit des chercheurs, Madagascar est un lieu idéal pour promouvoir la protection des amphibiens. Cette idée peut sembler saugrenue. Imaginer protéger des faunes que l'on a, par le passé, jugées (à tort) « mineures », comme les animaux à sang froid, et sans rentabilité économique évidente peut apparaître comme une provocation dans un pays où le PIB est parmi les

plus bas au monde et où le revenu moyen par habitant avoisine 2 euros par jour.

En même temps, il est clair que la nature représente l'une des rares ressources du pays, et probablement la plus importante. Voilà pourquoi, au cours des dix dernières années, nous avons consacré énormément de temps et d'énergie à soutenir des actions en faveur de la protection des amphibiens à Madagascar.

Nous nous sommes retrouvés personnellement en première ligne d'abord en raison de notre passion, puis parce que nous avons toujours pensé que l'étude des amphibiens méritait une attention particulière. Il était important de décrire les nouvelles espèces, mais, simultanément, il était essentiel d'impliquer l'opinion publique, les hommes politiques et les experts afin de les convaincre que la préservation des amphibiens à Madagascar offrait aux populations locales une piste de développement et afin de projeter ce pays à l'avant-garde de la protection de la biodiversité.

L'occasion d'agir concrètement dans ce sens se présenta à nous lors du lancement de l'*Amphibian Conservation Action Plan*, un grand événement organisé en 2005 à Washington par l'équipe Declining Amphibian Populations Task Force. Dans ce cadre, deux grandes figures de la protection de la nature, Russell Mittermeier, président de l'organisation américaine Conservation International, et le Canadien Claude Gascon, coordinateur du Groupe spécialiste des amphibiens (*Amphibian Specialist Group*) à l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN), proposèrent à Angelica Crottini (l'une d'entre nous) de coordonner un ambitieux projet de protection au niveau national. Angelica menait depuis des années des projets de recherche sur les amphibiens malgaches, dans la perspective de leur préservation.

Cette proposition représentait une excellente occasion de braquer les projecteurs sur les amphibiens malgaches. Le lien avec la communauté scientifique locale se fit avec la collaboration de Herilala Randriamahazo, lui aussi passionné et ardent partisan des études herpétologiques à Madagascar.

Ensemble, en 2006, nous avons organisé la première rencontre sur la protection des amphibiens malgaches, un atelier international intitulé ACSAM (*A Conservation Strategy for the Amphibians of Madagascar*).

PORTRAITS DE FAMILLES

Ces quelques amphibiens de Madagascar sont des représentants des familles et sous-familles autochtones de l'île. Les statuts de conservation correspondants sont indiqués sur une échelle allant de « préoccupation mineure » à « en danger critique d'extinction », en passant par « vulnérable », « quasi menacé » et « en danger ».

1. *Heterixalus rutenbergi*, ou grenouille arboricole de Rutenberg, (famille Hyperoliidae), est présente sur le haut plateau central et classée « quasi menacée ».

2. *Dyscophus antongilii*, ou grenouille-tomate (famille Microhylidae, sous-famille Dyscophinae), du nord-est de Madagascar est une espèce quasi menacée.

3. *Scaphiophryne gottlebei*, ou grenouille arc-en-ciel (famille Microhylidae, sous-famille Scaphiophryninae), est une espèce semi-fouisseuse et rupicole du massif de l'Isalo classée « en danger ».

4. *Anodonthyla vallani*, ou grenouille arboricole de Vallan (famille Microhylidae, sous-famille Cophylinae), vit dans la forêt d'Ambositantely, dans le haut plateau central. Elle est en danger critique d'extinction.

5. *Mantella aurantiaca*, ou grenouille dorée, est une espèce terri-
cole présente dans la zone d'Andasibe-Moramanga (famille Mantel-
lidae, sous-famille Mantellinae) en danger critique d'extinction.

6. *Boophis williamsi*, grenouille de torrent de Williams (Mantelli-
dae, sous-famille Boophinae), espèce endémique du massif de l'An-
karatra, est en danger critique d'extinction.

7. *Aglyptodactylus securifer* (Mantellidae, sous-famille Laliostominae),
de l'ouest de Madagascar, est classée en « préoccupation mineure ».

8. *Tsingymantis antitra* (famille Mantellidae, sous-famille Mantelli-
nae), rencontrée dans la réserve spéciale d'Ankarana, est vulnérable.

9. *Ptychadena mascareniensis*, ou grenouille des Mascareignes
(famille Ptychadenidae), présente dans toute l'île, fait l'objet d'une
préoccupation mineure.



1. *Heterixalus rutenbergi*

2. *Dyscophus antongilii*

3. *Scaphiophryne gottlebei*



4. *Anodonthyla vallani*



5. *Mantella aurantiaca*



6. *Boophis williamsi*



7. *Aglyptodactylus securifer*



8. *Tsingymantis antitra*



9. *Ptychadena mascareniensis*



1 cm

La capitale Antananarivo vit se réunir les plus importants chercheurs du domaine. Étaient également présents nombre de personnalités politiques et responsables d'organismes publics ou d'associations de protection de la nature.

Cette rencontre a donné naissance au plan d'action national nommé Sahonagasy, mot malgache qui signifie justement « grenouilles de Madagascar ». C'est ainsi que furent définies une série d'orientations stratégiques de recherche, de protection et de sensibilisation écologique – de fait, un exemple mondial pour la protection des amphibiens.

Une faune menacée par la déforestation et le trafic d'animaux

Les lignes d'action furent élaborées sur plusieurs fronts. Avant tout, on décida de catégoriser toutes les espèces d'amphibiens, en utilisant les méthodologies de la Liste rouge de l'UICN. On identifia ainsi les espèces en danger critique d'extinction. Les projets de protection se focalisèrent donc plus particulièrement sur ces espèces au cours des années suivantes.

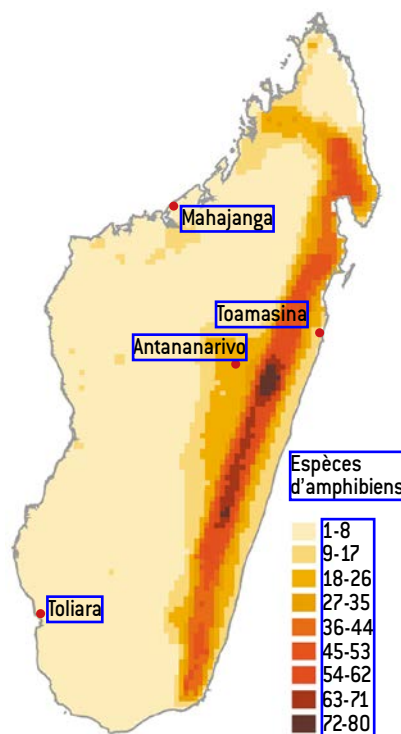
Ces initiatives ont par exemple contribué à protéger l'une des espèces les plus menacées de Madagascar et du monde : *Mantella cowanii*. Cette petite grenouille aux couleurs vives et contrastées, noire et rouge, survit dans quelques rares zones du haut plateau central malgache. Dans ces régions, les forêts tropicales primaires ont disparu depuis longtemps : le bois qui en est extrait a été utilisé pour la construction de maisons et comme combustible, et les prairies montagneuses restantes ont été dévastées par le *tavy*, pratique de culture itinérante sur brûlis d'origine indonésienne qui détruit encore aujourd'hui les milieux naturels malgaches.

Parallèlement, la beauté des couleurs de la grenouille *Mantella cowanii* en avait fait un véritable trésor pour les populations des alentours d'Antoetra, où survivaient les rares noyaux reproducteurs, et où la capture d'exemplaires destinés au marché des animaux de terrarium (trafic international d'animaux) la menaçait fortement d'extinction.

Des recherches minutieuses ont permis de retrouver les dernières populations de cette grenouille et de comprendre que,

par exemple, les habitats naturels avaient disparu dans certaines régions, et que les grenouilles survivaient seulement le long de falaises humides situées à haute altitude. Grâce à une action énergique, le commerce fut interrompu et les populations restantes furent protégées. De plus, à la suite de l'initiative du Groupe spécialiste des amphibiens de l'UICN, les autorités ont protégé la zone qui abritait la plus importante population connue de cette espèce, zone transformée désormais en une sorte de sanctuaire. *Mantella cowanii* est devenue un centre d'intérêt et un animal protégé pour les populations locales elles-mêmes, en particulier dans les communes d'Ivato et d'Antoetra.

Une action similaire est en cours pour les forêts résiduelles et les grenouilles du massif



L'EST DE MADAGASCAR

est la région de l'île la plus riche en amphibiens, comme l'indique la carte de gauche, où le pays est divisé en cellules d'environ 11 kilomètres de côté.

Cette région est aussi celle où subsistent des forêts humides (en brun et en vert sur la carte de droite, le brun indiquant les forêts de basse altitude).



de l'Ankaratra, la deuxième plus haute montagne de Madagascar (2100 mètres). Quelques rares sections de forêt de haute altitude y subsistent, entrecoupées de forêts de conifères introduites par les colonisateurs français. En octobre 2010, un violent incendie détruisit une bonne partie des forêts de conifères, épargnant heureusement les fragments de forêts originelles, ce qui a permis la survie de deux espèces de grenouilles que l'on ne trouve que là : *Boophis williamsi* et *Mantidactylus pauliani*. Grâce à un investissement de la Mac Arthur Foundation et à l'engagement de l'association

locale VIF, la région de l'Ankaratra sera finalement protégée – en espérant que cette heureuse initiative ne viendra pas trop tard pour la conservation de ces espèces, étant donné l'intense déforestation qui sévit dans cette région.

Une autre espèce digne d'attention est la grenouille-tomate, *Dyscophus antongilii*. Caractérisée par sa grande taille et par une coloration vive rouge-orangé, elle survit en nombre à l'intérieur de la ville côtière de Maroantsetra, au nord-est de l'île. Là, elle se reproduit dans les petits étangs construits dans les propriétés privées pour l'élevage de canards et d'oies et dans les canaux d'écoulement. Auparavant très fréquente et admirée par les touristes qui visitaient le parc de Masoala tout proche, la

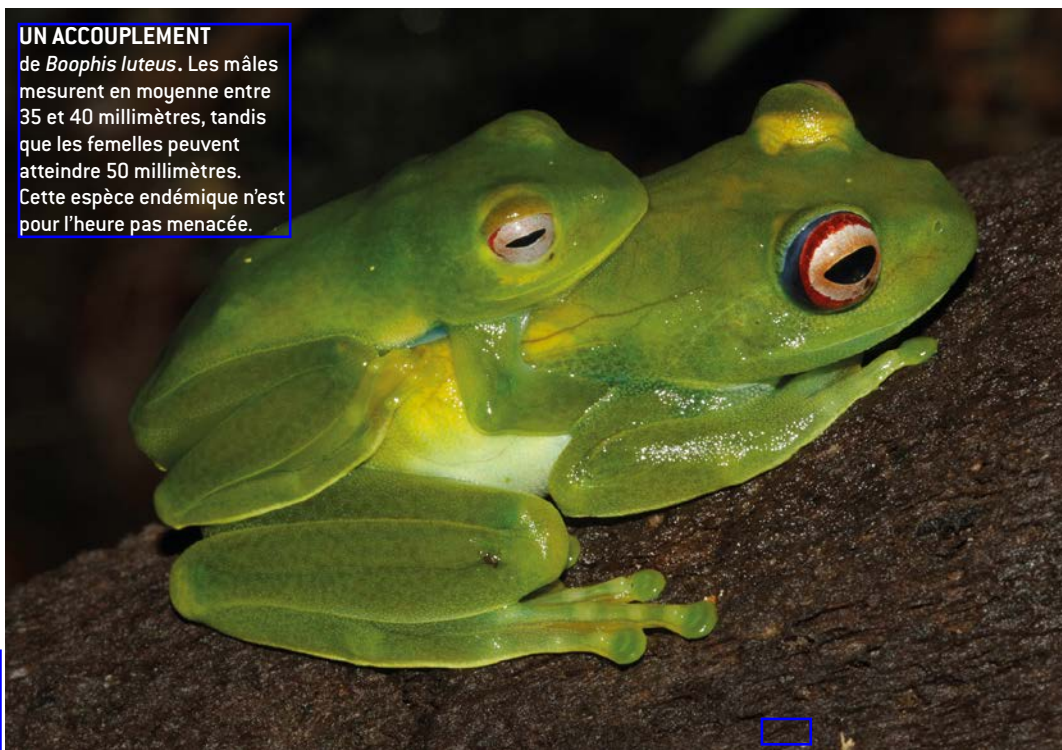
une occasion rêvée de faire comprendre l'importance de ces animaux.

Les initiatives n'ont pas manqué, notamment l'étude de la faune d'amphibiens présents dans la réserve naturelle de Betampona, l'une des dernières parcelles de la forêt humide de basse altitude, proche de Toamasina (anciennement appelée Tamatave), ville de la côte orientale.

Dans cette petite forêt de 29 kilomètres carrés, on a recensé 80 espèces d'amphibiens, dont un tiers étaient inconnues de la science. Toujours dans les environs de Toamasina, dans le parc d'Ivoloina, une rencontre a été organisée en 2010 à l'intention des chercheurs malgaches pour promouvoir le lancement d'un plan national de surveillance contre le champignon dit

UN ACCOUPLEMENT

de *Boophis luteus*. Les mâles mesurent en moyenne entre 35 et 40 millimètres, tandis que les femelles peuvent atteindre 50 millimètres. Cette espèce endémique n'est pour l'heure pas menacée.



grenouille-tomate est désormais en régression, notamment parce qu'en ville, la nappe phréatique se réduit et le bétonnage excessif élimine les sites reproducteurs historiques. Une contribution de la fondation allemande BioPat a permis d'acquérir des terrains intégrant divers sites de reproduction.

La présence dans une ville d'une grenouille aussi voyante et unique au monde a également rendu possibles de nombreuses initiatives pédagogiques. Peu d'enfants malgaches étaient conscients de la richesse des amphibiens de leur pays : disposer de la grenouille-tomate à portée de main fut

chytride, qui peut provoquer la chytridio-mycose. Ce champignon microscopique est la cause d'une maladie dangereuse pour les amphibiens. Identifiée depuis plusieurs années, la chytridiomycose est apparue comme l'une des principales causes du déclin des amphibiens à travers le monde.

Jusqu'à il y a peu, ce champignon ne semblait pas présent à Madagascar, qui constituait ainsi une région très favorable pour développer un programme de prévention adéquat. Grâce à la collaboration de nombreuses institutions qui ont œuvré sur le terrain et à la coordination

Une espèce invasive de crapaud allochtone, c'est-à-dire ne faisant pas partie de la faune native, a été récemment observée dans les environs de Toamasina, sur la côte orientale de Madagascar: le crapaud *Duttaphrynus melanostictus*. Originaire du Sud-Est asiatique, arrivé à Madagascar probablement avec des matériaux de construction importés, c'est un parent du tristement célèbre crapaud buffle (*Rhinella marina*), responsable de nombreux problèmes écologiques en Australie et dans d'autres régions du monde. *D. melanostictus* est lui aussi une espèce de grande taille (il atteint 15 centimètres) et très féconde (il dépose des œufs par dizaines de milliers). De plus, ce crapaud est toxique et se nourrit pratiquement de toutes les proies à sa portée, s'adaptant bien aux environnements anthropisés. Aussi craint-on que *D. melanostictus* s'étende et nuise gravement à la faune malgache, qui a évolué à l'abri de ses défenses toxiques naturelles. Les autorités malgaches collaborent avec des experts en vue d'élaborer un plan d'éradication destiné à juguler cette nouvelle menace.



© M. Vences

BIBLIOGRAPHIE

M. C. Bletz *et al.*, Widespread presence of the pathogenic fungus *Batrachochytrium dendrobatidis* in wild amphibian communities in Madagascar, *Scientific Reports*, vol. 5, article 8633, 2015.

C. Weldon *et al.*, Pre-emptive national monitoring plan for detecting the amphibian chytrid fungus in Madagascar, *EcoHealth*, vol. 10(3), pp. 234-240, 2013.

F. Andreone *et al.*, The challenge of conserving amphibian megadiversity in Madagascar, *PLoS Biology*, vol. 6(5), article e118, 2008.

F. Glaw et M. Vences, *A Field Guide to the Amphibians and Reptiles of Madagascar* (3^e édition), Vences & Glaw Verlag, 2006.

internationale assurée par le Groupe spécialiste des amphibiens de l'UICN, huit sites ont été surveillés durant trois ans. Les chercheurs y ont prélevé un échantillon de 50 amphibiens deux fois par an, afin de déterminer l'absence ou la présence du pathogène. Les données ont malheureusement confirmé la présence du chytride, même s'il n'est pas encore établi s'il s'agit ou non d'une forme pathogène.

Un défi mondial

En cas d'épidémie de chytridiomycose, il faudra mettre en place un programme d'intervention rapide, coordonné par un groupe de travail spécifique rendant compte au ministère des Eaux et Forêts. C'est justement de cela dont il a été question en novembre 2014 lors de l'atelier ACSAM2 tenu au centre ValBio, dans le cœur de la forêt de Ranomafana, l'un des lieux de Madagascar les plus riches en amphibiens.

Cette rencontre, qui a rassemblé plus de 70 chercheurs, a notamment débouché sur un engagement des participants et des institutions à faire de Madagascar un exemple pour la protection des amphibiens à l'échelle mondiale. Il s'agit de maintenir une surveillance continue du chytride et d'étendre ce suivi à d'autres pathologies émergentes (dont les mortels *Ranavirus*), ainsi que de promouvoir, de la part des ministères compétents, la sensibilisation à l'environnement.

Pour les espèces en voie d'extinction, nous tenterons d'acquérir des zones au sein desquelles nous pourrions promouvoir des

actions de protection, ainsi qu'appliquer des programmes d'élevage *ex situ*. De fait, le transfert en captivité de certaines espèces, en général les plus sensibles, s'est révélé être l'une des rares solutions efficaces en cas de pathogénicité des chytrides ou de disparition soudaine de l'habitat. Malheureusement, nous savons peu de choses sur l'élevage des amphibiens malgaches: parmi les 300 espèces décrites à Madagascar, et les quelque 200 en cours de description, il n'en existe que quelques dizaines pour lesquelles nous disposons de connaissances sur l'élevage en captivité.

La protection des amphibiens malgaches s'est révélée particulièrement importante pour le développement de programmes intégrés, qui comprennent des actions sur le terrain et un engagement de la communauté scientifique internationale. Les nouveaux objectifs de la conservation des amphibiens de Madagascar ont été identifiés: il ne nous reste plus qu'à retrouver nos manches et à convaincre le monde entier que ces animaux méritent d'être préservés pour les générations futures.

Les amphibiens constituent un défi au niveau mondial. Les modifications ou destructions des habitats, la pollution, le commerce et les maladies émergentes ne sont que quelques-uns des dangers qui guettent ces vertébrés. Leur disparition saute sans doute moins aux yeux que celle des grands animaux charismatiques, mais elle n'en est pas moins importante pour l'équilibre mondial. Le plan d'action que nous avons lancé à Madagascar est un banc d'essai important pour la protection d'une faune aussi riche que fragile. ■

explorez MARS

palais

DÉCOUVERTE

EXPOSITION jusqu'au 28 août 2016

® Champs-Élysées Clemenceau et Franklin-Roosevelt

En partenariat avec



L'ESSENTIEL

- On pensait que les bruits intenses ne provoquaient que des bourdonnements d'oreille et des pertes auditives transitoires. En réalité, une partie des atteintes auditives ne sont pas réversibles.
- Des niveaux de bruit élevés peuvent causer des lésions permanentes aux fibres du nerf auditif, qui transmet au cerveau les signaux des cellules sensorielles auditives.
- Une perte auditive cachée en résulte : la personne touchée perçoit les sons, mais sa compréhension de la parole est dégradée.
- Un médicament permettant aux fibres nerveuses de se reconstituer aiderait à résoudre ce problème de santé publique.

Le fléau des pertes auditives cachées

Charles Liberman

Marteaux-piqueurs, concerts et même tondeuses à gazon causent parfois à nos oreilles des dommages irréparables. Et mal diagnostiqués, car indétectables par un examen classique de l'audition.

Aux États-Unis, les supporters des équipes de football Seahawks, de Seattle, et Chiefs, de Kansas City, tentent régulièrement d'établir le record mondial du stade le plus bruyant. Le 1^{er} octobre 2014, les Chiefs ont atteint le dernier record : 142,2 décibels. Ce niveau équivalait à celui du vrombissement douloureux et délétère d'un moteur d'avion à réaction entendu à une trentaine de mètres de distance, exemple type de ce que les spécialistes de l'audition considèrent comme un bruit suffisamment fort pour entraîner des lésions auditives. Après le match, les supporters des Chiefs étaient aux anges. Ils avaient pris un grand plaisir à faire l'expérience, savourant les bourdonnements dans leurs oreilles ou la sensation que leurs tympans étaient sur le point d'exploser. Ce qui s'est passé dans leurs oreilles était pourtant loin d'être merveilleux.

Un test auditif classique, l'audiogramme tonal, réalisé avant le match puis juste après, aurait pu révéler une détérioration marquée. Le son le plus faible qu'un spectateur pouvait entendre avant l'engagement (disons, des mots murmurés) risquait de ne plus être détectable par cette personne à la mi-temps. Les seuils d'audition – niveaux sonores les plus faibles entendus, en fonction des fréquences – ont peut-être augmenté de près de 20 à 30 décibels au moment du coup de sifflet final. Les bourdonnements dans les oreilles s'atténuant en quelques jours, il est possible que l'audiogramme tonal soit ensuite revenu à la normale, car

on peut récupérer la capacité d'entendre des sons faibles.

Les scientifiques ont longtemps pensé que, une fois les seuils d'audition revenus à la normale, il devait en être de même pour les fonctions de l'oreille. Mes collègues et moi avons récemment montré que cette supposition est fautive. En effet, des expositions sonores ne conduisant qu'à une augmentation temporaire des seuils provoquent parfois des dommages immédiats et irréversibles aux fibres du nerf auditif, qui transmet les informations sonores au cerveau. De telles lésions peuvent être sans effets sur la détection des sons, mesurée par l'audiogramme tonal, mais elles sont susceptibles de gêner la capacité à traiter des signaux plus complexes. On nomme « perte auditive cachée » cette affection nouvellement reconnue ; « cachée », car dans ce cas un audiogramme normal masque la lésion nerveuse et la baisse d'audition associée. Cette situation rejoint celle, bien connue, des quelque 15 % de personnes, parmi celles se plaignant d'atteintes auditives, qui ont un audiogramme tonal normal.

Lorsqu'une personne continue à maltraiter ses oreilles, les dommages occasionnés aux fibres nerveuses peuvent s'aggraver. En fait, ces dégâts contribuent à la détérioration progressive de la capacité des personnes d'âge moyen à avancé de distinguer les subtilités de la parole. Toutefois, la perte auditive cachée ne se limite nullement aux adultes âgés. Les dernières recherches suggèrent qu'elle

touche également des sujets plus jeunes dans les sociétés industrielles, en raison d'une exposition accrue à des sons intenses, dont certains sont évitables.

La vulnérabilité de l'oreille résulte de son impressionnante sensibilité, qui s'étend sur une vaste échelle de niveaux sonores. La capacité humaine à percevoir un son à des fréquences d'environ 1 000 oscillations par seconde, soit 1 000 hertz (Hz), en d'autres termes le seuil d'intensité à partir duquel nous entendons ce son, est fixée à 0 décibel (dB). L'échelle des décibels est une échelle logarithmique: une augmentation de 20 dB du niveau sonore correspond à une multiplication par 10 de l'amplitude des ondes sonores. À 0 dB, les osselets de l'oreille moyenne, dont les vibrations régissent le processus de l'audition, se déplacent d'une distance inférieure au diamètre de l'atome d'hydrogène. À l'autre extrême, par exemple à plus de 140 dB, l'oreille est contrainte de traiter des ondes sonores d'amplitude 10 millions de fois supérieure.

Des vibrations détectées par des cellules ciliées

L'audition est un processus qui débute lorsque les entonnoirs de l'oreille externe acheminent, à travers le conduit auditif, des ondes sonores jusqu'au tympan. Ce dernier vibre et met en mouvement les osselets de l'oreille moyenne. Les vibrations qui en résultent poursuivent alors leur chemin vers le canal de l'oreille interne rempli de liquide, la cochlée, où sont localisées des cellules ciliées qui garnissent une bande de tissu en spirale nommée organe de Corti. Ces cellules tiennent leur nom de saillies en forme de poils, appelées stéréocils, qui s'étendent en faisceaux à la surface exposée à l'air des cellules. Les cellules ciliées les plus sensibles aux faibles fréquences se situent à l'une des extrémités de la spirale cochléaire et les plus sensibles aux hautes fréquences à l'autre extrémité.

Lorsque des ondes sonores fléchissent les « cils », ces cellules convertissent ces vibrations en signaux chimiques, en émettant une molécule de neurotransmetteur (du glutamate) à l'extrémité opposée, où elles forment des synapses (zones de jonction) avec les fibres du nerf auditif. Au niveau de la synapse, le glutamate libéré va se lier à des récepteurs situés sur la terminaison d'une fibre du nerf auditif. Ce dernier est composé par les neurones auditifs, dont les

L'AUTEUR



M. Charles LIBERMAN est professeur d'oto-laryngologie à la faculté de médecine

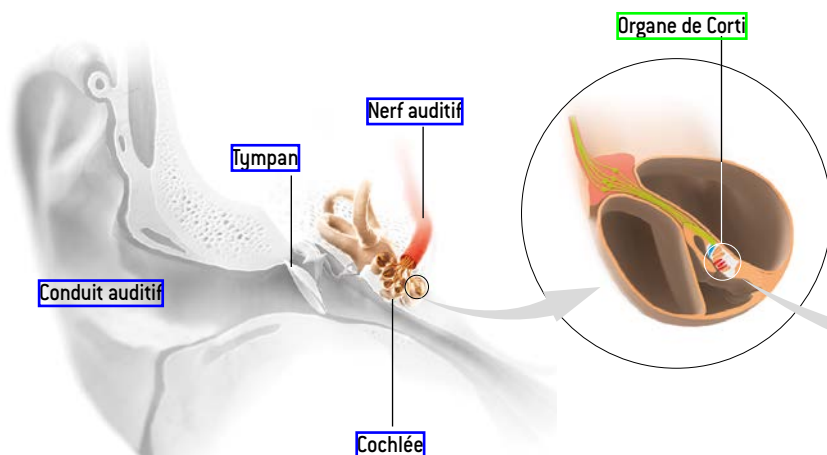
de l'université Harvard, à Boston aux États-Unis, et directeur du laboratoire Eaton-Peabody à la clinique Massachusetts Eye and Ear de cette faculté.

axones se projettent sur le noyau cochléaire. La liaison du glutamate aux fibres nerveuses déclenche un signal électrique, qui parcourt toute la longueur du nerf auditif jusqu'au tronc cérébral. De là, les signaux passent à travers une série de circuits neuronaux parallèles qui traversent différentes régions, du tronc cérébral jusqu'au mésencéphale et au thalamus, pour finir leur parcours dans le cortex auditif. L'intégralité de ce circuit complexe analyse et organise notre environnement acoustique en un ensemble de sons reconnaissables, que ce soit une mélodie familière ou le son plaintif d'une sirène.

Les cellules sensorielles auditives, dites cellules ciliées, sont de deux types, externe et interne. Les déplacements des cellules ciliées externes ont pour effet d'amplifier ceux des cils des cellules ciliées internes, tandis que ces dernières transforment ces déplacements en signaux chimiques, qui stimulent le nerf auditif. Les cellules internes sont essentiellement responsables de ce que nous considérons comme étant l'audition, car 95 % des fibres du nerf auditif forment des synapses uniquement avec elles. La raison pour laquelle si peu de fibres connectent des cellules ciliées externes au

LE TRAUMATISME AUDITIF

Lorsque des ondes sonores parcourent le conduit auditif et traversent le tympan, elles atteignent l'oreille interne. Là, dans l'organe de Corti, des vibrations engendrées par les sons stimulent les cellules ciliées externes (*ci-contre*). Ces vibrations, amplifiées par les cellules ciliées externes, sont ensuite détectées par les cellules ciliées internes, qui les convertissent en signaux chimiques, lesquels seront transmis aux fibres du nerf auditif. On sait depuis longtemps que l'endommagement des cellules ciliées provoque une perte auditive. On a découvert cependant que les fibres peuvent elles aussi être endommagées par un bruit intense, d'où une perte auditive même si les cellules ciliées restent intactes.



cerveau reste un mystère; d'après certains chercheurs, les fibres connectées à des cellules ciliées externes seraient responsables de la douleur ressentie lorsque l'intensité d'un son approche les 140 dB.

Historiquement, on évaluait la perte auditive principalement à l'aide d'un audiogramme dit tonal. Un tel test consiste à enregistrer la capacité à détecter des sons de fréquences variant par octaves (doublement de la fréquence), soit généralement 250, 500, 1000, 2000, 4000 et 8000 Hz. Dans les premières phases de la perte auditive induite par le bruit, l'audiogramme tonal indique une déficience correspondant à une incapacité à détecter des sons dans les fréquences moyennes du champ auditif humain (qui s'étend de 20 à 20 000 Hz, au plus). Cette déficience est nommée « surdité du chaudronnier », les otologues sachant depuis longtemps que les chaudronniers qui martèlent des plaques de métal présentent souvent une perte auditive permanente pour les sons de fréquences moyennes.

Dans les années 1950 et 1960, des études épidémiologiques qui ont porté sur des ouvriers travaillant dans des usines bruyantes ont montré un lien évident entre

la durée d'occupation de l'emploi et une baisse de l'acuité auditive. Le déficit initial aux environs de 4000 Hz tendait à s'étendre à d'autres fréquences au fil du temps. De nombreux ouvriers plus âgés perdaient totalement l'audition au-delà des 1000 ou 2000 Hz. Il s'ensuit une déficience auditive sévère, car une grande partie des informations contenues dans la parole se situent dans cette plage de fréquences devenues inaudibles.

Danger au-delà de 85 dB

Des études de ce type ont incité les autorités de différents États à élaborer des directives pour limiter les expositions au bruit sur les lieux de travail. Ainsi, aux États-Unis, plusieurs agences fédérales réglementent les niveaux sonores au travail, notamment l'Institut de la sécurité professionnelle et de la santé (*National Institute for Occupational Safety and Health*) et l'administration de la sécurité professionnelle et de la santé ou OSHA (*Occupational Safety and Health Administration*).

L'absence d'accord précis entre ces diverses agences reflète les difficultés à

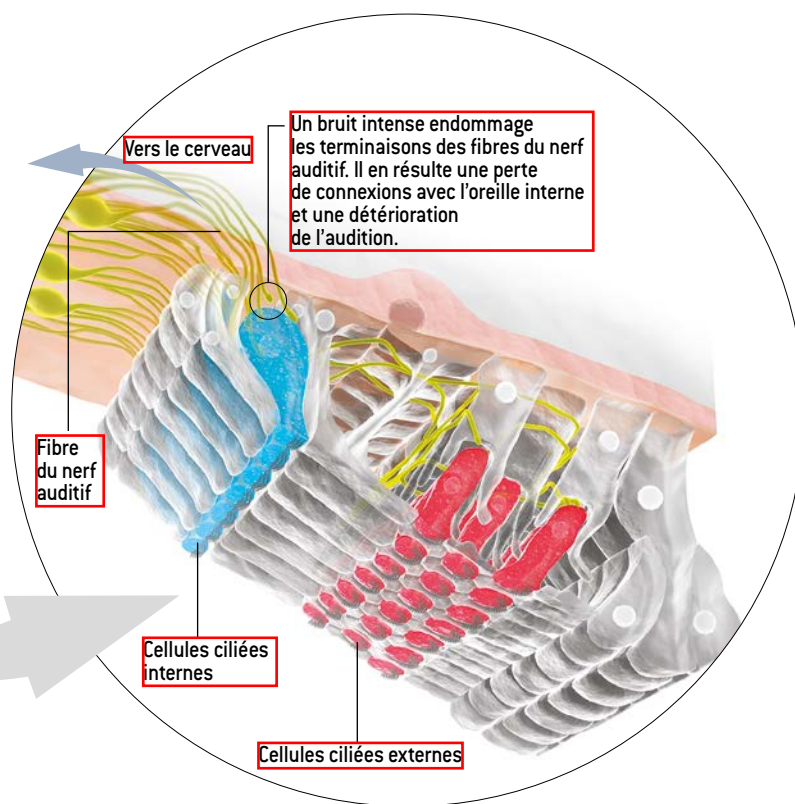
évaluer le risque de pertes auditives dues au bruit. D'une part, il existe énormément de différences individuelles de sensibilité au bruit: il y a des oreilles « solides » et des oreilles « sensibles ». Cela signifie que les organismes de réglementation ont à choisir quel pourcentage de la population il faut protéger et quel niveau de perte auditive est acceptable. D'autre part, les effets du bruit sur l'audition sont le résultat d'une combinaison complexe de la durée, de l'intensité et des fréquences des sons auxquels une personne est exposée.

L'OSHA impose que les niveaux sonores ne dépassent pas 90 dB pour une journée de huit heures (en Europe, ce seuil est fixé à 87 dB). Au-delà de 90 dB, le risque d'atteintes est à peu près proportionnel à l'énergie totale absorbée par l'oreille (produit de la durée par l'intensité). Pour chaque tranche de 5 dB supplémentaires, les directives de l'OSHA recommandent une réduction de moitié de la durée d'exposition. En d'autres termes, un ouvrier ne doit pas être exposé à 95 dB pendant plus de quatre heures par jour, ou à 100 dB durant plus de deux heures par jour.

Au vu de ces chiffres, l'exposition à 142 dB des supporters qui tentent de battre le record du match le plus bruyant dépasserait les normes de l'OSHA au bout de 15 secondes environ. L'OSHA ne réglemente bien entendu pas les niveaux sonores auxquels sont exposés les spectateurs de matchs, ni même ceux des fermes américaines, où des adolescents conduisant des tracteurs et des moissonneuses toute la journée sont exposés à un sérieux risque de perte auditive.

Au cours des soixante dernières années, les spécialistes de l'audition ont supposé que les lectures habituelles d'un audiogramme tonal révélaient tout ce qu'il faut savoir sur les dommages auditifs dus au bruit. L'audiogramme indique en effet s'il y a eu une atteinte des cellules ciliées de l'oreille interne, des recherches des années 1940 et 1950 ayant montré que ces cellules de l'oreille interne sont parmi les plus vulnérables aux surexpositions acoustiques.

En outre, des expériences menées chez des animaux, dont certaines réalisées dans notre laboratoire, avaient précisé les choses. Elles avaient montré que les cellules ciliées externes sont plus vulnérables que les internes, que les cellules ciliées qui détectent les hautes fréquences sonores sont plus vulnérables que celles de la plage de basses fréquences, et qu'une fois perdues, les cellules ciliées ne se régénèrent jamais. Même



avant que ces cellules dégèrent, un bruit très fort peut endommager les faisceaux de stéréocils coiffant les cellules et ces dommages sont également irréversibles. Lorsque les cellules ciliées sont endommagées ou mortes, les seuils d'audition sont augmentés (il faut monter le volume sonore de la radio, ou un interlocuteur assis de l'autre côté de la table doit élever la voix).

Il était toutefois difficile d'aller plus loin dans la compréhension des lésions cochléaires chez l'homme, car, avec les techniques existantes, il était impossible d'explorer en toute sécurité les minuscules cellules ciliées d'une personne en vie. Chez l'homme, les dommages liés à la perte auditive due au bruit ont été étudiés uniquement chez des personnes décédées qui avaient légué leur corps à la science.

Des atteintes malgré un audiogramme normal

En partie du fait de ces limitations, les scientifiques travaillant sur l'audition cherchent encore à savoir si les pertes auditives sont inéluctables en raison du vieillissement ou si elles résultent d'une exposition répétée à l'environnement bruyant de la vie moderne. Un indice très tentant provient de travaux menés dans les années 1960, au cours desquels des chercheurs ont étudié des groupes vivant dans des environnements exceptionnellement tranquilles, telle la tribu des Mabaans dans le désert soudanais. Les tests auditifs ont donné des résultats notablement meilleurs chez des hommes mabaans âgés de 70 à 79 ans, par comparaison avec un groupe d'hommes américains du même âge. Mais ces études ne permettent pas de déceler d'autres différences éventuellement liées à l'audition, telles que des différences génétiques ou alimentaires.

Des recherches récentes que nous avons menées sur les effets du bruit sur l'audition indiquent une nouvelle voie à explorer pour mieux comprendre les dangers de la surexposition acoustique. Les scientifiques et les cliniciens savent depuis longtemps que certains dommages dus à l'exposition au bruit sont irréversibles et d'autres non. Autrement dit, les seuils auditifs reviennent parfois à la normale au bout de quelques heures ou quelques jours, et d'autres fois la récupération sera incomplète et le seuil aura définitivement augmenté. Les spécialistes de l'audition pensaient que si la sensibilité au seuil était restaurée, l'oreille

avait totalement récupéré. Nous savons aujourd'hui que ce n'est pas le cas.

Les fortes détonations des pétards lors des fêtes nationales ou les hurlements de la foule lors d'un match ont un effet délétère non seulement sur les cellules ciliées, mais aussi sur les fibres du nerf auditif. Notre équipe et d'autres ont montré dans les années 1980 que les bruits trop intenses provoquent des lésions au niveau des terminaisons des fibres nerveuses, là où elles forment des synapses avec les cellules ciliées. Il est probable que les terminaisons gonflent et finissent par se rompre en réaction à une libération d'une quantité excessive de glutamate, la molécule de signalisation, par les cellules ciliées surstimulées. En effet, une libération trop importante de glutamate en tout endroit du système nerveux est toxique.

Le sens commun voulait que ces fibres endommagées par le bruit fussent en mesure de récupérer ou de se régénérer, puisque les seuils auditifs peuvent revenir à la normale dans des oreilles qui ont présenté un fort gonflement des nerfs immédiatement après l'exposition. Dans mon laboratoire, nous étions sceptiques quant à cette possibilité de régénération. Nous savions aussi que des lésions nerveuses induites par le bruit ne se reflètent pas dans les tests habituels, parce que des études chez l'animal remontant aux années 1950 ont montré que la perte de fibres du nerf auditif, sans perte de cellules ciliées, ne modifie pas l'audiogramme, à moins que la destruction ne devienne catastrophique, supérieure à 80 %.

Il semble qu'une population dense de fibres nerveuses ne soit pas nécessaire pour percevoir un son dans une cabine de test silencieuse. Par analogie, prenez une image numérique d'un groupe de personnes et échantillonnez-la plusieurs fois en diminuant à chaque fois sa résolution. Au fur et à mesure de la réduction de la densité des pixels, les détails de l'image deviennent moins nets. Vous pouvez toujours dire qu'il y a des personnes sur l'image, mais vous ne pouvez pas les identifier. De même, avons-nous supposé, une perte diffuse de neurones ne modifie pas forcément la capacité à détecter un son, mais elle pourrait facilement dégrader la compréhension des paroles dans un restaurant bruyant.

Quand, dans les années 1980, nous avons commencé à étudier les lésions nerveuses induites par le bruit, le seul moyen de compter les synapses entre les fibres du nerf auditif et les cellules ciliées

Faits et chiffres

• **ENVIRON 360 MILLIONS de personnes dans le monde (plus de 5 % de la population) souffrent de déficience auditive invalidante (– 40 dB pour la meilleure oreille chez l'adulte, – 30 dB chez l'enfant âgé de moins de 15 ans).**

• **ENVIRON UN TIERS des personnes âgées de plus de 65 ans sont touchées.**

• **LA MOITIÉ DES CAS de déficience auditive pourraient être évités par de bonnes pratiques, le traitement efficace des affections de l'oreille et la vaccination.**

• **ON ESTIME À 1,1 MILLIARD le nombre de jeunes menacés par une perte d'audition en raison de pratiques d'écoute dangereuses.**

SOURCE : OMS

Comment protéger son audition

Dans des études menées sur différentes espèces animales, nous avons provoqué des lésions irréversibles du nerf auditif en exposant les animaux durant deux heures en continu à un bruit de 100 à 104 décibels (dB).

Il y a de bonnes raisons de penser que l'oreille humaine est tout aussi sensible.

La plupart des expositions quotidiennes pendant notre vie ne durent pas aussi longtemps. Il est néanmoins prudent d'éviter une exposition sans protection à tout son d'intensité supérieure à 100 dB.

De nombreux sons de la vie quotidienne présentent un risque. Dans les salles de concert et les discothèques, le son atteint les 115 dB et des niveaux moyens qui dépassent les 105 dB. Les souffleurs de feuilles et les tondeuses à gazon à essence atteignent des intensités de 95 à 105 dB aux oreilles de leurs utilisateurs, tout comme des outils électriques tels que les scies circulaires. La fréquence des sons a également son importance. Le bruit d'une ponceuse à bande est plus dangereux, au même niveau de décibels, que celui d'une moto, moins aigu. Les marteaux-piqueurs produisent des niveaux sonores de 120 dB même pour les passants, et les cadences rapides des impulsions de la mèche métallique sur le béton produisent beaucoup de sons aigus dangereux.

Que faire ? De nos jours, nous avons tous accès à des sonomètres étonnamment précis et portables. Il existe de nombreuses applications gratuites ou peu onéreuses pour les téléphones portables, qui fournissent des mesures fiables de la pression sonore produite par un instrument de musique ou les pétarades d'une voiture, à 1 ou 2 dB près de ce qu'indiquerait l'appareil professionnel le plus cher. Ainsi, pour moins de 20 euros, l'application Sound Level Meter Pro pour iOS m'a fourni en laboratoire des mesures précises à mieux que 0,1 dB près.

Une fois que vous savez quels sons de votre environnement sont potentiellement dangereux, la bonne nouvelle est qu'une protection efficace pour vos oreilles ne coûte pas cher, est facile à utiliser et parfaitement portable. Bien insérés, les bouchons d'oreille en mousse permettent d'atténuer le niveau sonore de 30 dB dans les plages de fréquence les plus dangereuses.

Si vous allez assister à un concert, ces bouchons d'oreille en mousse étouffent trop le son. Si vous voulez entendre le son à un niveau (de sécurité) juste au-dessous, utilisez des bouchons d'oreille « pour musiciens ». Différentes marques sont disponibles en ligne à partir de moins de 10 euros la paire. Ils sont conçus pour assurer une atténuation du son de 10 à 20 dB, identique pour les sons aigus et plus graves, de façon à ne pas modifier le timbre de la musique.

Le plus important est de faire attention à ce que vos oreilles vous disent. Si, à la suite d'un événement ou d'une activité, les sons vous paraissent plus sourds, comme si vous aviez du coton dans les oreilles, ou si vous avez des bourdonnements, il est probable que des synapses de votre nerf auditif aient été détruites. Ne vous désespérez pas, mais essayez de faire en sorte que cela ne se reproduise pas.

- C. L.



140 décibels (dB)
Moteur d'avion à réaction

130 dB
Arme à feu

120 dB
Marteau-piqueur

110 dB
Concert/discothèque

100 dB
Tondeuse à gazon à essence
Perte auditive après 2 heures d'exposition

90 dB
Moto
Perte auditive après 8 heures d'exposition

80 dB
Trafic urbain

70 dB
Aspirateur

60 dB
Conversation normale

50 dB
Pluie

internes était de faire de la microscopie électronique de coupes en série. Ce procédé extrêmement laborieux nécessitait près d'un an de travail pour analyser les synapses associées à seulement quelques cellules ciliées d'une cochlée.

Vingt-cinq ans après, avec Sharon Kujawa, de la clinique Massachusetts Eye and Ear, nous avons voulu savoir si, en soumettant de jeunes souris à un épisode de surstimulation acoustique, on accélérerait le début de la perte auditive liée à l'âge. Les animaux ont été exposés à un bruit choisi pour ne causer qu'une augmentation temporaire des seuils auditifs, donc aucune lésion permanente des cellules ciliées. Comme prévu, les cochlées des rongeurs présentaient un aspect normal quelques jours après l'exposition. Cependant, l'examen des animaux, entre six mois et un an plus tard, a révélé une perte croissante de fibres nerveuses, malgré la présence de cellules ciliées intactes.

Heureusement, depuis les années 1980, on a beaucoup appris sur la façon d'explorer la structure des synapses à l'échelle moléculaire. On dispose à présent d'anticorps couplés à différentes substances fluorescentes, capables de marquer des structures de part et d'autre de la synapse connectant une cellule ciliée interne et une fibre du nerf auditif. Grâce à ces marquages, nos comptages de synapses par des observations au microscope optique étaient faciles.

Nous avons vite accumulé des données montrant que quelques jours après une exposition au bruit, quand le seuil auditif était revenu à la normale, jusqu'à la moitié des synapses du nerf auditif avaient disparu. La perte du reste des neurones (les corps cellulaires et les axones projetés vers le tronc cérébral) est devenue manifeste en quelques mois. En deux ans, la moitié des neurones auditifs avaient complètement disparu. Dès que les synapses étaient détruites, les fibres concernées n'étaient d'aucune utilité et ne réagissaient à aucun son, quelle que soit son intensité.

Au cours des dernières années, nous avons documenté la dégénérescence de synapses induite par le bruit chez des souris, des cobayes et des chinchillas, ainsi que dans des tissus humains *post mortem*. Nos études sur l'animal et sur l'oreille humaine ont montré que la perte de connexions entre les fibres du nerf auditif et les cellules

ciliées se produit avant les augmentations des seuils auditifs associées à la perte de cellules ciliées. L'idée qu'une lésion du nerf auditif provoque une sorte de perte auditive cachée, une composante importante de la baisse de l'audition induite par le bruit et due à l'âge, est désormais largement admise. De nombreux spécialistes travaillent au développement de tests afin de déterminer si le problème est très répandu et si nos modes de vie bruyants conduiront à une épidémie de lésions auditives chez des personnes de tous âges.

Sous sa forme la plus simple, l'audiogramme tonal, la référence en matière de tests de l'audition, consiste à mesurer des seuils auditifs et constitue une jauge sensible de l'état des cellules ciliées de la cochlée. Il est cependant un indicateur médiocre des lésions des fibres du nerf auditif. Nos recherches ont montré que les lésions nerveuses de la perte auditive cachée ne modifient pas la capacité à détecter la présence

Les pertes auditives cachées seraient parfois à l'origine d'acouphènes ou d'hyperacousie

d'un son, mais qu'elles dégradent fort probablement notre capacité de comprendre les paroles et d'autres sons complexes. En fait, elles pourraient fortement contribuer à la plainte classique des personnes âgées : « Je peux entendre les gens parler, mais je n'arrive pas à comprendre ce qu'ils disent. »

Les audiologistes savent depuis longtemps que deux personnes présentant des audiogrammes similaires peuvent obtenir des résultats très différents aux tests de compréhension de la parole dans un environnement bruyant, tests qui mesurent le nombre de mots correctement identifiés lorsque le niveau du bruit de fond augmente. Auparavant, ils attribuaient ces différences au traitement cérébral. Nos recherches suggèrent qu'elles résultent en grande partie de différences dans le nombre de fibres du nerf auditif ayant survécu.

La perte auditive cachée aiderait aussi à expliquer d'autres plaintes relatives à l'audition, notamment les acouphènes (bourdonnements dans les oreilles) et l'hyperacousie (incapacité de supporter des sons même d'intensité modérée). Ces affections persistent souvent même lorsque

l'audiogramme ne présente aucune anomalie. Par le passé, des scientifiques et des cliniciens ont souligné l'obtention d'un audiogramme normal chez des personnes souffrant d'acouphènes ou d'hyperacousie et ont de nouveau conclu que le problème devait avoir une origine cérébrale. Nous suggérons au contraire que la lésion a pu intervenir au niveau du nerf auditif.

Réglementations à revoir

Nos recherches soulèvent des questions sur les risques d'une exposition régulière à une musique forte lors de concerts, de soirées dans des discothèques et à partir de dispositifs d'écoute personnels. Bien que la perte auditive induite par le bruit soit clairement un problème chez les musiciens professionnels, même chez ceux qui jouent de la musique classique, des études épidémiologiques menées sur des auditeurs occasionnels ont invariablement échoué à montrer un effet notable sur leurs audiogrammes.

Aux États-Unis, les directives fédérales émises pour minimiser les dommages dus au bruit chez les ouvriers américains sont toutes fondées sur la supposition que si les seuils post-exposition reviennent à la normale, l'oreille a entièrement récupéré. Comme nous l'avons appris, cette supposition est fautive ; il s'ensuit donc que les réglementations actuelles concernant le bruit sont probablement insuffisantes pour éviter des lésions du nerf auditif induites par le bruit et la perte auditive qui en résulte.

Pour traiter cette question, il nous faut de meilleurs tests de diagnostic des lésions du nerf auditif, car nous manquons de numérations de synapses sur des tissus *post mortem*. Une approche prometteuse est fondée sur la mesure de l'activité électrique dans les neurones auditifs, nommée réponse auditive du tronc cérébral (RATC).

On peut mesurer la RATC chez un sujet éveillé ou endormi, équipé d'électrodes sur le cuir chevelu qui enregistrent l'activité électrique (électroencéphalographie) en réponse à la présentation de séries de sons de différentes fréquences et de différents niveaux de pression acoustique. On a longtemps interprété le test RATC sur la base du principe du tout ou rien, un signal électrique clair en réaction à un son signifiant une audition normale, et l'absence de réaction indiquant une perte d'audition.

Des travaux que nous avons menés chez l'animal ont montré que l'amplitude de la RATC à des niveaux sonores élevés est très informative: elle augmente proportionnellement au nombre de fibres du nerf auditif dotées d'une connexion viable avec des cellules ciliées internes. De même, dans une récente étude épidémiologique inspirée par nos travaux, les chercheurs ont utilisé une variante de la RATC chez un groupe d'étudiants anglais présentant des audiogrammes normaux et ont observé des amplitudes plus faibles de la réponse chez ceux qui ont mentionné avoir été exposés de façon répétée au bruit intense de discothèques et de concerts.

À la recherche de traitements potentiels pour la perte auditive cachée, nous nous demandons à présent si l'on peut inverser la dégénérescence induite par le bruit, en traitant les neurones survivants avec des substances chimiques conçues pour faire croître de nouvelles fibres nerveuses et pour rétablir ainsi des connexions avec les cellules ciliées internes. Bien que les synapses elles-mêmes soient détruites immédiatement après l'exposition au bruit, la

lenteur de la dégénérescence du reste du nerf (corps cellulaire et axone) nous permet d'être optimistes et de penser que l'on peut rétablir la fonction normale chez de nombreuses personnes. Nous avons obtenu des résultats encourageants dans des études sur l'animal en administrant des neurotrophines (des protéines qui favorisent la croissance des neurones) directement dans l'oreille interne.

Il sera peut-être bientôt possible de traiter une perte auditive cachée en injectant à travers le tympan des gels qui libèrent lentement des neurotrophines afin de recréer des synapses en quelques mois ou années. On administrerait ces produits tout de suite après l'exposition à un bruit intense, comme celui de l'explosion à la ligne d'arrivée du marathon de Boston en 2013, qui a lésé l'audition de plus d'une centaine de spectateurs. Ainsi, un otologiste pourra peut-être un jour administrer des médicaments dans la cochlée pour traiter de façon très peu invasive les lésions auriculaires induites par le bruit – et cela aussi facilement qu'un ophtalmologue corrige aujourd'hui une myopie par une chirurgie laser de la cornée. ■

BIBLIOGRAPHIE

S. G. Kujawa et M. C. Liberman, Synaptopathy in the noise-exposed and aging cochlea: Primary neural degeneration in acquired sensorineural hearing loss, *Hearing Research*, publié en ligne le 11 mars 2015.

S. G. Kujawa et M. C. Liberman, Adding insult to injury: Cochlear nerve degeneration after "temporary" noise-induced hearing loss, *Journal of Neuroscience*, vol. 29(45), pp. 14077-14085, 2009.



LES {Partagez les savoirs} RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM

Entrée gratuite

Au Jardin des Plantes

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



UN CHERCHEUR / UN LIVRE

Lundi 7 mars – 18h :
Une belle histoire de l'Homme, Éditions Flammarion / Muséum, 2015
 Par E. Heyer, anthropo-généticienne, Muséum
 et D. Grimaud-Hervé, paléo-anthropologue, Muséum

CONFÉRENCES

La Nature nous parle : la sonothèque du Muséum
 Lundi 14 mars – 18h : L'éco-acoustique ou la nature sur écoute
 Par J. Sueur, maître de conférences, éco-acousticien, Muséum
 et H. Glotin, professeur, Institut Universitaire de France, Université de Toulon
 Lundi 21 mars – 18h : Sons et comportement chez les animaux
 Par T. Aubin, directeur de recherche CNRS, Université Paris-Sud et H. Cap, éthologue, gestionnaire des collections de zoologie, Muséum d'Histoire naturelle de Toulouse

MÉTIER DU MUSÉUM

Dimanche 20 mars – 15h :
Carpologue, spécialiste des graines et des fruits archéologiques, A. Salaverri

COURS PUBLICS

Et l'Homme domestiqua la plante : à l'origine des espèces cultivées
 Par M. Tengberg, spécialiste en archéobotanique de l'Asie du Sud-Ouest, professeur, Muséum
 Jeudi 24 mars – 18h : Cultiver le sauvage : naissance de l'agriculture au Proche-Orient
 Jeudi 31 mars – 18h : Riz, mils et sorgho : les autres agricultures de l'Ancien Monde

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

Séismes, tempêtes... Bientôt des capes de protection

Gregory Gbur

Si la cape d'invisibilité n'est encore qu'une perspective lointaine,
son principe inspire des dispositifs de protection
contre d'autres types d'ondes que la lumière.

Il y a près d'une décennie, les premières recherches scientifiques sur une cape d'invisibilité dans le domaine optique ont vu le jour. Mais en dépit d'efforts théoriques et expérimentaux acharnés, de nombreux obstacles restent à surmonter avant qu'un dispositif de camouflage à la Harry Potter se profile à l'horizon. En effet, des limitations théoriques indiquent que de tels dispositifs pourraient être impossibles à réaliser, si l'on exige d'eux une taille macroscopique et une efficacité parfaite.

Une cape de masquage idéale guide les ondes autour d'une région centrale, un peu comme l'eau s'écoule autour d'un gros galet dans un ruisseau. Les objets situés dans cette région n'interagissent pas avec les ondes qui, en aval et en amont de la région masquée, sont imperturbées. Cette propriété est en fait un inconvénient pour les capes d'invisibilité, où les ondes dont il s'agit sont des ondes lumineuses : celui qui la porte ne sera pas vu, mais il ne pourra rien voir non plus.

Cependant, toutes les ondes ne sont pas lumineuses, et l'on pourrait exploiter les idées de dissimulation par cape pour protéger des objets ou des personnes contre les effets nuisibles d'ondes océaniques, sonores, magnétiques ou sismiques. En fait, la mise au point de dispositifs de dissimulation pour protéger, plutôt que pour cacher, pourrait être l'application la plus intéressante susceptible d'émerger de ce domaine de recherche encore tout jeune.

Les racines de l'invisibilité en physique remontent à des recherches dans le domaine biomédical. Au début des années 1970, l'ingénieur britannique sir Godfrey Hounsfield développait la première technique d'imagerie médicale en trois dimensions, le tomodensitomètre ou scanner à rayons X, aujourd'hui omniprésent, et démontrait son efficacité et son innocuité pour réaliser des images du cerveau. Dans un tel scanner, l'objet examiné est exposé à des rayons X venant de multiples directions, ce qui produit un

L'ESSENTIEL

■ Des idées publiées

Il y a une dizaine d'années ont donné naissance à tout un domaine de recherche : la physique de l'invisibilité.

■ La réalisation d'une cape

d'invisibilité, même imparfaite, se heurte à de nombreux obstacles d'ordre pratique, voire théorique.

■ Pour se protéger

d'ondes autres que lumineuses, les obstacles sont moins nombreux. Les scientifiques ont ainsi réalisé divers dispositifs qui constituent des preuves de principe.

ensemble d'images qu'un ordinateur combine pour former une image tridimensionnelle complète de l'objet.

Mais les rayons X sont relativement inefficaces pour distinguer les tissus mous. Les chercheurs ont donc commencé à développer de nouvelles techniques d'imagerie médicale fondées sur l'utilisation d'ondes différentes. Une inquiétude se fit jour immédiatement: et si certains objets n'étaient pas visualisables par ces techniques? En d'autres termes, existait-il des objets invisibles pour ces techniques d'imagerie? S'il existait par exemple des «tumeurs invisibles», alors toute technique utilisant des ondes pour explorer le corps humain présenterait de graves défauts.

L'invisibilité, mission impossible ?

Heureusement, des travaux théoriques de la fin des années 1980 ont montré que, en général, il n'existe pas d'objets invisibles. Un objet peut être complètement invisible lorsqu'il est éclairé d'une seule direction (par exemple, nombreux sont ceux qui se sont cognés sur une porte en verre parce que l'éclairage était tel que la porte devenait invisible), mais il semble impossible qu'un objet soit invisible pour toutes les directions d'éclairage.

Ce résultat a semblé régler définitivement la question, jusqu'à ce que, en 2006, deux études théoriques soient publiées dans la revue *Science*, l'une par Ulf Leonhardt, à l'université de Saint Andrews, en Écosse (et aujourd'hui à l'institut Weizmann, en Israël), et l'autre par John Pendry, de l'Imperial College de Londres, avec David Schurig et David Smith, de l'université Duke aux États-Unis. Ces deux articles proposaient des modèles théoriques de cape d'invisibilité fondés sur une technique nouvelle nommée optique transformationnelle.

De quoi s'agit-il? Quand de la lumière passe d'un milieu à un autre, par exemple de l'eau à l'air, elle change de direction – on parle de réfraction. Cet effet est évident quand on observe une paille plongée dans un verre d'eau: la paille semble pliée à l'interface air-eau. L'idée clé de l'optique transformationnelle a consisté à remarquer que, dans de nombreux cas, courber des ondes lumineuses équivaut mathématiquement à déformer la géométrie de l'espace. Le principe consiste donc à concevoir la déformation spatiale

L'AUTEUR



Gregory J. GBUR est maître de conférences au département de physique et d'optique

de l'université de Caroline du Nord à Charlotte, aux États-Unis.

Article publié avec l'aimable autorisation de la revue *American Scientist*.

souhaitée, en l'occurrence celle qui force les rayons lumineux à contourner la région à dissimuler, puis à en déduire le type de matériaux nécessaires pour produire le dispositif de camouflage.

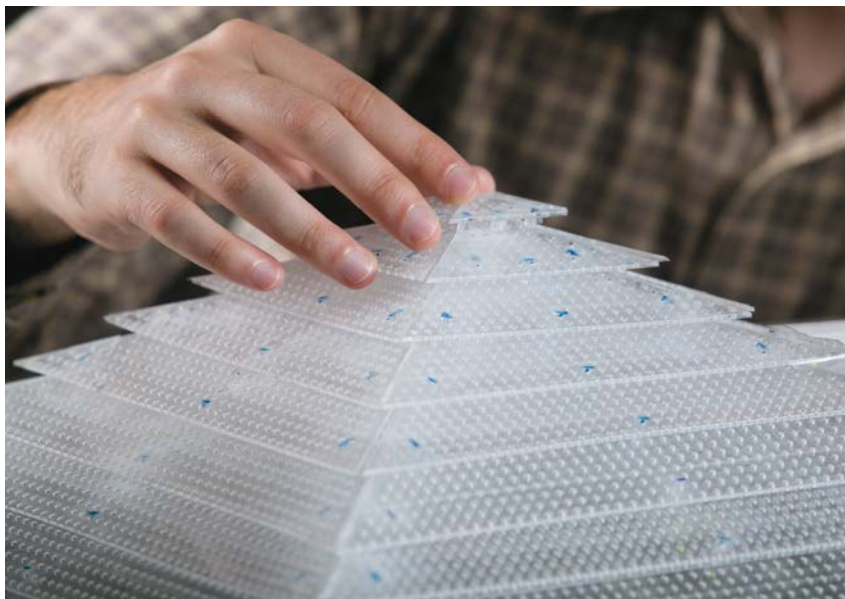
Comment ces dispositifs de dissimulation seraient-ils possibles alors que des recherches antérieures avaient apparemment prouvé l'impossibilité de l'invisibilité? Les auteurs des deux études de 2006 résolvaient cette contradiction apparente de deux façons différentes. Ulf Leonhardt notait simplement que la non-existence de l'invisibilité « parfaite » n'exclut pas la possibilité d'une quasi-invisibilité: un objet invisible à 99 %, par exemple, serait sans doute acceptable pour la plupart des applications. Quant à John Pendry et ses deux coauteurs, ils faisaient observer que les preuves de non-existence ne prennent pas en compte des milieux matériels très particuliers que l'on ne trouve pas dans la nature, mais que l'on pourrait en principe fabriquer en laboratoire.

Les métamatériaux entrent en scène

Ces chercheurs pensaient à ce qu'on appelle à présent des « métamatériaux », des milieux formés par un assemblage de structures artificielles. Alors que la plupart des matériaux naturels ne réagissent qu'au champ électrique des ondes lumineuses, on pourrait mettre au point des métamatériaux présentant en outre une réponse magnétique. De plus, la plupart

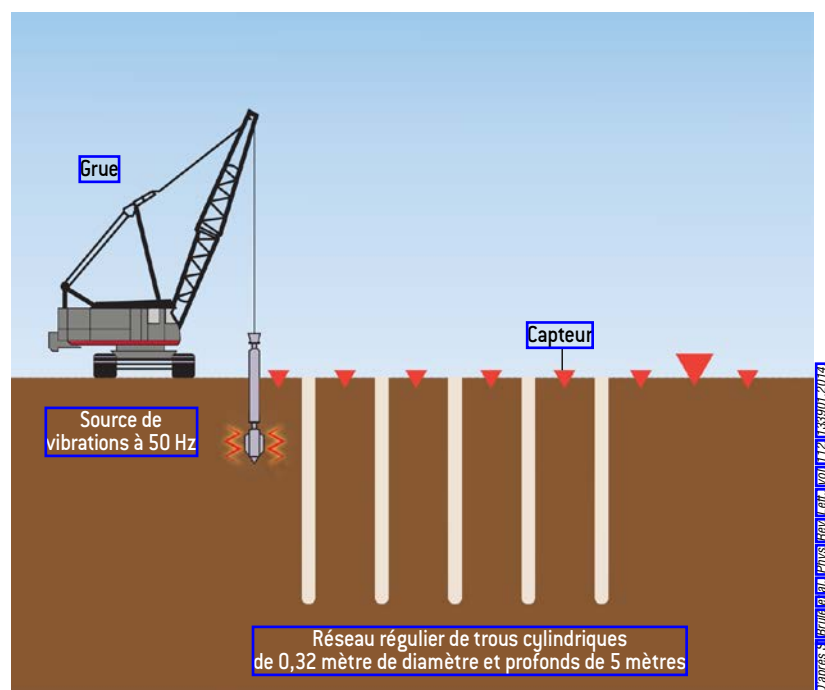
CE « TAPIS » ACOUSTIQUE

réalisé en 2014 à l'université Duke renvoie les ondes sonores vers un auditeur comme si elles n'avaient rencontré aucun obstacle, dissimulant ainsi l'objet qu'il recouvre. Steven Cummer et ses collègues ont effectué de longs calculs pour déterminer le positionnement précis de trous et de feuilles de plastique permettant de modifier la trajectoire des ondes sonores de façon appropriée.



SCIENCE FRAZ / L'UNIVERSITÉ DUKE

PROTECTION ANTISISMIQUE



AVEC DES TROUS DE FORAGE PRÉCISEMENT ESPACÉS, qui font varier la densité moyenne du sol d'un endroit à l'autre, on peut contrôler la vitesse, donc la direction, de propagation dans le sol d'une onde de vibration. Une expérience récente, schématisée ci-dessus et réalisée par Stéphane Brûlé, de l'entreprise Ménard, et ses collègues, a ainsi montré qu'un tel réseau dévie les ondes de surface produites par une source artificielle. Ce principe permettrait de protéger une structure contre des ondes sismiques.

des matériaux naturels sont isotropes, c'est-à-dire que la lumière s'y propage à la même vitesse quelle que soit sa direction. Les matériaux anisotropes, où la vitesse de la lumière dépend de la direction considérée, offrent une liberté supplémentaire pour concevoir de véritables dispositifs de dissimulation.

Se cacher des micro-ondes

Fin 2006, les chercheurs de l'Imperial College et de l'université Duke ont construit et testé un dispositif rudimentaire capable de cacher un objet vis-à-vis de micro-ondes. Depuis, divers concepts de dispositif de dissimulation ont été proposés, et un certain nombre d'entre eux ont été testés. Notamment, en 2014, l'équipe de l'université de Duke a fait la démonstration d'une cape d'invisibilité aux ondes acoustiques. Bien que ces dispositifs soient loin de pouvoir prétendre à une véritable invisibilité, ils illustrent la validité des concepts théoriques.

La dissimulation parfaite vis-à-vis des rayons lumineux se heurte cependant à

un certain nombre d'obstacles majeurs. Côté pratique, la construction de métamatériaux suppose que l'on soit capable de manipuler la structure de la matière à des échelles du même ordre que la longueur d'onde de la lumière (condition d'une forte influence sur l'onde). Comme la lumière visible a des longueurs d'onde de l'ordre du millionième de mètre, cette tâche n'est pas encore à notre portée.

Il y a par ailleurs, du côté théorique, un défi encore plus difficile à relever. Pour que la cape soit vraiment indétectable, la lumière doit mettre le même temps à traverser la cape qu'à passer à côté. Or la lumière passant à l'intérieur de la cape doit parcourir une distance supérieure pour éviter la région masquée, ce qui signifie qu'elle doit se propager plus vite que la lumière extérieure. Par conséquent, la lumière à l'intérieur de la cape doit voyager à une vitesse supérieure à celle de la lumière dans l'air, qui est presque identique à la vitesse de la lumière dans le vide, c . Il est possible de réaliser cet exploit pour une plage très étroite de fréquences sans dépasser c et violer la théorie de la relativité d'Einstein,

mais il semble impossible de le faire pour tout le spectre visible simultanément. En d'autres termes, on pourrait masquer une nuance donnée de rouge, mais l'objet resterait bien visible pour la lumière de toutes les autres couleurs.

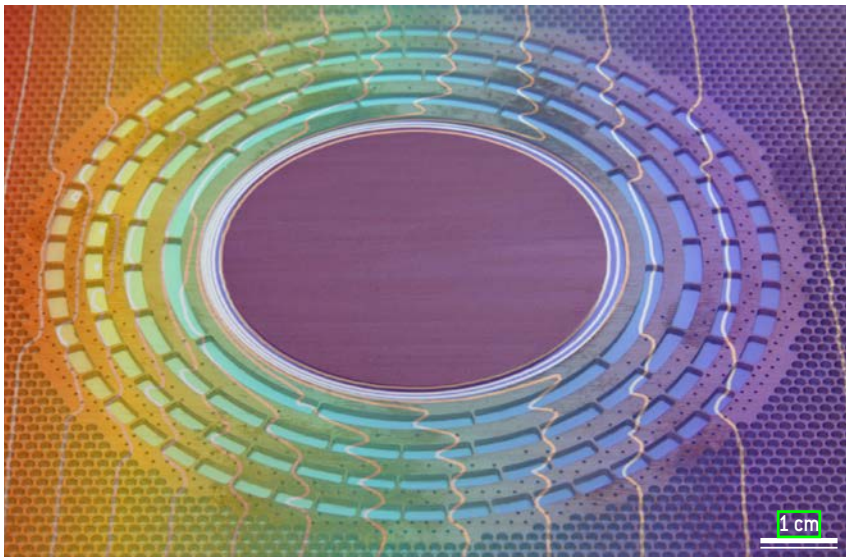
Si l'on ne réalisera probablement pas de capes d'invisibilité optique parfaites, ou juste raisonnablement bonnes, et de taille correcte, de nombreux obstacles à la dissimulation vis-à-vis de la lumière visible disparaissent pour d'autres types d'ondes que la lumière. La vitesse de ces ondes, très inférieure, n'a pas, en pratique, de limite supérieure; de plus, les longueurs d'onde en jeu sont beaucoup plus grandes, ce qui les rend plus aisées à manipuler. Et si ce qui nous intéresse est de concevoir des dispositifs pour se protéger d'ondes destructrices, nous n'avons pas besoin d'atteindre la perfection. Une «cape d'invisibilité» réduisant l'impact d'une onde sismique sur un bâtiment ne serait-ce que d'un ordre de grandeur pourrait empêcher l'effondrement de ce dernier.

Boucliers souterrains

Les scientifiques ont proposé, pour se protéger des ondes, plusieurs dispositifs fondés sur l'idée de dissimulation par cape. Par exemple, on pourrait entourer un bâtiment d'une série de trous ou de piliers positionnés de manière très précise dans le sol, ce qui ferait varier spatialement la densité moyenne du sol et, par conséquent, la direction de propagation des éventuelles ondes sismiques destructrices, lesquelles dévierait de façon à éviter la structure.

Avec des collègues, Sébastien Guenneau et Stefan Enoch, de l'institut Fresnel (CNRS/Aix-Marseille université/Centrale Marseille) ont testé cette idée. En 2012, un réseau de trous a été mis en place par l'équipe de Stéphane Brûlé, de l'entreprise Ménard, pour faire écran à un générateur d'ondes sismiques artificielles (voir la figure ci-dessus). Bien que le système ait simplement bloqué les ondes plutôt que de les guider, il a démontré que des structures souterraines pouvaient agir sur ce type d'ondes.

Il est également possible de créer des dispositifs de dissimulation pour les ondes sonores se propageant dans l'air ou dans l'eau. En 2011, Nicholas Fang et des collègues, à l'université de l'Illinois à Urbana-Champaign, ont fait la démonstration



PROTÉGER DE LA CHALEUR : c'est ce que fait cette structure bidimensionnelle, réalisée avec du cuivre et un isolant thermique en 2013 par Martin Wegener, de l'institut de technologie de Karlsruhe, et ses collègues. Le flux de chaleur, qui se propage de gauche à droite, préserve la région centrale et semble imperturbé par celle-ci, comme en témoignent les températures (codées par des couleurs).

d'un petit dispositif de dissimulation vis-à-vis d'ultrasons se propageant sous l'eau selon un plan. La structure réalisée est un cylindre plat d'une quinzaine de centimètres de diamètre, comportant 16 anneaux concentriques constitués de cavités connectées. Ces dernières sont conçues pour modifier la vitesse du son chacune de façon différente, afin que les ondes ultrasonores contournent la région centrale du dispositif où se trouve l'objet à dissimuler ou à protéger.

Une autre possibilité intéressante serait de se protéger des vagues de l'océan. En 2012, Mohammad-Reza Alam, de l'université de Californie à Berkeley, a proposé une idée de dispositif de dissimulation pour une application de ce type. Elle fait appel à la présence de perturbations sous la surface, appelées ondes interfaciales, qui apparaissent souvent dans les océans à une profondeur où la température, et donc la densité de l'eau, change brutalement.

Un brise-lames autour d'une plateforme ?

En installant autour d'une bouée ou d'une plateforme pétrolière une structure aux motifs bien choisis, il est en théorie possible de convertir les vagues qui s'approchent de la structure en ondes interfaciales qui vont passer en dessous sans faire de dégâts ; de l'autre côté de la structure, les ondes remonteraient ensuite à la surface. Pour l'instant, cette idée n'a pas fait l'objet d'expériences.

Les ondes ne sont pas les seules cibles possibles d'une telle technologie. En 2012,

Sébastien Guenneau et Claude Amra, de l'institut Fresnel, et Denis Veynante, de l'École centrale de Paris, ont introduit l'idée de cape thermique, capable de protéger une région d'un flux de chaleur. Pour l'essentiel, la cape offre une « trajectoire de moindre résistance » au flux de chaleur, qui tendra ainsi à contourner la région dissimulée avant d'y pénétrer partiellement au bout d'un certain temps. Un tel concept pourrait fournir une protection à des appareils sensibles à la chaleur, comme le sont les dispositifs électroniques.

Se protéger d'un flux de chaleur, d'un champ magnétique...

Un autre domaine où l'on pourrait envisager une protection est celui des champs magnétiques. Toujours en 2012, Fedor Gömöry et ses collègues, de l'Institut de génie électrique, en Slovaquie, et de l'université autonome de Barcelone, en Espagne, ont fait la démonstration expérimentale d'une cape magnétique. Elle était constituée de deux cylindres creux accolés et concentriques, le cylindre interne étant en matériau supraconducteur, qui expulse les champs magnétiques, et le cylindre externe en fer, qui au contraire les attire. Ce dispositif empêche un champ magnétique statique de pénétrer à l'intérieur du double cylindre.

Cette technique pourrait se révéler utile en imagerie médicale. En imagerie par résonance magnétique, ou IRM, le signal est obtenu à l'aide d'un champ magnétique puissant, tellement puissant que la plupart des équipements électroniques utilisés pour exploiter la machine doivent être placés dans une autre pièce. Une cape magnétique pour ces appareils électroniques leur permettrait d'être plus petits et moins coûteux.

Il est même possible de créer une cape anticourants électriques. En 2012, Fan Yang et ses collègues, de l'université de Lanzhou et de l'université du Sud-Est, en Chine, ont fait la démonstration expérimentale d'une cape d'invisibilité vis-à-vis d'un courant électrique continu. Une telle cape pourrait offrir davantage de liberté aux ingénieurs électroniciens dans la conception géométrique des circuits, en évitant les interférences entre les composants.

Les techniques d'optique transformationnelle pourraient aussi servir à camoufler, c'est-à-dire à faire en sorte que n'importe quel objet ressemble à n'importe quel autre. Yun Lai et ses collègues, à l'université de science et technologie de Hong Kong, ont réalisé la première étude théorique de cette idée en 2009, et un certain nombre de variantes ont été explorées les années suivantes.

Ces chercheurs ont créé l'illusion d'un trou dans un mur, ce qui revient à rendre transparente une surface opaque. Ils ont également montré qu'il est possible de faire paraître un objet beaucoup plus gros qu'il ne l'est en réalité. On pourrait exploiter une telle illusion pour, par exemple, qu'une porte secrète grande ouverte apparaisse comme un morceau de mur fondu avec le reste. Mais aucune de ces possibilités n'a encore été mise en pratique pour des murs ou des portes de plus d'un millièmètre de millièmètre d'épaisseur...

Des formes limitées d'invisibilité peuvent offrir une protection de manière tout à fait inattendue. En 2003, avant même la parution des premiers articles théoriques

sur la dissimulation, une cape d'un type très différent – une cape rétroréfléchissante – a été introduite par Susumu Tachi, de l'université de Tokyo : une caméra filme la scène se déroulant derrière la cape, et le film est projeté sur le vêtement rétroréfléchissant. La personne portant la cape semble alors transparente, vue depuis certaines directions.

Invisibilité en trompe-l'œil

Ce prototype a été conçu comme démonstration d'une technique utilisable pour rendre « transparent » l'intérieur d'une automobile ou d'un avion. Le pilote ou le conducteur pourrait alors, virtuellement, voir tout autour de lui à tout moment, et en particulier les dangers qui, d'habitude, lui seraient cachés.

La cape est traditionnellement le vêtement que portent les voyageurs pour se protéger des intempéries. Les applications que laisse entrevoir la physique de l'invisibilité montrent que la science pourrait offrir des capes qui protègent contre presque tous les aléas de la nature. ■

BIBLIOGRAPHIE

A. Colombi *et al.*, Forests as a natural seismic metamaterial: Rayleigh wave bandgaps induced by local resonances, *Scientific Reports*, vol. 6, 19238, 2016.

G. J. Gbur, Designing directional cloaks from localized fields, *Optics Letters*, vol. 40, pp. 986-989, 2015.

S. Brûlé *et al.*, Experiments on seismic metamaterials: Molding surface waves, *Physical Review Letters*, vol. 112, 133901, 2014.

N. Landy et D. R. Smith, A full-parameter unidirectional metamaterial cloak for microwaves, *Nature Materials*, vol. 12, pp. 25-28, 2013.

S. Guenneau *et al.*, L'invisibilité en vue, *Pour la Science*, vol. 382, août 2009.



APPRENDRE À SE CONCENTRER

Au travail, à l'école...

Nous avons de plus en plus de mal à nous concentrer. SMS, alertes e-mail, zapping permanent, rythmes de travail : notre attention est mise à rude épreuve par un environnement changeant et saturé de sollicitations. Comment garder le fil de nos pensées, sans se laisser distraire par nos propres soucis du quotidien ? Ce numéro livre des clés issues des dernières découvertes en neurosciences. Elles nous permettent de repérer les moments où nous décrochons et de nous recentrer immédiatement. Indispensable au travail, et pour les plus jeunes, à l'école.

Disponible en kiosque
et sur www.cerveauetpsycho.fr

John Wilkins, l'avocat du peuple de la LUNE

Claire Bouyre

Au XVII^e siècle, John Wilkins, un jeune savant anglais, est convaincu que la Lune est habitée. Conscient qu'il ne peut rien prouver, l'érudit ecclésiastique construit son argumentation sur les récentes découvertes astronomiques, mais aussi sur les connaissances du vivant.

Les Sélénites existent-ils ? Du nom de la déesse grecque de la Lune, Séléné, ce terme désigne, depuis les *Histoires vraies* de Lucien de Samosate (II^e siècle), les éventuels habitants lunaires. Aujourd'hui, si rien ne permet d'affirmer qu'il n'existe pas d'autres formes de vie ailleurs que sur Terre, il est certain que la Lune n'abrite aucun peuple et il est même fort probable qu'elle ne renferme aucune trace de vie. Nous tenons ces informations de l'astronomie, de l'astrophysique et des missions *Apollo* sur notre satellite et autour : pas d'atmosphère, seules quelques traces d'eau – et sous forme de glace –, aucune trace de vie, aucune molécule biologique dans les centaines d'échantillons rapportés des expéditions sur la Lune entre 1969 et 1972...

Au XVII^e siècle, en revanche, avec les connaissances de l'époque et l'importance de la religion, il n'était pas aussi simple de répondre à cette question et la discussion était âpre entre les partisans de l'existence d'autres mondes habités que la Terre et leurs opposants. Pour comprendre les difficultés auxquelles ont été confrontés les





L'ESSENTIEL

■ Entre le Monde

de Copernic, centré sur le Soleil et non la Terre, et les observations de la Lune à la lunette astronomique, des savants du XVII^e siècle se demandent si la Lune est habitée.

■ Pour l'un d'eux, John

Wilkins, il est probable qu'elle le soit. Il s'appuie sur les idées récentes de l'astronomie ainsi que sur les connaissances du vivant.

■ Homme de science

et homme de foi, il mêle Dieu à son raisonnement, mais dénonce les lectures littérales de la Bible.

EVOQUANT DES PAYSAGES TERRESTRES, les cartes détaillées de la face visible de la Lune, telle celle ci-dessus, publiée en 1647 par l'astronome polonais Johannes Hevelius dans *Selenographia, sive Lunae descriptio*, se sont multipliées au XVII^e siècle grâce à la lunette astronomique.

savants de l'époque, suivons l'un d'eux, John Wilkins, un jeune Anglais dont l'argumentaire en faveur des mondes habités eut un certain succès en son temps et inspira les réflexions de savants contemporains dans toute l'Europe.

Une planète habitable

Wilkins naît en 1614. John Dod, son grand-père maternel, se charge en partie de son éducation. Il lui enseigne les valeurs puritaines. À 13 ans, Wilkins entre au New Inn Hall, puis au Magdalen Hall. Plusieurs matières sont alors incluses dans son programme d'études, à savoir l'arithmétique, la géométrie, l'astronomie et la philosophie naturelle. En 1634, il reçoit son *Master of Arts degree*. Lorsqu'il rédige son premier ouvrage *The Discovery of a World in the Moone* (*La Découverte d'un monde sur la Lune*), en 1638, Wilkins finit à peine ses études. Il s'appuie sur ses enseignements et sur de nombreuses lectures complémentaires qui témoignent d'une grande érudition pour un jeune homme de 24 ans.

L'ouvrage montre que la Lune pourrait être un monde habité et les rééditions anglaises de l'ouvrage, mais également françaises et allemande, attestent de son succès. À en juger par la présentation de l'ouvrage et par son contenu, Wilkins s'adresse à un public assez large. Il cherche à atteindre un lectorat laïque, pas nécessairement spécialiste du sujet, mais un minimum cultivé et éduqué. Il souhaite aussi convaincre le public et obtenir un soutien de ses contemporains. Son travail est écrit en anglais et permet ainsi de propager et de rendre accessibles au public anglais non latiniste les théories astronomiques récentes. Il ne s'agit pas de vulgarisation,

Les cieux et les astres ne sont pas exempts de corruption et, comme la Terre, sont soumis au changement

le terme serait anachronique, mais Wilkins fait preuve d'un effort pédagogique réel dans la mise en forme, la formulation des idées et les illustrations.

Dans l'ouvrage, les interrogations de l'auteur portent sur les caractéristiques indispensables que doivent présenter les astres, et particulièrement la Lune, pour

John Wilkins, entre science et religion

Fondateur en 1660 de la Royal Society, équivalent anglais de l'Académie des sciences, évêque de Chester à la fin de sa vie, John Wilkins (1614-1672) n'avait que 24 ans lorsqu'il exposa ses arguments en faveur d'une Lune habitée. Pour lui, religion et science n'étaient pas séparables. Il plaçait les savoirs moraux, physiques, mathématiques, les croyances et les certitudes issues de la révélation divine sur une même échelle de savoir.

© WILKINS - 1638, LONDRES



abriter des êtres vivants, sur les formes que peuvent prendre ces créatures et sur les moyens de se rendre sur notre satellite pour les rencontrer. Le travail n'est pas aisé et Wilkins commence par mettre en garde son lecteur. Il lui explique que son livre doit être lu sans préjugé ou *a priori*, même si son opinion paraît étrange au premier abord. Il commence par avancer l'idée que plusieurs terres habitables pourraient exister dans l'Univers, et que cela n'est ni contradictoire ni incompatible avec la religion et la foi. Il explique que les cieux et les astres ne sont pas exempts de corruption et sont soumis au changement, comme l'est la Terre. Enfin, il centre son discours sur la Lune et son habitabilité.

Un conflit astronomique et religieux

Avec ce premier ouvrage, Wilkins se place au cœur d'un conflit opposant les partisans d'un système géocentrique – avec une Terre immobile au centre de l'Univers – aux défenseurs du système héliocentrique de Copernic, où la Terre tourne autour du Soleil (voir l'encadré page ci-contre). En réalité, ce conflit s'inscrit dans une controverse plus large sur l'interprétation de la Bible. Parmi les savants impliqués, Philip Lansberg, astronome et mathématicien hollandais, et Nathanael Carpenter, philosophe anglais, défendent le système copernicien. À ces auteurs s'opposent le Belge Libert Froidmont et l'Écossais Alexander Ross, deux aristotéliens soutenant un modèle géocentrique et une interprétation littérale de la Bible. En effet, prises dans leur sens littéral, les écritures saintes stipulent que le Soleil poursuit sa course autour de notre Terre, se levant chaque matin et se couchant chaque soir.

Dans la troisième édition de son ouvrage, publiée en 1640 et intitulée *A Discourse concerning A New World & Another Planet* (« Discours sur un Nouveau Monde et une autre planète »), Wilkins rassemble une argumentation construite et étayée contre les idées de Froidmont et de Ross. À la suite de son premier livre, il en ajoute un deuxième visant à défendre le système héliocentrique. Comme ses adversaires, il est homme de science et homme de foi. Il s'oppose à l'interprétation littérale de la Bible, mais c'est sa foi en un Dieu infiniment sage et puissant qui l'incite à penser l'existence d'êtres lunaires.

Pour lui, l'astronomie de la Bible doit être accessible à tous. Aussi est-elle présentée simplement, en s'appuyant sur les apparences et la perception commune, de sorte que les passages qui ne s'accordent pas avec l'expérience ne doivent pas être pris à la lettre. Par conséquent, les écritures saintes ne sont en contradiction ni avec le mouvement diurne de la Terre ni avec sa révolution annuelle, ni même avec le fait qu'il existe d'autres êtres ailleurs que sur notre planète. Wilkins défend l'idée d'une religion naturelle, dans laquelle la connaissance de la nature, et plus particulièrement du ciel, mène à Dieu. Religion et science ne s'opposent pas, mais se complètent, et l'entièreté du spectacle de la nature porte la trace de son créateur.

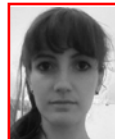
Six ans plus tard, Ross répond à Wilkins dans un nouvel ouvrage, s'efforçant de ridiculiser son adversaire. La Terre tourne autour du Soleil et il existe des habitants

sur la Lune ? Quelle idée ! Si la Terre tournait, on le sentirait, et nos constructions ne pourraient pas tenir en place, tout s'effondrerait ! Et puisque nous sommes le centre de l'attention de Dieu, pourquoi aurait-il créé d'autres êtres, ailleurs, qui ne nous sont d'aucune utilité ?

Ainsi, en ce qui concerne l'habitabilité de la Lune, le point central du débat se situe dans l'intention de Dieu. Pour Wilkins, le pouvoir de Dieu étant infini, il est impossible qu'il se soit limité à satisfaire l'être humain. Croire que tout a été réalisé à notre intention est une vision étroite et anthropocentrique. Il est difficile d'imaginer que nous puissions être seuls dans un Univers si vaste.

Toutefois, pour envisager la vie sur d'autres astres, l'astronomie ne suffit plus. Wilkins invoque aussi les sciences du vivant. Les connaissances dans le domaine se perpétuent depuis l'Antiquité – pour vivre, un être, qu'il soit végétal ou animal, a besoin de

L'AUTEURE



Claire BOUYRE est docteure en épistémologie et histoire des sciences de l'université

de Bordeaux. Elle a soutenu sa thèse de doctorat en 2015 sur le vivant dans le discours sur la pluralité des Mondes, notamment dans l'œuvre de John Wilkins.

Un Monde ou des mondes ?

Au début du XVII^e siècle, dans l'Europe savante, différents systèmes du Monde coexistent, et John Wilkins doit d'abord se positionner par rapport à eux. Certains auteurs affirment que le centre de l'Univers est la Terre ; d'autres pensent qu'il s'agit du Soleil ; d'autres encore suggèrent qu'il n'y a pas de centre, car le Monde est infini.

Ces propositions sont le fruit de plusieurs siècles de réflexions philosophiques, astronomiques et religieuses. Jusqu'au XVI^e siècle, le système de Ptolémée (II^e siècle), hérité d'Aristote, prédomine chez les savants : la Terre est immobile au centre d'une sphère d'étoiles fixes, le Soleil et les planètes tournent autour. Le système est dit géocentrique. Dans cette représentation, la Lune marque une frontière nette entre deux milieux : la Terre et les cieux.

Dans le domaine terrestre, tout est soumis à un perpétuel changement, alors que dans le domaine céleste, tous les corps ont un mouvement circulaire et uniforme. Ils ne naissent ni ne meurent. Milieu terrestre et milieu céleste se distinguent alors par leur degré de perfection. Les objets les plus proches

de la Terre, comme la Lune et le Soleil, tournent rapidement, tandis que les étoiles, astres les plus parfaits, sont fixes par rapport au firmament, mais non par rapport à la Terre. La sphère sur laquelle elles reposent, nommée sphère des fixes, effectue en effet une révolution en vingt-quatre heures.

Dans ce système, la Terre n'est pas considérée comme une planète. Ce terme qui signifie astre errant s'applique aux globes que nous voyons se déplacer dans le ciel, par opposition aux étoiles qui apparaissent immobiles sur la voûte céleste. La Terre étant fixe et au centre du Monde, il ne peut s'agir d'une planète. En revanche, dans cette représentation, la Lune est une planète.

En 1543, l'astronome polonais Nicolas Copernic propose un

modèle héliocentrique où la voûte céleste et le Soleil sont immobiles. La Terre devient un corps céleste au même titre que Vénus et Mercure, et bénéficie des mêmes attributs. L'ordre des planètes est modifié par rapport au système ptoléméen et la dualité céleste/terrestre est ébranlée. Désormais, la Terre tourne autour du Soleil et sur elle-même. À cela s'ajoutent d'autres propositions, telle celle de l'astronome anglais Thomas Digges, selon laquelle la sphère des étoiles fixes n'existe plus. Il lui substitue une sphère infinie et immobile dans laquelle il y aurait une infinité d'étoiles. Pour le philosophe italien Giordano Bruno, l'Univers serait infini et dépourvu de lieux privilégiés. Bruno établit une analogie entre la Terre et les autres planètes du Système solaire, d'une part, et entre le Soleil et les étoiles, d'autre part. À partir du système de Copernic, il propose une infinité de systèmes, répartis dans l'espace et organisés comme le nôtre.

Dans les années 1610, grâce à sa lunette astronomique, Galilée

observe un ensemble d'éléments qui remettent en question le ciel immuable hérité d'Aristote et plaident en faveur du système héliocentrique de Copernic. Les différentes possibilités d'organisation du Monde sont reprises, modifiées, et présentent de nombreuses variations, à commencer par la signification même des termes employés.

Ainsi, l'acception du terme

« Monde » varie selon les auteurs : pour certains, le Monde est l'ensemble de l'Univers avec toutes les parties dont il est composé (planètes, étoiles, comètes...). Pour d'autres, il désigne le Système solaire, c'est-à-dire le Soleil, la Terre et tous les astres que nous voyons se déplacer sur la sphère céleste. Certains, enfin, attribuent ce terme à la Terre et, par analogie, à d'autres astres. Ainsi, selon les acceptions, une « pluralité des mondes » désigne une pluralité d'univers, de systèmes solaires ou de terres habitables. Supposer, comme John Wilkins, que la Lune est un « Monde », c'est proposer que la Lune est habitée, comme la Terre.



conditions similaires à celles de la Terre – et les savants se demandent quelles caractéristiques sont indispensables, comme une terre solide, une lumière et de la chaleur provenant du Soleil, des montagnes, des mers, une alternance du jour et de la nuit. La plupart des astres échappant à notre regard, Wilkins focalise son attention sur la Lune et recense les similarités existantes avec la Terre. L'observation à l'œil nu de la Lune indique qu'elle présente des taches claires et d'autres plus sombres, peut-être des terres et des mers. La découverte récente de la lunette astronomique ajoute de nouveaux éléments: on distingue des montagnes et de profondes vallées. L'existence d'une atmosphère est débattue. Enfin, la Lune se situant à la même distance du Soleil que la Terre, elle reçoit lumière et chaleur, ce qui permet la création du vent et de la pluie.

La défense du système héliocentrique vient compléter le raisonnement de Wilkins.

COPERNIC, GALILÉE, KEPLER, trois figures emblématiques de l'astronomie, présentent les principaux arguments de John Wilkins sur le frontispice de son *Discourse* [1640] : le système du Monde de Copernic, centré sur le Soleil, lequel confère lumière, chaleur et mouvement à toutes les planètes, selon le texte en latin qui l'entoure ; une carte représentant peut-être une région fictive de la Lune ; un oiseau géant pour voler jusqu'à l'astre ; un horizon symbolisant le Nouveau Monde à découvrir...

Si la Terre est une planète comme les autres, tournant sur elle-même et autour du Soleil, et non le centre du Monde, alors pourquoi les autres planètes ne seraient-elles pas elles aussi des lieux habitables ? Et quel serait l'intérêt que Dieu rende la Lune habitable si ce n'est pour y placer des habitants ? Pour Wilkins, il est donc probable qu'elle soit habitée, même si nous ne pouvons en avoir la certitude. Ces êtres vivants – les Sélénites – sont peut-être des hommes, des êtres qui nous ressemblent, ou au contraire des êtres aux formes si différentes de celles que nous connaissons qu'il nous est impossible de les imaginer. Si certains auteurs essaient de deviner leur apparence, leur taille, leur coutume, Wilkins ne se prononce pas, car tout ne serait que conjecture.

La Lune, un autre « Nouveau Monde » ?

En revanche, il s'interroge sur les conditions de vie de tels êtres. Pour tenter d'y répondre, il s'appuie sur la découverte récente des animaux et végétaux du Nouveau Monde et sur leurs milieux de vie. Pour Wilkins, le monde lunaire est un nouveau monde à découvrir, comme le fut le continent américain, et il compare volontiers Galilée à Christophe Colomb. Il met à profit les récits des grands voyageurs, tel le *De Natura novi orbis* du missionnaire et naturaliste espagnol José de Acosta, et les utilise comme modèles afin de s'inscrire dans leur continuité. La Lune est ainsi désacralisée. Elle n'est rien de plus qu'une contrée lointaine, un prolongement de notre Terre, accessible aux voyageurs qui voudront tenter l'aventure.

Défendre le monde dans la Lune est alors une occasion supplémentaire de glorifier le créateur, comme cela a été le cas pour l'Amérique. Wilkins s'appuie sur le monde qu'il connaît pour tenter de définir le climat, la température, les alternances du jour et de la nuit ainsi que les saisons lunaires. Il admet que tout ne peut pas être semblable au monde terrestre. Les jours et les années, par exemple, sont toujours d'une même longueur et la Lune éclaire toute notre Terre tandis que celle-ci n'éclaire qu'un seul hémisphère de la Lune. Mais cela ne suffit pas pour rendre ce monde totalement dissemblable du nôtre. La nature n'a pas qu'un seul moyen pour effectuer ses desseins. Comme Acosta avec l'Amérique, Wilkins montre que la nature peut produire une grande diversité d'êtres

vivants et d'objets. Lorsqu'il se demande par exemple si la longueur des nuits sur la Lune ne s'oppose pas à la sagesse divine, Wilkins répond qu'on observe la même chose aux Pôles terrestres.

Mais la comparaison entre Nouveau Monde et Monde dans la Lune resterait incomplète si elle ne prenait pas en compte la dimension du voyage à travers le vaste océan ou, dans le cas de la Lune, à travers l'espace. Au XVII^e siècle, la lunette astronomique est considérée comme un moyen de transport et le grossissement équivalait au voyage. Toutefois, la vision reste limitée et personne n'a encore rapporté d'objets lunaires ni fait d'observation directe. Les réalités lunaires restent inaccessibles et, pour Wilkins, il faudrait se rendre sur place.

Six mois de voyage à vol d'oiseau

Mais comment atteindre notre satellite ? Wilkins établit un rapide calcul : sachant que la Lune est éloignée de la Terre de 52 demi-diamètres terrestres, si l'homme se déplaçait en ligne droite sans s'arrêter avec une vitesse de 68 kilomètres par heure, le voyage durerait au moins six mois. Complicé, certes, mais pas impossible. Peut-être qu'un oiseau pourrait nous transporter ou que nous pourrions construire une machine.

Ses idées se précisent au fil des ans. Loin d'être jugé irréalisable ou farfelu, le vol humain intéresse d'autres savants tels que le Français Pierre Gassendi ou l'Italien Francesco Lana. Dans les années 1650, le savant anglais Robert Hooke se joint à Wilkins pour l'aider dans ses recherches. Il est peut-être trop difficile de se rendre sur la Lune, mais tous deux ne désespèrent pas de s'élever au moins au-dessus du sol, en attendant mieux. Wilkins imagine des machines volantes ou encore des ailes attachées au corps. Les bras des hommes n'étant pas assez puissants, le plus simple serait d'utiliser les jambes, plus fortes et moins sujettes à la fatigue. Pour cela, il faudrait créer une machine dans laquelle les ailes seraient reliées aux jambes. L'homme pousserait alors sur chaque pied, l'un après l'autre, comme s'il grimpait, et chaque mouvement de jambe ferait bouger les deux ailes en même temps. Il pense aussi à une machine plus grande, qui accueillerait plusieurs hommes et transporterait

SOULEVER UN ÉLÉPHANT est un jeu d'enfant pour le Ruck. Apparu dans la littérature persane et arabe du Moyen Âge, cet oiseau géant y est présenté comme un rapace immense, doté d'une force extraordinaire et vivant sur une île de l'océan Indien occidental. L'oiseau soulève sans difficulté rhinocéros et éléphants pour les donner comme nourriture à ses petits. Pour certains auteurs, il est réel. Pour d'autres, tel Ulisse Aldrovandi dans son *Ornithologiae* (1599, ci-contre), c'est un animal fabuleux. Dans son ouvrage, John Wilkins propose de chevaucher l'animal jusqu'à la Lune.



des vivres et des objets pour le commerce avec les habitants lunaires.

Ainsi, en Angleterre et dans l'Europe savante, Wilkins devient une source d'inspiration pour plusieurs auteurs. Certains étendent le raisonnement à d'autres planètes, d'autres l'utilisent en théologie naturelle pour souligner la puissance créatrice de Dieu, d'autres s'en servent pour présenter de nouvelles réflexions naturalistes, tel Charles Morton, qui décrit la Lune comme un monde accueillant les oiseaux terrestres lors de la mauvaise saison.

À la fin du XVII^e siècle, de nouveaux ouvrages, tels les *Entretiens sur la pluralité des mondes* de Bernard Le Bouyer de Fontenelle, éclipsent l'œuvre de Wilkins en banalisant l'idée d'un monde lunaire. Pourtant, la cohérence de son discours mérite que l'on s'y arrête. En choisissant d'étudier ce sujet, Wilkins savait qu'il ne pourrait apporter de preuves, mais il souhaitait malgré tout se positionner dans le domaine de la science. Influencé par le développement du scepticisme dans l'affrontement religieux entre protestants et catholiques, mais aussi par le renouveau du scepticisme dans les sciences, Wilkins a nuancé son propos. En présentant chaque proposition, en éliminant les fausses et en évaluant les probabilités des autres, il a ménagé son lecteur. Son message n'était pas que la Lune est habitée, mais qu'il est fort probable qu'elle le soit. Et en multipliant les marques d'incertitudes, il a certes affaibli son idée, mais il l'a rendue recevable par le plus grand nombre, même par ceux qui ne partageaient pas sa conviction. ■

BIBLIOGRAPHIE

C. Bouyre, *Le vivant dans le discours sur la pluralité des Mondes. L'exemple de l'œuvre de John Wilkins (1614-1672)*, Thèse, 2015 : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01236074>

J. Wilkins, *The Discovery of a World in the Moone*, 1638 : <https://archive.org/details/discoveryofworld00wilk>

J. Wilkins, *A Discourse Concerning a New World & Another Planet*, 1640.

A. Ross, *The New Planet no Planet*, 1646.

À ÉCOUTER

Le jeudi 10 mars 2016, de 16h à 17h, Claire Bouyre reviendra sur le plaidoyer de John Wilkins en faveur d'une Lune habitée dans la partie *Actualité* de l'émission *La marche des sciences*, sur France Culture. www.franceculture.com

Vie ou intelligence : comment en repérer les traces ?

Les erreurs commises à propos de l'identification de traces de vie ou d'intelligence font comprendre pourquoi il est important de savoir mesurer la complexité.

Jean-Paul DELAHAYE

Il semble naturel de distinguer trois catégories de structures sur Terre et dans l'Univers :

– les structures physiques (galaxies, rochers, fleuves, molécules d'eau, étoiles, trous noirs, cristaux, planètes, atomes d'hydrogène, glaciers, dunes...);

– les structures vivantes ou provenant d'organismes vivants (arbres, cellules, alvéoles des ruches d'abeilles, organes, biomatériaux, neurones, réseaux sanguins, chromosomes, protéines, squelettes d'homínidés, paramécies, insectes...);

– Les structures provenant d'êtres doués de raison, que nous qualifierons d'« intelligentes » (livres, ordinateurs, réseaux routiers, sonates de piano, démonstrations de théorèmes, avions, firmes industrielles, molécules de plastique, programmes de jeu d'échecs, gravures anciennes...).

Ces trois catégories peuvent être insuffisantes, notamment s'il existe des formes de vie inconnues différentes de la nôtre, ou des êtres superintelligents qui produisent des objets dont nous ignorons la nature, voire dont nous ne percevons pas qu'ils sont structurés. Il se peut aussi qu'il y ait continuité entre les trois types de structures envisagées – physiques, vivantes et intelligentes – et que notre distinction soit chimérique.

La musique des baleines nous incite à la prudence : qui, en entendant ces sons sans savoir comment ils ont été enregistrés, aurait compris qu'ils venaient d'animaux intelligents en train de communiquer et non d'un

phénomène physique ? Nous supposons dans la suite que les trois niveaux sont distincts, non ambigus et que tout s'y range bien. Vous pouvez tester cette hypothèse en vous demandant si vous changeriez de catégorie certains exemples donnés entre parenthèses où si vous en connaissez qui n'appartiennent à aucune des trois catégories.

Se pose alors une question : comment identifier le type d'une structure vue sur Terre ou ailleurs, et est-ce toujours possible ?

Le problème est important dans plusieurs domaines et pourtant cette identification des origines n'est l'objet d'aucune discipline cataloguée. Il est intéressant et amusant de voir comment, lorsqu'elle se pose, on la résout (pas toujours, toutefois !) dans les disciplines qui y sont confrontées.

Les hypothèses de SETI

Le projet SETI (*Search for Extra-Terrestrial Intelligence*) recherche des signaux incontestablement d'origine intelligente.

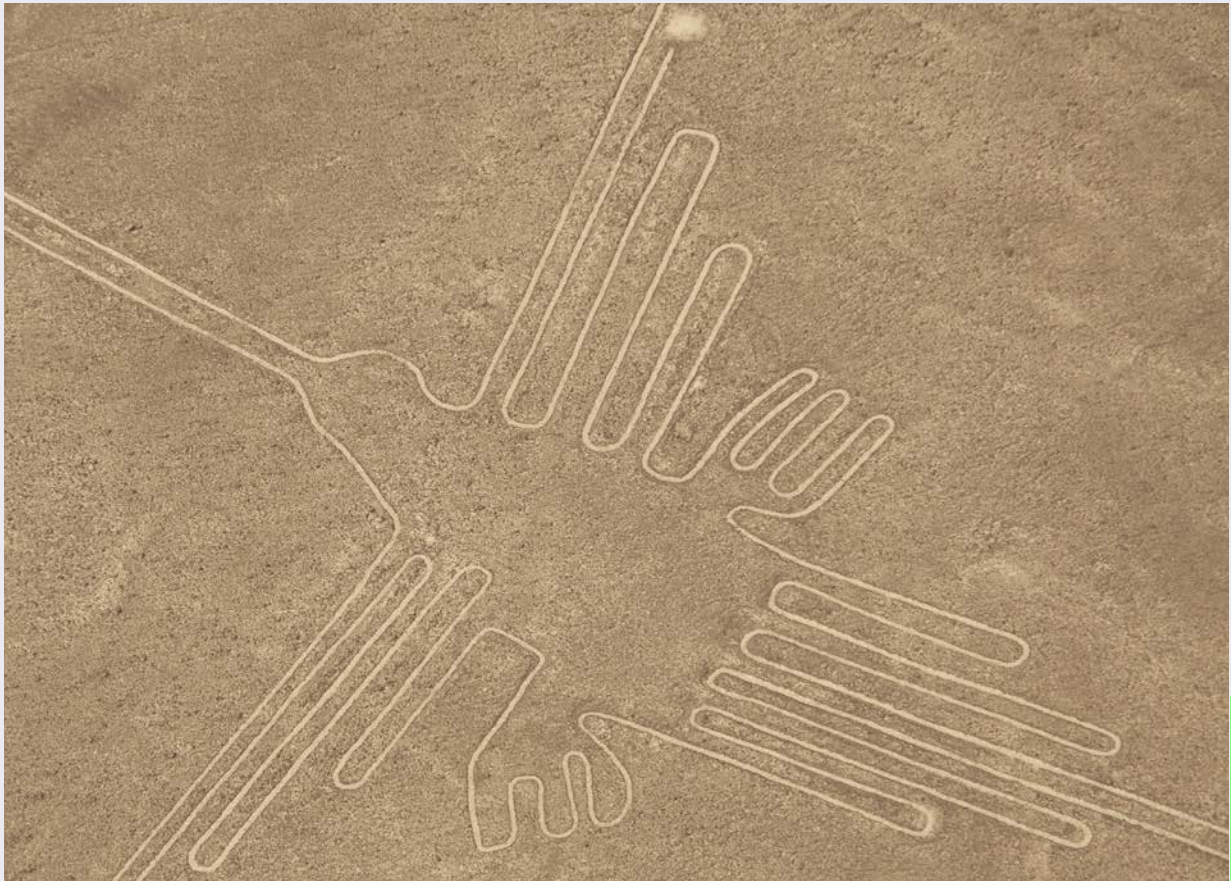
Les travaux de SETI consistent principalement à examiner des ondes enregistrées par des radiotélescopes et à y rechercher des signaux à faible largeur de bande (c'est-à-dire dont la gamme de fréquences est étroite), éventuellement pulsés (c'est-à-dire périodiques). L'idée est que les signaux à faible largeur de bande ne se trouvent habituellement pas dans la nature et donc que si l'on en reçoit, ils proviendront d'une émission produite par une intelligence

extraterrestre. Celle-ci, pour émettre loin, aura choisi d'émettre sur une faible largeur de bande, moins gourmande en puissance, et qu'elle jugera identifiable par les radiotélescopes d'autres civilisations avancées pour qui les signaux à faible largeur de bande seront les mieux identifiables ! Le raisonnement est fondé sur l'hypothèse que si l'on détecte un signal à bande étroite et, mieux encore, s'il est pulsé, il provient d'une source intelligente, car la nature (le monde physique où aucun être intelligent n'intervient) ne produit aucun signal de ce type.

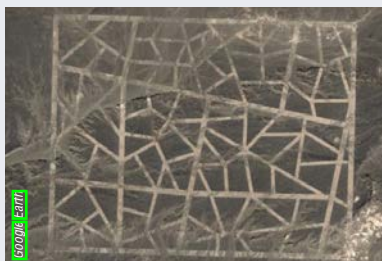
Cette hypothèse est discutable. On peut contester qu'un signal à bande étroite, ou périodique, soit nécessairement le résultat d'une activité intelligente. Lors de la découverte des pulsars, en 1967, on a cru, à cause de la période très stable d'émission, avoir capté un signal extraterrestre. Aussi les découvreurs Jocelyn Bell et Antony Hewish baptisèrent LGM1 le signal, pour *Little Green Man 1*. Après discussions et spéculations, les spécialistes conclurent que l'émission provenait d'une étoile à neutrons en rotation rapide sur elle-même. Il y avait bien un signal périodique rapide... mais pas de petits hommes verts.

Une autre hypothèse est implicite : une structure vivante, mais non intelligente (n'ayant pas évolué jusqu'à une civilisation technologique), ne peut pas émettre un signal (pulsé ou non) à faible largeur de bande. Or il pourrait exister des formes de vie dont les organismes auraient des modes de fonctionnement très différents et soient capables,

Des images énigmatiques, mais d'origine humaine



À la surface de la Terre, des formes étranges sont vues de satellites. Dans le désert du sud du Pérou réside l'une des grandes énigmes de l'humanité : les dessins ou géoglyphes de Nazca (ci-dessus), longs de plusieurs kilomètres, dont on ne connaît ni les auteurs, ni la signification en dépit de nombreuses études depuis leur découverte en 1927. D'étonnantes structures en Chine (ci-contre, en haut) ont été photographiées en 2011 par Google Earth. Personne ne doute qu'elles résultent de constructions intentionnelles humaines. Mais à quoi servent-elles ? Les cercles de culture comme ceux du Wiltshire en Angleterre (ci-contre, en bas) ont longtemps été mystérieux et les hypothèses les plus folles ont circulé, notamment une origine satanique qui était déjà évoquée dans une gravure sur bois de 1678 (à droite).



même s'ils n'ont pas atteint un niveau d'intelligence élevé, d'émettre les signaux que nous recherchons. Il s'agit là de spéculations difficiles à préciser, mais n'oublions pas que l'Univers n'est pas aussi simple que ce nous croyons en savoir. Souvenons-nous par exemple du temps où les savants refusaient l'idée qu'il puisse tomber des pierres du ciel. C'est seulement au début du XIX^e siècle que les physiciens Ernst Chladni et Jean-Baptiste Biot ont montré que les météorites provenaient vraiment de l'espace.

Il est donc sage de formuler le projet SETI et ses analogues de manière prudente : on recherche un signal à bande étroite et si possible pulsé, et si nous en trouvons un, il faudra l'analyser attentivement avant de le rattacher à une source intelligente.

Henry Lin, du Harvard College aux Etats-Unis, Gonzalo Abad et Abraham Loeb, du centre d'astrophysique Harvard-Smithsonian, ont proposé récemment une méthode de détection de la vie extraterrestre fondée sur l'analyse spectrale de l'atmosphère des

planètes de type terrestre. Des traces de photosynthèse dans l'analyse spectrale de la lumière provenant de ces planètes seraient un indice suggérant une forme de vie.

Détecter de la pollution sur une exoplanète

Pour aller plus loin, il faudrait repérer des indices en faveur de la présence d'une société industrielle, et donc d'une forme d'intelligence. Ces auteurs suggèrent de s'intéresser aux CFC (chlorofluorocarbures) qui trahiraient la présence d'une civilisation avancée polluante. Si ce sont des CFC à courte durée de vie, nous aurons affaire à une civilisation active (au moment où la lumière a été émise). Si ce sont des CFC à longue durée de vie, cela signifiera qu'une telle civilisation polluante a existé dans les 100 000 ans qui précèdent l'émission de cette lumière (100 000 ans est la durée de vie estimée des CFC les plus persistants). Les auteurs pensent que les télescopes de la prochaine

génération seront capables d'effectuer ces analyses spectrales.

Les signaux extraterrestres ne sont pas nécessairement dans le ciel, ils pourraient être dans le génome des êtres vivants. Dans un article de la revue d'astronomie *Icarus* paru en 2013, le mathématicien Vladimir Shcherbak et l'astrophysicien Maxim Makukov, d'Almaty au Kazakhstan, affirment que les caractéristiques du code génétique en démontrent l'origine intentionnelle et intelligente : pour eux, le code génétique serait trop parfait pour être apparu spontanément et aurait été introduit sur Terre par des êtres intelligents.

Malgré l'arsenal statistique déployé dans leur article, l'argumentation est faible : les défenseurs de ce « SETI génomique » s'émerveillent de la simplicité du code et non de sa complexité. Or l'apparition spontanée de structures simples et performantes par le jeu des contraintes du monde physique, ici de la sélection naturelle au cours de plus de trois milliards d'années, ne doit pas nous étonner, car la simplicité et certaines formes de perfection ne sont pas rares chez les organismes vivants (pensons aux perles dans les huîtres). Par ailleurs, les régularités arithmétiques que les auteurs présentent comme extraordinaires ressemblent aux coïncidences que les numéologues voient dans la Bible ou dans les décimales de π , et ne pourraient résulter, selon ces crédules, que d'une inscription délibérée par un être intelligent !

L'argument de ces chercheurs est proche de celui des créationnistes et des tenants de l'*Intelligent Design* : les êtres vivants sont trop bien organisés pour émerger des dynamiques physico-chimiques et des processus darwiniens de type variation-sélection. La réponse à ces élucubrations est simple : si les processus de la sélection naturelle engendrent des êtres aussi parfaits et délicats que les chats, les moustiques ou les orchidées, alors pourquoi la sélection naturelle ne pourrait-elle pas aussi aboutir au code génétique, quelle que soit la perfection qu'on croit y déceler ?

La recherche de vie extraterrestre primitive, et non plus d'intelligence extraterrestre, est aussi soumise au problème de l'identification du type de structures (physiques, biologiques ou intelligentes). De vives controverses portent sur la météorite

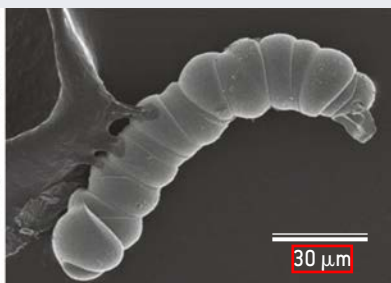
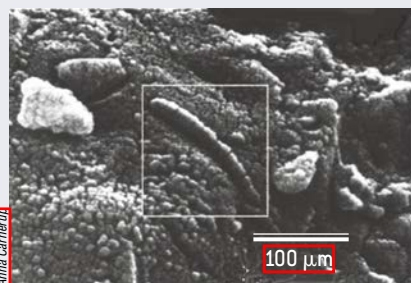
Des fossiles provenant de Mars ?

D'après sa composition, la météorite ALH84001 trouvée en Antarctique proviendrait de Mars, où elle aurait été arrachée par un choc de la planète avec une autre météorite et projetée dans l'espace avant d'arriver sur Terre. Des formes tubulaires (photographie de gauche) à sa surface ressemblent à des bacilles.

David McKay de la Nasa et plusieurs de ses collègues conclurent de l'analyse de ces formations qu'il s'agissait de fossiles d'une forme primitive de vie martienne. Depuis, cette

thèse a été contestée. Outre de savantes considérations géochimiques et cristallographiques, l'incertitude provient de ce que les formes martiennes étranges ressemblant à ce

qui pourrait être des bacilles ne sont pas structurellement assez complexes pour que l'origine biologique s'impose de toute évidence, cela d'autant plus qu'on a appris à créer en laboratoire des formes (photographie de droite) assez proches de celles trouvées sur ALH84001 sans avoir à faire intervenir aucune action biologique directe ou indirecte.



ALH84001, découverte en 1984 dans l'Antarctique. D'après leurs analyses chimiques, les spécialistes affirment depuis 1993 qu'elle provient de Mars où elle se serait formée, il y a 4 milliards d'années, puis une collision avec une météorite l'aurait éjectée il y a 15 millions d'années, avant qu'elle n'arrive sur Terre il y a 13 000 ans. L'examen au microscope électronique montre sur la météorite des structures tubulaires qui seraient, selon certains, des fossiles de formes bactériennes. Ces structures sont plus petites que les formes terrestres analogues, ce qui éliminerait l'idée d'une contamination.

Des traces contestées

L'événement fut jugé si important que le président américain Bill Clinton en fit l'annonce à la télévision. En août 1996, un article de la revue *Science* signé par David McKay, de la Nasa, fournit des photos et l'analyse de la découverte. Aujourd'hui, il semble que ce sont les doutes qui l'emportent quant à la nature biologique des structures trouvées sur ALH84001. Des structures assez proches ont été obtenues en laboratoire par des processus physiques, sans impliquer une forme de vie. Par ailleurs, les critères qui démontreraient une origine biologique ne sont pas tous satisfaits. Les opposants argumentent que la nature chimique des parties structurées et les processus de fossilisation laisseraient des traces qui sont absentes.

La ressemblance morphologique est un argument délicat : si l'on exige que les traces trouvées et tout ce qui les entoure ressemblent à ce qu'on a déjà trouvé pour certains fossiles terrestres, ne risque-t-on pas de passer à côté d'une forme de vie différente de celle qu'on connaît ? Le paléobiologiste anglais Martin Brazier, qui ne croyait pas à la nature biologique des tubules de la météorite martienne, a exprimé une réserve sous une forme plus générale : « La complexité seule n'est pas un signal fiable de l'origine biologique. »

Pourtant, le seul moyen de ne pas passer à côté des formes de vie éloignées de la nôtre n'est-il pas au contraire de se fixer un critère

Première trace de vie sur Terre ?

Découverts par William Schopf en Australie en 1987 dans une roche dénommée Apex Chert, ces filaments de carbone sont datés d'il y a 3,5 milliards d'années. Pendant un moment, ils furent considérés comme les plus anciennes traces de vie sur Terre. Leur nature biologique est aujourd'hui contestée.



lié à la complexité ? Seule la vie et ses longs processus d'élaboration progressive produisent des structures finement organisées. La physique peut certes conduire à certaines formes ressemblant à des bacilles (cela a été réalisé en laboratoire), mais jamais elle n'est en mesure de donner rapidement des structures hiérarchisées comme celles d'un tissu vivant organisé en couches, chacune constituée de formes cellulaires elles-mêmes composées de sous-structures.

Les formes identifiées sur la météorite ALH84001 ne sont pas très complexes et un pur critère de complexité ne permet pas de conclure à une forme de vie. Même si, ici, les critères formulés par Brazier aboutissent à la même conclusion négative, il faut rester prudent et ne pas fixer des exigences que seules les formes de vie identiques à la nôtre pourraient satisfaire : la complexité reste le meilleur critère absolu qui ne nous ferme pas les yeux.

Est-il plus simple de repérer les premières formes de vie terrestres ? Ce n'est pas certain, comme en atteste une autre controverse sur des filaments de carbone découverts dans

une roche dénommée *Apex Chert*, en Australie. Ces structures repérées en 1987 par William Schopf, de l'université de Californie à Los Angeles, sont vieilles de 3,5 milliards d'années. Elles ont été un temps considérées comme les plus anciens fossiles terrestres.

Les cyanobactéries fixent le carbone en utilisant l'énergie de la photosynthèse. La preuve que les filaments retrouvés sont des fossiles de tels organismes – hypothèse proposée par William Schopf – aurait constitué une avancée déterminante dans notre compréhension de l'apparition de la vie sur Terre. Or les partisans d'une origine biologique de ces filaments semblent en mauvaise posture. Bien qu'un article de 2012 signé par William Schopf et Anatoliy Kudryavtsev proclame la résolution définitive de la controverse en faveur de l'hypothèse biologique, plusieurs articles publiés depuis défendent la thèse inverse ! En particulier, en 2015, David Wacey, de l'université de Bristol, et ses collègues se fondent sur l'examen à l'échelle nanométrique des roches concernées et concluent que les filaments ne présentent pas une « morphologie

Premières œuvres d'art ?

Dans des endroits où l'étude des couches géologiques et les méthodes de datation ne laissent aucun doute, les paléontologues sont amenés à découvrir des objets ayant été entre les mains d'hominidés (ici des Néandertaliens) bien identifiés ou résultant de leurs activités.

C'est le cas de cette pierre trouvée dans une grotte à Gibraltar. Joaquín Rodríguez-

Vidal et ses collègues interprètent les traces qu'elle porte comme les premières

marques de dessins symboliques et artistiques. Même si l'étude microscopique révèle que les traces résultent de l'action répétée d'un objet pointu, doit-on vraiment considérer comme établi que ces croix très approximatives résultent d'une action intelligente intentionnelle ?



paléontologie. Le problème est de reconnaître sur un caillou ou un coquillage qu'une trace a été faite par un humain avec l'intention d'y graver un signe ou un dessin.

Donnons un seul exemple. En juin 2014, PNAS, la revue de l'Académie des sciences des États-Unis, a publié un article de Joaquín Rodríguez-Vidal et d'autres préhistoriens, qui analysent des marques découvertes dans une grotte et affirment qu'il s'agit de la première trace d'une « pensée abstraite s'exprimant par l'usage de formes géométriques ».

La gravure, d'une vingtaine de centimètres, sur laquelle se fonde cette affirmation comporte plusieurs entailles. Elle a été trouvée dans la grotte de Gorham, à Gibraltar, qui a abrité des Néandertaliens. Sous une couche de sédiments permettant d'affirmer que les traces datent d'au moins 39 000 ans est apparue une sorte de croix en creux dans la roche (voir l'encadré ci-contre). L'analyse microscopique montre que ces tracés résultent d'un mouvement répété plusieurs dizaines de fois, vraisemblablement à l'aide d'une pierre.

De l'art néandertalien ?

L'origine humaine n'est pas douteuse, mais l'affirmation qu'il s'agit d'un dessin délibéré de nature symbolique ou artistique est difficile à admettre. Est-ce qu'un instrument utilisé pour travailler du bois, de la peau ou une pierre ne pourrait pas avoir laissé, sur une sorte de plan de travail, des traces de ce type qui ne seraient donc ni intentionnelles ni symboliques ? D'autres causes ne pourraient-elles pas produire de telles marques en creux ?

A nouveau, il semble que ce soit la simplicité des motifs gravés qui pose problème. Quand on découvre la pierre de Rosette en Égypte, ou le disque de Phaistos en Crète, même si l'on n'arrive pas à en comprendre le sens (c'est toujours le cas pour le disque), la complexité et la richesse des structures qu'on y observe conduisent à la conclusion incontestable qu'il s'agit d'un objet ayant une origine intelligente et intentionnelle. Ici, on en est loin et y voir la naissance de l'art ou de la pensée symbolique apparaît précipité. L'analyse en

biologique ». Leur article propose aussi l'hypothèse que les filaments se sont formés dans les écoulements d'une source hydrothermale, et qu'il s'agit d'artefacts minéraux.

Là encore, les arguments échangés dans le débat sont délicats et oscillent entre des remarques liées à la complexité des structures en jeu, dont on prétend qu'elle est trop grande pour provenir d'un simple processus chimique ou minéral (affirmations des défenseurs d'une origine vivante), et des assertions que rien de ressemblant n'existe vraiment dans le monde vivant connu ou que la relativement faible complexité morphologique des structures ne permet pas d'exclure une origine abiotique, qu'on réussit d'ailleurs plus ou moins à reconstituer

en laboratoire (arguments des opposants à l'origine biologique).

Les raisonnements sont incertains, presque subjectifs. En se fondant sur ce qu'on sait de la vie terrestre, on peut certes fixer des critères drastiques qui rejettent l'hypothèse d'une origine biologique des formes étranges rencontrées, mais ce sera en prenant le risque d'éliminer des formes de vie que l'on n'imagine pas. Avant qu'on découvre de la vie autour des sources hydrothermales profondes en 1977, on jugeait impossible qu'une vie ne repose pas sur l'énergie solaire, et que des bactéries utilisent à la place le sulfure d'hydrogène.

On rencontre des affirmations controversées dans un autre domaine encore : la

termes de simplicité et de complexité est importante et parfois décisive. Mais dans les cas incertains, les conclusions ne peuvent provenir que d'observations et de raisonnements complémentaires : datations, objets environnants, connaissances chimiques ou autres... La simple prise en compte de la taille des structures analysées est parfois un élément capital pour formuler une conclusion.

Considérons par exemple la forme cubique. Il ne fait aucun doute que si l'on découvre un objet parfaitement cubique de 10 mètres ou de 1 000 kilomètres de côté, on considérera comme presque certain qu'elle est due à l'action d'une forme d'intelligence (c'est l'idée du monolithe $1 \times 4 \times 9$ du film *2001, l'Odyssée de l'espace*), alors que le même cube parfait de moins d'un centimètre de côté existe dans la nature sous forme naturelle cristalline. Découvrir un cube parfait ne doit donc pas être interprété de la même façon selon sa taille. La raison de nos interprétations différentes provient de ce que la simplicité n'est jamais un critère concluant (un cube est simple).

La forme sphérique parfaite aussi conduirait à des conclusions différentes selon la taille. Il est cependant assez amusant de remarquer que les conclusions obtenues ne sont pas les mêmes que pour le cube : une forme naturelle sphérique parfaite très petite est possible (goutte d'eau, perle d'huître), très grande aussi (planète, étoile), alors qu'en revanche une taille moyenne – un mètre de rayon par exemple – signifierait presque certainement une action intelligente.

La complexité, critère primordial

Les erreurs les plus ennuyeuses commises dans l'identification d'une structure se sont toujours produites en considérant que la structure appartenait à une catégorie dont elle n'avait pas la complexité de ses représentants typiques. Les signaux LGM1 étaient simplement périodiques, ce qui n'est pas caractéristique des signaux intelligents (les cristaux sont périodiques, la trajectoire des planètes est périodique, etc.). Les structures sur la météorite martienne étaient arrondies, certes, et semblables superficiellement à

des bacilles, mais les formes arrondies existent aussi dans le monde minéral. La complexité des pseudobacilles n'était pas bien grande et certainement pas autant que peut l'être une cellule ou un organe ; ils ne pouvaient donc pas sans risque être rattachés à une forme de vie.

Mesurer la complexité : des outils insuffisants

Les trois catégories envisagées sont liées à trois niveaux différents de complexité structurelle, dont la théorie du calcul nous suggère qu'elle doit être conçue comme un contenu en calcul (voir dans cette rubrique « Qu'est-ce qu'un objet complexe ? », Pour la Science, mai 2013). Les structures les plus complexes sont liées à l'intelligence, au niveau intermédiaire on a affaire à des structures vivantes ou intelligentes (les structures produites par l'intelligence sont parfois simples), et à un niveau inférieur on a affaire à des structures physiques, biologiques ou intelligentes.

Face à une structure simple, l'identification du bon niveau ne peut se faire qu'en prenant en compte d'autres informations telles que les couches géologiques où l'objet a été trouvé, l'échelle de la structure, ce qu'on sait de la physique, de la chimie, etc.

Malheureusement, les outils pour mesurer la complexité structurelle sont aujourd'hui insatisfaisants. Cette évaluation de complexité se fait directement et s'appuie sur notre jugement – nous savons par exemple qu'un dessin est complexe en y reconnaissant un arbre ou un animal –, mais c'est là une méthode subjective et difficile à quantifier.

Les autres méthodes d'évaluation de complexité structurelle sont soit trop particulières et *ad hoc*, par exemple quand on compte le nombre de symboles différents sur ce qui ressemble à un texte, soit générales mais peu fiables, comme celles utilisant les algorithmes de compression. Même si aucune solution générale automatique et sûre n'est disponible aujourd'hui, on doit adopter des points de vue clairs et raisonnables qui évitent des conclusions précipitées : il nous faut raisonner prudemment en oubliant nos rêves.

L'AUTEUR



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

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

BIBLIOGRAPHIE

S. T. Hyde, Crystals : animal, vegetable or mineral ?, *Interface Focus*, vol. 5, 20150027, 2015.

J. Rodríguez-Vidal *et al.*, A rock engraving made by Neanderthals in Gibraltar, *PNAS*, vol. 111, pp. 13301-13306, 2014.

H. W. Lin *et al.*, Detecting industrial pollution in the atmospheres of Earth-like exoplanets, *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 792(1), L7, 2014.

J.-P. Delahaye, Mesurer la complexité des objets numériques, *Bull. de la Société Informatique de France*, vol. 1024, pp. 35-53, 2013 (<http://1024.labri.fr/1024-numero-1-delahaye.pdf>).

Références supplémentaires sur www.pourlascience.fr



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

SCIENCE & FICTION

De l'origine des espèces... extraterrestres

D'où vient la vie ? Les hypothèses scientifiques et les spéculations romantiques foisonnent, mais elles s'accordent sur un point : tout pourrait s'être joué dans l'espace.

Jean-Sébastien STEYER et Roland LEHOUCQ. Illustration : Marc BOULAY

Si les œuvres de science-fiction dépeignent souvent des extraterrestres complexes et des civilisations avancées, certains auteurs n'oublient pas de revenir aux origines pour évoquer l'émergence de la vie. Mais faute de modèles scientifiques consensuels, ils prennent alors quelques libertés pour imaginer comment la vie est apparue. Partons à la recherche de ces premières formes de vie extraterrestre !

Les fossiles les plus anciens découverts sur Terre sont âgés d'environ 3,5 milliards d'années : ils suggèrent qu'à cette époque, des bactéries et autres microbes (notamment les archées, cousines des bactéries) pullulaient déjà dans les océans du globe et formaient des concrétions biominérales, les stromatolithes, que l'on trouve encore le long des côtes en Australie. Notons que du carbone d'origine probablement biologique, datant de 4,1 milliards d'années, a aussi été découvert en Australie, ce qui repousserait l'apparition de cette vie de quelques centaines de millions d'années. Ces tout premiers restes témoignent d'une vie très ancienne et apparue assez rapidement – géologiquement parlant – après la formation de la planète (il y a environ 4,56 milliards d'années).

Si les spécialistes de cette vie ancienne se réjouissent de découvrir des fossiles de plus en plus âgés, ceux qui travaillent sur les modalités même de leur apparition sont plus perplexes, car aucun consensus n'est encore atteint. En effet, plusieurs modèles sur l'origine



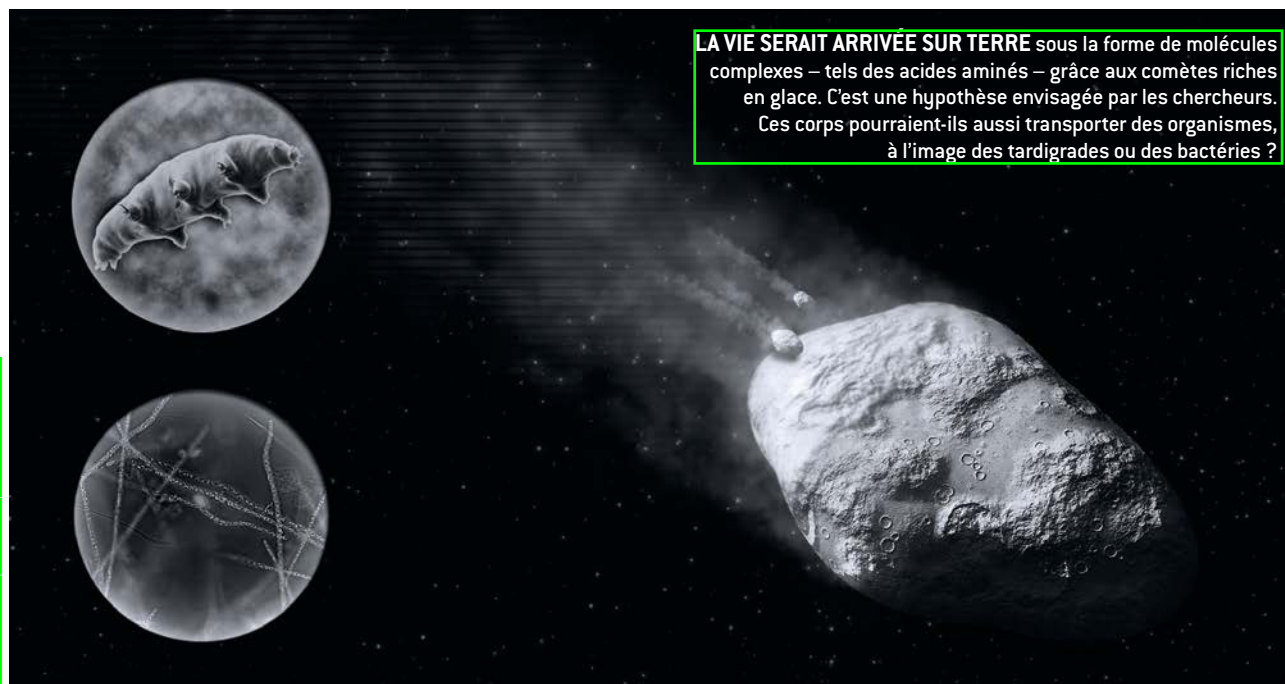
LE PERSONNAGE DE « LA CHOSE », membre des Quatre Fantastiques, rappelle, par son aspect rocheux, le Golem, constitué d'argile et auquel la vie a été insufflée par magie.

de la vie s'opposent, en fonction des disciplines et de leurs propres définitions de la vie. Selon les généticiens, la vie est avant tout un système de reproduction d'information dont les erreurs de copie sont retenues, ou non, par la sélection naturelle. Dans ce cadre, le support d'information génétique tel que l'ARN serait apparu avant la membrane cellulaire.

Or, d'après les biochimistes, c'est justement l'inverse qui se serait produit : pour eux, la vie se définit comme un système contenu dans une membrane semi-perméable de sa propre fabrication, permettant un transfert de matière et d'énergie, notamment pour sa reproduction. Selon cette définition, le métabolisme joue donc un rôle primordial.

La question de l'origine de la vie a de tout temps titillé l'imagination. Ainsi, des écrits tirés du folklore hébreu du XVI^e siècle relatent l'histoire d'un certain Juda Loew ben Bezalel, rabbin de Prague, qui, pour défendre les juifs des persécutions, transformait par magie de la boue en une créature anthropoïde connue sous le nom de Golem. Ce grand humanoïde fictif, lorsqu'il est représenté, n'est pas sans rappeler La Chose, superhéros plus récent de l'univers Marvel et un des Quatre Fantastiques. À la différence près que La Chose n'est pas une montagne de boue humaine mais un astronome d'origine juive, Benjamin Jacob Grimm, qui a muté à la suite d'une forte exposition à des rayons cosmiques.

L'histoire du Golem, comme celle de la création d'Adam à partir d'argile, évoque une transformation spontanée et directe



LA VIE SERAIT ARRIVÉE SUR TERRE sous la forme de molécules complexes – tels des acides aminés – grâce aux comètes riches en glace. C'est une hypothèse envisagée par les chercheurs. Ces corps pourraient-ils aussi transporter des organismes, à l'image des tardigrades ou des bactéries ?

de matière minérale en humanoïde. Ces métaphores religieuses de l'homme modelé à l'image de Dieu préfigurent la vision erronée que l'évolution aboutit à l'homme, vu comme la plus complexe de toutes les espèces.

En revanche, dans *Un amour de sable*, nouvelle de Sylvie Lainé (dans *L'Opéra de Shaya*, ActuSF, 2014), le sable d'une étrange planète est conscient, intelligent, mais loin de l'aspect humain. Cette forme de vie originale et siliceuse nous rappelle que l'intelligence n'est pas le propre de l'humanité (comme nous le montrent de nombreux animaux) et qu'une vie à base de silicium (autre que celle à base de carbone que nous connaissons) est peut-être envisageable.

Plus scientifique, le modèle de la panspermie a aussi beaucoup inspiré les auteurs de science-fiction. Cette hypothèse très en vogue suggère que la vie proviendrait d'un assemblage d'acides aminés, arrivés sur Terre lors d'impacts de comètes ou d'astéroïdes. Les matériaux cométaires notamment, avec leurs grains de poussière entourés de glace et à la chimie complexe, auraient fourni les précieux acides aminés qui joueraient le rôle de briques du vivant. Notons que sur Terre, seulement une vingtaine d'acides aminés environ se combinent et forment l'ensemble des eucaryotes – soit, selon les estimations, entre 5 et 30 millions d'espèces vivantes caractérisées par des cellules dotées d'un noyau et de mitochondries.

Dans sa nouvelle intitulée *L'Appel de la Nébuleuse* (Le Béal, 2010), Claude Ecken

restitue d'une manière très poétique et précise les processus physicochimiques à l'œuvre dans un nuage moléculaire géant, de la formation d'un système planétaire à l'apparition de la vie. La panspermie est ici mise en avant pour imaginer l'apparition de formes de vie ailleurs dans l'Univers.

Le fantasme des Grands Anciens

Mais il est tentant de penser que, plutôt que des molécules, ce sont des espèces intelligentes qui auraient apporté la vie sur Terre. Cette idée, farfelue, est ancienne : dans son roman *Les Montagnes hallucinées* (1936), Howard Philips Lovecraft invente une mythologie complexe où notre planète aurait été, peu de temps après sa formation, visitée par des extraterrestres intelligents, les Anciens, pour y introduire la vie. L'histoire se complique lorsque ces Anciens, pour construire leurs cités enfouies, créent des êtres tentaculaires, les Shoggoths, qui échappent ensuite à tout contrôle.

Ce scénario a peut-être inspiré Ridley Scott pour le film *Prometheus* (2012) : celui-ci relate l'histoire d'extraterrestres humanoïdes, les « Grands Ingénieurs », qui ont créé la vie sur Terre, puis, plusieurs milliards d'années plus tard, le monstre Alien afin d'anéantir l'humanité devenue néfaste. Or l'expérience tourne mal, les terribles Aliens se retournant contre leurs créateurs.

Les histoires d'extraterrestres intelligents ayant créé la vie sur Terre ou ayant guidé l'évolution humaine sont nombreuses. Mais au-delà des œuvres de fiction, elles ont donné lieu à la théorie pseudoscientifique dite des anciens astronautes, qui interprète certains vestiges préhistoriques ou archéologiques comme étant dus à des extraterrestres.

Cette théorie est critiquée par la communauté scientifique tout entière, à commencer par le préhistorien Jean-Loïc Le Quellec : ce dernier a par exemple montré que les fameuses peintures rupestres sahariennes représentant des silhouettes longilignes ne sont pas des Martiens venus sur Terre il y a bien longtemps, mais des hommes et des femmes parés de costumes et de coiffes traditionnelles.

Cette réfutation sérieuse des dérives pseudoscientifiques n'empêche pas les scientifiques de conserver un certain humour : dans sa nouvelle *Genèses*, de 1958, le préhistorien et auteur de science-fiction François Bordes (sous le pseudonyme de Francis Carsac) mettait en scène un explorateur extraterrestre atterrissant sur notre proto-Terre : « Un monde sans vie, absolument stérile [...] Dans l'écume flottait seulement une glaire de composés organiques [...] Alors, la conscience tranquille et plein de mépris, il cracha dans la mer. » Une bien prosaïque origine de la vie sur Terre ! ■

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

ART & SCIENCE

L'Univers dans une assiette

Un artiste a réussi à faire entrer tout l'Univers observable dans une unique œuvre circulaire. Il a été aidé par les logarithmes et les travaux d'une équipe d'astronomes.

Loïc MANGIN

Encore ! Votre grand-tante a de nouveau craqué pour un bibelot... En l'occurrence, il s'agit d'une grande assiette décorative qui, trônant sur un napperon au-dessus de la télévision, s'offre au regard de tous les visiteurs. Mais, cette fois, vous êtes intrigué. À quoi correspond l'illustration (voir la figure ci-contre) ? Sur un fond essentiellement noir se détachent de nombreux éléments, notamment des petits cercles colorés, un halo blanchâtre, des taches diffuses, une sorte de toile d'araignée... Face à votre perplexité, votre aïeule vous éclaire : c'est l'Univers tout entier qui est figuré !

On doit cette représentation à l'artiste et musicien sud-américain Pablo Carlos Budassi. Avant de détailler comment il s'y est pris, vérifions que tout l'Univers observable est bel et bien contenu dans l'assiette de Taté.

Le Système solaire est au milieu, avec le Soleil au centre du disque. Puis viennent les planètes rocheuses (Mercure, Vénus, Mars, la Terre – orientée avec l'Afrique du Sud pointant vers le haut !). On distingue même la Lune. On a ensuite la ceinture principale d'astéroïdes (elle contient ici une comète), les planètes gazeuses (Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune), la ceinture de Kuiper et le nuage d'Oort marquant la fin du Système solaire.

Autour de ce dernier, le halo blanchâtre circulaire correspond au bras de la Voie lactée qui contient le Système solaire. En s'éloignant encore du centre, on trouve

d'autres galaxies, puis le réseau de structures à grande échelle (les filaments de la « toile d'araignée ») où se regroupent préférentiellement toutes les galaxies.

Au-delà, le cercle rouge à la périphérie marque le fond diffus cosmologique (le rayonnement électromagnétique émis quand l'Univers, suffisamment refroidi, ne pouvait plus empêcher la propagation des photons sur de longues distances). Enfin, le bord noir et gris correspond aux quelque 380 000 ans durant lesquels, après le Big Bang, l'Univers est resté un plasma. Ainsi, près de 14 milliards d'années sont résumées !

Pablo Carlos Budassi a inscrit une sphère de 93 milliards d'années-lumière de diamètre dans un simple disque

La clé qui explique cette prouesse est l'idée de logarithme. Pablo Carlos Budassi s'est fondé sur les travaux de l'équipe de J. Richard Gott III et Mario Juric, à l'université de Princeton, aux États-Unis. En 2005, ces astronomes ont proposé une carte de l'Univers pour rendre compte des observations du *Sloan digital sky survey*. Depuis 2000, ce programme de relevé des objets célestes exploite un télescope optique dédié de 2,5 mètres de diamètre situé à l'observatoire d'Apache Point, au Nouveau-Mexique.

La carte, qui recensait 3 millions d'objets célestes, était une projection conforme

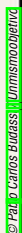
selon une échelle logarithmique. Expliquons. Une projection conforme conserve localement les angles. C'est le cas de la projection Mercator de la surface terrestre sur un planisphère : la forme d'une région, pour peu qu'elle ne soit pas trop grande par rapport à l'ensemble, est alors correctement rendue sur la carte.

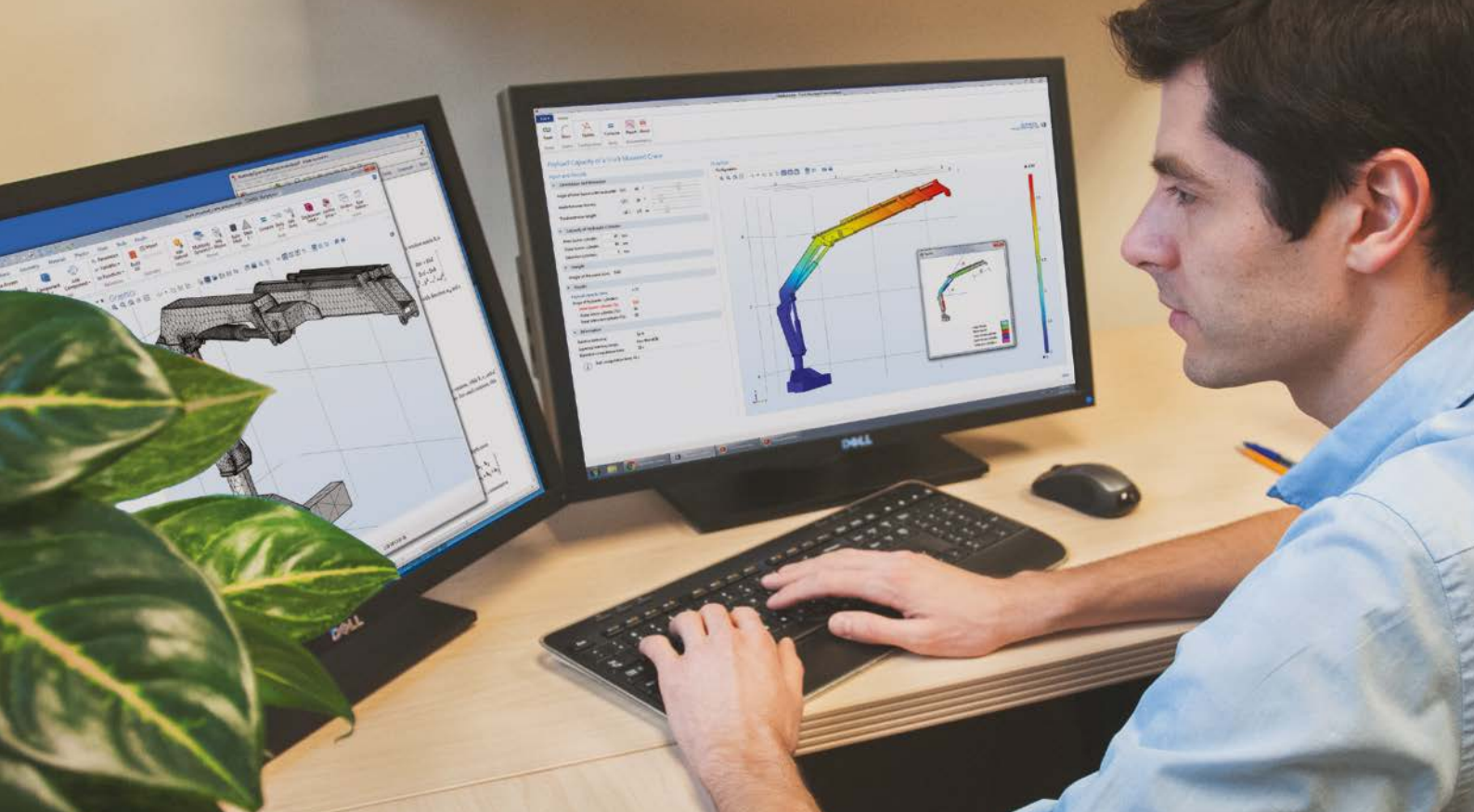
Quant à l'échelle logarithmique, elle consiste en une progression exponentielle des valeurs le long d'un axe. J. Richard Gott III et Mario Juric l'illustrent en évoquant ces livres qui permettent d'appréhender les ordres de grandeur. D'une page à une autre, l'échelle est augmentée ou diminuée d'un facteur 10. C'est un moyen de comprimer l'espace.

La carte des astronomes a été pour Pablo Carlos Budassi une sorte de toile sur laquelle, grâce au logiciel Photoshop, il a compilé des images de la Nasa collectées par des télescopes et les sondes. Il a ensuite comblé les trous. En fin de compte, il a réussi à inscrire une sphère de 93 milliards d'années-lumière de diamètre dans un simple disque.

Idée cadeau : l'œuvre de Pablo Carlos Budassi n'est que numérique. Faites-la imprimer sur un objet quelconque, une assiette par exemple, et offrez-le... à qui vous voulez ! ■

J. R. Gott III et al.,
A map of the universe,
The Astrophysical Journal,
vol. 624, pp. 463-484, 2005.





LA MULTIPHYSIQUE POUR TOUS

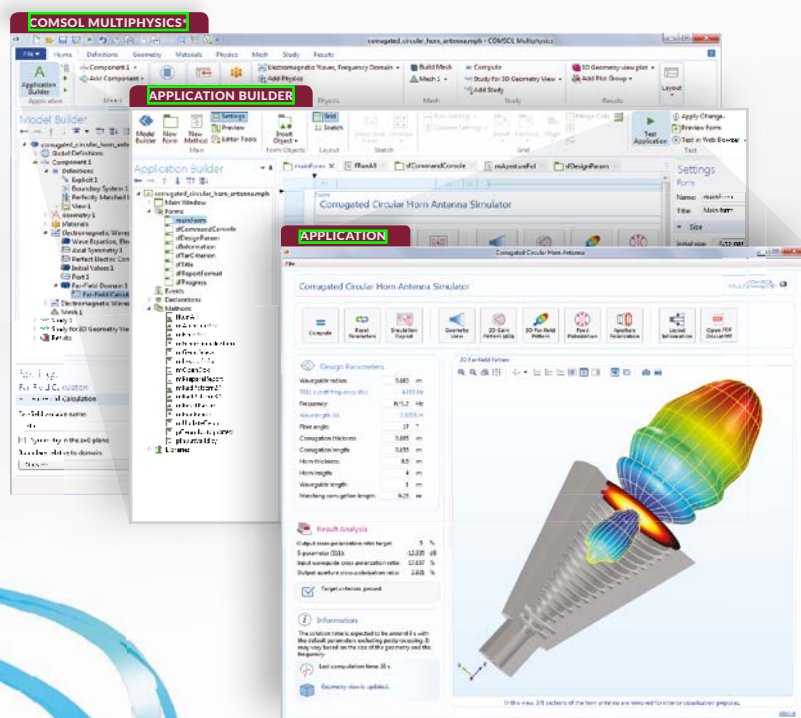
L'évolution des outils de simulation numérique vient de franchir un cap majeur.

Des applis spécialisées sont désormais développées par les spécialistes en simulation avec l'application Builder de COMSOL Multiphysics®.

Une installation locale de COMSOL Server™, permet de diffuser les applis dans votre organisme et dans le monde entier.

Faites bénéficier à plein votre organisme de la puissance de l'outil numérique.

comsol.fr/application-builder



IDÉES DE PHYSIQUE

Des valves à lumière dans les écrans

Comment fonctionnent les écrans à cristaux liquides, ou LCD ?

Le principe consiste à contrôler la polarisation de la lumière, au moyen d'un champ électrique appliqué aux cristaux.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Chaussez des lunettes polarisantes et regardez votre écran de télévision, de tablette ou de téléphone mobile : l'écran s'assombrit. Pourquoi ? Parce que, comme nous allons le voir, la lumière qui émerge des pixels actifs de l'écran est elle-même polarisée, mais dans une direction différente de celle des lunettes.

En fait, les pixels des écrans actuels constituent des « valves » qui bloquent ou laissent passer de la lumière émise en permanence à l'arrière de l'écran. Ces valves fonctionnent grâce à un champ électrique qui établit un lien entre deux propriétés *a priori* bien éloignées : la polarisation de la lumière et l'orientation des molécules organiques dont sont constitués les « cristaux liquides ». Quel est ce lien ?

Des molécules orientables à volonté

Commençons par les cristaux liquides, plus précisément ceux qualifiés de nématiques. Ces liquides sont composés de molécules organiques allongées, sans ordre dans leurs positions, mais avec la même orientation (comme des allumettes dans une boîte). Leurs propriétés physiques, et notamment électriques et optiques, dépendent donc de la direction considérée par rapport à cette orientation privilégiée, comme dans un solide cristallin.

Au début du XX^e siècle, le physicien français Charles-Victor Mauguin a découvert qu'il

était possible de contrôler mécaniquement cette orientation. En effet, quand les molécules du cristal liquide sont au contact d'une surface striée, elles s'alignent dans la direction des stries. Les forces intermoléculaires ont alors pour résultat d'orienter l'ensemble des molécules du liquide parallèlement aux molécules en contact avec la surface.

Plus subtilement, si l'on coince une couche de cristal nématique entre deux surfaces, l'une striée dans une direction, l'autre striée dans la direction perpendiculaire, on obtient un cristal nématique dit



LES ÉCRANS D'AFFICHAGE à cristaux liquides comportent deux films polarisants. La lumière qui en émerge est de polarisation rectiligne. Si l'on retire le film polarisant externe d'un écran allumé, la partie découverte apparaît uniformément éclairée.

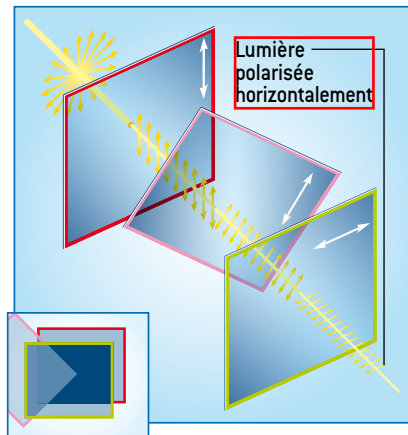
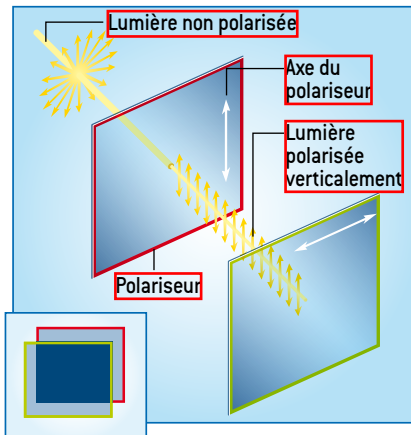
torsadé : l'orientation des molécules varie continuellement le long de l'épaisseur de la couche, en adoptant la structure d'une hélice qui fait un quart de tour. Nous verrons que cette structure joue un rôle crucial dans les dispositifs d'affichage.

Intéressons-nous maintenant à la lumière, et plus précisément à sa polarisation. Comme toutes les ondes électromagnétiques, une onde lumineuse est formée d'un champ électrique et d'un champ magnétique qui oscillent de concert en se propageant. Les deux champs sont perpendiculaires entre eux et à l'axe de propagation. Par définition, la polarisation caractérise la direction du champ électrique.

Pour la plupart des lumières (naturelle ou d'une lampe à filament), cette direction est aléatoire et varie sans cesse au cours du temps. On parle de lumière non polarisée.

Dans certaines situations, en revanche, la direction de polarisation est fixe. On parle alors de polarisation rectiligne. Le moyen le plus simple d'obtenir une polarisation rectiligne est d'utiliser un filtre polarisant (à base de matériaux cristallins). Ce polariseur laisse intégralement passer la lumière lorsque le champ électrique de cette dernière est parallèle à une direction donnée (l'axe du polariseur) et l'absorbe totalement si le champ est porté par l'axe perpendiculaire. Ainsi, lorsque de la lumière non polarisée traverse un polariseur, elle se polarise selon l'axe de ce dernier.

Comment changer la direction de polarisation de cette lumière ? Si l'on place un



LA LUMIÈRE NATURELLE ou émise par une ampoule n'est pas polarisée. Un filtre polarisant ne laisse passer que les composantes de la lumière dont la polarisation est de même direction que l'axe du polariseur. La lumière qui traverse deux polariseurs dont les axes sont orthogonaux est ainsi totalement bloquée (à gauche). Mais si l'on intercale un troisième polariseur dont l'axe fait 45° avec les deux autres, une partie (25 %) de l'intensité lumineuse est transmise (à droite).

second polariseur dont l'axe fait un angle α avec celui du premier, on récupère à la sortie uniquement la partie du champ électrique alignée avec ce second axe. L'amplitude du champ est donc réduite d'un facteur $\cos \alpha$, et la puissance lumineuse (proportionnelle au carré de cette amplitude) d'un facteur $\cos^2 \alpha$.

Faire tourner la polarisation

Il est impossible d'obtenir de cette façon une polarisation ayant tourné d'un quart de tour ($\alpha = 90^\circ$), car les deux polariseurs croisés constituent un système opaque (comme $\cos 90^\circ = 0$, l'intensité sortante est nulle). Mais tout n'est pas perdu ! Intercalons entre ces polariseurs un troisième, dont l'axe est la bissectrice des deux autres (donc à 45°). Après son passage à travers le premier film, la polarisation de la lumière n'est pas orthogonale à l'axe du polariseur intermédiaire ; une partie de la lumière est donc transmise. Et on a le même effet entre le polariseur intermédiaire et le dernier polariseur.

Ainsi, grâce à l'ajout du polariseur intermédiaire, on est passé de l'opacité à une transmission partielle d'une lumière (un quart de l'intensité lumineuse) dont la polarisation a tourné de 90°. Avec cinq polariseurs d'axes orientés à 0°, 22,5°, 45°, 67,5° et 90°, l'intensité transmise atteindrait 53 %. Et si l'on augmente le nombre de polariseurs dont les axes sont régulièrement décalés, on s'approchera d'une transmission totale d'une lumière dont l'axe de polarisation

tourne continuellement au fur et à mesure de sa propagation.

C'est ce que réalise naturellement une couche mince de cristal nématique torsadé. Pour comprendre pourquoi, il faut d'abord savoir que les propriétés optiques d'un nématique non torsadé, notamment son indice de réfraction, diffèrent beaucoup selon que la lumière qui le traverse est polarisée parallèlement ou perpendiculairement à l'orientation de ses molécules.

Considérons une lumière dont la polarisation a la même orientation que les premières molécules rencontrées. Que se passe-t-il lorsqu'elle se propage ensuite dans une couche de cristal nématique où les molécules ont légèrement tourné ? Le champ électrique comporte une composante principale selon la nouvelle orientation et une petite composante perpendiculaire. Or, à cause de la forte différence d'indice de réfraction, cette petite composante n'est plus en phase avec la première. Quand la lumière traverse plusieurs couches de molécules dont l'orientation tourne peu à peu, on montre que la petite composante du champ est détruite par les interférences avec les contributions des couches précédentes. On retrouve ainsi une rotation de la polarisation avec transmission parfaite.

Nous sommes désormais prêts à réaliser l'écran LCD (*Liquid Crystal Display*, « affichage à cristaux liquides »). Plaçons une couche mince, de quelques micromètres d'épaisseur, d'un cristal nématique torsadé d'un quart de tour entre deux polariseurs perpendiculaires et éclairons cette « dalle » par derrière. Le premier polariseur confère à la lumière une polarisation rectiligne ; la couche de cristal liquide fait tourner la polarisation d'un quart de tour pour l'aligner avec le second polariseur, qui transmet donc toute la lumière.

Disposons ensuite un ensemble d'électrodes transparentes de part et d'autre du cristal liquide afin d'y définir une matrice de pixels. Appliquons une tension suffisante sur un pixel donné : ses molécules nématiques s'alignent selon la direction du champ électrique externe, c'est-à-dire perpendiculairement à la couche, comme l'avait montré dans la première moitié du XX^e siècle le

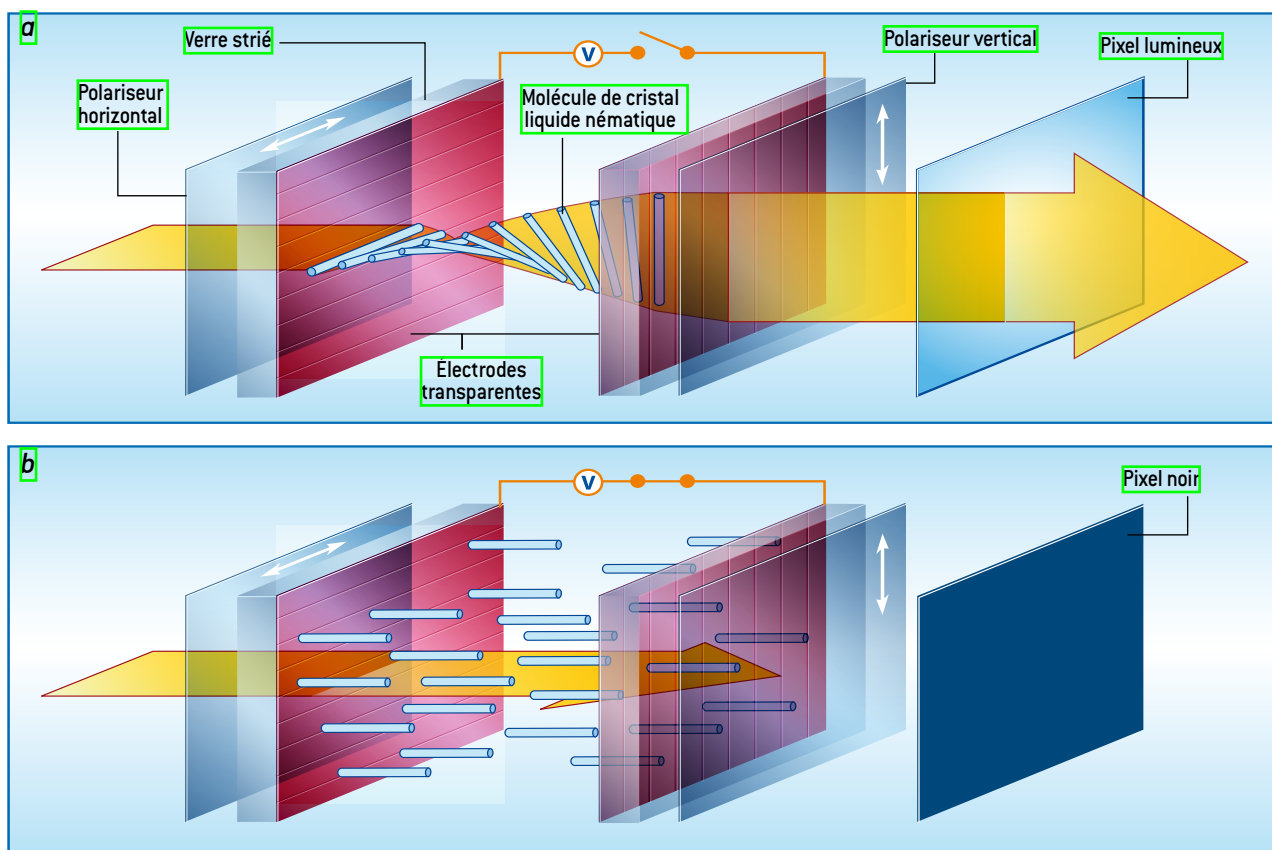
LES AUTEURS



Jean-Michel COURTJY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'université Pierre-et-Marie-Curie, à Paris. Leur blog : <http://blog.idphys.fr>



Retrouvez la rubrique
Idées de physique sur
www.pourlascience.fr



physicien russe Vsevolod Frederiks. Dans cette géométrie, les molécules n'agissent plus sur la polarisation lumineuse. Celle-ci ne tourne plus, et le second polariseur bloque la lumière : on a réalisé une valve à lumière.

Quand on annule la tension, les molécules se réalignent dans les stries, les forces internes reconstituent l'hélice et le pixel redevient lumineux. Le second film polariseur est donc essentiel : si on l'enlève, la dalle restera lumineuse en permanence pour l'œil, qui n'est pas sensible à la polarisation.

Que se passe-t-il si l'on regarde à travers des lunettes polarisantes la dalle dépourvue de ce second film ? En orientant convenablement la tête (pour rendre orthogonaux les axes de polarisation des lunettes et du film arrière de l'écran), on obtient l'image originale. En la tournant ensuite de 90° (pour rendre ces axes parallèles), on reçoit uniquement de la lumière des pixels soumis à une tension : le blanc devient noir et le noir blanc. Autrement dit, on voit le négatif. À 45° ,

on a une égale proportion de l'image originale et de son négatif, et tout est blanc.

En pratique, chaque pixel est composé de trois éléments à cristaux liquides avec des filtres colorés pour réaliser la trichromie : en tournant la tête, on passera donc de l'image originale en couleurs à un écran blanc, jusqu'à obtenir de nouveau l'image... mais dans les couleurs complémentaires.

Notons que la plupart des afficheurs ont un axe de polarisation oblique, orienté à 45° par rapport à la verticale. Pourquoi ? Pour éviter que, vu à travers des lunettes polarisantes dont l'axe est généralement vertical, l'écran apparaisse entièrement noir là où il devrait être lumineux ! Ainsi, à travers des lunettes polarisantes (en gardant la tête droite), l'écran apparaît deux fois moins brillant – c'est l'assombrissement que nous évoquions au début. En penchant la tête d'un côté, on assombrit encore plus l'image, jusqu'à l'éteindre ; en l'inclinant de l'autre côté, l'image devient plus lumineuse. ■

QUAND LA TENSION APPLIQUÉE à un élément de l'écran est nulle (a), la lumière traverse les deux polariseurs croisés, car sa polarisation tourne de 90° grâce à l'ordre moléculaire en hélice adopté par le cristal liquide. Lorsque l'élément d'affichage est sous tension (b), les molécules du cristal liquide s'alignent avec le champ électrique créé par la tension. Elles n'agissent alors plus sur la polarisation de la lumière, et celle-ci ne peut franchir le second polariseur : le pixel est noir.

BIBLIOGRAPHIE

D. Dunmur et T. Sluckin, *Soap, Science, and Flat-Screen TVs - A History of Liquid Crystals*, Oxford University Press, 2010.

QUESTION AUX EXPERTS

La dopamine est-elle la molécule du plaisir ?

Oui. Plus elle est libérée en quantité importante dans un endroit particulier du cerveau, plus on éprouve de plaisir.

Jean Costentin



Caféine, nicotine, alcool, cannabis, héroïne, bon repas et ébats sexuels ont un point commun : ils procurent du plaisir. Mais comment créent-ils cette sensation dans le cerveau ?

Un début de réponse est venu d'une étude pionnière réalisée par les neurobiologistes canadiens James Olds et Peter Milner il y a plus de cinquante ans. Ces chercheurs ont implanté un couple d'électrodes à différents endroits du cerveau de rats. En appuyant sur une pédale, les animaux faisaient passer un courant entre ces électrodes et stimulaient ainsi les neurones à leur proximité. Pour certaines implantations, les rats appuyaient sur la pédale des milliers de fois par heure, dédaignant de boire s'ils avaient soif, de manger s'ils avaient faim, négligeant même la jolie ratte en chaleur introduite dans leur cage. Ils éprouvaient manifestement un plaisir des plus intenses, oubliant tous les autres. Seul l'épuisement les arrêtaient...

Or les neurones ainsi stimulés libéraient de la dopamine (un neuromédiateur, c'est-à-dire une substance qui intervient dans la communication entre certains neurones) dans le noyau accumbens, une toute petite structure enfouie profondément dans le cerveau. Ces neurones, qui naissent dans l'aire tegmentale ventrale (au sommet du tronc cérébral), constituent la pierre angulaire de ce qu'on appelle désormais le système de la récompense. Ce système favorise la survie et la pérennité de l'espèce, car c'est grâce à lui qu'un animal a du plaisir à étancher sa soif, à

satisfaire sa faim et à s'accoupler. Le plaisir éprouvé garantit la mise en œuvre régulière de ces comportements, ce qui explique que le système de la récompense ait été conservé au cours de l'évolution.

Depuis ces travaux, on considère la dopamine comme le médiateur du plaisir. Grâce à une technique nommée microdialyse intracérébrale, qui consiste à introduire une sonde dans le cerveau, on a mesuré sa concentration cérébrale dans différentes situations. Ainsi, l'injection intraveineuse de glucose à un animal affamé suscite une intense libération de dopamine dans le noyau accumbens, de même que l'injection de nicotine ou d'alcool à un animal qui n'y a jamais été exposé.

Plaisir ou désir ?

En rupture (toute relative) avec cette assertion, quelques neurobiologistes, tel Morten Kringelbach, de l'université d'Oxford, voient plutôt en la dopamine le médiateur du désir. Ils s'appuient notamment sur des expériences où des rats privés de dopamine ne se déplacent plus vers des aliments, comme s'ils n'éprouvaient plus de désir. Des biais ne sont cependant pas à exclure dans leurs travaux, car la dopamine a de multiples fonctions et est notamment impliquée dans la motricité (son déficit dans certaines structures cérébrales est par exemple associé à la maladie de Parkinson).

En outre, le désir ne me semble pas une sensation directement liée à la libération d'une molécule, mais plus une construction psy-

chique bâtie sur les fondations d'un plaisir éprouvé ou imaginé : on se souvient du plaisir et on cherche à le revivre. Chez un alcoolique, un fumeur ou une autre victime de toxicomanie, la sensation de manque et le désir d'une nouvelle dose sont d'ailleurs associés à une hypodopaminergie, c'est-à-dire à une concentration anormalement basse de dopamine : celle-ci chute en effet dans le noyau accumbens à mesure que les « drogues » sont éliminées de l'organisme. Le consommateur chemine alors dans la vallée du déplaisir, dévoré par l'impatience de fumer une autre cigarette ou de boire un autre verre. Il présente à un certain degré des troubles de la dépression.

Des chercheurs ont réussi à corriger ces troubles dépressifs au moyen de médicaments intensifiant la libération de dopamine, telles des amphétamines, mais le plaisir qu'ils faisaient réapparaître était si fort qu'ils ont à leur tour déclenché des phénomènes de dépendance. Le mieux étant l'ennemi du bien, ces traitements ont été abandonnés.

Désir et plaisir sont en tout cas intimement liés. Le manque du second peut provoquer le premier, mais ils vont parfois aussi de pair, l'anticipation d'un moment agréable ayant déjà une certaine saveur : « le plaisir de l'amour débute en gravissant l'escalier », dit-on... ■

Jean COSTENTIN est professeur émérite de pharmacologie, ancien directeur de l'unité de neurobiologie clinique du CHU de Rouen, et auteur de *La dopamine dans tous ses états* (Docis, 2015).

ABONNEZ-VOUS
À POUR LA SCIENCE



■ POUR LA
SCIENCE

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

- ☐ 1 an • 12 numéros • **59€** au lieu de ~~78,50€~~ (D1A59E)
- ☐ 2 ans • 24 numéros • **110€** au lieu de ~~157€~~ (D2A110E)
- ☐ 3 ans • 36 numéros • **159€** au lieu de ~~235,50€~~ (D3A159E)

Nom : _____
Prénom : _____
Adresse : _____

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

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

- ☐
- Par carte bancaire

Numéro de carte |

Date d'expiration

Clé

les 3 chiffres au dos de votre CB

Signature obligatoire



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

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

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

Délai de livraison: dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 31/03/16 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site www.pourlascience.fr. Conformément à la loi "Informatique et Libertés" du 6 janvier 1978, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification aux données vous concernant en adressant un courrier à Pour la Science.

SCIENCE & GASTRONOMIE

Opération beurre feuilleté

Le beurre est un excellent produit brut. Comme avec d'autres matières premières culinaires, osons le transformer afin d'obtenir, par exemple, une alternance de couches différentes.

Hervé THIS



La gourmandise a ses oukases. Notamment, il faudrait « respecter les produits ». Pourquoi ce fétichisme ? Pourquoi parlons-nous de « produits naturels » pour les aliments, alors que l'artificiel est le produit de notre art, et que s'il y a « produit », c'est qu'il y a production, transformation ?

Le lait ? Il n'est « bon » que si les éleveurs font paître aux vaches une herbe favorisant des goûts intéressants, et le terroir n'est pas rien, avec ses sols, ses climats, ses races animales. Le beurre ? Il est loin d'être naturel, puisqu'on l'obtient après des manipulations qui incluent une légère fermentation (on parle de « maturation », ça fait plus chic), un barattage, un malaxage pendant un rinçage à l'eau, parfois une pasteurisation.

Dans les cas favorables, le beurre est très « bon » : il a une consistance agréable, avec une saveur, une odeur, une couleur. Pour autant, nous ne mangeons pas de beurre seul : l'associer à du pain est déjà un acte culinaire. Alors pourquoi s'arrêter en chemin ?

Nous considérerons ici que le beurre est fait de matière grasse et d'eau (la réglementation limite à 16 % la proportion d'eau restant dans le beurre, et à 2 % la matière sèche non grasse, composée principalement de lactose et de protéines).

L'eau est dispersée dans la phase grasse, qui, à la température ambiante, est en partie solide et en partie liquide. À -10 °C, toute la matière grasse est cristallisée ; à plus de 55 °C, elle est entièrement fondue ; à la température ambiante, une fraction (les triglycérides aux résidus d'acides gras les

plus longs et les plus saturés) est à l'état solide. À cette matière, que nous décidons de transformer (ce que l'on fait d'ailleurs dès que nous raclons la plaquette), que pouvons-nous faire subir ?

Le plus simple est la production de beurre clarifié par chauffage doux : la phase aqueuse est libérée quand la matière grasse fond, de sorte que l'on récupère cette dernière par décantation. Le beurre clarifié a l'avantage de chauffer sans charbonner.

À peine plus complexe, la production de beurre noisette résulte d'un chauffage du beurre qui modifie les protéines et le lactose. Il s'ensuit un brunissement que l'on stoppe quand il est léger. Apparaissent alors des goûts merveilleux.

Toutefois, il s'agit là de simples fractionnements ou craquages. Faisons mieux ! Construisons par exemple de nouveaux produits issus du beurre en émulsionnant un liquide dans la phase grasse récupérée. Nous obtiendrons une émulsion de type « eau dans huile » en battant une solution aqueuse (du jus de citron, du vin, du jus d'orange, du bouillon...) dans de la matière grasse ; au refroidissement, on aura une gélification de la phase grasse, par cristallisation de la partie la plus fusible. Ou bien nous produirons une émulsion « huile dans eau » en ajoutant lentement, tout en fouettant, de la matière grasse dans une solution aqueuse (par exemple, du jus de citron que l'on aura mêlé au petit-lait). Évidemment, le même type de préparation peut s'obtenir à l'aide du beurre noisette.

Il ne s'agit là que de dispersions aléatoires d'une phase dans l'autre. Or on peut organiser

les matières. Pourquoi ne pas reprendre la recette de la pâte feuilletée, en alternant des préparations à base de beurre ? Nous partirons d'un « pâton », fait d'une matière beurrée, en forme d'une galette d'un centimètre d'épaisseur ; nous disposerons dessus une autre matière beurrée, différente de la première, et nous replierons le premier pâton sur le second pour l'enfermer, comme dans une enveloppe ; puis nous étendrons l'ensemble au rouleau, et le replierons, en deux ou en trois. Répétons l'opération : le nombre de couches de ce « beurre feuilleté » dépendra des repliements.

On peut aussi jouer sur la couleur et le goût des pâtons. Par exemple, nous pourrions alterner une émulsion eau dans huile, avec du jus de citron dans du beurre, et une émulsion huile dans eau, avec un beurre de crevettes, c'est-à-dire du beurre émulsionné dans une bisque de crevette. Je vous invite à déposer cet objet sur un filet de poisson simplement sauté ; en fondant, le beurre libérera ses goûts alternés. La plasticité du beurre permet des modelages innombrables qui, hélas, ne nous feront pas perdre de kilos. ■



Hervé THIS, physicochimiste, est directeur du Centre international de gastronomie moléculaire AgroParisTech-Inra et directeur scientifique de la fondation Science & culture alimentaire (Académie des sciences).



Retrouvez la rubrique
Science & gastronomie sur
www.pourlascience.fr



N°460 - février 2016
réf. M0770460



N°459 - janvier 2016
réf. M0770459



N°458 - décembre 2015
réf. M0770458



N°457 - novembre 2015
réf. M0770457



N°456 - octobre 2015
réf. M0770456



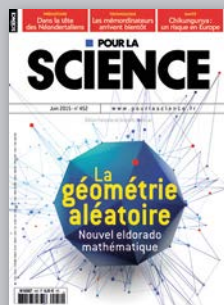
N°455 - septembre 2015
réf. M0770455



N°454 - août 2015
réf. M0770454



N°453 - juillet 2015
réf. M0770453



N°452 - juin 2015
réf. M0770452



N°451 - mai 2015
réf. M0770451



N°450 - avril 2015
réf. M0770450



N°449 - mars 2015
réf. M0770449



N°448 - février 2015
réf. M0770448



N°447 - janvier 2015
réf. M0770447



N°446 - décembre 2014
réf. M0770446

POUR LA SCIENCE

Complétez votre collection
dès maintenant!

5,50€ dès le 2^e numéro
acheté!

A découper ou à photocopier et à retourner accompagné de votre règlement à : Groupe Pour la Science • 628 avenue du Grain d'Or • 41350 Vineuil • e-mail : pourlasciencevpc@daudin.fr

☐ Oui, je commande des numéros
de *Pour la Science* au tarif unitaire
de 5,50€ dès le 2^e acheté.

Je reporte ci-dessous les références à 8 chiffres correspondant aux numéros commandés et au format souhaité :

1^{re} réf. 01 x 6,50 € = 6,50 €
2^e réf. x 5,50 € = €
3^e réf. x 5,50 € = €
4^e réf. x 5,50 € = €
5^e réf. x 5,50 € = €
6^e réf. x 5,50 € = €
Frais port (4,90€ France - 12€ étranger) + €

☐ Je commande la reliure *Pour la Science*
(capacité 12 n^{os})
au prix de 14 € x 14 € = €

TOTAL À RÉGLER = €

Indiquez mes coordonnées :

Nom :
Prénom :
Adresse :

C.P. : Ville :
Pays : Tél. :
* pour le suivi client (facultatif)

Mon e-mail pour recevoir la newsletter *Pour la Science* :

@
* à remplir en majuscules

Je choisis mon mode de règlement :

☐ par chèque à l'ordre de *Pour la Science*
☐ par carte bancaire

N°
Date d'expiration Code de sécurité
(les 3 chiffres au dos de votre CB)

Signature obligatoire

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

TOUTES LES ARCHIVES
DEPUIS 1996 SUR
www.pourlascience.fr

■ ARCHEOLOGIE

Boire en Gaule

Fanette Laubenheimer,

CNRS Éditions, 2015
(192 pages, 22 euros).

Boire en Gaule, c'est avant tout boire de la bière. L'auteure, elle-même fille de brasseur, n'a aucun mal à nous en convaincre. Dans ce petit livre synthétique, elle nous explique comment l'hydromel, la bière et le vin ont chacun à leur tour humecté le palais de nos ancêtres.

Parfois saumâtre, l'eau demandait à être purifiée par un peu d'alcool. La vie semble alors plus belle pour un moment, quand on la contemple à travers le filtre de l'ivresse, sûrement un cadeau des dieux qui entrent alors en nous... Pour sa part, l'hydromel, c'est-à-dire un mélange fermenté d'eau et de miel, est sans doute l'alcool le plus ancien de l'humanité. Bu dès le Néolithique, réservé initialement à une élite qui le consommait lors de banquets rituels, il deviendra l'objet d'échanges commerciaux de longue distance lorsqu'il se démocratisera.



Apparue elle aussi au Néolithique, la brasserie suppose un savoir-faire spécifique. Il faut d'abord obtenir du malt, puis

le brasser et le faire fermenter. L'ajout d'armoise ou de romarin (le houblon viendra bien plus tard) aromatise le mélange et le rend plus digeste. La Gaule, couverte de champs de céréales, a un grand rôle à jouer dans la brasserie. On y boit de la bière dès le Campaniforme, soit bien avant les Gaulois. Comme pour l'hydromel, des réseaux commerciaux se développent, dès que les brasseurs apprennent à conserver le breuvage.

Boisson rituelle, la bière fait aussi partie du quotidien des petites gens, plus encore lorsque le christianisme l'aura chassé de la sphère du sacré : imagine-t-on Jésus offrir une mousse à ses apôtres ? Le vin, boisson d'abord importée et hors de prix, mettra du temps à s'imposer, mais les Gaulois romanisés passent vite maîtres dans l'art de vinifier, au point d'inquiéter Rome, qui tente de bloquer le commerce de leur vin. Et, maîtres du vin, ils le resteront jusqu'à aujourd'hui !

Romain Pigeaud
Chercheur associé
à l'université de Rennes 1

■ NUTRITION

L'Anti-régime

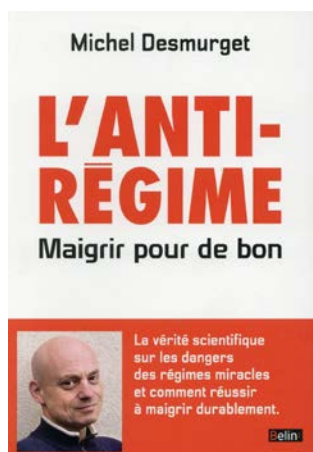
Michel Desmurget

Belin, 2015
(352 pages, 21 euros).

Encore un, me direz-vous ! Encore un nouveau livre, sur un nouveau régime amaigrissant ? Passé le premier réflexe et tournées les premières pages, on comprend vite qu'il s'agit d'autre chose. Le titre de l'ouvrage lui-même annonce la couleur : rendons hommage à son auteur, directeur de recherche à l'Inserm et spécialiste de neurosciences, d'avoir si bien évité

ce piège en prenant le contre-pied de la littérature du genre.

Scientifique, il n'a de cesse d'exercer son esprit critique avec clairvoyance pour dénoncer l'ineptie de la plupart des régimes et la regrettable réceptivité du grand public à ce type de messages racoleurs. Son ouvrage commence en effet par un inventaire approfondi



des régimes en vogue, qu'il analyse sans concession. Résultat ? Une condamnation de tous les régimes miracles, des plus classiques aux plus actuels, et surtout de l'« affligeante bouillie pseudoscientifique » qui les sous-tend. Clairement, pour l'auteur, ces régimes n'ont jamais fait maigrir autre chose que le portefeuille des plus crédules et grossier celui de gourous médiatiques peu regardants sur les conséquences de leurs conseils sur la santé de qui les suit.

Au fil de chapitres très accessibles, l'auteur dégage un certain nombre de constats suivis de préconisations de bon sens. Sur cette base, il aborde ensuite dans la deuxième partie de l'ouvrage le problème de la façon la plus concrète possible : en s'inscrivant dans la durée, armé de conviction, en s'appropriant ces petits « trucs » qui font la différence et en privilégiant le partage familial comme principal soutien dans les efforts nécessaires.

Les résultats sont-ils à la hauteur des espoirs de tant de malheureux obèses grugés par toutes les tentatives précédentes ? L'auteur témoigne sur son cas avec franchise : il a perdu 50 kilogrammes et réussi à ne pas en reprendre. D'après lui, oui, c'est possible, pourvu que le bonheur soit dans l'assiette !

Bernard Schmitt
CERN

■ MÉDECINE MILITAIRE

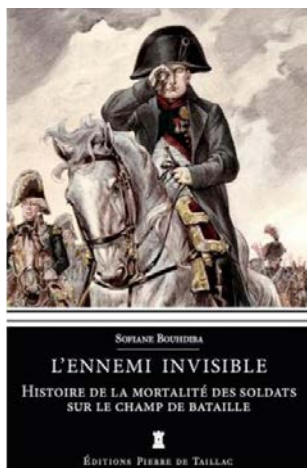
L'Ennemi invisible

Sofiane Bouhdiba

Pierre de Taillac, 2015
(172 pages, 19,90 euros).

Ce livre évoque tant de misères humaines que je me sens gêné de dire qu'il m'a intéressé. Comme s'il s'agissait d'éprouver du plaisir à le lire ! Disons donc plutôt que la façon dont il aborde l'histoire m'a paru avoir une nécessité.

Mourir à la guerre n'est pas toujours tomber sous les coups ennemis : les guerres favorisent les épidémies. L'auteur a choisi dix épisodes guerriers célèbres, et leur associe une maladie qui a particulièrement frappé les combattants. Le mot maladie est pris en un sens large. Au siège d'Antioche (1097-1098), Sofiane Bouhdiba associe la famine ; à la retraite de Russie (1812), le froid ; à la guerre de 1914-1918, la boue. Les tranchées faisaient macérer dans la boue les pieds des soldats, ce qui a provoqué d'innombrables pathologies, dont les noms suffisaient à faire frémir : ulcérations fongueuses, pourriture d'hôpital... Ici et maintenant, nous avons la chance que beaucoup de noms de maladies ne soient que des noms, justement. Alors, l'auteur rappelle ce que sont ces maladies en décrivant les souffrances qu'ont



causées, lors des épisodes guerriers qu'il a sélectionnés, la peste (siège de Caffa, 1344-1347), le choléra (guerre de Crimée, 1853-1856), la fièvre typhoïde (protectorat tunisien, 1881). La variole (siège de Tenochtitlán, 1521) a peut-être contribué plus que la poudre à la victoire des conquistadors sur les Amérindiens. Comme il n'est pas d'histoire sans polémique, l'auteur soutient une thèse controversée au sujet de la bataille de Valmy (1792) : si les révolutionnaires ont gagné, c'est que les coalisés ont été victimes de la dysenterie. Lors de la campagne du Mexique (1862-1867), les médecins ont suspecté les vents d'être la cause de l'épidémie de fièvre jaune.

Les progrès médicaux, ainsi que ceux des transports et de la conservation des aliments, font que, depuis la fin du XX^e siècle, on meurt moins de maladies sur le champ de bataille. Mais la létalité des armes a augmenté. Le livre s'achève sur le syndrome de la guerre du Golfe (1991), qui affecte les vétérans américains. Est-il provoqué par les vaccins qu'ils avaient reçus ? Ou par l'utilisation de munitions contenant de l'uranium appauvri ? La lumière est loin d'être faite.

■ ESSAI

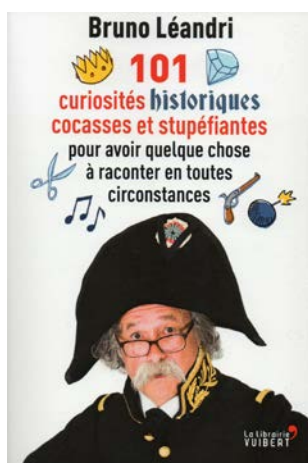
101 Curiosités historiques cocasses et stupéfiantes

Bruno Léandri

Vuibert, 2015
(256 pages, 14,90 euros).

Boileau disait : « Jamais au spectateur n'offrez rien d'incroyable / Le vrai peut quelquefois n'être pas vraisemblable ». Léandri est l'anti-Boileau. Il fait son miel du vrai incroyable, et l'offre dans ce recueil de curiosités parfois amusantes, parfois effrayantes, mais toujours saisissantes et bien racontées.

Un fait vrai mais invraisemblable est plus extravagant qu'un fait invraisemblable mais fabriqué. On peut donc croire l'auteur lorsqu'il présente un fait comme attesté ! En tout cas, là où je connais, j'ai constaté le sérieux de cet humoriste...



Son ton amusé n'empêche pas l'émotion devant certaines absurdités meurtrières. Ainsi, par deux fois, dans les années 1930-1940, le nationalisme, amplifié par la

convoitise pour des terres réputées pétrolifères, mena à une guerre (entre le Paraguay et la Bolivie, puis entre l'Équateur et le Pérou). Et, par deux fois, quand la paix revint, le vainqueur put explorer ces terres – et constater qu'elles ne recélaient aucun pétrole...

Léandri est troublé par les ratés de la mémoire collective. Elle semble ne pas avoir enregistré que le nitrate d'ammonium, à l'origine de la catastrophe de l'usine AZF de Toulouse en 2001, est un récidiviste. En 1947, le cargo *Grandcamp* explosa dans le port de Texas City. Bilan : 600 morts (31 à Toulouse).

Les mésaventures des savants ont leur part dans ce recueil. Ainsi, l'abbé Le Gentil, mandaté pour aller à Pondichéry observer le passage de Vénus devant le Soleil, partit en 1760 mais, suite à des péripéties tragicomiques, ne put revenir que onze ans plus tard. On le croyait mort, ses biens avaient été vendus, son siège à l'Académie des sciences donné à un autre. Et ses observations ? Une succession rocambolesque de guerres et de nuages inopinés les avait empêchées...

Les physiciens alimentent aussi la rubrique « incroyable mais vrai », eux qui avouent que la plus grande part de la matière de l'Univers leur échappe. Plus biscornu encore : pour tenter de la détecter avec leurs appareils ultramodernes, ils ont besoin de plomb neutre, et n'en ont pas trouvé de mieux adapté que celui récupéré dans une galère romaine coulée en l'an 380, que son séjour sous l'eau a mis à l'abri des rayons cosmiques !

Voici, résumées, quatre des curiosités de Léandri. Il vous en reste donc 97 à découvrir...

Didier Nordon



Agrippine

Virginie Girod

Tallandier, 2015
(300 pages, 20,90 euros)

Agrippine, une pionnière du

féminisme ? Il est clair que sa résilience dans un monde d'homme pervers et violent est déjà une affirmation spectaculaire de la force féminine ; c'est encore plus clair avec ce livre qui nous montre qu'elle a voulu rien moins que diriger le monde (romain)... Et qu'elle y est parvenue, avant de succomber écrasée par l'effondrement du plafond de verre qu'elle avait osé percer. L'auteur nous le rend perceptible en analysant les sources à notre disposition.



Les Relativités : espace, temps, gravitation

Michel Le Bellac

EDP Sciences, 2015
(230 pages, 24 euros)

Est-il possible de s'initier aux théories d'Einstein – la relativité restreinte et la relativité générale – sans douleur et sans subir un déluge d'équations et de formalisme mathématique ? Ce livre de Michel Le Bellac, physicien et auteur de nombreux manuels pour étudiants, constitue une réponse positive à la question. Il aborde les principales notions de la relativité de façon originale et vivante, en les illustrant avec de nombreux exemples récents tirés de la physique des particules, de l'astrophysique ou de la cosmologie – et en réduisant le formalisme au strict minimum.



La Lumière et la Vie

Bernard Valeur
et Élisabeth Bardez

Belin, 2015
(224 pages, 25 euros)

Sans lumière, point de photosynthèse, d'horloge circadienne, de ramages de séduction, de migrations saisonnières ou d'énergie sur Terre... Physicochimistes, les deux auteurs passent en revue le rôle joué par la lumière dans les multiples facettes du monde vivant, des origines de la vie jusqu'aux techniques de l'optogénétique. Le texte, concis, est d'une implacable justesse scientifique ; les images foisonnent, mais toutes illustrent vraiment les phénomènes évoqués. Un ouvrage de grande... valeur !

Retrouvez l'intégralité de votre magazine et plus d'informations sur www.pourlascience.fr

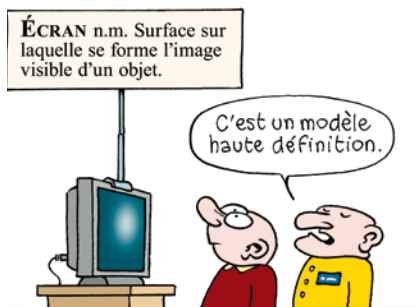


Didier Nordon

EN TOUTE RIGUEUR...

Les mathématiciens sont rigoureux. Or la rigueur exige qu'ils n'emploient jamais un mot sans l'avoir défini. Donc... Donc ils emploient une foule de mots qu'ils n'ont pas définis.

Ainsi, le verbe être, dont la définition mènerait à une discussion sans fin sur le mode d'existence des objets mathématiques. Ou le mot définition, qui ferait tomber dans un cercle vicieux : on ne peut proposer une définition du mot définition que si l'on dispose déjà d'une définition du mot définition !



Définir certains autres mots de base usuels (hypothèse, conclusion, théorème, démonstration, rigueur...) ralentirait l'activité technique proprement dite des mathématiciens. Ils aiment mieux faire comme si le sens de ces mots allait de soi.

La philosophie aussi a un vocabulaire hétérogène, mais elle se nourrit de la réflexion sur les mots usuels (le verbe être, par exemple) autant que sur les mots savants (herméneutique, transcendantal...). Prendre les mots usuels comme des mots de base dotés d'un sens évident identique pour tout le monde serait une faiblesse chez un philosophe.

Seulement, s'il lui venait fantaisie d'analyser – au moyen de mots ! – chacun des mots qu'il emploie, son discours, explosant selon une réaction en chaîne, se démultiplierait à l'infini. Alors, il est obligé d'employer sans s'y attarder des mots qui mériteraient pourtant qu'il le fasse. On peut toujours tout discuter, mais on ne peut jamais discuter tout.

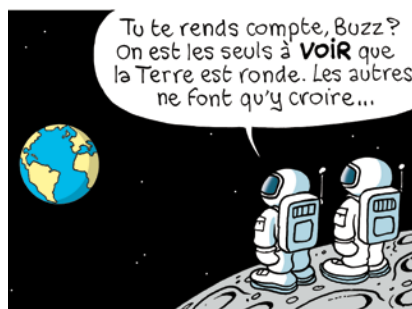
Les mathématiques et la philosophie n'émancipent pas de la naïveté à laquelle le langage nous condamne. Pour un mot auquel nous croyons avoir réussi à assigner un sens précis, nous en employons mille que nous ne contrôlons pas.

FAUT-IL LE VOIR SOI-MÊME POUR Y CROIRE ?

En principe, un mathématicien ne tient un résultat pour vrai que s'il sait le démontrer. En fait, il ne respecte pas ce principe. Il lui faut bien croire à la vérité de théorèmes trop loin de sa spécialité pour qu'il en comprenne la démonstration ! Alors, il agit comme dans toutes les professions : il fait confiance à ses collègues – sauf ceux dont il a des raisons de penser qu'ils sont peu fiables.

Même destiné à n'être pas appliqué, le principe de tenir pour vrai uniquement ce que l'on a vérifié en personne serait aberrant dans d'autres disciplines. Un géologue ne peut pas assister à la surrection d'une montagne. Un historien ne peut pas aller place de la Bastille le 14 juillet 1789 voir ce qui s'y passe. Un sociologue, un économiste, ne peuvent pas refaire la collecte des statistiques sur lesquelles ils fondent leurs travaux.

Une conjonction néfaste se produit en histoire, en sociologie, en économie : ce sont des disciplines où les enjeux idéologiques sont vifs et où les intermédiaires entre un auteur et l'objet de son étude sont nombreux. Chaque auteur étant par conséquent tenté de privilégier les sources qui confortent ses préjugés, ces disciplines n'apparaissent pas comme porteuses de vérités que chacun



doit accepter. Du coup, elles servent plus facilement à nourrir les passions partisans qu'à les atténuer.

ARGUMENTS À CONSIDÉRER, OBJECTIONS À DÉCONSIDÉRER

Lorsque le mathématicien Alexander Grothendieck s'est mis à critiquer l'institution scientifique, dans les années 1960-70, certains ont discrédité ses objections en disant qu'elles avaient sa frustration pour fondement : il n'avait pas su démontrer les conjectures de Weil, et se consolait en vilipendant l'institution.



Le problème de ce genre d'explications par la psychologie est qu'elles sont toujours plausibles, et jamais intéressantes.

La frustration est la chose la mieux partagée. Tous, nous avons été – et plus d'une fois – le renard face aux raisins inaccessibles. Il n'est donc pas de lanceur d'alerte qu'on ne puisse accuser d'être mû par quelque frustration. Mais cela ne dit rien sur la valeur de ses propos. Si n'avaient une chance d'être judicieux que les arguments provenant d'auteurs vierges de toute frustration, aucun argument judicieux n'aurait jamais été avancé depuis que le monde est monde !

Disqualifier un argument en l'interprétant comme l'expression déguisée d'une amertume de son auteur est un avatar d'un procédé ancien, aussi injuste qu'efficace : déconsidérer un individu est plus facile que réfuter ses arguments. Surtout s'ils sont pertinents. ■

Direction de l'innovation
et des relations avec les entreprises

cnrs

formation entreprises

Axes de formation 2016

Statistiques, bioinformatique et big data

Génie logiciel, modélisation, robotique

SIG, géographie, archéologie

Énergie, environnement

Électronique, optique, métrologie

Matériaux et molécules : mise en œuvre

Matériaux et molécules : caractérisation

Microscopie

Chromatographie, spectroscopie

Spectrométrie de masse

Résonance magnétique nucléaire

Biologie

Expérimentation animale

Qualité, sécurité

180 formations pour tous les professionnels des secteurs privé et public

- Des stages de 3 à 5 jours
- Une pédagogie basée sur l'expérimentation
- Des formations sur les plateformes de recherche du CNRS par les chercheurs et ingénieurs des meilleurs laboratoires
- Plus de 1100 professionnels formés chaque année

Découvrez nos stages 2016 sur cnrsformation.cnrs.fr

Contact : cfe.contact@cnrs.fr - 01 69 82 44 55

Suivez-nous sur Twitter  @CNRS_CFE



Accédez aux
formations



www.cnrs.fr

COSMINNOV

COSMETIC INNOVATION DAYS



24-25 MAI 2016 - ORLÉANS, FRANCE

4th

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

→ Programme scientifique / Conférences plénières

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

Vieillesse cutané & Physiologie de la ride

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

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

Formulation & Physico - Chimie

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

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

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

Science & Maquillage

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

Cosmétiques & Nouvelles Technologies

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

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

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

NIELS GRABE - Bioquant-University of Heidelberg, Germany

Beauté & Digital

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

MATHIAS HERBERTS - Cofondateur, Disruptive CTO, Cityzen Data, France

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

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

Participer à cosminnov : www.cosminnov.com