

SCIENCE

ASTROPHYSIQUE
**L'ORIGINE
DES BANDES
DE JUPITER**

ARCHÉOLOGIE
**LA TOUTE PREMIÈRE
UNIVERSITÉ
ÉTAIT INDIENNE**

PHYSIQUE
**RECHARGER
SANS FIL... ET
EN SE DÉPLAÇANT !**

OCTOBRE 2017
N° 480

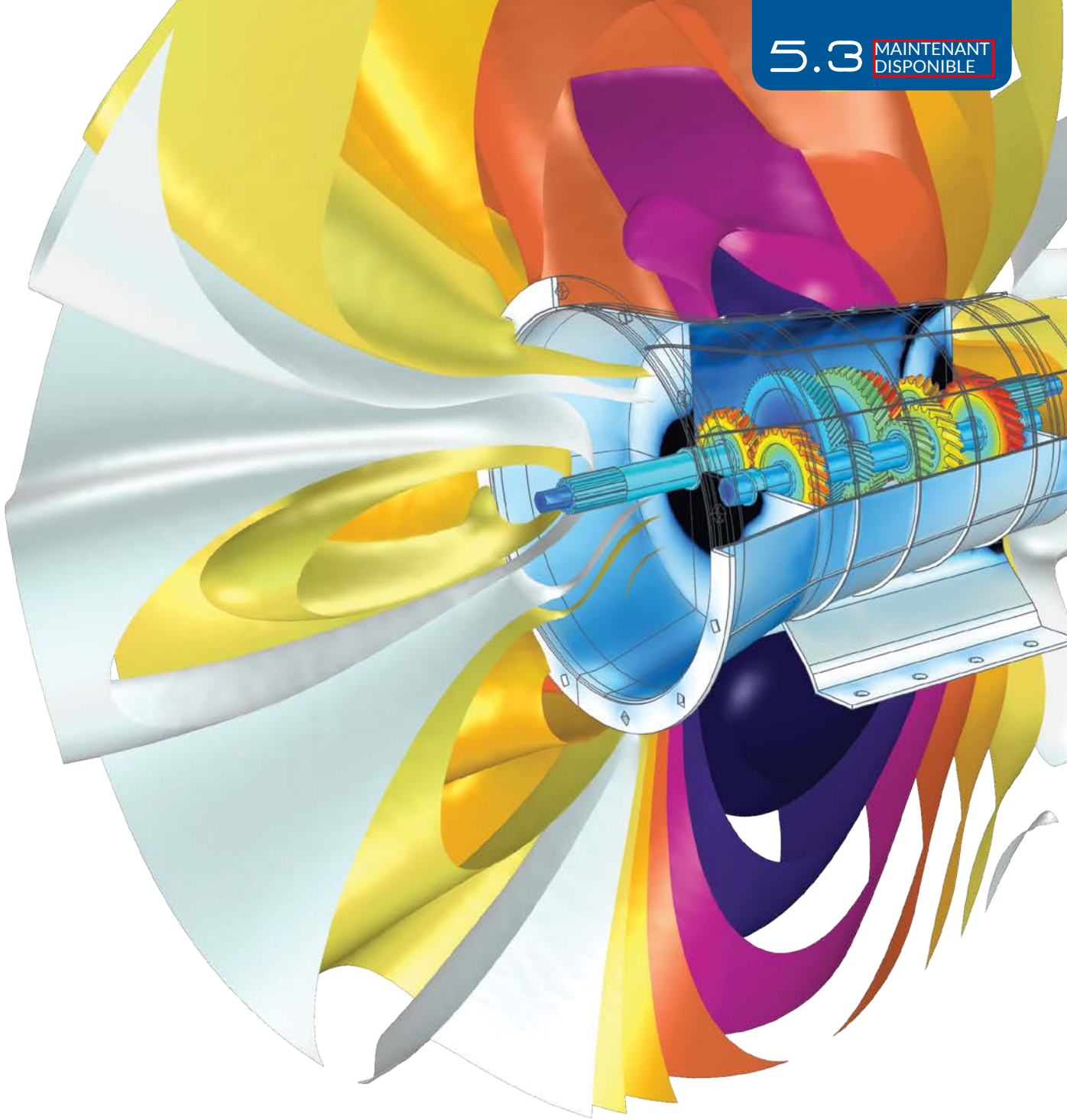


LES NEURONES DU SOUVENIR

**Comment le cerveau
organise la mémoire**

DÉBAT

**LA SOCIOLOGIE
EST-ELLE VRAIMENT
SCIENTIFIQUE ?**



LA MULTIPHYSIQUE POUR TOUS

avec COMSOL Multiphysics®

Les outils de simulation numérique
viennent de franchir une étape majeure.

Dépassez les défis de la conception avec COMSOL Multiphysics®. Avec ses puissants outils de modélisation et de résolution, obtenez des résultats de simulation précis et complets.

Développez des applications personnalisées à l'aide de l'Application Builder, et déployez-les au sein de votre organisation et auprès de vos clients partout dans le monde, avec une installation locale de COMSOL Server™.

N'attendez plus. Bénéficiez de la puissance des simulations multiphysiques.

comsol.fr/products



Certifié PEFC

Ce produit est issu
de forêts gérées
durablement et de
sources
contrôlées.

10-31-1282

pefc-france.org

**E
DITO**



**MAURICE
MASHAAL**
Rédacteur
en chef

NEUROBIOLOGIE ET SOCIOLOGIE, MÊME COMBAT?

La mémoire est une fonction cérébrale essentielle: ne se souvenir de rien de ce qui nous est arrivé il y a quelques minutes, quelques heures, quelques jours, quelques années est unimaginable. Mais comment notre cerveau mémorise-t-il ces événements? Et comment organise-t-il les souvenirs en un ensemble cohérent, dans l'espace et le temps par exemple? L'organe qui remplit notre cavité crânienne n'a dévoilé jusqu'ici qu'une infime partie de ses secrets, et les processus mis en œuvre dans la mémorisation restent mal connus. La neurobiologie est une science relativement jeune!

Pour autant, notre savoir et notre compréhension progressent constamment. Et les neurobiologistes franchissent parfois des pas importants, notamment grâce à de nouvelles techniques d'exploration. C'est le cas avec les découvertes sur la mémoire décrites ce mois-ci par leurs auteurs (voir pages 27 à 44). Elles éclairent le lien entre les souvenirs et les réseaux de neurones sous-jacents, et montrent comment des souvenirs différents sont associés ou, au contraire, bien distingués.

Ainsi, les rouages de la mémoire se précisent peu à peu, comme d'ailleurs ceux des autres fonctions assurées par le cerveau. Et les rouages de la société? Là, c'est une autre histoire. Bien que la sociologie ait peu ou prou le même âge que la neurobiologie, certains de ses thèmes semblent faire l'objet d'éternels et inféconds débats entre les spécialistes. Pourquoi? Certes, ce qui touche à la société est souvent d'une redoutable complexité. Mais les sociologues Gérard Bronner et Étienne Géhin soulignent dans ce numéro un problème d'une autre nature: le manque d'une partie des sociologues aux critères qui feraient de leur discipline une science à part entière (voir pages 54 à 61). Un constat auquel le cerveau associera aisément un souvenir: l'affaire Sokal, en 1996... ■

SOMMAIRE

N° 480 /
Octobre 2017

ACTUALITÉS

P. 6

ECHOS DES LABOS

- Cellules souches contre Parkinson
- 45 000 ans d'impact sur les forêts tropicales
- Une citadelle annulaire viking
- Un dinosaure parfaitement fossilisé
- Le méthane arctique, fausse menace climatique ?
- L'interaction de deux photons enfin détectée
- Dompter les ondes cobra

P. 18

LES LIVRES DU MOIS

P. 20

AGENDA

P. 22

HOMO SAPIENS INFORMATICS

Il y a erreur et erreur
Gilles Dowek

P. 24

CABINET DE CURIOSITÉS SOCIOLOGIQUES

L'incertitude et la vie post mortem
Gérald Bronner

GRANDS FORMATS



P. 46

ASTROPHYSIQUE

AU CŒUR DES BANDES DE JUPITER

Simon Cabanes, Benjamin Favier et Michael Le Bars

Pourquoi l'atmosphère de Jupiter présente-t-elle des bandes ? Deux modèles proposent une explication à cette énigme. Des expériences de laboratoire et les données de la sonde *Juno*, en orbite autour de Jupiter, devraient enfin les départager.



P. 62

ARCHEOLOGIE

NALANDA, LA PLUS VIEILLE UNIVERSITÉ DU MONDE

Max Deeg

Environ 400 ans avant la plus ancienne université occidentale, le grand monastère bouddhiste de Nalanda, en Inde, enseignait déjà la philosophie, la littérature brahmanique, la linguistique, la logique et la médecine.



P. 54

SCIENCES SOCIALES

LA SOCIOLOGIE, UNE SCIENCE EN DANGER

Gérald Bronner et Étienne Géhin

La sociologie est-elle une science ? On pourrait en douter au vu des dérives intellectuelles de certains spécialistes de cette discipline, dénoncent Gérald Bronner et Étienne Géhin dans leur dernier livre *Le Danger sociologique*. Pourtant, une sociologie scientifique est possible.



P. 68

TECHNOLOGIE

RECHARGER SANS FIL ET EN MOUVEMENT

Geoffroy Lerosey

Recharger les batteries d'un téléphone ou d'un véhicule électrique sans qu'il y ait contact matériel est possible. Mais pourrait-on le faire tout en étant en mouvement ? Oui, grâce à la symétrie parité-temps...



POUR LA
SCIENCE.FR

LETTRE D'INFORMATION

NE MANQUEZ PAS
LA PARUTION DE
VOTRE MAGAZINE
GRÂCE À LA NEWSLETTER

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



Inscrivez-vous
www.pourlascience.fr



En couverture :
© Shutterstock.com/Sebastian Kaulitzki

Les portraits des contributeurs
sont de Seb Jarnot

Ce numéro comporte un catalogue
Belin sur une sélection d'abonnés
France Métropolitaine



P.72

HISTOIRE DES SCIENCES

LA COCA, ARME DES CONQUISTADORS

Samir Boumediene

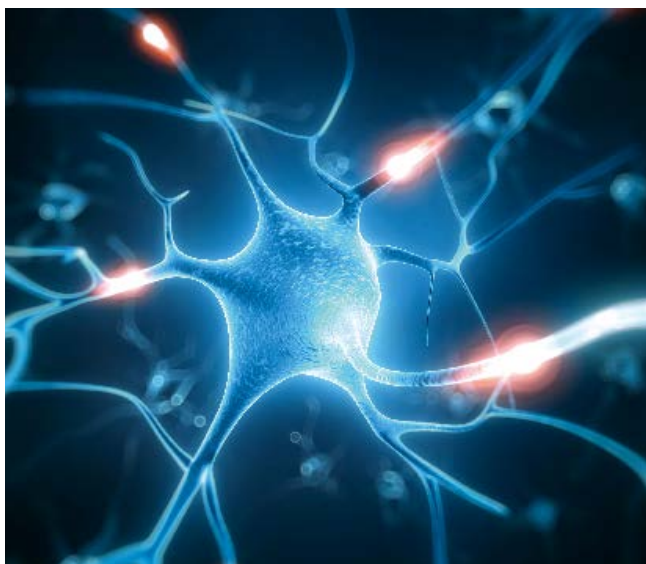
Pour les Espagnols du xvi^e siècle, l'Empire inca est bien l'Eldorado: une source quasi inépuisable d'or et d'argent. Mais on oublie souvent un acteur majeur de ce pillage: la coca. Cette plante permit aux conquérants d'envoyer les Indiens au fond des mines. Et de finir de déstructurer la société andine.

À LA UNE

P.27

NEUROSCIENCES

LES NEURONES DU SOUVENIR



P.28

COMMENT UN SOUVENIR EN APPELLE UN AUTRE

Alcino J. Silva

Observer des souvenirs se former dans le cerveau, et même voir deux souvenirs se lier entre eux: c'est aujourd'hui possible grâce à de nouveaux types de microscopes.

P.38

DES NEURONES EN PLUS POUR UNE MÉMOIRE BIEN RANGÉE

Mazen A. Kheirbek et René Hen

Chaque jour, le cerveau adulte produit de nouveaux neurones. Ces cellules nous aident à distinguer un souvenir d'un autre – une découverte qui fournit une piste pour traiter les troubles anxieux.

RENDEZ-VOUS

P.80

LOGIQUE & CALCUL

121, 404 ET AUTRES NOMBRES PALINDROMES

Jean-Paul Delahaye

Visuellement faciles à identifier, ces nombres offrent des problèmes de tous niveaux et quelques défis informatiques. Les mathématiciens ont aussi trouvé de beaux résultats: ainsi, tout nombre entier peut s'écrire comme la somme de trois nombres palindromes.

P.86

ART & SCIENCE

Let it bee

Loïc Mangin



P.88

IDÉES DE PHYSIQUE

Décollages à chaud

Jean-Michel Courty

et Édouard Kierlik

P.92

CHRONIQUES DE L'ÉVOLUTION

Pourquoi le maïs vient du pop-corn

Hervé Le Guyader

P.96

SCIENCE & GASTRONOMIE

Bavarois sans crème

Hervé This

P.98

A PICORER

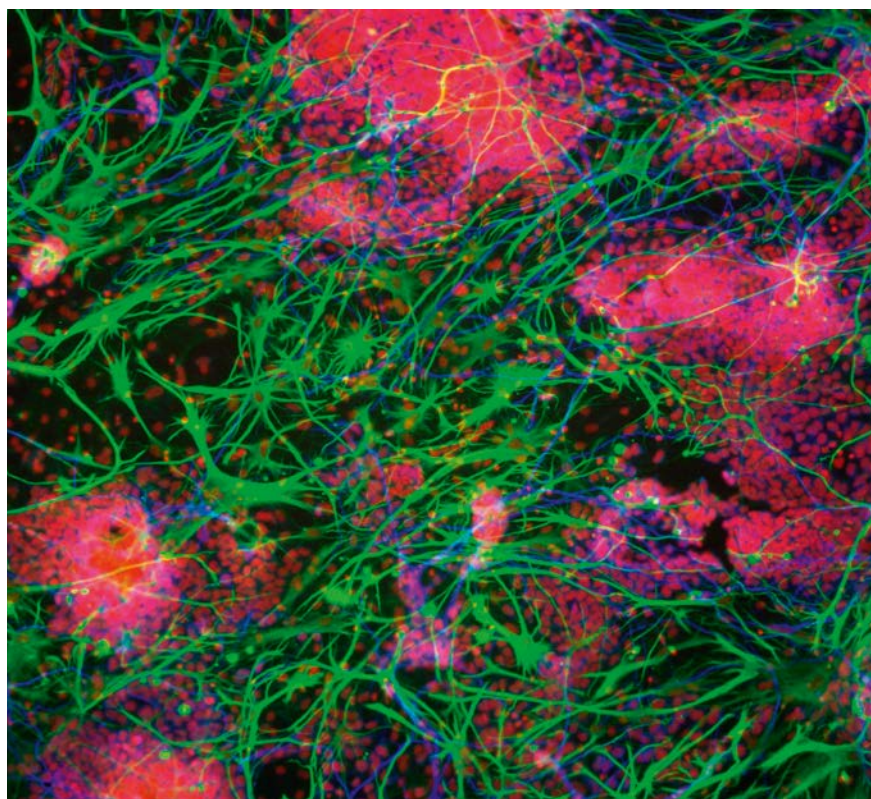
A

CTUALITÉS

P.6 Échos des labos
P.18 Livres du mois
P.20 Agenda
P.22 Homo sapiens informaticus
P.24 Cabinet de curiosités sociologiques

NEUROSCIENCES

CELLULES SOUCHES: UN TRAITEMENT CONTRE LA MALADIE DE PARKINSON?



Dans un milieu approprié, des neurones (en bleu: leurs prolongements, en rouge: leur noyau, en vert: d'autres cellules) se développent à partir de cellules souches, ici d'embryons humains, mais aussi de cellules souches produites à partir de la peau. Une piste pour réparer les dégâts causés par la maladie de Parkinson.

Des cellules souches issues de cellules de peau humaine ont permis de soigner des singes aux symptômes parkinsoniens. L'espoir de proposer le traitement à l'homme est grand.

Paul, 70 ans, présente tous les symptômes de la maladie de Parkinson, qui concerne environ 150 000 personnes en France: diminution de l'activité motrice, lenteur des mouvements, grande fatigue, tremblements et rigidité. Les causes de la pathologie demeurent inconnues, mais on sait qu'elle est due à la mort progressive des neurones dopaminergiques qui prennent naissance dans la substance noire et se projettent dans le striatum, deux régions au cœur du cerveau. Alors pourquoi ne pas remplacer ces neurones?

Ce rêve des neurobiologistes est peut-être en train de devenir réalité grâce à la transplantation de «bébés» neurones issus de cellules souches dites pluripotentes. Ces dernières se différencient en effet en n'importe quel type de cellules, donc potentiellement en neurones dopaminergiques. L'équipe de Jun Takahashi, de l'université de Kyoto, et ses collègues viennent de franchir une étape importante vers la thérapie cellulaire en utilisant des cellules souches humaines pour soigner des singes aux symptômes parkinsoniens.

Remplacer les neurones perdus par des cellules souches est particulièrement

indiqué dans le cas de la maladie de Parkinson, les symptômes apparaissant lorsqu'environ 70% des neurones dopaminergiques de la substance noire sont morts. Les premiers essais de transplantation remontent aux années 1990, avec des cellules souches de fœtus humains issus d'avortements thérapeutiques. Les patients traités ont vu leurs symptômes moteurs diminuer et les neurones greffés ont survécu, parfois jusqu'à vingt ans, sans dégénérer. Mais cultiver en laboratoire des cellules souches humaines issues de fœtus était délicat...

Or en 2006, Shinya Yamanaka, de l'université de Kyoto, et ses collègues ont créé des cellules souches, dites pluripotentes induites (cellules iPS), à partir de cellules adultes: ils ont reprogrammé des cellules de peau pour les transformer en leurs ancêtres embryonnaires. Dès lors, la

thérapie cellulaire avec des cellules souches humaines induites était envisageable chez l'homme.

Jun Takahashi et ses collègues ont donc créé, à partir de cellules de peau prélevées sur des humains adultes, 7 lignées de cellules souches induites dont 4 provenaient de personnes en bonne santé et 3 de patients parkinsoniens. Puis, à partir de ces lignées, ils ont produit des cellules « progénitrices » de neurones dopaminergiques. Au bout de 28 jours, les chercheurs ont transplanté ces progéniteurs dans le striatum de macaques intoxiqués pendant 12 semaines au MPTP, une molécule qui détruit spécifiquement les neurones dopaminergiques. Les 11 singes présentaient les symptômes moteurs caractéristiques de la pathologie et se déplaçaient peu; 4 ont reçu les cellules progénitrices induites des hommes sains, 4 celles des patients parkinsoniens et 3, les témoins, n'ont eu qu'une solution sans cellules souches. Et l'on y associait un traitement immunosuppresseur pour éviter tout rejet.

Douze mois après la greffe, les 8 animaux ayant reçu les progéniteurs dopaminergiques se déplaçaient mieux, et plus vite, et avaient de meilleures aptitudes cognitives et motrices, avec une amélioration de leur « score » symptomatique de 40 à 55 %, que les cellules progénitrices soient issues des patients ou des personnes saines. Ces bénéfices ont perduré deux ans. Les scientifiques ont aussi suivi le devenir des greffons par imagerie cérébrale: les neurones ont bien survécu deux ans, ont émis des prolongements et ont sécrété de la dopamine. Et aucune inflammation ni tumeur n'ont été détectées dans le cerveau des singes.

Jun Takahashi et ses collègues espèrent débiter un essai clinique chez l'homme à la fin de l'année prochaine. Aucun traitement immunosuppresseur ne sera nécessaire si on utilise les cellules adultes du patient pour créer ses propres cellules souches induites et neurones dopaminergiques. Même si ces derniers coûtent cher à produire et peuvent mettre plusieurs mois à se développer, le traitement est très prometteur. En effet, Paul, véritable patient du neurochirurgien Ivar Mendez, de l'université de Saskatchewan, au Canada, allait beaucoup mieux huit ans après avoir été transplanté avec des cellules dopaminergiques issues de fœtus. ■

BÉNÉDICTE SALTHUN-LASSALLE

T. Kikuchi et al., *Nature*, vol. 548, pp. 592-596, 2017

ARCHÉOLOGIE

45 000 ans d'impact sur les forêts tropicales

Des chasseurs-cueilleurs à l'urbanisation moderne, l'homme modifie depuis longtemps les forêts tropicales. Une équipe de l'institut Max-Planck, en Allemagne, a réalisé la première synthèse d'études concernant l'empreinte humaine sur ces écosystèmes à l'échelle mondiale. Stéphen Rostain nous explique l'évolution de cet impact.



Propos recueillis par CLÉMENT DUFRENNE

STÉPHEN ROSTAIN
directeur de recherche
du CNRS
à l'université Paris 1
Panthéon-Sorbonne

En 2017, quel est l'état des forêts tropicales au niveau mondial ?

Aujourd'hui, avec notamment l'exploitation de l'huile de palme à Bornéo, les infrastructures minières en Amérique du Sud et l'urbanisation galopante, on observe une inquiétante déforestation. Par exemple, en Amazonie, environ 15 % de la forêt a disparu en quarante ans – l'équivalent en superficie de la France et de la Grande-Bretagne. Et l'on continue à puiser les ressources et les richesses de ces forêts.

À quelle période sont apparues les premières exploitations des forêts tropicales ?

Les traces archéologiques montrent que cela a commencé avec l'arrivée de l'homme moderne en Asie du Sud-Est, il y a 45 000 ans. Rapidement, celui-ci a brûlé des parties de la forêt pour mettre en place ses activités d'« agroforesterie ». Elles consistent à favoriser certaines plantes, à en replanter d'autres... Ces populations de chasseurs-cueilleurs préparaient ainsi leurs futurs passages afin de récolter les fruits qui faisaient partie de leur alimentation. Elles ont peut-être aussi été responsables de l'introduction de certaines espèces ou de la disparition d'autres, telles que les mastodontes en Amazonie.

Comment cette exploitation a-t-elle évolué par la suite ?

Il existe plusieurs vagues d'exploitation de la forêt tropicale. L'équipe de l'institut Max-Planck différencie trois époques : après la période d'« agroforesterie » des populations nomades, une « petite » agriculture s'est mise en place au début de l'Holocène, il y a près de 10 000 ans. Les premières traces sont observées en Nouvelle-Guinée. Les humains ont domestiqué les plantes locales (patates

douces, manioc, bananes, etc.), mais aussi les animaux (poules...), en s'adaptant aux rythmes saisonniers de la forêt. L'agriculture s'est ensuite intensifiée, avec une déforestation pour laisser place aux cultures. Cette période s'est accompagnée d'une forte urbanisation. On retrouve, grâce à des mesures par lidar, des anciennes habitations encore occultées sous la forêt en Asie du Sud-Est et en Amérique.

Quelles sont les conséquences de cette activité humaine ?

Avant l'arrivée des sociétés industrielles, l'intervention de l'homme a été peu destructrice, même si on observe des changements de dominance d'espèces. Par exemple, il pouvait y avoir une concentration plus forte en bambous, cacaotiers... parce qu'on avait favorisé la prolifération de ces plantes. Cela a changé l'aspect des forêts, mais ne les a pas détruites. Bien au contraire, les populations autochtones avaient des modes d'exploitation qui permettaient, voire favorisaient, la régénération forestière après leur départ. Depuis, nous sommes passés à une exploitation beaucoup plus intensive et destructrice.

Quelles leçons peut-on tirer de l'exploitation passée des forêts ?

L'érosion des sols, les coulées de boue ou les inondations sont, aujourd'hui, le résultat d'une mauvaise gestion moderne des forêts tropicales. Cette étude nous montre qu'une exploitation mesurée, qui laisse aux forêts une chance de se régénérer, est possible. À Angkor, au Cambodge, des infrastructures assuraient la bonne distribution et évacuation de l'eau. Certaines communautés mayas « jardinaient » la forêt selon des pratiques efficaces contre l'érosion des sols. Ces pratiques peuvent inspirer nos sociétés urbaines modernes. Il est crucial d'apprendre à écouter le savoir millénaire des communautés autochtones. ■

P. Roberts et al., *Nature Plants*, vol. 3, article 17093, 2017

ARCHÉOLOGIE

UNE NOUVELLE CITADELLE ANNULAIRE VIKING

La discrète trace ronde visible dans un champ de l'île de Seeland, au Danemark, correspond à l'une des forteresses du roi viking surnommé Harald à la dent bleue.

Le pied à peine posé en Angleterre, Guillaume le Conquérant, au XI^e siècle, bâtit un château de bois. Les Normands maîtrisèrent ensuite le territoire anglais à l'aide d'un réseau stratégique de 500 mottes castrales (des tertres). Au X^e siècle, Harald à la dent bleue, l'allié danois de l'arrière grand-père de Guillaume, ne procéda pas autrement pour unifier le Danemark en un royaume. Mais au lieu de mottes castrales, il construisit de curieuses citadelles annulaires, qu'il installa en nombre à la croisée de toutes les routes et voies d'eau importantes des zones riches de son territoire. Étonnamment, on n'avait jamais trouvé une telle forteresse dans le sud de l'île de Seeland, pourtant l'une des plus riches régions scandinaves. C'est désormais chose faite: Søren Sindbæk, de l'université d'Aarhus, au Danemark, et deux collègues ont identifié une structure parfaitement circulaire dans un champ nommé Borgring (littéralement «château annulaire»), non loin de la ville de Køge, à une quarantaine de kilomètres au sud de Copenhague.

Lorsqu'ils ont commencé leur enquête sur la forteresse présumée, les chercheurs disposaient du plan exact des citadelles annulaires vikings. On le connaît en effet grâce à la forteresse particulièrement bien conservée de Trelleborg, au Danemark: remparts circulaires en terre et gazon, renforcés du côté interne par des assemblages de poutres verticales et horizontales; bardage extérieur du rempart en rondins; fossé en V circulaire; rues pavées de bois reliant à angle droit des portails placés au nord, au sud, à l'est et à l'ouest; quatre cadrans contenant chacun quatre maisons délimitant une cour.

Les chercheurs ont donc recherché ces éléments. À l'aide d'un magnétomètre, ils ont d'abord démontré le caractère presque parfaitement circulaire de la structure. Ils ont ensuite établi que les remparts avaient été édifiés à l'aide de mottes de terre ou de gazon et d'argile. Des lignes radiales en marquent l'emplacement qu'ils interprètent comme les traces d'anciennes charpentes de renfort sous-jacentes aux remparts. Larges de 10-11 mètres, ces derniers forment un cercle d'un diamètre moyen de



Ci-dessus, cette restitution à échelle réduite d'une forteresse viking circulaire du type de celle de Trelleborg montre l'un de ses portails et le bardage de poutres qui en protégeait les remparts. Ci-dessous, la flèche jaune indique où se trouve la trace visible en télémétrie lidar de la citadelle découverte dans un champ nommé Borgring, qui signifie littéralement «château annulaire».



122 mètres. À l'extérieur des remparts, les chercheurs ont retrouvé des trous de poteaux en bois massif d'une quarantaine de centimètres de diamètre, dessinant un cercle d'un diamètre extérieur de 144 mètres: les restes du bardage.

Afin d'être sûrs, les chercheurs devaient aussi identifier au moins deux portails situés en des points cardinaux. En suivant le bardage le long du mur nord-ouest, ils sont parvenus en un point où il plonge brusquement vers l'intérieur: la fouille a alors révélé les restes de poteaux brûlés, puis d'un portail incendié large d'environ 5 mètres, ainsi que de planches posées à plat sur le sol. Dès lors, ils ont pu rechercher par sondage un autre portail situé à angle droit. Ils ont choisi de rechercher le portail est, et l'ont effectivement trouvé (incendié lui aussi) à l'endroit attendu.

La datation par le radiocarbone de deux fragments de bois place la construction entre 893 et 1017, ce qui est compatible avec la très courte période de construction des citadelles circulaires, située vers 975-980.

Ainsi, il se confirme que Harald à la dent bleue a bien stabilisé son royaume en établissant très vite un maillage stratégique de forteresses rondes en rondins: le premier réseau Bluetooth en quelque sorte! ■

FRANÇOIS SAVATIER

H. Goodchild *et al.*, *Antiquity*, vol. 91(358), pp. 1027-1042, 2017

TRIGONOMETRIE BABYLONIENNE ?

Une tablette d'argile de 3 700 ans, retrouvée au début du xx^e siècle dans le sud de l'Iraq, fait en ce moment débat : à quoi servait-elle ? Composée de quatre colonnes et quinze lignes, elle contient une collection de triplets de Pythagore, des entiers vérifiant la relation $a^2 + b^2 = c^2$ entre côtés d'un triangle rectangle. Daniel Mansfield, de l'université de la Nouvelle-Galles du Sud, en Australie, avance dans une étude que la tablette servait à des calculs trigonométriques, bien avant leur introduction par les Grecs. Une idée séduisante, mais très spéculative d'après la plupart des spécialistes.

UNE ÉTOILE EN ORBITE RELATIVISTE

Les anomalies observées dans l'orbite de Mercure autour du Soleil s'expliquent par d'infimes effets de correction de la relativité générale par rapport à la gravitation newtonienne. Une équipe menée par Marzieh Parsa, de l'université de Cologne, vient d'observer un effet similaire, de quelques pourcents par rapport à l'orbite newtonienne, pour l'étoile S2 tournant autour du trou noir supermassif au centre de la Voie lactée, à 26 000 années-lumière de nous.

SCHIZOPHRÉNIE ET TEMPS TROUBLÉ

La schizophrénie touche 1 sur 600 000 personnes en France et 0,7 % de la population mondiale. L'équipe d'Anne Giersch, de l'université de Strasbourg, a constaté, chez les patients atteints, un lien entre les troubles de la personnalité, relatifs à la notion du « soi », et ceux de la perception du temps. Les chercheurs ont proposé des tests cognitifs à une cinquantaine de personnes. Celles souffrant le plus des troubles du « soi » avaient aussi le plus de mal à lier des événements discontinus et donc à les intégrer dans un continuum temporel.

MACROPHAGES ET TESTICULES

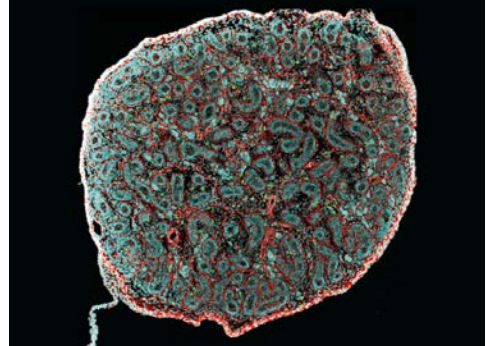
En plus de participer, avec le reste du système immunitaire, à la lutte contre les agressions extérieures, les macrophages jouent un rôle de gardien de la fertilité en modérant la réponse immunitaire. L'équipe de Michael Sieweke, du Centre d'immunologie de Marseille-Luminy, a précisé comment ces cellules gardiennes se mettent en place.

Les testicules assument un double rôle : libérer des hormones masculines telles que la testostérone et produire les cellules reproductrices – les spermatozoïdes. Or ceux-ci apparaissent à la puberté, mais l'éducation du système immunitaire visant à ne pas éliminer de cellules du soi se développe bien avant ce stade. Les spermatozoïdes pourraient donc ne pas être reconnus comme tels et détruits. C'est grâce à l'intervention de deux types de macrophages testiculaires, dont l'origine vient d'être caractérisée, que la fonction des testicules est préservée.

Par des techniques de traçage cellulaire, les chercheurs ont montré que deux compartiments du testicule sont peuplés de macrophages : le compartiment interstitiel, qui contient aussi les cellules productrices de testostérone, et le compartiment tubulaire, autour des tubes séminifères qui abritent les précurseurs des spermatozoïdes. Et leurs populations de macro-

LES GARDIENS DE LA FERTILITÉ

Sur cette coupe de testicule de souris, les tubes séminifères sont marqués en rouge et les macrophages en vert.



phages sont distinctes. Les macrophages interstitiels sont présents dès le stade *in utero* et sont issus de progéniteurs embryonnaires, tandis que les macrophages dits périvitubulaires n'apparaissent qu'à la puberté et proviennent de progéniteurs hématopoïétiques de la moelle osseuse, lieu de synthèse des cellules immunitaires. Reste à élucider les mécanismes d'immunosuppression induits par ces macrophages et qui autorisent la production de spermatozoïdes. Après quoi, on pourra peut-être agir sur certaines infertilités dues à des surréactions immunitaires. ■

NOËLLE GUILLON

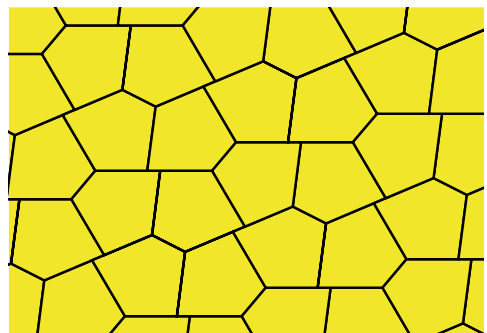
N. Mossadegh-Keller et al., *Journal of Experimental Medicine*, en ligne le 7 août 2017

MATHÉMATIQUES

PAVAGES AUX PENTAGONES : FIN

Quelles formes peuvent recouvrir un plan lorsqu'on les répète les unes à côté des autres dans un motif sans fin, nommé pavage ? Les Grecs anciens avaient déjà prouvé que les seuls polygones réguliers qui peuvent paver le plan sont les triangles, les quadrilatères et les hexagones.

Une nouvelle démonstration de Michaël Rao, du CNRS et de l'École normale supérieure de Lyon, met aujourd'hui un point final à la classification des polygones convexes (réguliers ou non) qui couvrent le plan en conquérant le dernier bastion : les pentagones, qui ont résisté pendant 99 ans. Dans sa démonstration assistée par ordinateur, Michaël Rao a identifié 371 façons d'assembler les sommets des pentagones entre eux pour former un pavage, et les a vérifiées une par une.



L'un des 15 types de pavages pentagonaux du plan.

À partir de conditions géométriques simples, par exemple que la somme des angles en chaque sommet doit être égale à 360 degrés, Michaël Rao a déterminé que seules les 15 familles de pentagones déjà connues (la dernière n'a été identifiée qu'en 2015) conviennent. ■

C. D.

M. Rao, en ligne le 1^{er} août 2017, <https://arxiv.org/abs/1708.00274>

EN IMAGE

UN DINOSAURE PARFAITEMENT FOSSILISÉ RÉVÈLE SES SECRETS

Un monstre de pierre de une tonne et demie, de cinq mètres de long et muni de quatre rangées de pointes sur le dos: telle est l'impressionnante découverte réalisée en 2011 dans une mine du Canada, dans la province de l'Alberta. Près de 7000 heures de travail plus tard, voilà le colosse prêt à nous révéler ses secrets.

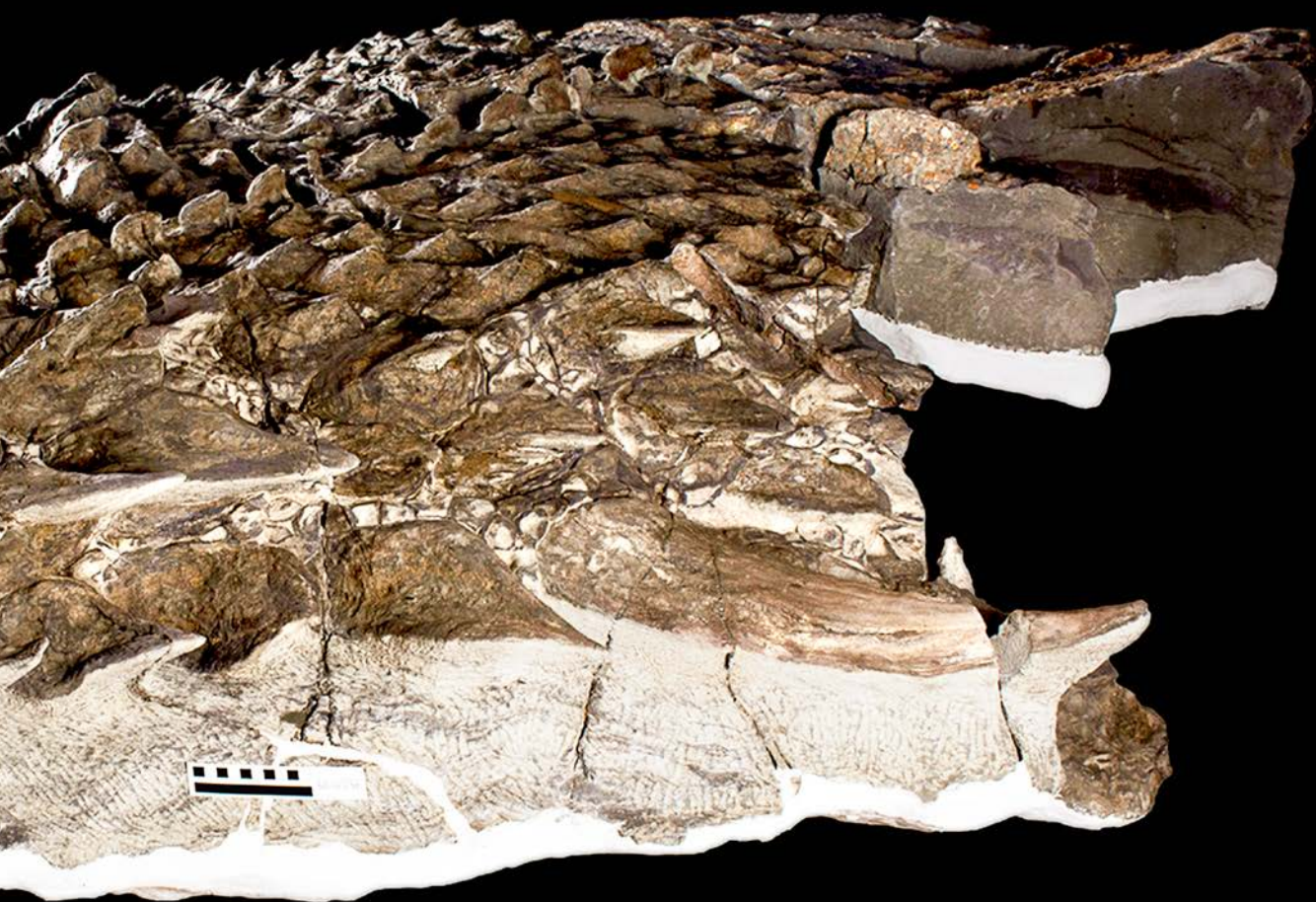
Ce fossile est celui d'un nodosaure (*Borealopelta markmitchelli*), dinosaure herbivore cuirassé de la famille des ankylosaures, probablement mort noyé il y a quelque 110 millions d'années et dont les restes, après avoir traversé les âges, se trouvent aujourd'hui dans un très bon état de conservation. Une chance «aussi faible que de gagner au loto», selon les paléontologues qui se sont occupés de l'animal.

Pendant plus de cinq ans, Caleb Brown, du musée royal Tyrrell de paléontologie, au Canada, et ses collègues ont restauré et analysé le fossile. Un travail minutieux qui leur a permis d'obtenir des détails sur les caractéristiques physiques de l'animal, mais aussi sur son mode de vie. Par exemple, en analysant la couleur de la peau du reptile, les chercheurs se sont aperçus que sa pigmentation était plus foncée sur le dos que sur la face ventrale. Ce type de camouflage, fréquent chez de nombreuses espèces, traduit souvent l'existence de prédateurs. Ainsi, et de façon surprenante étant donné sa taille et son imposante armure, *Borealopelta markmitchelli* était probablement la proie de carnivores plus gros que lui. ■

DONOVAN THIEBAUD

C. M. Brown et al., *Current Biology*, vol. 27, pp. 2514-2521, 2017





CLIMATOLOGIE

LE MÉTHANE ARCTIQUE, FAUSSE MENACE CLIMATIQUE?

La putréfaction de la matière organique saturant les sols arctiques en voie de dégel entraînera-t-elle une énorme émission de méthane (CH_4)? Pour le savoir, Xavier Faïn, de l'Institut des géosciences de l'environnement, à Grenoble, et ses collègues ont restitué les émissions atmosphériques de CH_4 lors d'un ancien réchauffement climatique.

D'après les calculs actuels, les sources géologiques de CH_4 (fonte de pergélisols, tourbières...) dégagent 52000 tonnes de méthane par an. Toutefois, la concentration atmosphérique de méthane conduit à un résultat différent de celui donné par la compilation de toutes les sources de CH_4 . Aussi les climatologues soupçonnent-ils depuis longtemps qu'une partie de l'émission de CH_4 par les sols dégelés passe inaperçue. D'où l'intérêt d'une comparaison avec une autre époque de réchauffement climatique.

Les chercheurs ont choisi l'«événement du Dryas récent», un brusque réchauffement de l'atmosphère de l'hémisphère Nord d'il y a 11600 ans environ; comme celui d'aujourd'hui,

ce réchauffement a dégelé de vastes étendues de pergélisols. Pour déterminer la concentration de CH_4 d'origine géologique alors présente dans l'atmosphère, ils ont prélevé dans le glacier Taylor, en Antarctique, une série de gros volumes de glace datant de 11715, 11559, 11515, 11453 et 11357 ans avant le présent. Après y avoir mesuré la concentration résiduelle de carbone 14, ils en ont déduit, à l'aide d'un estimateur statistique, les concentrations de méthane atmosphérique aux cinq dates citées. Résultat: les émissions géologiques de méthane sont restées constantes, aux environs de 15000 tonnes par an, pendant tout l'événement du Dryas récent.

Si la comparaison avec le réchauffement actuel tient, ce résultat implique que les estimations actuelles exagèrent les émissions naturelles de CH_4 d'un facteur 3 à 4. Corrélativement, il implique que les émissions de méthane dues aux activités humaines sont très sous-estimées... ■

P.S.

V. V. Petrenko *et al.*, *Nature*, vol. 548, pp. 443-445, 2017

EN BREF

LES NEURONES DE LA DOMINANCE

Et s'il suffisait d'activer quelques neurones pour transformer un introverti en mâle dominant? C'est ce que viennent de réussir sur des souris Tingting Zhou, de l'Institut biologique des sciences de Shanghai, et ses collègues. En enregistrant l'activité cérébrale de couples de rongeurs face à face dans un tube, les chercheurs ont détecté des neurones qui s'activaient davantage en cas de comportement dominant. Puis, à l'aide d'une technique dite d'optogénétique, ils ont activé spécifiquement ces neurones chez des mâles dominés, qui ont alors contraint leur congénère à reculer. Les neurones découverts sont situés dans le cortex préfrontal dorsomédian, une zone impliquée dans l'évaluation des coûts et des bénéfices, ainsi que dans celle des efforts à fournir.

Direction de l'innovation et des relations avec les entreprises

Organisme de formation continue

cnrs
formation
entreprises

→ 200 formations technologiques courtes proposées par le CNRS sur ses plateformes de recherche

pour les ingénieurs et les techniciens

→ Domaines de formation

Big data, robotique, énergie, matériaux, biologie, microscopie, spectrométrie, RMN... et plus encore

+ de 1100 stagiaires formés chaque année



www.cnrs.fr

Découvrez nos stages sur
cnrsformation.cnrs.fr



contact : cfe.contact@cnrs.fr ou +33 (0)1 69 82 44 55

[@CNRS_CFE](https://twitter.com/CNRS_CFE)

PHYSIQUE

LE PIÈGE DU FOURMILION

Pour capturer sa proie, la larve de fourmilion creuse un trou dans le sable. La fourmi qui y pénètre glisse sur les parois et ne peut plus remonter. Jérôme Crassous, de l'université de Rennes, et ses collègues ont analysé les caractéristiques physiques de ce piège.

Les chercheurs ont reproduit en laboratoire la configuration du piège à l'aide d'objets de différentes masses posé sur un plan incliné de billes de verre. Ils ont observé que seuls ceux de masse intermédiaire produisaient une pression et des forces de frottement adaptées pour glisser dans le trou. Ainsi, un insecte très léger ne perturberait pas assez la structure granulaire pour provoquer une avalanche. À l'inverse, un insecte très lourd formerait son propre creux dans le sable et trouverait alors un appui pour sortir du trou. La fourmi, en revanche, ne peut y échapper! ■

G. D.

J. Crassous et al., *Phys. Rev. Lett.*, vol. 119, 058003, 2017

PHYSIQUE DES PARTICULES

MINIDÉTECTEUR DE NEUTRINOS

La détection des neutrinos, particules élastiques, est très difficile et nécessite d'immenses dispositifs. Aux États-Unis, une équipe de physiciens américains et russes a pour la première fois réussi à détecter des neutrinos avec un appareil dont la taille ne dépasse pas celle d'un extincteur. Les chercheurs se sont intéressés à un type particulier d'interactions des neutrinos de basse énergie avec les noyaux des atomes du détecteur, type d'interactions que l'on n'avait jamais mesuré jusqu'à présent. Bien qu'elles soient plus fréquentes que les autres, ces interactions constituaient un défi expérimental: les déceler revient à mesurer le recul d'une boule de bowling heurtée par une balle de tennis de table.

La miniaturisation du système est un grand pas en avant. Des minidétecteurs pourraient notamment servir au contrôle de la prolifération des armes nucléaires, les matières radioactives étant émettrices de neutrinos à des taux différents selon leur nature. ■

D. F.

D. Akimov et al., *Science*, en ligne le 3 août 2017

ASTROPHYSIQUE

MUSE... ET LE CIEL DEVIENT PLUS NET



La nébuleuse planétaire NGC 6369 est le résultat de l'explosion d'une étoile qui a dispersé son gaz et sa poussière dans son voisinage. Les images ont été prises par l'instrument Muse sans le système d'optique adaptative (à gauche) et avec (à droite).

Les images obtenues par le VLT (le Very Large Telescope) de l'Observatoire européen austral (ESO), situé au sommet du Cerro Paranal, au Chili, vont devenir encore plus spectaculaires et riches d'informations pour les astrophysiciens. En effet, Yepun, le quatrième télescope du VLT (dont le nom est celui de la planète Vénus en langue mapuche) a bénéficié d'une amélioration importante de son système optique. L'instrument Muse placé à l'un de ses foyers exploite maintenant ce système et, déjà, les premières images sont d'une netteté exceptionnelle.

Dans le domaine de l'observation astronomique depuis le sol, les turbulences atmosphériques constituent un facteur limitant pour la qualité des images. Elles tendent, par le phénomène de réfraction, à dévier les rayons lumineux et à produire un certain flou dans les images. Une façon de s'en abstraire est d'envoyer les télescopes dans l'espace, comme pour *Hubble* ou le futur *James-Webb*. Une autre solution est d'utiliser un système d'optique adaptative: le miroir secondaire du télescope est déformé en temps réel pour compenser les effets des turbulences.

Un tel dispositif a été installé sur Yepun. Pour obtenir le profil des turbulences, quatre lasers de 22 watts excitent les atomes de sodium dans la haute atmosphère. Ces derniers forment ainsi quatre «étoiles artificielles» dont les images permettent de calculer, à chaque milliseconde, les déformations à corriger.

Combiné au système d'optique adaptative, l'instrument Muse a déjà obtenu des images spectaculaires de nébuleuses planétaires telles que IC 4406 ou NGC 6369 (ci-dessus). Muse, opérationnel depuis 2014, est composé d'un ensemble de spectrographes fonctionnant dans les longueurs d'onde du visible. L'une de ses missions est l'étude des galaxies jeunes, situées dans l'Univers lointain et donc peu lumineuses. Avec le système d'optique adaptative, l'instrument pourra observer les galaxies en formation, parmi les moins brillantes.

Le miroir d'optique adaptative de Yepun mesure environ un mètre de diamètre, ce qui en fait le plus grand jamais construit. Il a nécessité des techniques de pointe qui seront cruciales pour le miroir d'optique adaptative de 2,4 mètres de l'ELT, le futur télescope géant de l'ESO. ■

S. B.

Communiqué de l'ESO : http://bit.ly/PLS480_MUSE

PHYSIQUE DES PARTICULES

L'INTERACTION DE DEUX PHOTONS ENFIN DÉTECTÉE

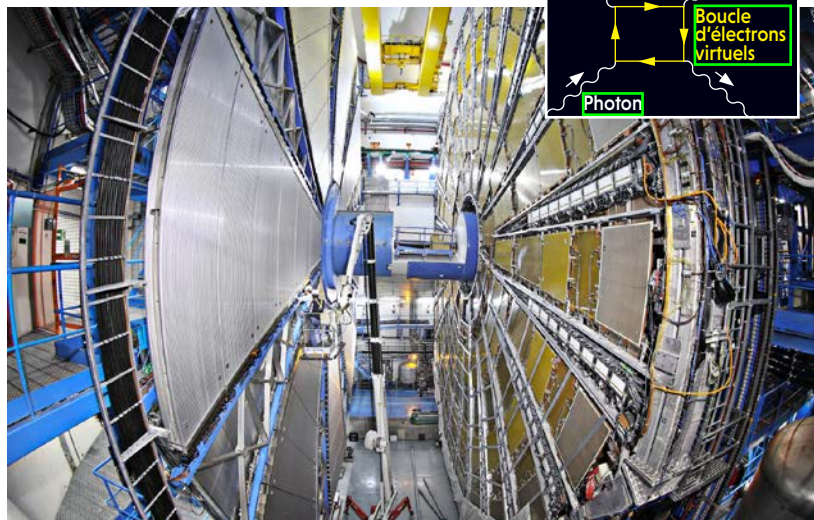
Grâce à des collisions entre des ions de plomb, l'expérience *Atlas*, au Cern, a mis en évidence un phénomène prévu il y a près de 80 ans.

En 1936, deux physiciens théoriciens allemands, Werner Heisenberg et Hans Heinrich Euler, ont prévu l'existence d'un processus rare, la diffusion élastique photon-photon, c'est-à-dire l'interaction d'un photon avec un autre photon. La collaboration *Atlas*, au collisionneur LHC du Cern, l'a enfin mis en évidence.

L'idée de l'interaction de deux photons a de quoi surprendre, car les équations de Maxwell pour l'électromagnétisme ne prévoient pas d'interaction de la lumière avec elle-même. Et en effet, lorsque deux faisceaux lumineux se croisent, ils se traversent et poursuivent leur chemin sans modification. Dès 1934, avec le développement de la physique quantique, Heisenberg et Euler ont procédé à la réécriture de la théorie électromagnétique sous sa forme quantifiée, préfigurant la théorie de l'électrodynamique quantique (nommée QED, le sigle anglais) développée dans les années 1940. Les deux chercheurs ont alors suggéré que, par des effets non linéaires, deux photons pouvaient interagir.

Comment la QED décrit-elle ce processus? Deux électrons ou positrons (antiparticules des électrons) interagissent par l'échange d'un ou plusieurs photons: c'est la traduction, dans le langage quantique, de l'interaction électromagnétique. De la même façon, deux photons peuvent interagir *via* l'échange d'un électron (ou d'un positron, et plus généralement de toute particule portant une charge électrique). Le point clé ici est que les électrons portent une charge électrique qui doit être conservée. Par conséquent, le premier photon devra renvoyer l'électron reçu du deuxième photon, ce qui produit un aller-retour d'électrons. En QED, on parle alors d'un échange en forme de boîte (ou en boucle) qui comprend des électrons et des positrons. Dans cet effet purement quantique, les particules échangées n'apparaissent que dans un laps de temps très court, correspondant à la durée de l'interaction: on parle de particules virtuelles.

La mise en évidence expérimentale de ce processus est cependant un défi. En effet, la probabilité que deux photons interagissent de la sorte est très faible et requiert un flux important de photons pour espérer qu'une seule



Les détecteurs d'*Atlas* (ouvert ici, lors d'une phase de maintenance) ont permis d'identifier des interactions photon-photon, un processus de très faible probabilité (en médaillon).

10¹² degrés

C'EST LA TEMPÉRATURE ATTEINTE PAR LE PLASMA DE QUARKS ET DE GLUONS FORMÉ LORS DE LA COLLISION D'IONS DE PLOMB AU LHC. CET ÉTAT DE LA MATIÈRE ÉTAIT AUSSI CELUI DE L'UNIVERS MOINS D'UNE MICROSECONDE APRÈS LE BIG BANG.

diffusion ait lieu. Même les lasers les plus intenses restent insuffisants pour que l'on espère voir un photon interagir avec un autre.

La collaboration *Atlas* a exploité une autre approche pour mettre en évidence la diffusion photon-photon. Le LHC accélère des protons, mais il fonctionne pendant certaines périodes comme un collisionneur d'ions de plomb. L'objectif principal de ces collisions est de former un plasma de quarks et de gluons, un état de la matière qui était celui de l'Univers dans ses premiers instants. Or l'utilisation d'ions de plomb a aussi un intérêt pour le phénomène qui nous intéresse ici.

Les champs électromagnétiques associés aux ions accélérés et en collision sont si intenses qu'ils peuvent quasiment être comparés à des faisceaux de photons. Dans les conditions expérimentales du LHC, la possibilité de faire interagir deux photons est ainsi potentiellement à la portée d'*Atlas*... même si elle reste plus de 100 millions de fois plus faible que la probabilité d'interaction, dite hadronique, entre deux ions de plomb. Après analyse, les physiciens ont isolé 13 événements qui correspondraient à de la diffusion élastique photon-photon. ■

S.B.

Collaboration *Atlas*, *Nature Physics*, en ligne le 14 août 2017

L'HOMME MODERNE À SUMATRA

L'homme anatomiquement moderne aurait quitté l'Afrique il y a quelque 80 000 ans. Mais il n'y avait pas de trace de son passage à cette époque dans les îles indonésiennes. Kira Westaway, de l'université de Sydney, et ses collègues ont daté deux fossiles de dents appartenant à l'homme moderne et retrouvées dans la grotte de Lida Ajer, dans l'ouest de l'île de Sumatra. Par une approche de datation multidisciplinaire, ils ont déterminé que les fossiles datent d'environ 68 000 ans. L'homme moderne est donc bien passé par Sumatra.

MOINS SEXY GRÂCE AU PHTHALATE

Le phtalate DEHP, utilisé comme plastifiant, est un polluant connu pour perturber le développement de l'appareil reproducteur de la souris mâle, qu'elle ait été exposée au stade prénatal ou postnatal. Carlos Dombret, de l'institut de biologie Paris Seine, et ses collègues ont montré que des souris mâles adultes exposées à de faibles doses de DEHP émettaient moins de vocalisations ultrasonores. Ces mâles étaient alors moins attractifs pour les femelles sexuellement réceptives. Les chercheurs ont ensuite identifié un récepteur hormonal dont l'expression est réduite chez ces rongeurs mâles.

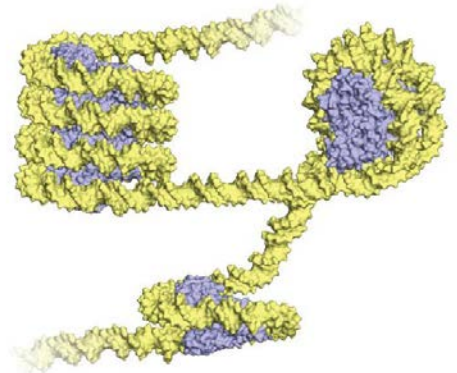
UNE NOUVELLE CAMÉRA ULTRARAPIDE

Le 1^{er} septembre dernier, onze pays d'Europe ont inauguré à Hambourg le plus puissant laser à rayons X à électrons libres (XFEL). Avec des impulsions de quelques centaines de femtosecondes (soit 10^{-15} seconde) pour des longueurs d'onde de 0,05 à 4,7 nanomètres, qui permettent une résolution atomique, le dispositif sera capable de filmer des molécules en mouvement, des virus, des réactions chimiques...

À L'ORIGINE DE L'ADN REPLIÉ

Les archées, des organismes unicellulaires, forment un domaine du vivant distinct de ceux des bactéries et des eucaryotes (organismes dont les cellules sont pourvues d'un noyau). Pourtant, leur stratégie de compaction de l'ADN est assez proche de celle des eucaryotes. En effet, leur molécule d'ADN s'enroule autour de protéines, tout comme celle des eucaryotes autour des histones. L'équipe de Karolin Luger, de l'institut de médecine Howard-Hughes, aux États-Unis, a comparé les mécanismes de compaction de l'ADN chez les eucaryotes et les archées et examiné leur lien évolutif.

Chez les eucaryotes, un segment d'ADN de 147 paires de bases s'enroule autour d'un octamère constitué de quatre dimères d'histones issues de quatre classes différentes, l'ensemble formant un nucléosome. Karolin Luger et ses collègues ont observé chez *Methanothermobacter thermautotrophicus*, une archée thermophile, une structure qui ressemble au nucléosome : l'ADN s'enroule autour d'une structure protéique composée de trois dimères identiques d'histones archéennes. Toutefois, et contrairement à l'octamère des eucaryotes, cette structure peut polymériser et former un long assemblage autour duquel l'ADN de l'archée s'enroule plusieurs fois en une « superhélice ».



Contrairement à celui des eucaryotes, l'ADN (en jaune) des archées peut s'enrouler plus ou moins autour de ses histones (en bleu).

Les chercheurs ont montré que la plupart des fonctions des nucléosomes eucaryotes sont aussi présentes chez les archées. Ils suggèrent ainsi que le mode d'enroulement de l'ADN chez les archées serait un vestige d'un prototype archaïque des nucléosomes. Mais pourquoi l'évolution aurait-elle sélectionné la structure rigide et complexe des nucléosomes chez les eucaryotes ? Les chercheurs pensent que, du fait de l'augmentation de la taille du génome, il était peut-être devenu avantageux de limiter les nucléosomes à une structure moins flexible, mais permettant d'accéder facilement aux divers endroits de la molécule d'ADN. ■

S.B.

F. Mattioli et al., *Science*, vol. 357, n° 6351, pp. 609-612, 2017

LA JEUNESSE DU DODO

Disparu au XVII^e siècle, ce pigeon géant endémique de l'île Maurice a laissé pour toutes traces quelques ossements, une tête, une patte et des témoignages plus ou moins concordants de marins. En étudiant la microstructure d'os de 22 dodos, dont un provenant d'un oisillon, Delphine Angst, de l'université du Cap, en Afrique du Sud, et ses collègues ont trouvé plusieurs informations sur la biologie du dodo. La structure de l'os renseigne sur sa vitesse de formation. Résultat : le dodo grandissait probablement très vite, atteignant quasiment sa taille adulte en quelques mois. Par ailleurs, des cavités observées dans certains os, signes que du calcium a été mobilisé en quantité, suggèrent que le dodo renouvelait ses plumes. Le scénario envisagé est le suivant : la période de reproduction et l'ovulation des femelles débutaient en août. Les



Le dodo juvénile, ici sur une reconstitution, atteignait quasiment sa taille adulte en quelques mois.

oisillons sortaient de leur œuf en septembre, puis atteignaient vite une taille suffisante pour résister aux cyclones de l'été austral (de novembre à mars). Leur mue commençait à la fin de l'été, en mars, s'achevant ainsi à temps pour la période de reproduction suivante. ■

MARIE-NEIGE CORDONNIER

D. Angst et al., *Scientific Reports*, vol. 7, 7993, 24 août 2017

GÉOPHYSIQUE

UN CHAMP DÙ AUX MARÉES?

L'agitation du fluide conducteur dans le noyau liquide d'une planète crée un effet dynamo à l'origine de son champ magnétique. La convection qui s'établit dans ce noyau est un moteur essentiel de ces mouvements. Elle naît de la différence de température entre le centre de la planète et sa surface. Or dans les petits corps célestes, le refroidissement est trop rapide pour que la convection s'installe durablement. Mais en montrant que les phénomènes de marées peuvent créer des turbulences au sein du noyau, Thomas Le Reun, de l'université Aix-Marseille, et ses collègues apportent une explication possible au champ magnétique des petits corps.

Ces chercheurs ont simulé une parcelle cubique d'un noyau liquide soumis à de petites perturbations. Ils ont virtuellement appliqué à ce volume un mouvement de rotation, pour simuler la rotation de la planète, et des forces de marées responsables de légères déformations. La combinaison de la rotation et des forces de marées dans des conditions plané-



LE CHAMP MAGNÉTIQUE LUNAIRE

De récentes mesures montrent que le champ magnétique de la Lune aurait persisté plus longtemps qu'on ne le pensait. Les marées y ont peut-être contribué.

taires a conduit à une amplification des perturbations.

Résultat: ce modèle conduit à une agitation du noyau, même pour les petites planètes qui ne sont pas sujettes à la convection. L'équipe veut maintenant vérifier que ces mouvements turbulents peuvent soutenir un effet dynamo, et donc un champ magnétique. ■

D.T.

T. Le Reun et al., Phys. Rev. Lett., vol. 119, 034502, 2017

EN BREF

GLACIERS D'ASIE, LE BILAN

Les hautes chaînes de montagnes asiatiques hébergent la plus grande concentration de glaciers en dehors des régions polaires. Ces glaciers s'étendent sur près de 100 000 kilomètres carrés, mais leur évolution a été contestée. Grâce à des images satellitaires, Fanny Brun, de l'université de Grenoble Alpes, et ses collègues ont montré qu'entre 2000 et 2016, la masse de l'ensemble des glaciers a diminué de près de 16 gigatonnes (Gt) par an, soit un peu moins qu'on ne le pensait. En outre, l'évolution est très hétérogène d'une zone à l'autre, d'un bilan négatif de 4 Gt par an pour la région de Nyainqentanglha à un accroissement de 1,4 Gt par an à Kunlun. Des données qui seront précieuses pour affiner les modèles climatiques.

les cités
des sciences & de l'industrie

conférences

À la Cité des sciences et de l'industrie

Entrée libre dans la limite des places disponibles

Quatre conférences et un ciné-débat

Quand la science se remet en question

Pour progresser dans la compréhension du monde, les scientifiques doivent parfois rompre avec les connaissances et les idées reçues de leur temps. Des exemples avec la matière noire, le programme génétique, les intelligences animales.

Les mardis 19, 26 septembre, 3 et 10 octobre à 19h et le samedi 14 octobre à 14h.

► Discussion au sujet de la rupture de la confiance entre science et société, autour du film « Révélations », de Michael Mann.

programme complet sur cite.sciences.fr

Avec le soutien de

SCIENCE culture plus

ASTROPHYSIQUE

SOLEIL EN ROTATION(S)

Une semaine. C'est le temps mis par le cœur du Soleil pour faire un tour sur lui-même. Depuis plusieurs années, les astrophysiciens supposaient que la vitesse angulaire de rotation du cœur de l'astre était supérieure à celle de sa surface, mais ils n'avaient pas pu quantifier cet écart. C'est désormais chose faite par Éric Fossat, de l'observatoire de la Côte d'Azur, et son équipe.

Pour ce faire, les chercheurs ont d'abord mis en évidence la présence d'ondes de gravité dans l'étoile en détectant leur signature dans les ondes acoustiques solaires mesurables à la surface de l'astre. Des caractéristiques de ces ondes de gravité, ils ont déduit que le cœur du Soleil tourne quatre fois plus vite que sa surface. Les modèles de notre étoile devront en tenir compte. ■

DEP

E. Fossat et al., *Astronomy & Astrophysics*, vol. 604, A40, 2017

SANTÉ

PRÉMATURÉS: DU PROGRÈS

La prématurité concerne 7% des naissances, soit, en France, entre 55 000 et 60 000 enfants par an. Le pronostic vital et le devenir neuromoteur, sensoriel et général de ces enfants à l'âge de 2 ans s'est largement amélioré entre 1997 et 2011, selon des résultats récents obtenus dans le cadre de l'étude française EPIPAGE-2.

L'enquête a inclus au départ plus de 5500 enfants nés prématurément entre 22 et 34 semaines d'aménorrhée (SA) d'avril à décembre 2011. Des informations ont été collectées à 2 ans auprès du médecin traitant et des parents grâce à un questionnaire standardisé. Le taux de survie des enfants s'est amélioré grâce à une meilleure prise en charge, sauf pour les prématurés extrêmes, en dessous de 24 SA. En outre, il subsiste des inquiétudes quant au développement des prématurés, dont 40 à 50 % ont un score de développement assez faible à 2 ans. Reste à savoir quels sont les facteurs impliqués et comment les prévenir. ■

N.G.

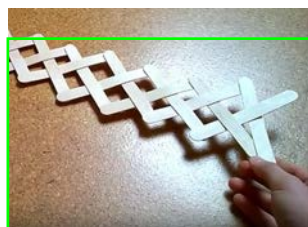
V. Pierrat et al., *BMJ*, vol. 358, j3448, 2017

PHYSIQUE

DOMPTER LES ONDES COBRA



Quand on construit un entrecroisement de bâtonnets (ci-dessous) et que l'on retire le premier, la structure se soulève et libère son énergie élastique en éjectant un à un les bâtonnets, formant une onde dite cobra (ci-dessus photographiée à différents instants repérés par une couleur, du jaune au bleu).



Entrecroisez de petits bâtonnets de bois semblables à ceux utilisés pour les glaces afin de former un long maillage où chaque bâtonnet, légèrement fléchi, est maintenu par deux voisins (voir la photo ci-contre). De l'énergie élastique est ainsi emmagasinée. Retirez le premier (ou le dernier) de

ces bâtonnets. La structure se déstabilise en se soulevant comme un serpent dressé, puis libère l'énergie élastique de façon spectaculaire en éjectant ses bâtonnets un par un, formant une onde qui se propage le long de la structure et que l'on nomme une onde cobra. Jean-Philippe Boucher, doctorant au laboratoire LadHyX, à l'École polytechnique, et ses collègues ont étudié les caractéristiques de ce type d'ondes.

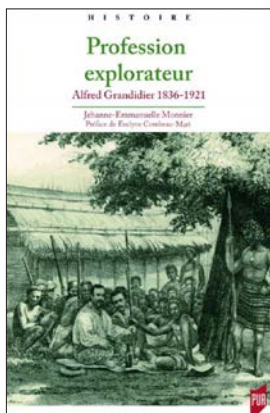
Jean-Philippe Boucher a observé que la vitesse des ondes cobra augmente avec la rigidité du matériau (ici, le bois) et avec son épaisseur. Elle diminue aussi avec sa longueur et ne dépend pas de sa largeur. Enfin, le physicien a montré que l'angle du maillage a une influence sur cette vitesse. Fort de ces observations, les chercheurs français ont mis en équation la propagation de l'onde, en s'appuyant sur l'équation établie par Leonhard Euler en 1744 pour décrire la déformation de tiges élastiques. En résolvant l'équation, ils ont pu calculer la forme de l'onde cobra, avec un résultat en bon accord avec l'expérience.

Dernier résultat de cette étude: l'équipe de physiciens a montré qu'en deçà d'une certaine longueur, les bâtonnets sont trop fragiles et atteignent leur point de rupture avant que l'onde ne puisse se propager. En revanche, si les bâtonnets sont trop longs, leur énergie potentielle de pesanteur est trop importante par rapport à leur énergie potentielle élastique et l'onde cobra ne peut exister.

L'intérêt des ondes cobra s'étend à d'autres domaines que la mécanique, par exemple la microbiologie. En effet, les microtubules, des fibres présentes dans les cellules et qui jouent un rôle majeur dans leur formation, ont une structure similaire aux maillages de bâtonnets des chercheurs. Parfois, ce maillage se défait à l'une de ses extrémités (phénomène appelé catastrophe des microtubules) et l'on observe une onde de désenchevêtrement semblable à celle étudiée par Jean-Philippe Boucher et ses collègues. ■

D.T.

J.-P. Boucher et al., *Physical Review Letters*, vol. 119, 084301, 2017



HISTOIRE DES SCIENCES

**PROFESSION EXPLORATEUR :
ALFRED GRANDIDIER 1836-1921**

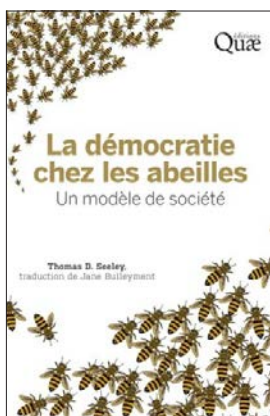
Jehanne-Emmanuelle Monnier
Presses Universitaires de Rennes, 2017
264 pages, 20 euros

Trop obnubilés peut-être par des repentances obsessionnelles, les Français ont quelque peu oublié leurs grands explorateurs des siècles passés – qui, il est vrai, furent souvent d'ardents colonialistes. Alfred Grandidier ne fait pas exception, et comme le montre bien ce livre, il est un peu l'archétype de l'explorateur du XIX^e siècle. Issu d'une très riche famille de la bonne société, il commence à voyager à travers le monde âgé d'à peine vingt ans, d'abord aux Amériques, puis en Inde.

C'est un peu par hasard, dans les années 1860, qu'il se retrouve à Madagascar, île qui sera dès lors sa terre de prédilection. Il y mène trois expéditions, la dernière s'achevant en 1870, qui apportent une foule d'informations nouvelles, de la géographie à l'ethnographie en passant par la zoologie et la paléontologie, et font de lui l'expert incontesté de cette grande île qui suscite alors les convoitises coloniales. Il cesse ensuite ses explorations à l'âge de seulement 34 ans, et ne parcourra plus Madagascar que par personnes interposées, dirigeant de loin les expéditions de nombreux jeunes voyageurs, dont son fils Guillaume. Fort d'un considérable réseau, qui comprend le Muséum, l'Académie des sciences, les missions catholiques et divers ministères, il exerce une influence énorme sur tout ce qui touche à Madagascar, que la conquête de l'île par les troupes françaises en 1894 ne fera que confirmer. Son but ultime demeure la connaissance, aussi exhaustive que possible, de l'île, avec une monumentale *Histoire physique, naturelle et politique de Madagascar*, publiée entre 1875 et 1940 et rassemblant de nombreuses contributions.

Par cette excellente biographie, l'auteure nous fait comprendre quelles étaient les motivations et les pratiques de ces grands explorateurs d'antan, et dans quel cadre social, scientifique et politique ils évoluaient. Son livre est un ouvrage académique, mais il est écrit dans un style si fluide et si agréable qu'il se lit avec beaucoup de plaisir.

ERIC BUFFETAUT / CNRS-ENS, PARIS



ENTOMOLOGIE

**LA DÉMOCRATIE
CHEZ LES ABEILLES**

Thomas D. Seeley
Quæ, 2017
216 pages, 29,50 euros

Cet essai passionnant, qui retrace la démonstration du déroulement d'une recherche scientifique longue et complexe par une communauté internationale de biologistes, part d'une question simple: «Comment fait un essaim d'abeilles pour choisir son logement et ne pas mourir?». Et le résultat final surprend.

Le titre évoque *a priori* certaines «recherches» pseudoscientifiques, par lesquelles certains essaient de justifier un régime totalitaire par l'exemple «parfait» que nous donneraient les «sociétés» d'insectes eusociaux, c'est-à-dire à «castes» d'origine biologique.

Rien de tout cela dans ce livre passionnant, bien au contraire! On voit comment les chercheurs et étudiants trouvent des solutions originales pour décrypter les comportements inattendus des abeilles. La reine n'intervient en rien; ce sont quelques centaines d'ouvrières exploratrices qui choisissent pour toutes. Comment? La lecture du livre vous le fera découvrir.

Thomas Seeley montre les convergences remarquables entre le fonctionnement de l'essaim et celui du cerveau d'un primate pour prendre une décision. Il explique enfin comment des (petits) groupes humains utilisent avec succès la procédure de prise de décision des abeilles, avec comme condition première «un respect mutuel et des intérêts en commun».

Ce livre intéressera les chercheurs, les étudiants et ceux qui veulent observer d'un peu plus près des phénomènes naturels et les procédures exemplaires mises en œuvre.

La couverture française comporte une erreur amusante, qui prouve à quel point il est urgent de le lire et de découvrir le monde des abeilles: les insectes dessinés, censés représenter des abeilles ont des ailes de mouches syrphides...

ANDRÉ NEL / MNHN, PARIS



MÉDECINE

SE GUÉRIR

Jo Marchant
Flammarion, 2017
384 pages, 21 euros

La pertinence de la démarche scientifique et médicale est fondée sur la rationalité et l'apport de la preuve. L'acte thérapeutique – intervention extérieure à l'individu – s'appuie sur la compréhension physiopathogénique des troubles afin de mieux lutter contre le mal-être et la maladie. Or des voix de plus en plus nombreuses s'élèvent pour défendre une autre approche: la mobilisation du psychisme serait déterminante et sa force suffisante pour contribuer à la santé. Doute, scepticisme, voire ironie critique ne manquent pas lorsque de tels arguments sont avancés. Car cette manière d'aborder la souffrance et la maladie, qualifiée d'irrationnelle, de subjective et de croyante, heurte notre cartésianisme.

L'auteure, généticienne et microbiologiste, nous démontre le bien-fondé de cette approche. Grâce aux progrès des neurosciences et au fil des études scientifiques et de nombreux témoignages qu'elle analyse, elle aborde successivement l'effet placebo, les techniques de maîtrise du stress par l'hypnose, le conditionnement pavlovien, la relaxation ou la méditation. En s'appuyant sur la réalité aujourd'hui démontrée des changements biochimiques entraînés par ces techniques (sécrétion de dopamine, d'endorphines, de prostaglandines, expression ou répression de certains gènes codants), elle met en évidence la réelle efficacité de ces pratiques dans l'amélioration de notre résilience.

En mobilisant cette interrelation corps-esprit, nous ne subissons plus passivement les aléas de notre histoire ni le poids de la maladie, mais devenons acteurs de notre devenir. Notre activité cérébrale, par les représentations mentales dynamiques qu'elle produit, est en effet capable d'influer dans une large mesure sur notre état, de l'ajuster et de le restaurer.

BERNARD SCHMITT / CERNH, LORIENT

FICTION SCIENTIFIQUE

L'HOMME QUI HAÏSSAIT LE BIEN

Sébastien Bohler
Robert Laffont, 2017
416 pages, 21,50 euros

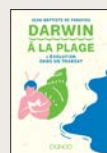
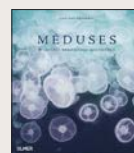
Heureusement que, dans ce thriller, un prisonnier échappe aux policiers qui le gardent, plonge dans la Seine depuis le quatrième étage du palais de Justice et s'enfuit. Heureusement que ce personnage, auquel réfère le titre du livre, s'opère lui-même du cerveau en enfonçant une tige de métal dans une plaie ouverte qu'il a au crâne.

Un thriller a besoin de quelques bonnes invraisemblances bien impressionnantes! Pour le reste, tout, dans celui-ci, est vraisemblable. Hélas! Je dis hélas, parce que la plupart des personnages sont des affreux. Un président prêt, pour se faire réélire, aux détournements de fonds et aux meurtres, et un ministre de l'intérieur prêt, pour prendre sa place, aux mêmes moyens. Des chercheurs scientifiques, surexcités à la perspective d'obtenir le prix Nobel, se procurant à bon marché des neurones embryonnaires auprès de fournisseurs véreux. Des soignants que l'appât du gain mène à agir contre toute humanité. Des aventuriers qui, prétendant les secourir, exploitent des populations sud-américaines rendues malades par la pollution de leur fleuve.

On demandera: quel rapport entre des hommes politiques et des chercheurs français, des aventuriers, des populations lointaines? C'est tout l'art du romancier que d'avoir su les faire interagir en mettant la neurobiologie au service d'une intrigue bien charpentée, prenante, agrémentée de poursuites haletantes, de combats et de brusques retournements de situation – sans oublier quelques espions russes et des menaces d'attentat. Et aussi des scènes érotiques (mais là, l'auteur n'en fait pas plus que le minimum syndical). Quant au critique, son devoir est de ne rien dévoiler de plus... Bonne lecture!

DIDIER NORDON / ESSAYISTE

ET AUSSI



MÉDUSES

Lisa-Ann Gershwin
Ulmer, 2017
224 pages, 30 euros

Connaissiez-vous les redoutables cuboméduses? Les inoffensives grosseilles de mer? Les salpes? Les siphonophores? Les ascidies? Les pyrosomes? Après la lecture de ce magnifique ouvrage, vous en saurez beaucoup sur les méduses et les autres groupes d'organismes gélatineux qui peuplent les mers et parfois les eaux douces. Les nombreuses et très belles photographies illustrent un texte à la fois savant, accessible, agréable et bien organisé. On y découvre l'extraordinaire diversité et beauté des animaux gélatineux, leur biologie, leur écologie, leurs interactions avec les humains...

DARWIN À LA PLAGE

Jean-Baptiste de Panafieu
Dunod, 2017
168 pages, 14,90 euros

Pilier de la biologie moderne, la théorie de l'évolution, qui a elle-même quelque peu évolué depuis sa formulation il y a plus de 150 ans par Charles Darwin, reste souvent mal comprise du grand public. Et elle continue de déranger ceux qui ont une position dogmatique sur la place de l'homme dans le monde, le rôle de Dieu et celui de la nature. Ce petit livre permet de s'initier aux grandes idées de cette théorie subtile, à son histoire, à ses fausses interprétations, à quelques-unes des voies explorées aujourd'hui par les chercheurs en sciences de la vie.

QUANTUM PHYSICS

Michael G. Raymer
Oxford University Press, 2017
306 pages, 15,13 euros

Sous-titré *What everyone needs to know* (« Ce que chacun doit savoir »), ce livre explique à un public large la physique quantique sous la forme de questions-réponses. Son grand mérite est de faire comprendre de façon relativement approfondie, dans un langage simple (mais en anglais...) et sans mathématiques, les principaux concepts de cette théorie contre-intuitive, quelques-unes de ses applications modernes et les difficultés d'interprétation qu'elle soulève. Vivement une traduction française!

PARIS

JUSQU'AU 10 JUIN 2018

Muséum national d'histoire naturelle
www.expometeorites.fr

Météorites, entre ciel et terre



On estime que chaque année, quelque 5000 météorites de masse supérieure au kilogramme tombent sur la planète. Ces pierres provenant de l'espace fascinent depuis des millénaires. Autrefois considérées comme des objets divins ou magiques, sacralisées ou redoutées, elles révèlent aujourd'hui aux scientifiques de multiples et précieuses informations sur les débuts du Système solaire, il y a environ 4,56 milliards d'années. Car la plupart des météorites se sont formées à cette époque et n'ont que très peu évolué depuis.

L'exposition qui leur est consacrée offre un vaste tour d'horizon sur la nature et l'origine des météorites, les mythes associés, la diversité de ces objets, leur chute et les cratères formés, ce qu'ils nous apprennent sur le Système solaire... Les visiteurs pourront notamment contempler plus de 350 pièces de la collection du Muséum (l'une des plus importantes du monde, avec plus de 4000 spécimens) et des pièces rares venues d'ailleurs. Sans oublier des projections spectaculaires et un parcours autour d'une douzaine d'œuvres d'artistes. ■

VITRY-SUR-SEINE

JUSQU'AU 3 NOVEMBRE

Maison des Projets de Vitry-sur-Seine
www.vitry94.fr

Trésors archéologiques



Avec les travaux du Grand Paris Express, des fouilles importantes ont été réalisées en 2016 sur le site de la future gare Vitry Centre. Les premières découvertes d'intérêt – objets, structures, sépultures – sont présentées ici au public. Une fenêtre sur l'histoire du territoire depuis l'Antiquité et le mode de vie de ses habitants. ■

GENÈVE

JUSQU'AU 31 DÉCEMBRE 2018

Conservatoire et Jardin botaniques de Genève
www.cjb-geneve.ch

Les multiples vies des herbiers



Collecter des plantes, les sécher et les mettre en herbarium est une pratique qui remonte au XVI^e siècle. Elle s'est beaucoup développée à l'âge d'or des grandes explorations et de la science naturaliste. Et avec les évolutions techniques, montre cette exposition, les herbiers révèlent aux botanistes de nouvelles informations. ■

ET AUSSI

Dimanche 8 octobre, 18 h 30

La Reine Blanche, Paris
www.reineblanche.com

INSECTES ET LUMIÈRES

Une conférence du physicien Serge Berthier, spécialiste des nanosciences, sur les structures microscopiques qui permettent aux insectes d'agir sur la lumière et, notamment, d'arborer de magnifiques couleurs métalliques. Des microstructures qui devancent de plusieurs centaines de millions d'années les « cristaux photoniques » fabriqués récemment en laboratoire...

Mardi 10 octobre à 20 h 55 sur Arte (www.arte.tv)

BÉBÉS SUR MESURE

Avec les avancées des sciences et des techniques, choisir le sexe de son bébé, la couleur de ses yeux et d'autres caractères entre dans le domaine du possible. Ce pouvoir nouveau sur la procréation suscite à juste titre des inquiétudes.

Mardi 17 octobre à 17 h Acad. des sciences, Paris www.academie-sciences.fr

5 À 7 AVEC FRANÇOISE BARRÉ-SINOISSI

Ce rendez-vous mensuel (sur inscription préalable) d'un membre de l'Académie des sciences avec le grand public impliquera cette fois la codécouverte du virus du sida (Prix Nobel en 2008). Il y sera notamment question d'infections émergentes dans le contexte de la mondialisation.

Samedi 21 octobre à 22 h 30 sur Arte (www.arte.tv)

LA FABRIQUE DU CERVEAU

Certains scientifiques cherchent à créer un cerveau artificiel dans lequel on pourra télécharger les informations d'un cerveau humain et qui pourrait ainsi remplacer ce dernier. Une enquête sur des recherches aux frontières de la science et de la fiction.

FRANCE

DU 7 AU 15 OCTOBRE
En quelque 2 500 lieux différents
<https://www.fetedelascience.fr>

Fête de la science



Comme chaque année depuis 1992, grâce à l'initiative du ministre de la Recherche de l'époque, Hubert Curien, la science se fête en France durant plusieurs jours (en octobre depuis 1995): visites de laboratoires, ateliers, conférences, animations, expériences, etc. L'occasion pour le grand public, partout dans le pays, de découvrir maints sujets de science, de rencontrer les chercheurs, de faire connaissance avec leur métier... ■

NANTES

JUSQU'AU 12 MARS 2018
Muséum de Nantes Métropole
www.museum.nantes.fr

Éternité



Sous-titrée « Rêve humain et réalités de la science », cette exposition décline trois grands thèmes assez distincts. Le premier est le « temps de l'homme », où l'on s'intéresse à l'espérance de vie de l'homme, au vieillissement et aux perspectives de l'abolir. Le deuxième porte sur le « temps de l'espèce », où l'on évoque la durée d'existence d'une espèce, l'évolution, les extinctions... Enfin, le troisième volet porte sur les débuts de la Terre et l'âge de l'Univers. ■

SORTIES DE TERRAIN

Dimanche 1^{er} octobre, 14 h
Pennedepie (Calvados)
Tél. 02 14 63 17 12
ou 06 69 61 55 06

MARAIS DE PENNEDEPIE

Une promenade de 2 h 30 dans des marais littoraux. Grâce à la grande diversité de leurs milieux (vasières, dunes, roselières, prairies, etc.), ces marais accueillent de nombreux oiseaux migrateurs.

Dimanche 1^{er} octobre
Sentheim (Haut-Rhin)
www.geologie-alsace.fr
Tél. 06 47 29 16 20

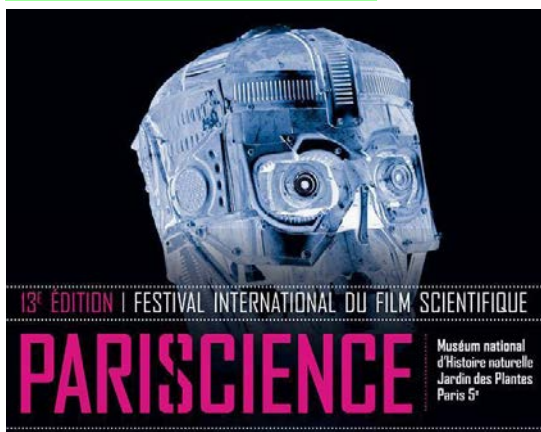
VALLÉE DE LA DOLLER

Balade de 3 h à 3 h 30 sur un sentier de 5-6 km qui retrace 340 millions d'années d'histoire géologique de la région, avec visite de la Maison de la géologie et de la grotte du Wolfloch.

PARIS

DU 2 AU 9 OCTOBRE
Muséum national d'histoire naturelle, IPGP et Le Grand Action
<http://www.pariscience.fr>

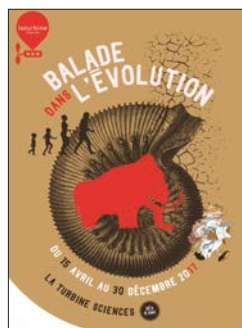
Festival Pariscience



Comme les précédentes, la 13^e édition de ce festival international du film scientifique propose une copieuse sélection de documentaires scientifiques de tous formats et sur des thématiques très diverses, qu'ils soient réalisés pour le cinéma ou pour la télévision. Ainsi, cette année, le public (quelque 10 000 spectateurs attendus) pourra découvrir en projection gratuite 87 films sélectionnés parmi plus de 400 venant du monde entier. Une manifestation où le grand public peut assouvir sa curiosité, où les professionnels du secteur se rencontrent, et où plusieurs prix sont décernés lors de la soirée de clôture. ■

ANNECY

JUSQU'AU 30 DÉCEMBRE
La Turbine sciences
www.laturbinesciences.fr



Balade dans l'évolution

Les principales étapes de l'histoire de la vie (essentiellement animale, toutefois) sur Terre sont ici racontées au travers de seize panneaux explicatifs généreux en jeux de mots et accompagnés de fossiles, de gravures, de squelettes. Une exposition qui montre l'évolution du vivant dans sa diversité, sans toutefois se pencher sur les mécanismes de cette évolution. ■

Samedi 14 octobre
Domaine de Montauger (91)
Tél. 01 60 91 97 34

LES ANIMAUX NOCTURNES

Dans l'Essonne, à l'occasion de l'événement « Le jour de la nuit », une soirée de sensibilisation à la protection de la biodiversité nocturne. Après une séance d'information en salle, on découvre sur le terrain des espèces nocturnes, en prenant conscience de l'impact sur elles de la pollution lumineuse.

Dimanche 15 octobre
Montauroux (Var)
Tél. 04 42 20 03 83

PIERRE MEULIÈRE

Une excursion à la journée sur les sites de la Fustière et de la forêt de Saint-Cassien, pour y découvrir la nature ainsi que les nombreuses carrières d'extraction de meules récemment cartographiées sur ces sites.

Mercredi 25 octobre
Sains-du-Nord (Nord)
Tél. 03 27 59 13 10

MIGRATION DES OISEAUX

L'après-midi, une promenade dans le bocage pour observer ce beau spectacle de la nature qu'est la migration des oiseaux.



LA CHRONIQUE DE
GILLES DOWEK

IL Y A ERREUR ET ERREUR

Une erreur dans un programme informatique n'a pas le même statut qu'une erreur dans une grande base de données.



Dans notre monde informatisé, une petite erreur dans un programme peut avoir des conséquences qui se répercutent sur de vastes échelles.

Parmi les premiers *Homo sapiens informaticus*, certaines figures, tels Norbert Wiener, Claude Shannon et Alan Turing ont bâti les cadres conceptuels dans lesquels nous pensons l'informatique aujourd'hui. Cependant, bien que contemporains, ces théoriciens ont fondé leurs réflexions autour d'idées très différentes: celle de pilotage – qui a donné le mot «cybernétique» – pour Wiener, de communication pour Shannon, de machine à calculer pour Turing. Cette diversité rend l'histoire intellectuelle de cette période foisonnante et difficile à appréhender.

Si, quelques décennies plus tard, le cadre de pensée de Turing s'est imposé, les idées de Wiener et de Shannon restent présentes dans certaines branches de l'informatique, tels les réseaux, la robotique ou l'automatique.

La différence entre les démarches de, par exemple, Shannon et de Turing peut s'illustrer par la place que la notion d'erreur y occupe. Une contribution essen-

tielle de Shannon concerne la transmission d'un message sur un canal, tel un réseau téléphonique. Ces messages sont discrets: ce sont des suites finies de symboles choisis dans un alphabet fini.

Mais le caractère discret de ces messages ne les prémunit pas contre des déformations lors de leur transmission. Pour Shannon, ces erreurs sont inévi-

Dans l'analyse de données massives, quelques erreurs ont un impact statistiquement limité

tables, mais elles peuvent être statistiquement corrigées et elles ne sont pas catastrophiques, tant qu'elles restent limitées. Nous tolérons, de même, des petites erreurs dans de nombreuses situations quotidiennes. Si, par exemple, en faisant un tiramisù, nous mettons, non

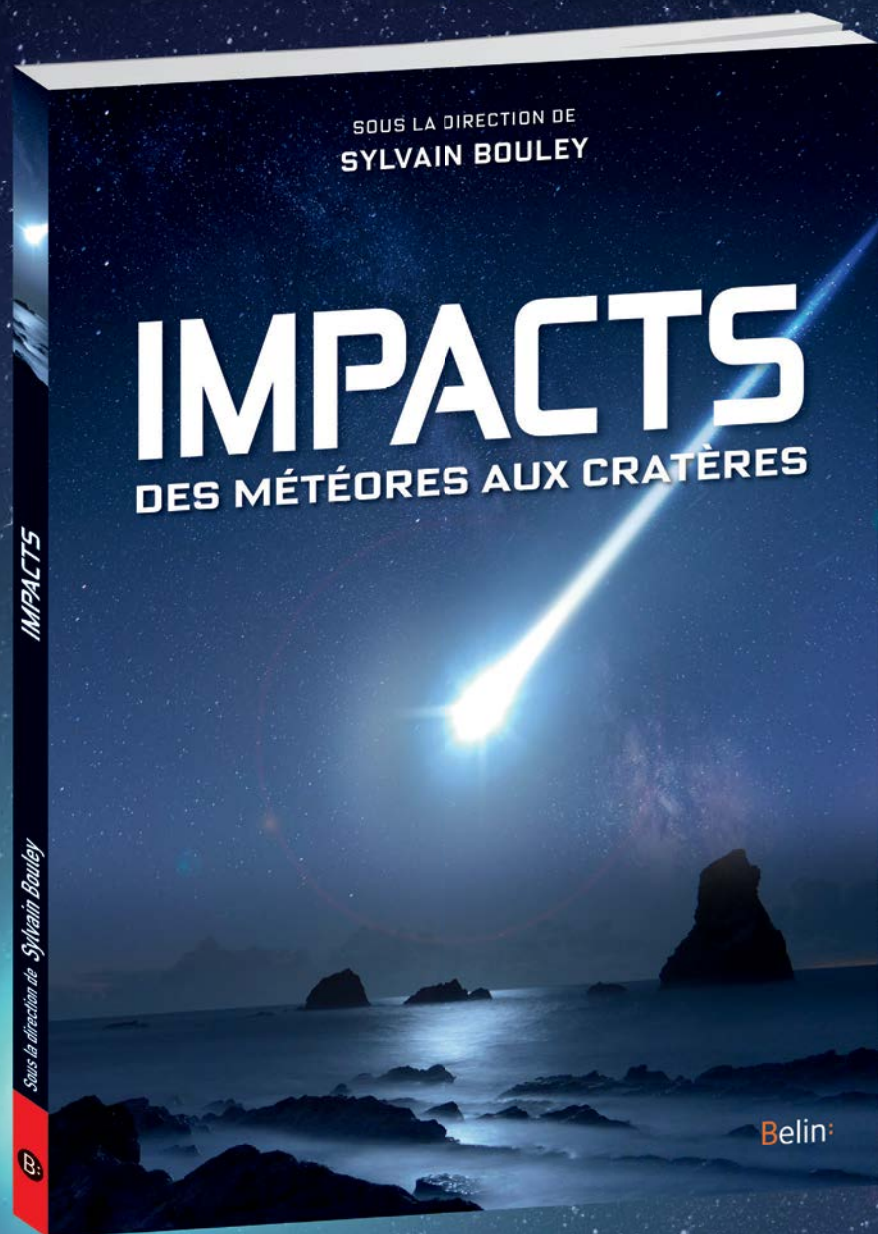
100 grammes, mais 120 grammes de sucre, le tiramisù sera peut-être un peu trop sucré, mais il restera un tiramisù. Il y a très peu de risques que cette erreur le transforme en une panna cotta. Il n'est donc pas surprenant que Shannon ait utilisé la théorie des probabilités pour définir les notions de compression et de correction d'un message. Par la suite, ses successeurs ont conçu des algorithmes de compression qui acceptent la perte d'un peu d'information dans les messages – par exemple, quelques pixels dans une image, indétectables à l'œil nu –, afin de pouvoir les compresser davantage. Fidèles à l'esprit de Shannon, les spécialistes de l'analyse de données massives nous apprennent aujourd'hui que, pourvu qu'elles ne soient pas trop nombreuses, quelques erreurs dans les données ont un impact statistiquement limité.

La vision de Turing est très différente, car le fait que les machines de Turing soient discrètes y rend les erreurs évitables. Mais, si elle n'est pas évitée, une petite erreur peut avoir des conséquences énormes. Les statistiques et les probabilités nous sont, dans un tel cas, d'un faible secours. À nouveau, nous savons que, dans de nombreuses situations quotidiennes, une petite erreur peut être à l'origine d'une catastrophe. Par exemple, si quelqu'un nous indique le chemin pour aller d'une ville à une autre: «Prendre l'autoroute vers le nord, rouler 100 kilomètres, sortir de l'autoroute, etc.», une petite erreur dans ces instructions, par exemple la substitution du mot «nord» par le mot «sud», peut nous mener assez loin de notre but. De même, le 15 janvier 1990, la moitié des abonnés d'un opérateur téléphonique américain se sont vu priver d'appels à longue distance, à cause d'un unique bug, dans une unique ligne de programme.

Dans notre monde discret, la discontinuité – petites causes, grands effets – est la règle. ■

GILLES DOWEK est chercheur à l'Inria et membre du conseil scientifique de la Société informatique de France. Son dernier livre, coécrit avec Serge Abiteboul: *Le Temps des algorithmes* (Le Pommier, 2017).

Le premier récit complet des
rencontres, parfois catastrophiques,
qui se produisent entre
les astéroïdes et les planètes !





LA CHRONIQUE DE
GÉRALD BRONNER

L'INCERTITUDE ET LA VIE POST MORTEM

Quand un individu exprime le souhait d'être enterré à proximité d'un proche, il est généralement en contradiction avec sa croyance. À l'œuvre : un biais d'incertitude.



Partager
une tombe
n'implique
pas une vie
commune
dans
l'au-delà...

Le 5 juillet 2017, le président de la République a annoncé que Simone Veil serait inhumée au Panthéon accompagnée de son mari. Antoine Veil, décédé quatre ans plus tôt, était sans doute méritant, mais mérite-t-il d'être au Panthéon? Personne ne s'est vraiment posé la question, parce qu'il n'est pas rare que des époux souhaitent être enterrés à proximité l'un de l'autre. Et de façon générale, il est banal que nous émettions quelques souhaits concernant les conditions de notre fin.

Ce type de désir que nous exprimons de notre vivant est assez curieux si l'on y réfléchit un instant. Bien que personne ne sache ce que nous trouverons après la mort, deux grands systèmes de réponses s'opposent sur ce point. Ou bien il n'y a rien, ou bien il y a quelque chose. À propos de ce quelque chose, la culture humaine, forte de ses 3000 dieux, propose de nombreuses solutions possibles. Mais si l'on s'en tient aux religions monothéistes dominantes, le récit proposé (qui n'est pas très précis d'ailleurs) dit à peu près que notre destination

finale (paradis, enfer, antichambre d'attente) dépendra de nos mérites et n'aura pas grand-chose à voir avec le lieu de notre inhumation. De même, dans les systèmes de croyances monothéistes, être enterré avec un proche ne garantit pas qu'il vous accompagnera durant le temps infini de la vie *post mortem*.

En d'autres termes, dans aucun monde possible de la croyance (il n'y a

Dans les principaux systèmes de croyance, le lieu où l'on est enterré n'a aucune importance

rien ou il y a quelque chose), le fait d'être enterré avec un proche n'a la moindre utilité. Et pourtant, dans cette situation d'incertitude, nous avons des préférences concernant l'endroit où reposera notre dépouille et avec qui éventuellement nous le partagerons.

Cette curiosité de notre esprit ressemble à s'y méprendre au biais d'incertitude qu'ont astucieusement révélé en 1992 deux célèbres chercheurs en psychologie, Amos Tversky et Eldar Shafir, par une petite expérience dont les résultats sont fascinants. Ils y demandaient à un groupe d'individus de réfléchir à des situations du type suivant.

Situation 1: vous venez de gagner 150 euros à la roulette en misant 150 euros sur le noir, votre capital s'élève à présent à 300 euros. Accepteriez-vous de parier de nouveau 150 euros sur le rouge ou sur le noir? Situation 2: vous venez de perdre, à la roulette, 150 euros en misant sur le noir. Accepteriez-vous de parier de nouveau 150 euros sur le rouge ou le noir?

La plupart des sujets affirmaient que dans les deux situations, ils rejoueraient (en cas de perte ou de gain, donc). Rien de vraiment surprenant jusque-là. En revanche, les réponses données face à la troisième situation par les mêmes personnes sont beaucoup plus déconcertantes. Dans la situation 3, on leur demandait s'ils accepteraient de rejouer dans les conditions énoncées dans les situations 1 et 2, mais cette fois sans savoir s'ils avaient gagné ou perdu.

La stricte logique aurait voulu qu'ils répondent oui, car précédemment, qu'ils aient gagné (situation 1) ou perdu (situation 2), ils avaient majoritairement décidé de rejouer. Or, dans cette situation d'incertitude, ils décidèrent majoritairement de ne pas rejouer!

Cette étrange suspension du jugement face à un choix disjonctif incertain ressemble à s'y méprendre à la préférence que certains d'entre nous expriment concernant le lieu de leur « dernière demeure » et les personnes avec qui ils la partageront. Dans tous les univers possibles, cette préférence n'a aucune importance; mais dans le doute, nous préférons minimiser les risques en reproduisant autant que faire se peut les conditions que nous aurions trouvées désirables du temps de notre vivant. ■

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



38 GRANDS TITRES DE PRESSE À PRIX UNIQUE ET IMBATTABLE!

PRIX UNIQUE
39€
l'abonnement

Jusqu'à
-77%
de remise

BULLETIN D'ABONNEMENT ETUDIANT

Bulletin à renvoyer complété et accompagné de votre règlement, sous enveloppe non affranchie à : RUE DES ETUDIANTS - LIBRE REPONSE 80402 - 21809 QUETIGNY CEDEX

1. COCHEZ LE OU LES ABONNEMENTS QUE VOUS CHOISISSEZ

ACTUALITÉ INTERNATIONALE

- ☐ Courrier international Hebdomadaire | 30 nos
- ☐ Le Monde diplomatique | Mensuel | 12 nos
- ☐ Time | Hebdomadaire | 35 nos
- ☐ Vocabulaire | Bimensuel 21 nos + 1 hors-série
- ☐ Anglais ☐ Allemand ☐ Espagnol
- ☐ (cochez l'édition choisie)

ACTUALITÉ GÉNÉRALE

- ☐ Alternatives Economiques | Mensuel | 11 nos
- ☐ + L'économie de A à Z
- ☐ + accès illimité à Alternatives Economiques Education
- ☐ Le 1 | Hebdomadaire | 39 nos
- ☐ L'Economie politique | Trimestriel | 6 nos
- ☐ L'Express | Hebdomadaire | 26 nos
- ☐ Le Monde Sélection hebdomadaire Hebdomadaire | 39 nos
- ☐ L'Obs | Hebdomadaire | 26 nos
- ☐ Le Point | Hebdomadaire | 26 nos
- ☐ Politis | Hebdomadaire | 18 nos
- ☐ Society | Bimensuel | 24 nos

SCIENCES HUMAINES

- ☐ Cercle Psy | Trimestriel | 8 nos
- ☐ Cerveau & Psycho | Mensuel | 10 nos
- ☐ Histoire & Civilisations | Mensuel | 11 nos
- ☐ Philosophie magazine | Mensuel | 8 nos
- ☐ Population & Avenir | Bimestriel | 7 nos
- ☐ Sciences Humaines | Mensuel | 11 nos

DÉBATS

- ☐ Études | Mensuel | 6 nos
- ☐ Futuribles | Bimestriel | 3 nos
- ☐ La Revue des Deux Mondes Mensuel | 6 nos
- ☐ Lien Social | Bimensuel | 10 nos

SCIENCES

- ☐ Les Cahiers de Science & Vie Bimestriel | 10 nos
- ☐ Pour la Science | Mensuel | 10 nos
- ☐ Science & Vie | Mensuel | 15 nos

MODE DE VIE

- ☐ Kaizen | Bimestriel | 8 nos
- ☐ Psychologies | Mensuel | 22 nos
- ☐ Sport & Vie | Bimestriel 6 nos + 2 hors-séries
- ☐ The Good Life | Trimestriel | 10 nos

ARTS

- ☐ Beaux Arts magazine | Mensuel | 12 nos
- ☐ Grande Galerie | Trimestriel | 8 nos
- ☐ Ideat | Bimestriel | 10 nos
- ☐ Polka | Trimestriel | 10 nos

CULTURE & LOISIRS

- ☐ L'éléphant | Trimestriel | 3 nos
- ☐ Les Inrockuptibles | Hebdomadaire 26 nos
- ☐ So Foot | Mensuel | 10 nos
- ☐ Télérama | Hebdomadaire | 21 nos

2. TOTAL DE MA COMMANDE

- ☐ 1 abonnement → 39 €
 - ☐ 2 abonnements → 69 €
 - ☐ 3 abonnements → 99 €
 - ☐ autre (30 € par abonnement supplémentaire)
- soit ----- abonnements → Total ----- €

3. MES COORDONNÉES

Nom -----
Prénom -----
Adresse (France métropolitaine seulement) -----

Code Postal ----- Ville -----
Email -----

- ☐ J'accepte de recevoir par e-mail des offres de Rue des Etudiants
- ☐ J'accepte de recevoir par e-mail des offres des partenaires de Rue des Etudiants

4. JE RÈGLE LA SOMME DE

☐ 39€ ☐ 69€ ☐ 99€ ☐ autre montant ----- €
par : ☐ Chèque à l'ordre de Rue des Etudiants ☐ Carte bancaire
N° -----

Date d'expiration -----
Cryptogramme (Les 3 derniers chiffres au dos de votre carte) -----

Date et signature obligatoires : -----

Les informations susvisées que vous nous communiquez sont nécessaires au traitement de votre abonnement. Conformément à la Loi Informatique et Libertés du 6 janvier 1978 modifiée par la loi du 6 août 2004, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification des données vous concernant en adressant un courrier à Rue des Etudiants. Ces données pourront être cédées à des organismes extérieurs, sauf opposition écrite de votre part à l'adresse susmentionnée.

Je certifie être étudiant(e) ----- Année d'étude -----
Filière -----

Offre valable jusqu'au 30 juin 2018

Abonnez-vous encore plus vite sur rue des étudiants.com

fête de
la Science ^{fr}

7 > 15
octobre
2017

fête de la Science

2500 lieux
d'expériences
et de
découvertes

entrée
gratuite

Les neurones du souvenir

Comment le cerveau organise la mémoire

De quelle façon les éléments de notre mémoire sont-ils stockés dans notre cerveau ? Depuis près d'un siècle, les neuroscientifiques tentent d'identifier les réseaux de neurones nécessaires et suffisants pour porter un souvenir.

Ces dernières années, grâce à de nouveaux outils, ce support neuronal a commencé à se dessiner. Notamment, on comprend comment un souvenir s'inscrit dans un groupe de neurones plutôt qu'un autre, par exemple lorsque le cerveau l'associe, dans notre mémoire, au souvenir d'un événement survenu peu avant ou, au contraire, le différencie d'un souvenir similaire, mais distinct. Les neurones du souvenir sont plus que jamais à la portée... de nos neurones.

L'ESSENTIEL

> La base de la mémoire est la capacité à associer plusieurs souvenirs à la suite les uns des autres, ce qui tisse un récit continu du passé.

> Des chercheurs ont observé que ce lien s'opère par le partage de neurones communs

à plusieurs souvenirs rapprochés dans le temps.

> En manipulant les « neurones partagés » au moyen de molécules ou de lasers, des neuroscientifiques ont réussi à faire ou défaire des associations de souvenirs.

L'AUTEUR



ALCINO J. SILVA
directeur du Centre intégratif de l'apprentissage et de la mémoire à l'université de Californie à Los Angeles

Comment un souvenir en appelle un autre

OBSERVER DES SOUVENIRS SE FORMER DANS LE CERVEAU, ET MÊME VOIR DEUX SOUVENIRS SE LIER ENTRE EUX : C'EST AUJOURD'HUI POSSIBLE GRÂCE À DE NOUVEAUX TYPES DE MICROSCOPES.

Nos souvenirs dépendent de notre capacité à nous remémorer des détails sur le monde – le visage d'un enfant, un canard, un lac. Mais pour les transformer en expériences réelles, le cerveau doit les fusionner en un tout – le regard d'un enfant qui voit s'envoler un groupe de canards au milieu des roseaux sur le bord d'un lac.

Pour acquérir une vision d'ensemble de la mémoire, il faut aussi prendre en compte d'autres facteurs. Car notre survie en tant qu'espèce au fil des millénaires a dépendu de notre capacité à nous rappeler non seulement les bonnes informations – par exemple, un lion ou un serpent – mais aussi le contexte où ces informations se sont produites. A-t-on rencontré l'animal au cours d'une confrontation inopinée, sur une étendue isolée de savane africaine, ou lors d'une visite décontractée au zoo ?

La vie quotidienne nous confronte à d'autres dangers, mais là encore il s'agit d'être à même de relier les souvenirs les uns avec les

autres. Par exemple, pour savoir si un investissement financier est intéressant, il faut prendre en compte l'honnêteté et la fiabilité de la personne qui nous l'a conseillé. Ne pas être capable d'établir la connexion entre l'investissement et la source de la recommandation peut avoir des conséquences désastreuses.

Le champ des neurosciences est en train de prendre à bras-le-corps cette question fondamentale : comment notre cerveau relie-t-il nos souvenirs les uns aux autres dans le temps et l'espace ? Jusqu'à présent, l'immense majorité des recherches sur la mémoire se sont concentrées sur la manière dont nous acquérons, stockons, ravivons et altérons nos souvenirs individuels. Mais la plupart de ces souvenirs ne sont pas des entités uniques et isolées. Nous savons que le rappel d'un souvenir en ravive un autre, suscitant des séquences qui nous aident à mieux prédire et comprendre le monde qui nous entoure.

Les mécanismes fondamentaux que le cerveau utilise pour créer ces associations de souvenirs commencent à être mieux compris après vingt ans de recherches menées dans



➤ plusieurs laboratoires, dont celui que je dirige. Comprendre les processus physiques mis en jeu dans l'intrication de ces souvenirs aura des conséquences qui, outre la connaissance de nos ressorts intimes, nous aideront peut-être à éviter les troubles de la mémoire mettant à mal notre capacité à former des souvenirs et à les lier les uns aux autres...

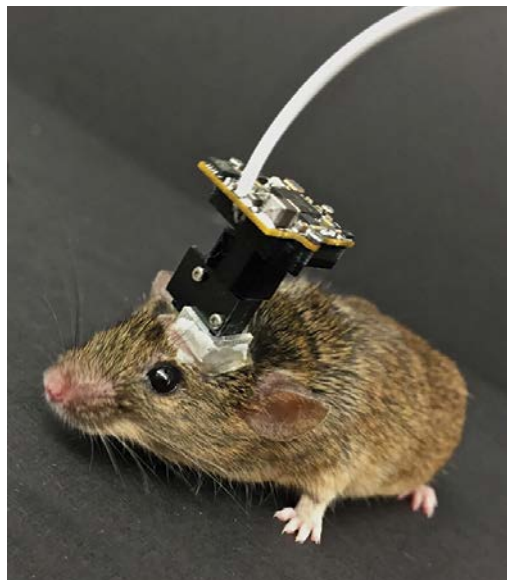
LA PROTÉINE CREB, ARCHITECTE DE LA MÉMOIRE

Lorsque nous avons commencé à étudier l'association des souvenirs, au début des années 1990, nous manquions encore des outils et connaissances nécessaires. Un élément déclencheur a été notre découverte de l'«allocation neuronale» : nous nous sommes aperçus que le cerveau utilise des règles spécifiques pour attribuer des fragments d'une information apprise à des groupes séparés de neurones dans des régions cérébrales impliquées dans la formation de la mémoire.

C'est le hasard qui nous a mis sur la piste de l'allocation neuronale. Tout a commencé lors d'une conversation que j'ai eue avec Michael Davis, un ami et collègue qui travaille aujourd'hui à l'université Emory, au cours d'une visite à l'université Yale en 1998. Michael Davis me faisait part de travaux où son équipe manipulait chez des rats un gène nommé *CREB* pour amplifier leur mémoire émotionnelle – par exemple l'association, dans leur mémoire, d'un bip sonore et d'un choc électrique.

Par le passé, mon laboratoire (aujourd'hui à l'université de Californie à Los Angeles, abrégée en UCLA) avait découvert, en collaboration avec d'autres chercheurs, que le gène *CREB* est nécessaire à la formation de la mémoire à long terme. Il remplit cette fonction en codant une protéine qui régule l'expression d'autres gènes nécessaires à la mémoire. Au cours d'un processus d'apprentissage, certaines synapses (les structures cellulaires que les neurones utilisent pour communiquer les uns avec les autres) sont formées, ou renforcées, de façon à faciliter les échanges entre neurones. La protéine CREB agit comme un architecte moléculaire dans ce processus. Sans son aide, la plupart des choses que nous vivons seraient oubliées.

Ce qui m'a surpris dans le récit de Michael Davis, c'est que son équipe avait réussi à améliorer la mémoire en n'augmentant la production de CREB que dans un petit sous-groupe de neurones de l'amygdale, une région cérébrale essentielle pour la mémoire des émotions. Une question me tarauda ensuite pendant des mois : comment la mémoire s'était-elle retrouvée dans une poignée de neurones où elle pouvait tirer avantage de quantités plus élevées de CREB ? Se pouvait-il que la protéine CREB non seulement orchestre la formation de souvenirs, mais aussi aide à assurer que les



Le miniscope est une innovation technique qui a permis à l'auteur et ses collègues de visualiser les souvenirs en formation dans un cerveau de souris. Grâce à lui, on observe directement les neurones qui s'activent dans le cerveau de l'animal, sans limiter les mouvements de ce dernier.

neurones qui la produisent aient plus de chances que les autres de participer à la formation de souvenirs ?

En science, il est tout aussi important de trouver les bonnes questions que d'y répondre. Lors de cette conversation, j'ai compris à quel point les neuroscientifiques connaissaient peu les règles qui assignent un souvenir donné à un groupe de neurones dans les différentes régions cérébrales qui gèrent notre mémoire. Nous avons donc décidé d'explorer cette question, et nous nous sommes concentrés sur les fonctions de la protéine CREB dans deux régions cérébrales clés pour la mémoire : l'amygdale, déjà citée, mais aussi l'hippocampe, crucial dans la mémoire des lieux.

QUELS NEURONES CRÉENT UN SOUVENIR ?

Notre première percée importante s'est produite lorsque nous avons recruté Sheena Josselyn, qui avait étudié CREB dans le laboratoire de Michael Davis. Dans une série d'expériences sur l'animal d'abord réalisées dans mon laboratoire et plus tard avec des collègues dans son propre laboratoire de l'université de Toronto, Sheena Josselyn s'est servie d'un virus pour introduire des exemplaires supplémentaires du gène *CREB* dans certains neurones de l'amygdale de souris. Elle a montré que ces neurones avaient dès lors près de quatre fois plus de chances de stocker des souvenirs effrayants que les cellules voisines.

En 2007, au terme d'une décennie d'efforts, mon équipe et celle de Sheena Josselyn ont accumulé les preuves que les souvenirs émotionnels ne sont pas attribués à des neurones au hasard dans l'amygdale. Les cellules qui prennent en charge les souvenirs sont celles qui produisent le plus de protéine CREB. Nous

avons ensuite montré que cette protéine a une fonction analogue dans d'autres régions du cerveau, dont l'hippocampe et le cortex, la partie la plus externe du cerveau.

Pour confirmer le rôle de la protéine CREB dans l'allocation des souvenirs aux différents neurones, nous nous sommes orientés vers des méthodes récentes qui ont bouleversé l'étude de la mémoire au cours des dernières années. Ces techniques de laboratoire permettent d'activer ou de désactiver des neurones, avec pour effet de raviver un souvenir ou de le maintenir silencieux. C'est grâce à ces outils que Yu Zhou, dans mon laboratoire, a modifié un petit groupe de neurones de l'amygdale de souris de telle sorte qu'ils produisent de plus grandes quantités de CREB ainsi qu'une autre protéine mise au point par le laboratoire d'Edward Callaway à l'institut Salk d'études biologiques, à La Jolla, en Californie. Grâce à cette protéine, nous réduisons au silence les neurones produisant CREB au moment où nous le souhaitons. Lorsque nous éteignons les neurones riches en protéine CREB et laissons actifs ceux qui en produisaient des quantités plus faibles, la mémoire des émotions était supprimée chez ces animaux. Cela montrait que les neurones

plus facilement activables. Était-ce la raison pour laquelle les neurones produisant beaucoup de CREB étaient sélectionnés pour stocker les souvenirs? Pour répondre à cette question, Yu Zhou a modifié des neurones de l'amygdale de façon à leur faire produire davantage de protéine CREB. Et à l'aide d'électrodes microscopiques, elle a constaté qu'ils étaient dès lors plus faciles à «allumer» que les neurones non modifiés. Leur excitabilité accrue (une plus grande disposition à recevoir et à transmettre les influx électriques qui véhiculent l'information d'un neurone à l'autre) suggérait que ces cellules étaient mieux préparées pour activer les processus nécessaires à la construction d'un souvenir.

Restait à tester cette idée. Yu Zhou a examiné en détail les connexions synaptiques des neurones produisant beaucoup de CREB. De très nombreuses observations ont depuis longtemps conduit à la notion que la force des connexions synaptiques est un aspect déterminant de la formation des souvenirs. Après avoir entraîné les souris à réaliser une tâche qui créait chez elles des souvenirs émotionnels, Yu Zhou a testé la force des connexions synaptiques de neurones de l'amygdale exprimant de fortes quantités de CREB. Pour cela, elle a stimulé les synapses de ces neurones à l'aide d'un faible courant électrique et a enregistré leurs réponses au moyen de fines électrodes. Comme elle s'y attendait, les synapses des neurones de l'amygdale produisant plus de CREB étaient plus puissantes que les autres, ce qui était en accord avec l'idée que ces neurones participaient au stockage des souvenirs.

ANCER UN SOUVENIR DANS UN GROUPE DE NEURONES

Dans une recherche encore plus récente, l'équipe de Sheena Josselyn a montré que le souvenir d'une expérience effrayante pouvait être stocké dans un ensemble prédéterminé de neurones de l'amygdale. Pour «flécher» ces neurones, les chercheurs leur avaient ajouté un type particulier de canal ionique qui augmente leur excitabilité (les canaux ioniques sont des pores ancrés dans la membrane des cellules). Le laboratoire d'Albert Lee, sur le campus de recherche Janelia de l'institut médical Howard-Hughes, à Ashburn, en Virginie, a obtenu un résultat similaire par une autre méthode: les chercheurs ont augmenté artificiellement l'excitabilité de neurones de l'hippocampe chez un rat lorsqu'il se trouvait en un endroit donné. Ils ont alors observé que ces neurones avaient tendance à se réactiver spontanément lorsque l'animal retournait au même endroit. Ce genre d'observation corrobore les nôtres: l'excitabilité joue un rôle essentiel dans la désignation des neurones mis en jeu pour stocker un souvenir donné.

Les neurones surexprimant le gène *CREB* ont quatre fois plus de chances de stocker des souvenirs que les cellules voisines

produisant de grosses quantités de CREB étaient de toute évidence impliqués dans le stockage des souvenirs.

Nous savions donc que les fortes concentrations de CREB pouvaient déterminer quelles cellules stockaient un souvenir en particulier, mais nous ne savions pas comment cela se produisait. Or Robert Malenka, de l'université Stanford, et ses collègues avaient par ailleurs découvert que le fait d'augmenter la quantité de CREB dans certains neurones les rendait

➤ Finalement, notre équipe et celle de Sheena Josselyn ont tiré parti d'une technique révolutionnaire appelée optogénétique, qui utilise des stimulations lumineuses pour activer ou éteindre les neurones. Grâce à cette approche, nous avons activé sélectivement des neurones plus riches en protéine CREB. Thomas Rogerson et Balaji Jayaprakash, à l'époque tous deux membres de mon laboratoire, ont tout d'abord modifié génétiquement des neurones de l'amygdale afin de leur faire produire davantage de protéine CREB, mais aussi la protéine channelrhodopsine-2, un canal ionique spécifiquement activé par la lumière bleue. Nous avons alors montré qu'il était possible de provoquer artificiellement le rappel d'un souvenir de peur chez des souris en utilisant la lumière bleue pour activer les neurones de l'amygdale plus riches en CREB, mais pas ceux qui en renfermaient moins. Ce qui était une autre façon de confirmer que la mémoire était stockée dans ces neurones à forte concentration de CREB.

LE COUPLAGE DES SOUVENIRS

En 2009, on m'a demandé d'écrire un article sur nos recherches sur la mémoire et j'ai profité de cette occasion pour présenter nos idées sur la façon dont les souvenirs sont associés dans le temps. La capacité de CREB à désigner quels neurones entrent dans la composition d'un souvenir – ce que nous appelons l'allocation neuronale – m'a conduit à l'hypothèse que ce processus pouvait être la clé de notre capacité à lier les souvenirs les uns aux autres. C'est ce que nous avons alors nommé, dans mon laboratoire, l'hypothèse de l'allocation de lien : les neurones qui surexpriment le gène CREB étant plus facilement activés et donc plus plastiques, ils sont plus aptes à stocker un autre souvenir. Et lorsque deux souvenirs ont un grand nombre de neurones en commun, ils sont liés.

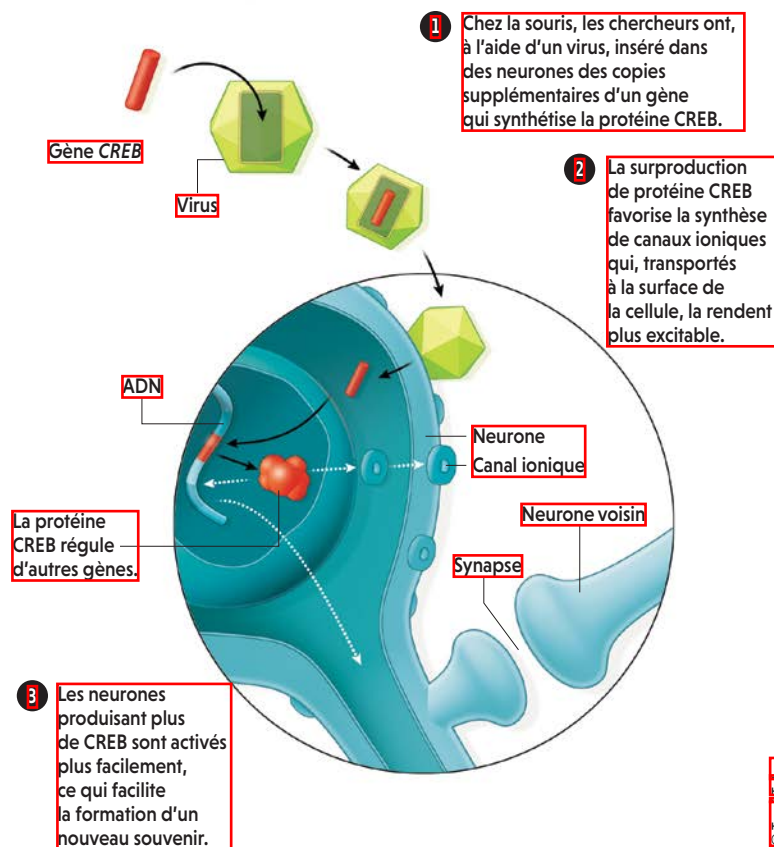
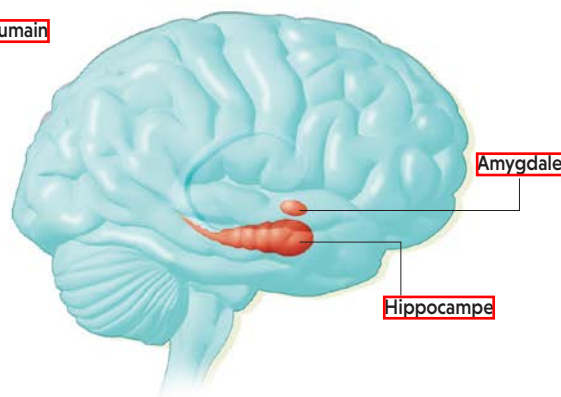
En conséquence, l'activation de ces neurones au cours de la remémoration d'un de ces deux souvenirs déclenche le rappel du second. Cette vision des choses débouchait sur une prédiction forte : deux souvenirs formés à peu de temps d'intervalle – la même journée, par exemple – ont plus de chances d'être liés que s'ils sont séparés par de plus longues périodes. Pour des intervalles supérieurs à une journée, le second souvenir ne bénéficie plus de l'excitabilité produite par le premier et se trouve donc stocké dans un autre sous-ensemble de neurones. La limite de temps imposée à l'association de souvenirs est *a priori* sensée, car les événements qui se produisent à l'échelle d'une journée ont bien plus de chances d'être connectés les uns avec les autres que ceux distants, mettons, d'une semaine.

En écrivant cet article et en mettant au clair mes idées, j'ai mieux cerné le défi que

SUR LA TRACE D'UN SOUVENIR

Plusieurs régions clés de notre cerveau interviennent dans la formation de nos souvenirs. Parmi elles, l'amygdale est essentielle pour les souvenirs à connotation émotionnelle, et l'hippocampe est impliqué dans la formation de ceux liés à nos expériences personnelles. L'équipe de l'auteur a montré que les neurones où l'on augmente artificiellement la production d'une protéine nommée CREB ont plus de chances de participer à l'encodage d'un souvenir.

Cerveau humain



constituerait leur mise à l'épreuve. Si l'hypothèse de l'allocation de lien était venue assez naturellement, il n'en était pas de même de sa validation. Ce test devait attendre le moment propice.

La situation a changé quand Denise Cai et Justin Shobe, tous deux alors au laboratoire, se sont joints au projet. Denise Cai proposa une expérience astucieuse: Justin Shobe et elle ont commencé à placer des souris dans deux cages au cours de la même journée, à cinq heures d'intervalle, dans l'espoir que les souvenirs des deux cages se trouveraient connectés l'un à l'autre. Plus tard, ils leur administrèrent un léger choc électrique alors qu'elles étaient dans la seconde cage. Comme prévu, quand, ensuite, les souris ont à nouveau été placées dans la cage où elles avaient reçu le choc électrique, elles se sont immobilisées, probablement parce qu'elles se rappelaient avoir reçu un tel choc en ce lieu. L'immobilisation est une réaction naturelle chez les souris apeurées, parce que la plupart des prédateurs les détectent alors moins facilement.

Le résultat clé est apparu lorsque Denise Cai et Justin Shobe ont placé les souris dans la première cage, où elles n'avaient jamais reçu de choc électrique. Nous pensions que si les souvenirs des deux cages étaient liés, les souris placées dans la première se rappelleraient du choc électrique reçu dans la seconde et, par anticipation, s'immobiliseraient – et c'est exactement ce qui s'est produit.

Nous avons aussi prédit que les deux souvenirs auraient moins de chances d'être liés s'ils étaient séparés de sept jours. Et effectivement, les souris replacées dans la première cage ne semblaient pas se souvenir de la deuxième lorsque l'intervalle de temps entre les deux premières expositions dépassait une semaine. En général, au-delà d'une journée d'intervalle, les souvenirs ne s'associaient pas.

UN MICROSCOPE PORTABLE POUR SOURIS

Aussi excitantes que fussent ces découvertes comportementales, elles ne suffisaient pas à confirmer une prédiction essentielle découlant de notre hypothèse: l'idée que les souvenirs individuels formés à peu de temps d'intervalle soient stockés dans une même zone du cerveau, au sein de populations neuronales se recouvrant partiellement. Ce recouvrement physique devait lier les souvenirs, de sorte que le rappel de l'un entraîne celui de l'autre.

Pour tester l'hypothèse d'allocation de lien, il fallait idéalement être en mesure de voir les souvenirs dans le cerveau au moment où ils se forment. Des techniques d'imagerie des neurones *in vivo* existaient déjà, mais elles nécessitaient de maintenir la tête de l'animal immobile, fixée à de gros microscopes, un

montage incompatible avec les expériences de comportement que nous devions mener.

Par chance, la bonne technique est apparue juste au moment où nous en avions le plus besoin. Lors d'un séminaire à l'UCLA auquel j'assistais, Mark Schnitzer, de l'université Stanford, décrit un tout petit microscope que son laboratoire venait d'inventer, capable de visualiser l'activité de neurones dans le cerveau de souris libres de se déplacer. Ce microscope de 2 à 3 grammes était porté par l'animal comme un chapeau. Cet instrument s'est révélé idéal pour pister les neurones activés par un souvenir donné. Il nous a permis de savoir si ces mêmes neurones deviennent actifs quelques heures après, lorsqu'un autre souvenir est créé – c'est-à-dire qu'il a permis de tester notre prédiction.

Nous étions si excités par cette invention, que nous avons décidé d'en créer notre propre version. Nous nous sommes associés avec les laboratoires de Peyman Golshani et Baljit Khakh, tous deux établis à UCLA, et avons embauché un chercheur postdoctoral du nom de Daniel Aharoni, qui s'attela à la mise au point de ce que nous appellerions plus tard les miniscopes de l'UCLA. Équipé d'une lentille insérée à proximité immédiate des cellules nerveuses, l'appareil est fixé au crâne de la souris et reste stable tout au long des tests qu'elle subit.

Deux souvenirs formés à peu de temps d'intervalle ont plus de chances d'être liés

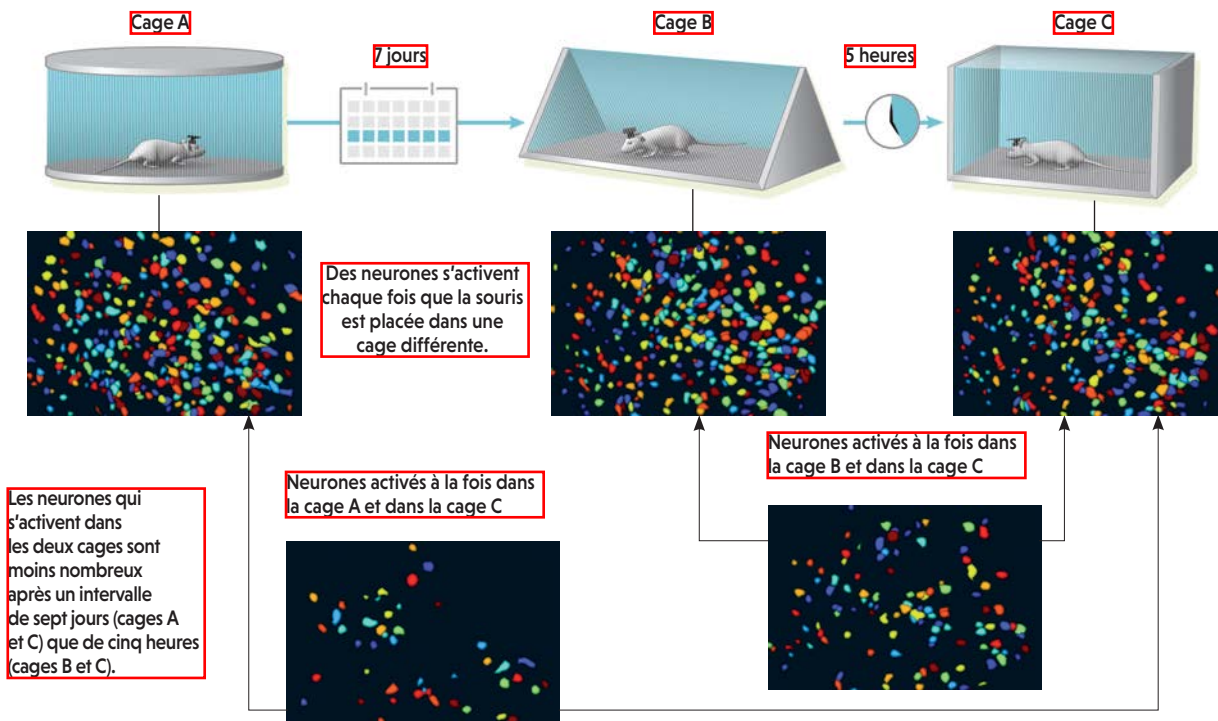
Pour visualiser uniquement les neurones activés par un souvenir, nous avons utilisé une autre technique dite d'indicateur de calcium codé génétiquement. Il s'agit d'injecter à l'animal une molécule qui devient fluorescente en présence de calcium: or un neurone qui s'active absorbe le calcium présent dans le milieu extracellulaire... Et devient donc visible au microscope.

Nous avons décidé de nous concentrer sur la région CA1 de l'hippocampe en raison de son rôle dans l'apprentissage et la mémorisation des lieux – par exemple, les cages que

COMMENT NOTRE CERVEAU RELIE LES SOUVENIRS

L'instant « proustien » – quand un souvenir en appelle un autre – a désormais une base cérébrale ! Des expériences ont révélé qu'une souris placée dans deux cages B et C associe les souvenirs de ces deux cages si elle les a explorées à moins de cinq heures d'intervalle. Elle n'associe pas, en revanche, les souvenirs de cages A et C où elle a été placée à une semaine d'intervalle.

L'association mnésique des cages B et C se produit parce que les souvenirs de ces deux endroits se sont enregistrés dans des ensembles de neurones qui se recouvrent, contrairement aux souvenirs des cages A et C. Dès lors, quand la souris est replacée dans la cage B, le rappel de son souvenir réactive nombre de neurones communs aux souvenirs des deux cages, ce qui ravive le souvenir de la cage C.



➤ nous avons utilisées dans nos expériences de comportement. Les souris coiffées de leurs miniscopes ont été placées dans les deux cages: nous voulions savoir si l'intervalle de temps entre les placements dans les deux cages déterminait quels neurones étaient activés dans les deux cas.

Les résultats ont dépassé nos espérances. Lorsque les souris reliaient les souvenirs des deux cages, de nombreux neurones de l'aire CA1 qui étaient actifs quand les animaux se trouvaient dans la première cage étaient aussi activés quand ils exploraient la seconde. Si l'intervalle entre les deux visites était de cinq heures, les souris formaient deux souvenirs dans un ensemble similaire de neurones. Si on laissait s'écouler une semaine entre les visites des deux cages, les souvenirs activaient deux ensembles de neurones disjoints.

Cette découverte confirmait une prémisse essentielle de l'hypothèse d'allocation de lien:

les souvenirs s'associent quand ils sont stockés dans des ensembles de neurones qui se recouvrent au moins en partie. De sorte que si vous réactivez un premier ensemble de neurones codant un premier souvenir, celui-ci stimule l'autre ensemble et facilite le rappel du second souvenir.

LES SOUVENIRS SUIVIS À LA TRACE

Pour valider plus solidement encore les résultats obtenus avec les miniscopes, Denise Cai s'est tournée vers une autre méthode mise au point par Mark Mayford, aujourd'hui à l'université de Californie à San Diego. Cette technique, nommée système TetTag (pour *tetracycline tag*), permet de marquer les neurones activés dans le cerveau d'une souris quand elle forme le souvenir d'une cage où elle est placée, à l'aide d'une sonde fluorescente qui reste ensuite active pendant des semaines.

Grâce à des études *post mortem* sur les animaux, on compare alors les neurones activés récemment – repérables grâce à l'activité des gènes exprimés immédiatement après la formation du souvenir – avec ceux signalés par le marqueur à longue durée. Cette étape identifie non seulement les neurones activés par un événement – auquel cas un neurone ne présente qu'un seul marqueur fluorescent –, mais aussi ceux qui sont sollicités par deux événements distincts: dans ce cas, deux marqueurs différents sont visibles au microscope.

UNE COMPÉTITION ENTRE NEURONES

En utilisant le même montage expérimental que précédemment, Denise Cai et son équipe ont montré que pendant un court intervalle de cinq heures, le recouvrement entre les neurones qui codent chacun des deux souvenirs – les neurones avec deux marqueurs – était nettement plus important que si les deux souvenirs avaient mis en œuvre des assemblées aléatoires de neurones. En revanche, si les deux événements mémorisés étaient séparés d'une semaine, le recouvrement ne dépassait pas la répartition aléatoire.

D'autres expériences réalisées par l'équipe de Sheena Josselyn à Toronto ont apporté des preuves supplémentaires de la validité de notre hypothèse d'allocation de lien. Non seulement elle a réalisé une nouvelle version de notre expérience de marquage neuronal, mais elle a aussi apporté de nouveaux indices comportementaux. Cette fois, les souris étaient non pas placées dans des contextes différents, comme

dans nos travaux, mais entraînées à distinguer deux sons différents, chacun associé à un choc électrique, les deux événements se produisant à des intervalles de temps différents. Lorsque six heures ou moins séparaient les deux événements, les souris s'immobilisaient ensuite plus longtemps à l'écoute du second son (sans électrochoc), signe que le souvenir associé à ce son était renforcé. Au-delà de six heures, ce n'était plus le cas. Les chercheurs de Toronto ont par ailleurs montré que lors du premier stimulus, dans l'amygdale latérale (une région importante dans le conditionnement de la peur), la proportion de neurones où la protéine CREB était activée augmentait pendant les six premières heures, puis redevenait normale dans les heures suivantes. En jouant sur l'excitabilité de ces neurones par optogénétique, les chercheurs ont alors montré qu'un phénomène de compétition détermine à quels neurones sont assignés deux souvenirs. Ils en proposent le scénario suivant: le premier événement augmente l'excitabilité d'un groupe de neurones – le lieu de son souvenir – en y augmentant l'activité de CREB. Si le deuxième événement a lieu dans les six heures suivantes, l'activité accrue de CREB favorise l'ancrage du second souvenir dans un groupe de neurones qui recouvre partiellement le premier, ce qui renforce le second souvenir. Au-delà de six heures, en revanche, tous les neurones ont *a priori* la même chance d'accueillir le deuxième souvenir, et il n'y a pas de recouvrement.

DEUX SOUVENIRS LIÉS SÉPARÉS AU LASER

Récemment, Kaoru Inokuchi et ses collègues de l'université de Toyama, au Japon, ont poussé cette analyse un cran plus loin. Ils ont utilisé la technique d'optogénétique pour inactiver, par de la lumière laser, le groupe de neurones partageant deux souvenirs émotionnels différents sans altérer l'activité des autres neurones, dont ceux propres et uniques à chacun des deux souvenirs. Les chercheurs ont montré qu'en inactivant les cellules partagées, ils abolissaient le lien entre les deux souvenirs, sans perturber le rappel de chaque souvenir individuel. Cette expérience élégante a fourni la preuve directe que les neurones partagés par deux souvenirs constituent le liant de notre mémoire.

Nous avons ensuite décidé d'étudier les liens entre souvenirs chez des souris plus âgées. Comparées aux jeunes, celles-ci produisent moins de protéine CREB dans leur cerveau, y compris dans les neurones de l'aire CA1 de l'hippocampe. Il en résulte une moindre excitabilité, ce qui nous a amenés à prédire que les souris âgées devraient rencontrer des difficultés à lier différents souvenirs. C'est pourquoi Denise Cai et ses collègues ont entrepris de répéter sur des animaux âgés une grande

Chez les souris âgées, les souvenirs sont moins liés car les réseaux de neurones qui les stockent se recouvrent moins. Mais on peut restaurer ce lien

> partie des expériences que nous avons mises au point sur des souris jeunes. Les résultats nous ont surpris. Les chercheurs savent que les hypothèses ne sont que des outils, et nous ne nous attendions pas à ce que les nôtres soient forcément exactes. Mais cette fois, nos intuitions se sont révélées justes.

Je me rappelle encore le moment où Denise Cai a fait irruption dans mon bureau, tout essoufflée, pour me dire que nos souris âgées, bien que se rappelant chaque cage, avaient des difficultés à associer leurs souvenirs de l'une et de l'autre, et ce même lorsqu'elles les avaient visitées à cinq heures d'intervalle, une période amplement suffisante pour la formation d'un lien mnésique chez des souris jeunes. Et les images obtenues par miniscope montraient un très faible recouvrement des ensembles de neurones associés aux deux souvenirs...

Imaginez notre excitation ! Mais nous sommes restés prudents. Nous avons donc repris nos manipulations encore et encore pour confirmer nos observations : les résultats ont été encore plus convaincants. Les neurones des souris âgées, produisant de faibles quantités de protéine CREB, ne liaient pas les souvenirs avec la même efficacité que les plus jeunes.

Galvanisés par ces résultats, nous avons immédiatement élargi le spectre de nos recherches. Était-il possible d'augmenter artificiellement l'excitabilité d'un ensemble de neurones de l'aire CA1 juste au moment où les souris âgées exploraient les deux cages, de façon à réactiver dans la seconde certains des neurones sollicités dans la première ? Pour le savoir, nous avons mis en œuvre une technique d'un genre nouveau qui permet de munir un neurone de récepteurs sensibles à certaines molécules. Ainsi, en diffusant ces molécules aux alentours du neurone, on provoque son activation à volonté – une technique nommée *Dread* pour *Designer Receptors Exclusively Activated by Designer Drugs* (récepteurs sur mesure activés exclusivement par des molécules sur mesure).

L'essentiel à retenir est l'aspect suivant : en injectant les molécules activatrices à l'animal aux moments souhaités, à savoir quand la souris pénètre dans la première cage, puis quand elle entre dans la seconde, on active à chaque fois le même groupe de neurones : ceux que l'on a modifiés dans l'aire CA1 de l'hippocampe pour porter les récepteurs. Et l'on crée ainsi un lien artificiel entre les souvenirs de ces deux instants.

De prime abord, l'idée d'une telle expérience paraissait pour le moins audacieuse. Une multitude de causes pouvaient la faire échouer. Premièrement, les souvenirs de lieux mettent en jeu des millions de neurones disséminés à travers diverses aires cérébrales interconnectées, et pas seulement la région CA1. Le vieillissement pouvait avoir affecté les

mécanismes d'association de souvenirs dans un grand nombre de ces aires, si ce n'était dans toutes. Et, de ce fait, même si nous réussissions à augmenter l'excitabilité d'un ensemble de neurones au sein de la zone CA1, ces cellules pouvaient tout à fait ne pas être les bonnes. Sans compter que nous ne savions pas si le degré d'excitabilité obtenu serait adapté.

RECOLLER LES SOUVENIRS ENSEMBLE

Et pourtant, l'expérience a fonctionné. La chance était décidément de notre côté. En restaurant un meilleur degré d'excitabilité neuronale dans un sous-ensemble précis de l'aire CA1 chez des souris âgées, nous avons réussi à allouer les deux souvenirs de cages en grande partie à un même groupe de neurones de cette zone, ce qui a restauré l'association des souvenirs chez ces animaux.

D'autres études en imagerie par résonance magnétique fonctionnelle, tant chez des rongeurs que chez l'humain, ont par ailleurs précisé la façon dont les souvenirs s'interconnectent dans le cerveau. Notamment, Howard Eichenbaum, de l'université de Boston, et ses collègues ont montré chez le rat que l'organisation des souvenirs est très structurée, leurs éléments communs étant codés de façon similaire d'une expérience à l'autre. Alison Preston, de l'université du Texas, à Austin, et ses collègues ont quant à eux observé chez l'humain que la réactivation d'un souvenir peut influencer la façon dont un nouveau souvenir sera encodé.

L'arsenal croissant des outils disponibles pour mesurer et contrôler l'activité neuronale commence à révéler les mécanismes que notre cerveau utilise pour organiser l'information. À présent, notre équipe tente de prolonger ce travail dans de nouvelles directions. En collaboration avec la neurobiologiste et bio-informaticienne Panayiota Poirazi, de l'Institut de biologie moléculaire et de biotechnologie de la Foundation for research and technology – Hellas, en Grèce, nous construisons des modèles informatiques pour simuler comment et quand les souvenirs se lient. Nous essayons aussi de comprendre les mécanismes qui contrôlent l'intervalle de temps nécessaire pour que deux souvenirs s'associent dans telle ou telle région du cerveau.

Peut-être la compréhension de ces phénomènes nous aidera-t-elle un jour à mettre au point des traitements pour les troubles de la mémoire observés dans des maladies comme la dépression, le déclin cognitif lié à l'âge, la schizophrénie ou le trouble bipolaire. Une chose est sûre : les recherches sur la formation des souvenirs sont désormais moins bridées par l'éventail des techniques disponibles que par les limites de notre imagination. ■

EN CHIFFRES

25 %

des neurones activés par un premier souvenir le sont aussi par un second, moins de 5 heures plus tard. Cette réutilisation assure un lien entre les deux événements passés. Par comparaison, seuls 3 % des neurones sont réactivés si l'intervalle est de 7 jours.

BIBLIOGRAPHIE

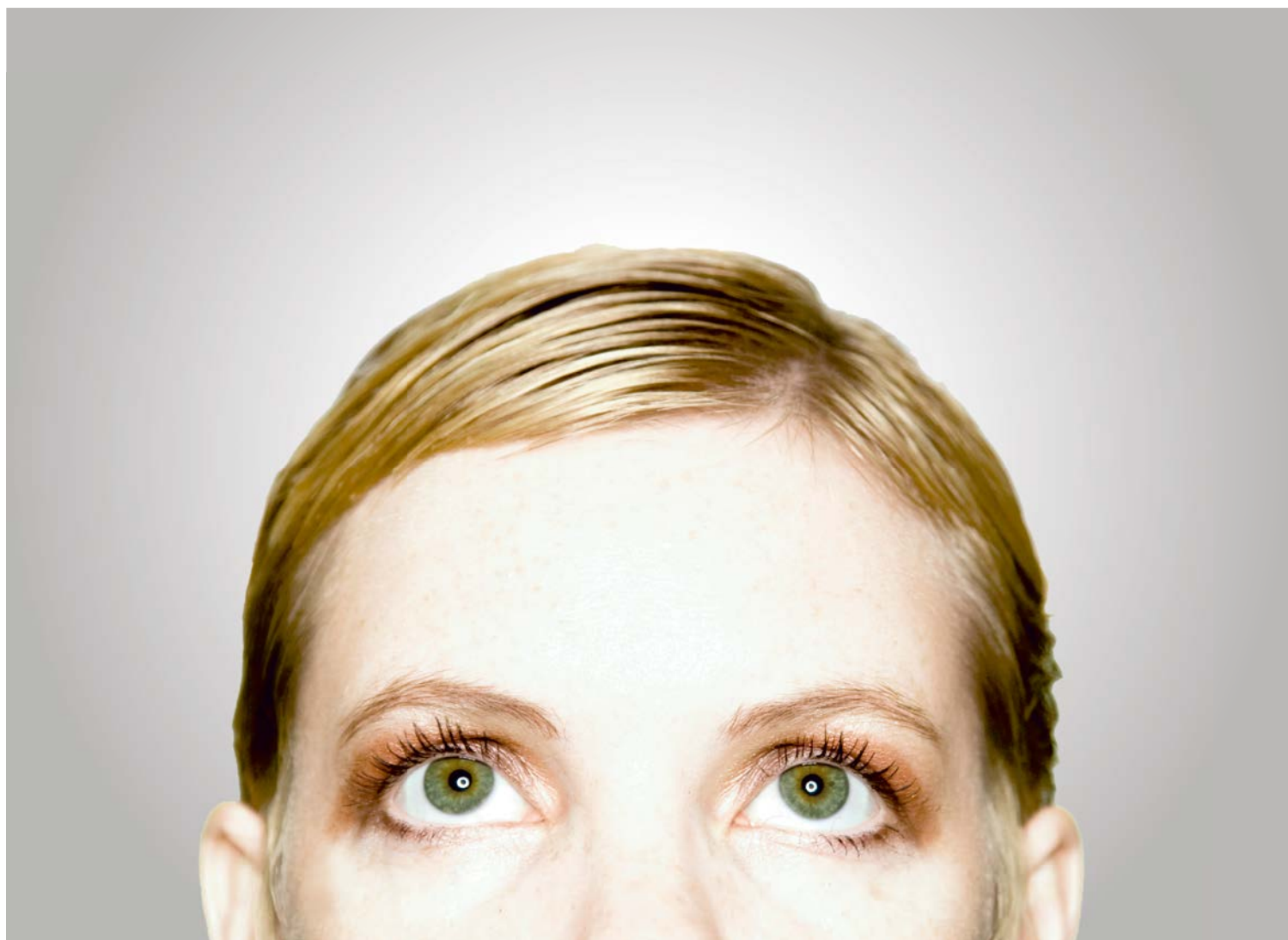
D. J. Cai et al., **A shared neural ensemble links distinct contextual memories encoded close in time**, *Nature*, vol. 534, pp. 115-118, 2016.

A. J. Rashid et al., **Competition between engrams influences fear memory formation and recall**, *Science*, vol. 353, pp. 383-387, 2016.

M. L. Schlichting et A. R. Preston, **Memory integration : Neural mechanisms and implications for behavior**, *Current Opinion in Behavioral Sciences*, vol. 1, pp. 1-8, 2015.

S. A. Josselyn et al., **Finding the engram**, *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 16(9), pp. 521-534, 2015.

Thomas Rogerson et al., **Synaptic tagging during memory allocation**, *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 15(3), pp. 157-169, 2014.



AcademiaNet offre un service unique aux instituts de recherche, aux journalistes et aux organisateurs de conférences qui recherchent des femmes d'exception dont l'expérience et les capacités de management complètent les compétences et la culture scientifique.

AcademiaNet, base de données regroupant toutes les femmes scientifiques d'exception, offre:

- Le profil des femmes scientifiques les plus qualifiées dans chaque discipline – et distinguées par des organisations de scientifiques ou des associations d'industriels renommées
- Des moteurs de recherche adaptés à des requêtes par discipline ou par domaine d'expertise
- Des reportages réguliers sur le thème »Women in Science«

Robert Bosch **Stiftung**

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

nature

POUR LA
SCIENCE

Une initiative de la Fondation Robert Bosch en association avec
Spektrum der Wissenschaft et Nature Publishing Group

www.academia-net.org

L'ESSENTIEL

> Le cerveau empêche les souvenirs de se mélanger en encodant les caractéristiques de chaque événement ou situation d'une façon qui nous permet de les différencier.

> Ce processus a lieu dans une région du cerveau qui génère des neurones tout au long de la vie. Ces derniers joueraient un rôle clé dans ce mécanisme.

> Les personnes souffrant de troubles anxieux ont des difficultés à distinguer les situations dangereuses de celles sans risque.

> Augmenter la neurogenèse chez ces personnes pourrait les aider à retrouver cette capacité.

LES AUTEURS



MAZEN A. KHEIRBEK
maître de conférences
en psychiatrie
à l'université de Californie
à San Francisco



RENÉ HEN
professeur de psychiatrie,
neurosciences et
pharmacologie à l'université

Des neurones en plus pour une mémoire bien rangée

OÙ AVEZ-VOUS GARÉ VOTRE VOITURE HIER SOIR ? ET AVANT-HIER ?
CHAQUE JOUR, NOTRE CERVEAU PRODUIT DE NOUVEAUX NEURONES
QUI NOUS AIDENT À DISTINGUER LES SOUVENIRS SEMBLABLES.
ET À ÉVITER DU MÊME COUP LES ASSOCIATIONS ANXIOGÈNES.

Des siècles durant, on a cru que le cerveau adulte ne pouvait fabriquer de nouveaux neurones. Même Santiago Ramón y Cajal, l'histologiste barcelonais qui fut, à la fin du XIX^e siècle, le père fondateur des neurosciences modernes, a déclaré impossible un tel renouvellement neuronal. Après des décennies d'observation minutieuse et d'illustrations détaillées de l'architecture microscopique des cellules nerveuses et de leurs connexions, Ramón y Cajal a conclu que, dans le cerveau adulte, «les voies nerveuses sont quelque chose de fixe, de fini et d'immuable; tout peut mourir, rien ne peut naître» (*Estudios sobre la degeneración y regeneración del sistema nervioso*, 1914).

Ainsi, quand Joseph Altman, travaillant alors à l'institut de technologie du Massachusetts (MIT), publia dans les années 1960

une série d'articles montrant que de nouveaux neurones apparaissaient dans le cerveau de cochons d'Inde adultes, il fut largement ignoré. Cette indifférence n'est pas très surprenante: d'un point de vue purement logique, l'ajout de nouveaux neurones dans un cerveau pleinement développé pourrait conduire à un désastre. Après tout, le cerveau stockant des informations dans des réseaux spécifiques de connexions nerveuses, on pourrait penser que l'introduction aléatoire de cellules inexpérimentées dans ces réseaux paralyserait notre capacité d'encoder et de récupérer correctement les informations, et sèmerait ainsi la confusion dans nos mémoires.

Mais la logique s'incline devant les résultats expérimentaux et, dans les années 1990, les données ont commencé à affluer. En examinant minutieusement des cerveaux de rongeurs, de singes et même d'humains adultes, des



Toute la vie, de nouveaux neurones poussent dans deux régions de notre cerveau, l'hippocampe et le bulbe olfactif. Certains joueraient un rôle clé dans l'organisation de nos souvenirs.

Des chercheurs ont prouvé que de nouveaux neurones continuent d'apparaître pendant toute la vie dans deux régions cérébrales, l'une intervenant dans l'odorat et l'autre, l'hippocampe, impliquée dans l'apprentissage, la mémoire et les émotions.

Dès lors, les neuroscientifiques se sont interrogés sur la fonction exacte de ces néoneurones. Et si leur rôle dans le système olfactif reste encore quelque peu obscur, l'hippocampe a commencé à révéler ses secrets. Les travaux de notre équipe et d'autres suggèrent que de jeunes neurones aideraient à enregistrer les souvenirs d'une façon qui les individualise et empêche qu'ils ne se superposent. Cette découverte pourrait conduire à de nouvelles approches pour traiter les troubles anxieux, notamment l'état de stress post-traumatique, car les personnes souffrant de ces troubles ont des difficultés à décrire la différence entre des situations suscitant une peur légitime et d'autres sans danger.

LE COUP DE LA MADELEINE DE PROUST

Fondamentalement, la mémoire consiste autant en rappels de souvenirs qu'en enregistrements. Le plus souvent, c'est le premier processus – par lequel un souvenir précis et détaillé surgit d'un simple coup d'œil, d'une odeur ou d'un goût – qui suscite l'étonnement. L'odeur d'une madeleine trempée dans une tasse de thé a immédiatement ramené le narrateur du roman de Marcel Proust *À la recherche du temps perdu* aux dimanches matin de son enfance :

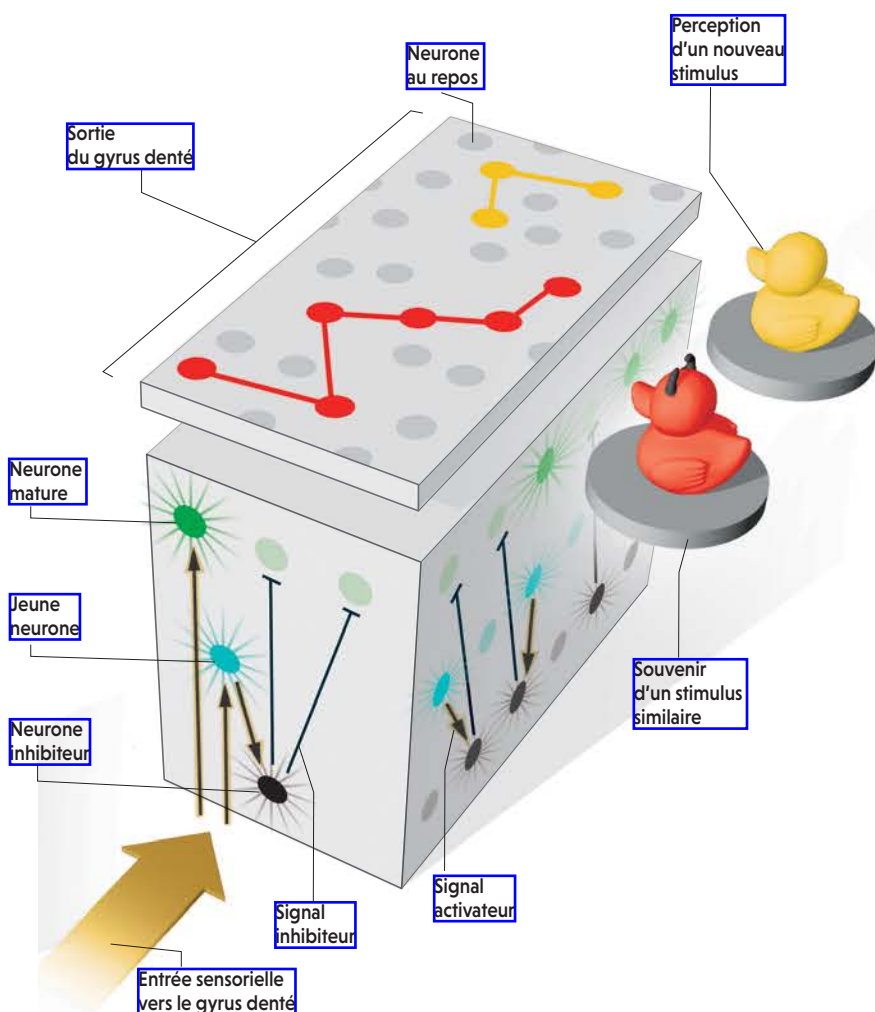
Et dès que j'eus reconnu le goût du morceau de madeleine trempé dans le tilleul que me donnait ma tante [...] aussitôt la vieille maison grise sur la rue, où était sa chambre, vint comme un décor de théâtre s'appliquer au petit pavillon, donnant sur le jardin [...]; tout Combray et ses environs, tout cela qui prend forme et solidité, est sorti, ville et jardins, de ma tasse de thé.

La capacité de se rappeler un souvenir entier, complet, à partir d'un indice perceptif (*pattern completion* en anglais) est l'une des fonctions les plus importantes de l'hippocampe. Cependant, pour qu'un souvenir revienne, il doit être déposé correctement. La capacité de distinguer deux souvenirs dont les entrées sensorielles se ressemblent (*pattern separation* en anglais) est l'autre tâche fondamentale de l'hippocampe. Grâce à cette capacité, qui apparaît liée à la production de nouveaux neurones, nous nous souvenons (dans la plupart des cas) de l'endroit où nous avons garé la voiture ce matin, par opposition à celui où nous l'avions laissée la veille ou la semaine passée.

Une telle distinction est indispensable non seulement pour maintenir l'organisation des souvenirs, mais également pour guider notre comportement – par exemple pour nous

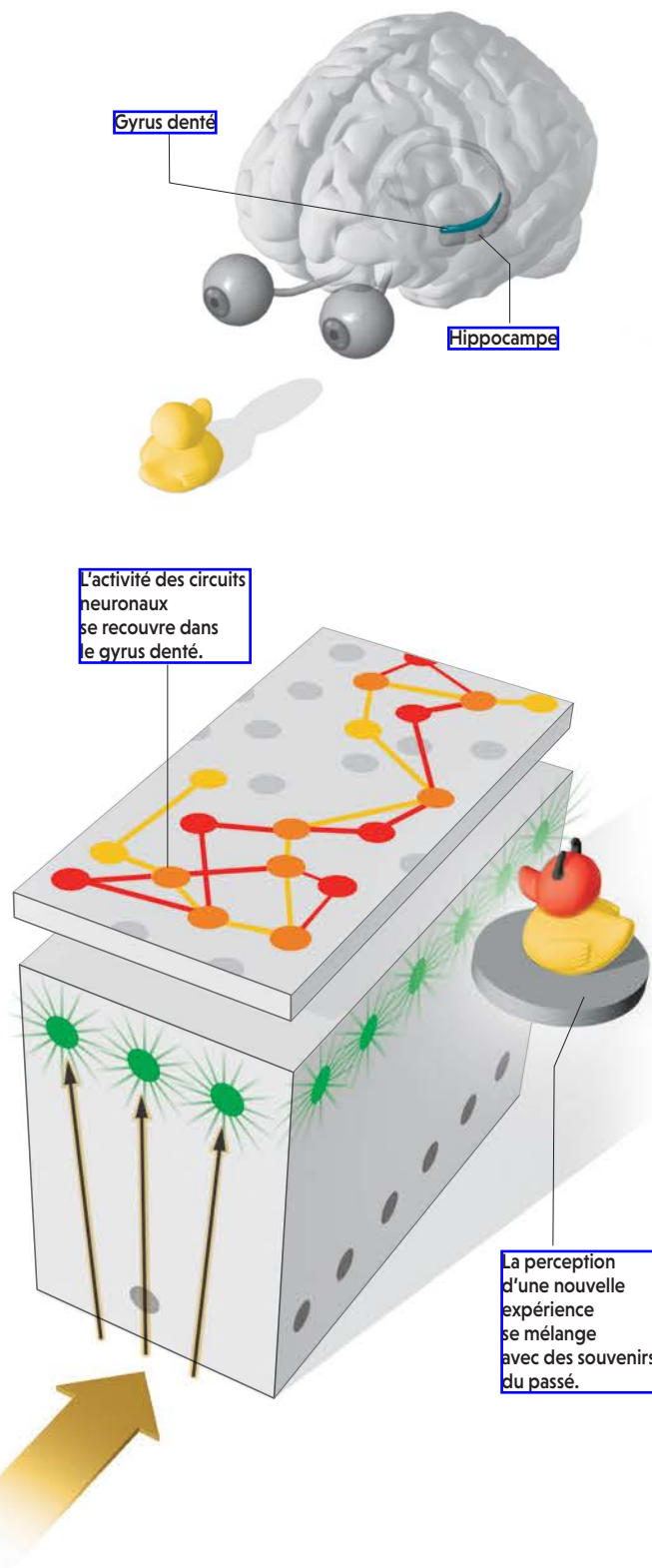
LA FONCTION DES NOUVEAUX NEURONES

Les nouveaux neurones qui naissent dans le gyrus denté du cerveau (ci-contre) sont impliqués dans la différenciation d'expériences similaires. Les auteurs ont proposé une hypothèse pour expliquer comment ils contribuent à ce processus (en bas à gauche) et pourquoi leur déficit pourrait conduire un individu à confondre une situation sans danger avec une autre effrayante à laquelle il aurait été confronté par le passé (en bas à droite), comme c'est le cas dans un état de stress post-traumatique.



COMMENT LES NEONEURONES RENFORCENT LES DIFFÉRENCES

Les nouveaux neurones pourraient favoriser la différenciation des expériences proches en encodant de nouvelles informations plus efficacement que des cellules plus âgées. Les auteurs privilégient cependant un autre point de vue : dans le gyrus denté, une situation active les neurones tant jeunes que matures. Les jeunes neurones activent alors des neurones intermédiaires inhibiteurs qui répriment la majeure partie de l'activité du gyrus denté (*couleur estompée*). Cet effet rehausse les détails distinctifs existant entre la nouvelle expérience (*en jaune*) et le souvenir d'une expérience similaire (*en rouge*) parfois plus sinistre.



Gyrus denté

Hippocampe

L'activité des circuits neuronaux se recouvre dans le gyrus denté.

La perception d'une nouvelle expérience se mélange avec des souvenirs du passé.

SANS NOUVEAUX NEURONES, LA CONFUSION RÉGNE

Selon l'hypothèse des auteurs, l'absence de nouveaux neurones supprime les effets inhibiteurs des neurones intermédiaires dans le gyrus denté. De ce fait, un plus grand nombre de neurones s'activent en réponse aux nouvelles informations et aux souvenirs qu'elles évoquent. Les représentations neuronales des deux événements sont donc susceptibles de se recouvrir de façon excessive, ce qui entraîne une perception erronée de la situation, où les deux événements ont fusionné.

orienter vers l'endroit où nous nous souvenons avoir vu notre voiture pour la dernière fois. Contrairement au rappel d'un souvenir entier à partir d'un indice perceptif, qui semble se produire principalement dans une région de l'hippocampe appelée CA3, la différenciation des souvenirs a lieu dans une structure de l'hippocampe nommée gyrus denté.

Nous avons tous deux décidé d'étudier le rôle des néoneurones dans ce processus en partie parce que ces cellules sont connues pour apparaître précisément dans cette région. Des cellules souches neurales, les cellules parentales qui produisent en série de nouveaux neurones, y forment une fine couche de cellules appelée la zone sous-granulaire. Les néoneurones quittent ensuite cette pépinière pour migrer vers le reste du gyrus denté où ils s'intègrent dans les circuits neuronaux existants. Chez la souris, les néoneurones peuvent représenter jusqu'à 10% des neurones du gyrus denté. Une étude de 2013 utilisant une forme de datation au carbone pour estimer la «date de naissance» des cellules a quant à elle montré que le cerveau humain adulte continue de produire de nouveaux neurones à une vitesse constante jusqu'à un âge avancé, acquérant ainsi environ 700 neurones chaque jour.

DES SOURIS CONFUSES ET PLUS ANXIEUSES

En 2009, nous avons commencé à étudier le rôle des néoneurones dans la différenciation des souvenirs chez la souris. Nous avons tout d'abord soit éliminé les jeunes neurones immatures en bloquant la neurogenèse, soit augmenté leur nombre en favorisant la survie des cellules. Puis nous avons regardé si ces manipulations modifiaient la capacité des animaux à distinguer des situations similaires.

Comme dans nombre de recherches comportementales, nous avons utilisé un type de conditionnement développé par le physiologiste russe Ivan Pavlov au début des années 1900. Pavlov a découvert que lorsqu'il agitait une clochette au moment de nourrir ses chiens, les animaux finissaient par associer le son à la nourriture et commençaient à saliver dès qu'ils entendaient le tintement. Au cours des cent dernières années, cette forme simple d'apprentissage a été très exploitée pour tester les bases neurologiques de la mémoire.

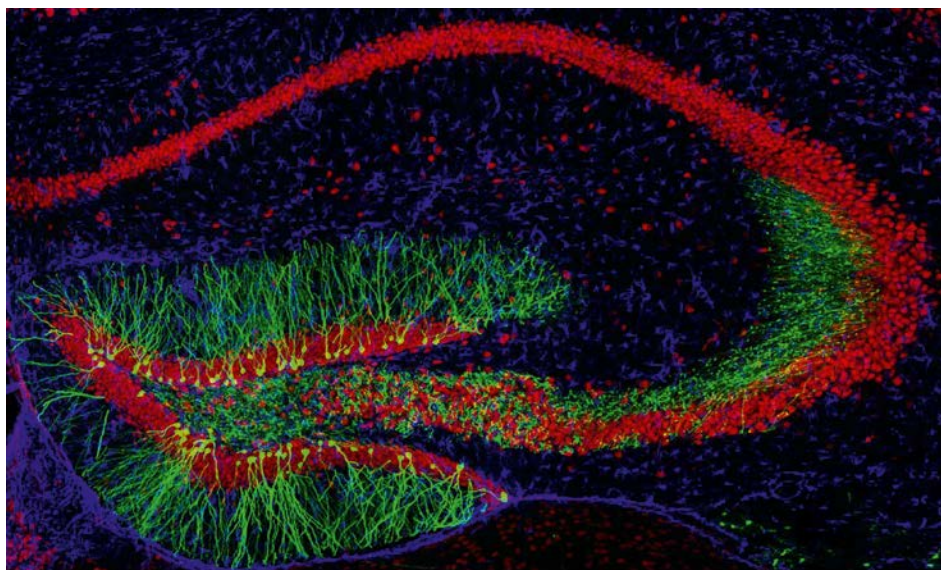
Dans nos expériences, au lieu d'agiter une sonnette lors des repas, nous avons entraîné des souris à anticiper la réception d'une légère décharge électrique aux pattes lorsqu'elles étaient retirées de leur cage habituelle et placées dans une enceinte non familière. Après quelques expositions, un animal apprend à associer le nouvel environnement au choc électrique, de sorte que chaque fois qu'il est placé dans cette enceinte, il s'immobilise de peur.

❑ Pour tester la capacité des souris à distinguer des souvenirs proches, nous les avons alors placées dans une cage très similaire, mais différente. Par exemple, si la cage où elles recevaient le choc était carrée avec des parois argentées, un éclairage bleu et une nette odeur d'anis, l'autre cage avait la même forme et la même couleur, mais une odeur de banane ou de citron. Les animaux étaient tout d'abord effrayés. Cependant, si aucun choc ne s'ensuivait, ils apprenaient vite à distinguer les deux situations, s'immobilisant dans la cage où ils recevaient le choc et ne manifestant aucune peur dans l'autre.

Notre raisonnement était le suivant: si la production de nouveaux neurones est indispensable pour séparer des souvenirs, la suppression de la neurogenèse dans le gyrus denté d'un animal doit rendre plus difficile la distinction entre les deux situations. Et c'est ce que nous avons observé. Les animaux privés de nouveaux neurones restaient excessivement nerveux, réagissant avec inquiétude dans les deux environnements, même après des passages répétés dans les cages inoffensives. Incapables de dissocier les deux souvenirs, les animaux ont généralisé leur peur de la cage d'origine, étendant leur anxiété à tout lieu qui lui ressemblait.

Inversement, nous avons amplifié expérimentalement le nombre de néoneurones dans le gyrus denté de souris en supprimant un gène qui, habituellement, favorise la mort de toute nouvelle cellule non indispensable. Les souris obtenues, dont le gyrus denté contenait une plus grande densité de nouveaux neurones, distinguaient plus facilement la cage infligeant le choc de celle qui lui ressemblait et elles se sentaient plus vite en sécurité dans l'enceinte sans danger. Ces observations confirmaient que des néoneurones jouent un rôle dans l'encodage et la capacité de distinguer des souvenirs semblables, mais différents.

D'autres laboratoires ont obtenu des résultats similaires. Des chercheurs menés conjointement par Fred Gage, de l'institut Salk pour les études biologiques à San Diego en Californie, dont les travaux ont participé à l'explosion des recherches sur la neurogenèse, dans les années 1990, et par Timothy Bussey, de l'université de Cambridge, au Royaume-Uni, ont montré que la suppression de nouveaux neurones dans le cerveau de souris adultes diminue leur capacité de distinguer des objets peu espacés, qu'il s'agisse de choisir entre deux branches d'un labyrinthe ou de toucher la bonne image avec leur museau sur l'écran d'un ordinateur. L'équipe de Timothy Bussey a par ailleurs observé que l'amplification de la neurogenèse améliorait les performances des souris lors du test sur écran. De plus, en utilisant un protocole de conditionnement similaire à



LES NÉONEURONES
DE L'HIPPOCAMPE

Sur cette coupe de l'hippocampe d'une souris adulte observée au microscope à fluorescence, de nouveaux neurones viennent de se former (en vert) dans le gyrus denté (la structure rouge en forme de V couché).

celui que nous avons utilisé, Susumu Tonegawa et ses collègues du MIT ont confirmé que les souris privées de nouveaux neurones sont incapables de distinguer une situation sûre d'une autre dangereuse.

DES NÉONEURONES POUR FREINER L'ACTIVITÉ DU CERVEAU

Ces études n'ont pas été menées chez l'humain. Mais si la neurogenèse est importante pour que nous distinguions des souvenirs, on peut penser qu'une interruption de ce processus sera associée à quelque perturbation de l'activité du gyrus denté, où naissent et résident les néoneurones. De fait, un tel lien a été observé chez des sujets humains. Utilisant l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle pour détecter l'activité neuronale, Michael Yassa, alors à l'université Johns-Hopkins, à Baltimore, aux États-Unis, et Craig Stark, de

Les souris privées de nouveaux neurones sont incapables de distinguer deux souvenirs qui se ressemblent

l'université de Californie à Irvine, ont montré que des personnes ayant des difficultés à distinguer différents objets similaires présentent une forte activité dans le gyrus denté.

L'observation d'une hyperactivité plutôt que d'une diminution d'activité paraît contre-intuitive, mais elle pourrait avoir du sens. Supposons que chaque situation stimule un réseau étendu de neurones du gyrus denté, disons 95% des neurones. Les souvenirs associés à chacune se mélangeraient et ne seraient plus distincts. Peut-être est-ce un tel processus qui se produit chez ces personnes. À l'inverse, le gyrus denté d'un individu normal accentuerait les différences entre un événement et le suivant en activant sélectivement des sous-ensembles de neurones qui ne se chevauchent pas. Par exemple, si la place de parking trouvée ce matin a activé disons cinq neurones du gyrus denté, celle de la veille serait associée à un autre ensemble de cinq neurones.

Nous avons donc émis l'hypothèse que de nouveaux neurones favoriseraient la séparation des souvenirs en réfrénant l'activité générale du gyrus denté. Lors de leur maturation, les néoneurones semblent interagir préférentiellement avec des neurones inhibiteurs. Lorsque

EN CHIFFRES

700

neurones naissent chaque jour dans l'hippocampe d'un humain adulte âgé d'une cinquantaine d'années.

2-6

semaines, c'est la période critique du développement des nouveaux neurones pendant laquelle ils sont particulièrement excitables et plastiques.

ces cellules inhibitrices sont excitées, elles freinent l'activité d'autres neurones du gyrus denté. Ce lien entre néoneurones et baisse de l'activité du gyrus denté est corroboré par des études menées chez des souris dont la neurogenèse a été supprimée. Ces souris, dépourvues de néoneurones, présentent une forte activité spontanée dans le gyrus denté, ce qui suggère que les néoneurones contrôlent l'activité neuronale générale dans cette structure.

L'EFFET DU PROZAC DÉPEND DE LA NEUROGENÈSE

Si le rôle de la neurogenèse dans la différenciation des souvenirs chez l'humain se confirme, cette découverte pourrait fournir de nouvelles pistes pour expliquer les troubles anxieux tels que l'état de stress post-traumatique. Les troubles anxieux se caractérisent par une exagération, parfois incapacitante, de la réaction de peur, même lorsque l'environnement ne présente pas de menace immédiate. Les psychologues ont longtemps soupçonné que la généralisation à outrance des souvenirs était une source possible de tels troubles. Une telle généralisation pourrait se produire à la suite d'un traumatisme, si l'individu n'arrive plus à

Toutes les

archives



■ Pour la Science
■ Dossier
Pour la Science
depuis

1996

Disponibles sur www.pourlascience.fr*

*Numéros à lire en ligne ou à télécharger au format PDF

▢ distinguer l'événement traumatisant d'une situation inoffensive présentant une certaine similitude avec celui-ci, par exemple un pique-nique interrompu par un bruit assourdissant. Les personnes capables de différencier les deux événements tressailliront probablement au bruit, mais comprendront vite que le parc n'est pas une zone de combat et poursuivront leur repas. En revanche, un vétéran dont la capacité de différencier les événements est affaiblie sera sans doute incapable de différencier la pétarade d'une voiture et le souvenir du champ de bataille – une erreur susceptible de déclencher une crise de panique.

Des expériences chez l'humain ont confirmé le lien entre une capacité réduite à distinguer deux souvenirs similaires et les troubles anxieux. Shmuel Lissek, de l'université du Minnesota, et ses collègues ont par exemple montré que les personnes souffrant de troubles de panique ont tendance à être effrayées lorsqu'elles voient un objet ressemblant à un autre dont la vue a été associée à un léger coup sur le poignet.

Des études menées avec un antidépresseur, la fluoxétine (commercialisée sous le nom de Prozac), ont conforté l'idée selon laquelle un déficit de production de nouveaux neurones peut alimenter des troubles anxieux. La fluoxétine soulage l'anxiété tant chez les animaux que chez l'humain. Des souris traitées avec ce médicament sont beaucoup moins nerveuses et plus aventureuses lorsqu'elles sont placées dans un nouvel environnement. De plus, ce renforcement de leur audace sous l'effet du médicament est totalement dépendant de la production de nouveaux neurones : nous avons démontré en 2003 que des traitements inhibant cette production annulent les effets anxiolytiques de la fluoxétine.

DU SPORT POUR PLUS DE NEURONES ?

Depuis, l'un de nous (René Hen), en collaboration avec des collègues de l'université Columbia, a montré que la neurogenèse est également nécessaire pour que la fluoxétine corrige des comportements dépressifs chez des macaques adultes. Nous commençons aussi à étudier le rôle des néoneurones directement chez des sujets humains. Pour l'instant, en examinant des cerveaux de patients après leur décès, nous avons observé que le traitement aux antidépresseurs augmente le nombre de cellules souches neurales (celles qui produisent de nouveaux neurones) dans le gyrus denté de patients présentant des troubles dépressifs majeurs. Il s'agit à présent de déterminer si la neurogenèse est nécessaire pour que ces médicaments traitent efficacement la dépression et l'anxiété chez l'humain.

Avec cette compréhension nouvelle du rôle du gyrus denté et de ses néoneurones

Chez la souris, le P7C3 favorise la survie de néoneurones et a un effet antidépresseur

dans la différenciation des souvenirs et, potentiellement, dans l'action des antidépresseurs, nous avons bon espoir que de nombreuses personnes souffrant de dépression, d'état de stress post-traumatique et de baisse des capacités cognitives pourront bénéficier d'interventions visant à amplifier la neurogenèse dans le cerveau adulte. Une méthode qui a déjà fait ses preuves chez des animaux adultes est l'exercice physique. Ce fut même une découverte liée à l'exercice physique qui raviva l'intérêt pour la neurogenèse à la fin des années 1990 : Fred Gage observa que chez les souris adultes qui avaient accès à une roue d'exercice, le nombre de neurones cérébraux augmentait. Cependant, l'exercice physique agit sans doute de multiples façons : de même que les antidépresseurs comme la fluoxétine, il influence probablement aussi le comportement et l'activité neuronale indépendamment de ses effets sur la neurogenèse, par exemple en favorisant l'établissement d'interconnexions neuronales renforcées et plus nombreuses.

Une méthode plus ciblée pour augmenter la production de nouveaux neurones pourrait agir de façon plus spécifique. Une récente recherche de composés chimiques stimulant la neurogenèse dans le gyrus denté de souris a révélé un candidat prometteur, nommé P7C3, qui favorise la survie de néoneurones. En 2015, une équipe de l'université du Texas, à Dallas, a montré que cette molécule, grâce à son action neuroprotectrice, a un effet antidépresseur chez la souris. Ces résultats préliminaires laissent espérer que des approches pharmacologiques augmentant la neurogenèse seront un jour opérationnelles contre les troubles anxieux. Ramón y Cajal n'avait jamais imaginé que le cerveau adulte lui-même produisait de nouveaux neurones. Mais le potentiel thérapeutique d'un tel rajeunissement neuronal ne lui avait pas échappé. Comme il l'avait noté dans son ouvrage *Estudios sobre la degeneración y regeneración del sistema nervioso*, «il appartient à la science du futur de changer, dans la mesure du possible, ce décret cruel». ■

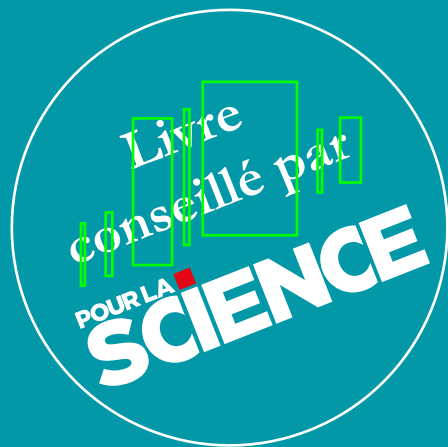
BIBLIOGRAPHIE

C. Anacker et R. Hen, **Adult hippocampal neurogenesis and cognitive flexibility – linking memory and mood**, *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 18(6), pp. 335-346, 2017.

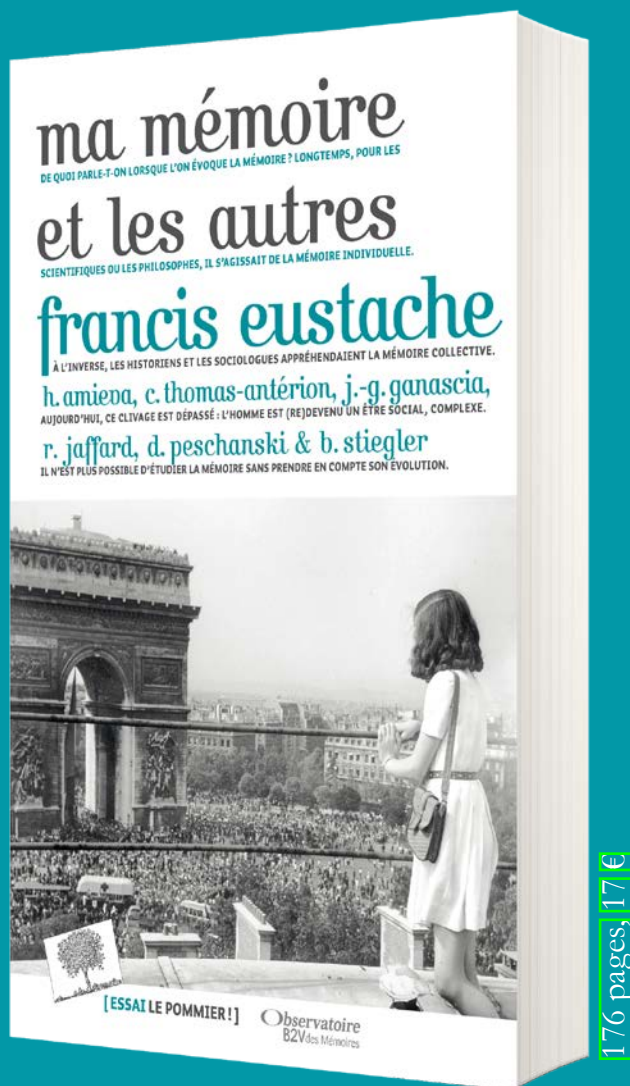
L. J. Drew et al., **Adult neurogenesis in the mammalian hippocampus : Why the dentate gyrus?**, *Learning and Memory*, vol. 20(12), pp. 710-729, 2013.

M. A. Kheirbek et al., **Neurogenesis and generalization : A new approach to stratify and treat anxiety disorders**, *Nature Neuroscience*, vol. 15, pp. 1613-1620, 2012.

A. Sahay et al., **Increasing adult hippocampal neurogenesis is sufficient to improve pattern separation**, *Nature*, vol. 472, pp. 466-470, 2011.



La mémoire, une construction en partage



Aujourd'hui, dans notre monde hyperconnecté où des « événements-monde » bouleversent les devenirs individuels, le clivage entre mémoire individuelle et mémoire collective est dépassé.

Une réflexion pluridisciplinaire qui met en lumière la complexité de nos mémoires – individuelle, collective et partagée...

Retrouvez toutes nos nouveautés sur notre site
www.editions-lepommier.fr



L'ESSENTIEL

> Parmi les énigmes que pose la planète Jupiter, la formation des bandes atmosphériques s'étendant d'est en ouest intrigue les spécialistes de planétologie et de mécanique des fluides.

> En effet, d'après les simulations, de telles structures devraient être instables et disparaître rapidement.

> Deux modèles concurrents permettent d'expliquer la dynamique de l'atmosphère.

> Pour les départager, les chercheurs réalisent des simulations numériques et des expériences en laboratoire. La sonde *Juno*, en orbite autour de Jupiter depuis 2016, apportera aussi de précieuses informations.

LES AUTEURS



SIMON CABANES
postdoctorant
au Laboratoire
de météorologie
dynamique, à Paris



BENJAMIN FAVIER
chercheur
du CNRS à l'Irphé,
à Marseille



MICHAEL LE BARS
chercheur
du CNRS à l'Irphé,
à Marseille

Au cœur des bandes de Jupiter

POURQUOI L'ATMOSPHÈRE DE JUPITER PRÉSENTE-T-ELLE DES BANDES ? DEUX MODÈLES PROPOSENT UNE EXPLICATION À CETTE ÉNIGME. DES EXPÉRIENCES DE LABORATOIRE ET LES DONNÉES DE LA SONDE *JUNO*, EN ORBITE AUTOUR DE JUPITER, DEVRAIENT ENFIN LES DÉPARTAGER.

Connu depuis l'Antiquité, Jupiter est devenue plus qu'un simple point lumineux errant dans le ciel nocturne grâce à l'invention de la lunette astronomique. Sous l'œil d'un de ces instruments (même d'amateur), la planète exhibe de nombreuses tempêtes et tourbillons, dont la spectaculaire Grande tache rouge, observée depuis plus de trois cents ans, mais aussi de magnifiques bandes de couleurs blanche, ocre et brune parallèles à l'équateur.

Dessinées pour la première fois par le prêtre et astronome italien Niccolò Zucchi en 1630, décrites et observées par maints astronomes (dont Jean-Dominique Cassini et Christian Huygens au XVII^e siècle), les bandes joviennes sont maintenant photographiées avec une précision exceptionnelle par le télescope spatial *Hubble* (voir la photographie page ci-contre). Pourtant, elles continuent d'intriguer les planétologues, qui tentent de comprendre la formation et surtout la grande stabilité de ces structures qui couvrent des milliers de kilomètres à la surface de la planète.

Grâce aux données de la sonde *Juno*, actuellement en orbite autour de Jupiter, aux récents progrès dans le domaine des simulations numériques de l'atmosphère des planètes et des expériences en laboratoire, nous commençons à comprendre le mécanisme sous-jacent à ces bandes. Il serait d'ailleurs commun à toutes les planètes géantes gazeuses, comme le suggèrent les observations de Saturne.

Ces bandes sont constituées de différentes couches de nuages qui recouvrent l'intégralité de la planète et qui sont poussées par des vents violents mais persistants, alternativement dirigés vers l'est et vers l'ouest, avec des vitesses pouvant atteindre 600 kilomètres par heure. On parle alors de jets zonaux, c'est-à-dire d'écoulements localisés, intenses et circulant dans la direction est-ouest. Cette structure de jets zonaux alternés constitue la trace visible de l'activité intense dont Jupiter est le siège.

En dehors des observations menées depuis la Terre, de nombreuses informations relatives à Jupiter ont été collectées par des missions spatiales. L'exploration de la planète a débuté en 1973 avec le survol de la sonde *Pioneer 10* et,

L'atmosphère de Jupiter présente des structures étonnantes soulignées par une variété de couleurs, du blanc à l'ocre. Des jets zonaux s'étendent d'est en ouest, parsemés de cyclones dont le plus connu, la Grande tache rouge est visible dans l'hémisphère sud.



> un an plus tard, de *Pioneer 11*. Ces deux appareils ont notamment mis en évidence la présence d'une vaste et puissante magnétosphère, hébergeant une intense ceinture de radiations. D'autres sondes ont ensuite partiellement renforcé nos connaissances de l'atmosphère et de la magnétosphère joviennes, lors de leur périple vers d'autres objectifs (*Ulysses* en 1992, *Cassini-Huygens* en 2000, *New Horizons* en 2007). À celles-ci, il faut bien sûr ajouter *Voyager 1* et *Voyager 2* qui ont découvert, lors de leur survol de Jupiter en 1979, la présence d'anneaux et de plusieurs satellites, ainsi que l'activité volcanique exceptionnelle à la surface de la lune Io.

Par le passé, seule la sonde *Galileo*, durant sa mission d'exploration du système jovien entre 1995 et 2003, est restée en orbite autour de Jupiter. *Galileo* a notamment envoyé une petite sonde dans l'atmosphère de Jupiter, qui a analysé la composition élémentaire des couches supérieures, en descendant progressivement jusqu'à être écrasée par la pression.

Dès lors, les yeux de tous les passionnés et scientifiques sont aujourd'hui rivés sur la sonde *Juno*, arrivée en orbite jovienne en 2016. Placée sur une trajectoire elliptique, pour limiter son passage dans la ceinture de radiations qui perturberait, voire endommagerait ses circuits, *Juno* effectue, à chaque passage, des survols à seulement 5 000 kilomètres au-dessus des nuages. Équipée d'une caméra couleur et de huit instruments scientifiques, elle devrait ainsi collecter de nombreuses informations sur l'atmosphère, sa composition, ses interactions avec le champ magnétique, mais aussi sur la dynamique des bandes zonales qui nous intéressent ici et peut-être prouver l'existence d'un noyau solide...

UNE PLANÈTE GÉANTE ET LÉGÈRE

Avec un rayon 11 fois supérieur à celui de la Terre, Jupiter est la plus grosse planète du Système solaire. Mais elle est aussi étonnamment légère, puisque sa masse n'est « que » 318 fois celle de la Terre, soit 4 fois moins que si leurs compositions étaient équivalentes. De fait, Jupiter est une géante dite gazeuse, constituée très majoritairement d'hydrogène et d'hélium. Ces éléments sont sous forme gazeuse dans l'atmosphère, où l'on trouve aussi des traces d'ammoniac (NH_3), d'hydrosulfure d'ammonium (H_4NS) et d'eau. En quantités certes infimes (moins de 1 %), ces composés n'en sont pas moins essentiels, car ils sont à l'origine des différentes couches de nuages que nous observons (voir la figure page ci-contre).

Nos connaissances de la structure plus profonde sont ensuite partielles et spéculatives. En descendant vers le centre de la planète, les gaz se transforment progressivement sous l'effet de la pression, d'abord en un brouillard de plus en plus dense, puis en un manteau liquide. Et plus

profondément, sans doute vers 7 000 à 11 000 kilomètres sous la surface nuageuse, les atomes d'hydrogène s'ionisent, formant un fluide conducteur dont les mouvements engendrent le puissant champ magnétique de Jupiter. Ce n'est finalement que dans les pro-

La dynamique interne de Jupiter reste encore mal connue

fondeurs extrêmes, à plus de 60 000 kilomètres sous la couche de nuages, que l'on rencontrerait peut-être une surface solide, marquant la présence d'un noyau rocheux d'une taille comparable ou supérieure à la Terre tout entière.

Par opposition à notre planète aux frontières nettes entre l'atmosphère, les océans, le manteau solide silicaté et le noyau de fer liquide puis solide, la quasi-intégralité de Jupiter serait ainsi constitué d'un continuum, dépourvu notamment de séparation franche entre l'atmosphère et l'intérieur de la planète. L'existence de ce continuum implique que la modélisation de la dynamique de Jupiter est très différente de celle de la Terre.

Sur Terre, les mouvements atmosphériques sont régis principalement par le chauffage solaire et l'absorption en surface, qui déterminent la météorologie de la planète et les mouvements des grandes masses nuageuses. La chaleur interne de la Terre, due à l'énergie emmagasinée lors de la formation de la planète, à la radioactivité, à des changements de phase, etc., est responsable des mouvements de convection dans le manteau et de la tectonique des plaques, ainsi que des mouvements dans le noyau liquide conducteur à l'origine du champ géomagnétique.

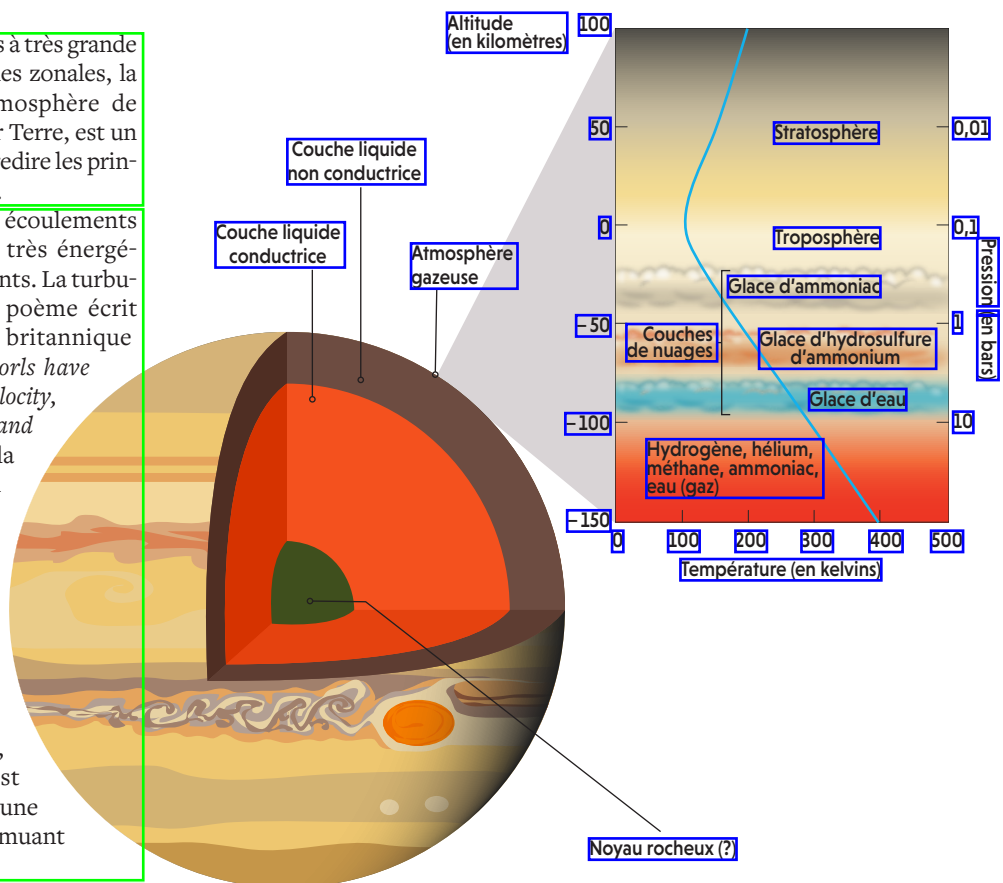
Sur Jupiter, ces deux sources de chaleur se combinent pour mettre en mouvement tout ou partie de la masse gazeuse et liquide d'hydrogène et d'hélium. Les bandes de la planète constituent la trace visible de ces mouvements; mais leur profondeur effective, leur source principale d'énergie et la façon dont l'énergie injectée se structure pour donner naissance à ces gigantesques bandes organisées restent très débattues.

Pour les physiciens qui s'intéressent aux processus géophysiques et atmosphériques,

expliquer l'existence de structures à très grande échelle spatiale, comme les bandes zonales, la Grande tache rouge dans l'atmosphère de Jupiter ou encore les cyclones sur Terre, est un problème ancien qui semble contredire les principes de la mécanique des fluides.

Le point commun de tous ces écoulements atmosphériques est qu'ils sont très énergétiques et donc forcément turbulents. La turbulence est bien résumée par ce poème écrit en 1922 par le mathématicien britannique Lewis Fry Richardson: «*Big whorls have little whorls, which feed on their velocity, and little whorls have lesser whorls and so on to viscosity*». Autrement dit, la turbulence est constituée d'un grand nombre de structures tourbillonnaires qui interagissent de façon à créer continuellement des tourbillons de plus en plus petits, jusqu'à ce que la viscosité du fluide, c'est-à-dire l'ensemble des phénomènes internes au fluide qui s'opposent à son mouvement, agisse et dissipe l'énergie. C'est ainsi par exemple qu'on mélange une goutte de lait dans son café en remuant rapidement le liquide.

Ce phénomène de «cascade turbulente» est au cœur de nombreux phénomènes en mécanique des fluides. On voit donc qu'un écoulement turbulent à grande échelle se déstabilise et tend à créer des structures de plus en plus localisées, et pas du tout des grandes structures cohérentes comme on en observe à la surface de Jupiter!



Jupiter est majoritairement composée d'hydrogène et d'hélium. Son atmosphère gazeuse présente plusieurs couches nuageuses dont la composition leur donne des couleurs différentes. En profondeur, avec l'augmentation de la pression, les gaz forment un brouillard, puis un manteau liquide. À environ 7000 kilomètres sous la couche des nuages, l'hydrogène s'ionise et forme une couche conductrice dont les mouvements sont responsables du champ magnétique intense de Jupiter. Les données recueillies par la sonde *Juno* devraient apporter une réponse à la question de l'existence ou non d'un noyau rocheux.

UNE TURBULENCE QUASI BIDIMENSIONNELLE

Cependant, si cette cascade turbulente (et donc l'impossibilité d'obtenir des grandes structures) est observée dans des volumes, des espaces tridimensionnels, il se passe exactement l'opposé si l'on considère un écoulement turbulent en deux dimensions, c'est-à-dire si le fluide est autorisé à bouger uniquement sur une surface. Dans ce cas, les tourbillons deviennent de plus en plus grands: on observe une cascade dite inverse (voir l'encadré page 50) par opposition à la cascade «directe» obtenue dans le cas tridimensionnel. Ainsi, à partir d'un écoulement vigoureux à petite échelle, on engendre des écoulements encore plus intenses à très grande échelle cette fois-ci (et qui ressemblent fortement aux cyclones et anticyclones de l'atmosphère terrestre!), exactement ce dont nous avons besoin pour expliquer en partie la formation des jets zonaux sur Jupiter.

Mais comment invoquer ce mécanisme bidimensionnel (2D) pour étudier l'atmosphère de Jupiter qui est intrinsèquement

tridimensionnelle (3D)? Plusieurs modèles existent et font débat depuis plusieurs décennies.

Le premier modèle, dit de couche mince, a été proposé dans les années 1950 et 1960, notamment par les Américains Seymour Hess et Hans Panofsky, puis par Andrew Ingersoll et Jeffrey Cuzzi, en s'inspirant du cas de l'atmosphère terrestre. L'idée repose sur un confinement géométrique de l'écoulement: dans un domaine 3D dont une dimension est beaucoup plus petite que les autres, les mouvements du fluide sont naturellement bloqués dans cette direction. Par exemple, la couche atmosphérique de Jupiter qui englobe les nuages de surface a une épaisseur de l'ordre de 100 kilomètres, à comparer à des dimensions latérales de plusieurs dizaines de milliers de kilomètres. Les mouvements verticaux sont négligeables et l'on peut considérer la dynamique atmosphérique comme quasi 2D. Il serait donc possible dans ces conditions d'avoir une cascade inverse avec la formation de grandes structures (voir l'encadré page suivante).

Le second modèle, dit profond, proposé par le physicien allemand Friedrich Busse en 1976, repose sur un confinement dynamique. Il s'appuie sur les travaux des Britanniques Joseph Proudman (1916), et Geoffrey Taylor (1917). Lorsqu'un fluide est en rotation rapide, les mouvements du fluide dans la direction de l'axe sont entravés, car la force de Coriolis (orthogonale à l'axe de rotation et au mouvement local du fluide) est dans ce cas dominante. Il se forme alors des colonnes tourbillonnaires orientées suivant l'axe de rotation, où le fluide circule uniquement dans le plan perpendiculaire à l'axe (voir l'encadré ci-dessous). La dynamique est alors quasi 2D, comme dans le modèle à couche mince. L'idée pourrait s'appliquer à Jupiter: la vitesse de rotation globale de la planète étant plus de dix fois supérieure à celles des vents, on peut considérer que les conditions requises pour le modèle profond sont probablement atteintes.

Ainsi, tant le modèle de couche mince que le modèle profond ramènent la géométrie tridimensionnelle de l'atmosphère jovienne à une configuration quasi bidimensionnelle où des structures à très grande échelle peuvent se former. Cependant, les grands tourbillons obtenus dans les simulations numériques ressemblent aux cyclones et à la Grande tache rouge, mais sont très différents des bandes observées à la surface de Jupiter. Comment expliquer ces bandes orientées préférentiellement d'est en ouest à partir des très vastes tourbillons créés par la cascade inverse? Là encore, les deux modèles évoqués plus haut apportent des explications différentes.

EXPLIQUER LA FORMATION DES JETS ZONAUX

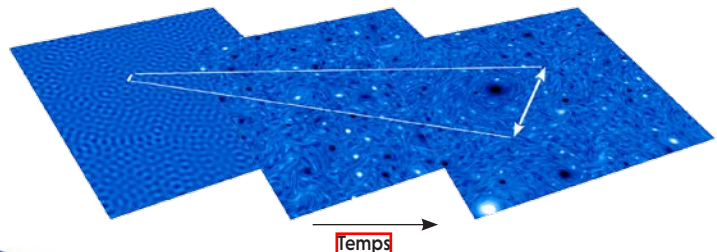
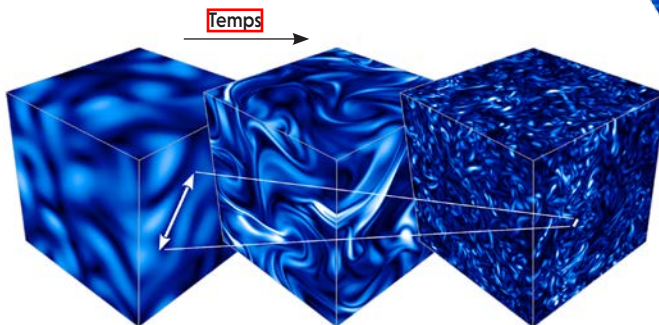
Sur Terre, la force de Coriolis a un rôle prépondérant dans la dynamique des océans et de l'atmosphère. Cette force, due à la rotation sur

LA TURBULENCE DANS DES STRUCTURES 2D OU 3D

Les simulations numériques de turbulence en deux ou trois dimensions ne conduisent pas aux mêmes phénomènes. Dans un espace tridimensionnel, l'énergie des écoulements est dissipée par la viscosité du fluide. Ainsi, les grandes structures tendent à disparaître au profit de tourbillons à petite échelle : on parle de cascade directe de l'énergie cinétique. On observe un comportement opposé si on oblige le fluide à se mouvoir dans un plan bidimensionnel. Les petites fluctuations s'organisent et forment

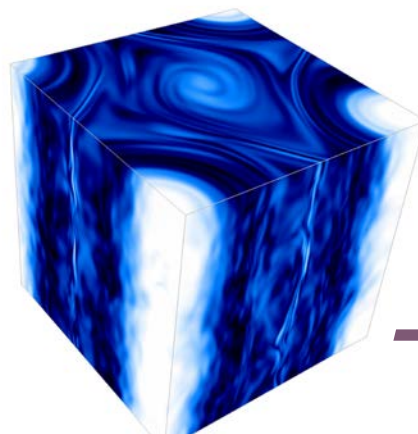
des grandes structures tourbillonnaires comparables aux cyclones. On parle alors de cascade inverse. Il est donc surprenant d'observer des structures stables à grande échelle dans un système intrinsèquement tridimensionnel tel que l'atmosphère de Jupiter. Cependant, dans les simulations d'un cube de fluide en rotation, le fluide se structure en colonnes alignées avec l'axe de rotation. Dans un plan perpendiculaire à cet axe, on observe des structures tourbillonnaires comme dans le cas bidimensionnel.

Modèle 2D : sur une surface carrée, les fluctuations à petite échelle dans l'écoulement s'organisent progressivement en tourbillons à grande échelle.



Modèle 3D : dans un volume tridimensionnel, si un écoulement présentant des structures à grande échelle est forcé au début de la simulation, il se déstabilise au fil du temps et tend à former des structures de plus en plus petites et localisées.

Modèle 3D en rotation : si le cube est mis en rotation, le fluide se structure en colonnes et on observe, comme sur la face supérieure, de grandes structures de type cyclonique.



elle-même de la planète, tend à dévier vers l'est une masse de fluide qui se déplace de l'équateur vers le pôle (vrai dans les deux hémisphères), et à la diriger vers l'ouest si le fluide se meut du pôle vers l'équateur. Il s'ensuit qu'un cyclone tourne dans le sens antihoraire dans l'hémisphère Nord et dans le sens horaire dans l'hémisphère Sud. Sur Jupiter, dans le cadre du modèle de couche mince, la situation serait similaire, avec une force de Coriolis très importante.

Le point crucial est que l'intensité de la force de Coriolis dépend de la latitude: elle est proportionnelle à la projection de la vitesse de rotation globale de la planète par rapport à la verticale du point de l'atmosphère où on fait le calcul. Ainsi, elle varie d'une valeur maximale aux pôles jusqu'à une valeur nulle à l'équateur.

Cette variation de la vorticité est à l'origine d'un phénomène ondulatoire: les ondes de Rossby, du nom du météorologue d'origine suédoise Carl-Gustaf Rossby qui les a détectées dans l'atmosphère terrestre en 1939. Ces ondes se propagent préférentiellement selon la direction est-ouest et tendent à focaliser dans la direction zonale l'énergie accumulée par les structures formées par la cascade inverse. En conséquence, sur Jupiter, les structures turbulentes grandissent par cascade inverse sans direction préférentielle jusqu'à une taille critique pour laquelle elles entrent en compétition avec les ondes de Rossby: toute l'énergie est alors canalisée dans la direction est-ouest, ce qui conduit à la formation des jets zonaux!

Dans le cas du modèle profond, le domaine fluide est tridimensionnel et s'organise selon des colonnes tourbillonnaires alignées avec l'axe de rotation de la planète. La hauteur de ces colonnes varie alors de façon non triviale avec la distance à l'axe de rotation. En effet, il ne faut pas oublier que cette couche fluide est limitée en profondeur par la couche conductrice animée d'une dynamique bien différente de celle accueillant les jets zonaux. Ainsi, la hauteur d'une colonne proche de l'axe de rotation est limitée par une zone de transition où le fluide devient conducteur sous les conditions planétaires de pression et de température. Notons que la profondeur de cette transition n'est pas bien connue (voir l'encadré ci-contre).

Maintenant, si l'on considère une colonne de fluide de volume constant, une variation de la hauteur de la colonne implique qu'elle sera tantôt étirée, tantôt compressée. Cette dynamique engendre un effet bien connu en mécanique du solide, ici transposé à un milieu fluide: l'effet «patineuse». Compressée, la colonne s'élargit et se met ainsi à tourner plus lentement, par conservation du moment cinétique, comme une patineuse qui écarte ses bras. Inversement, une colonne étirée tourne plus vite, comme la patineuse qui ramène ses bras contre son corps. Comme la hauteur d'une colonne varie en

DEUX MODÈLES EN CONCURRENCE

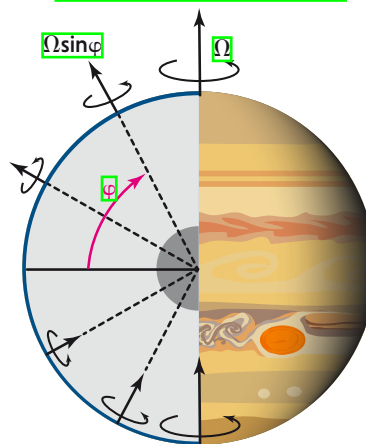
Les bandes zonales de l'atmosphère jovienne ne peuvent se former, *a priori*, que dans une géométrie bidimensionnelle. Pour expliquer leur formation, deux modèles ont été proposés.

Le modèle de couche mince suggère que la couche atmosphérique épaisse de 100 kilomètres (en bleu) n'interagit pas avec les couches plus basses. Son extension latérale, sur plusieurs milliers de kilomètres, permet de négliger son épaisseur. La rotation (Ω) de la planète induit une force de Coriolis qui met le fluide en rotation dans cette couche bidimensionnelle. Cette force dépend de la latitude (φ); elle est maximale aux

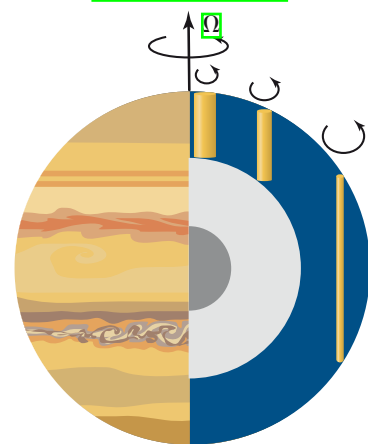
pôles et nulle à l'équateur. La variation de vorticité (l'intensité de la rotation) avec la latitude conduit à une injection de l'énergie cinétique atmosphérique préférentiellement dans une direction est-ouest, d'où la formation de jets zonaux.

Dans le modèle profond, on considère une épaisseur de fluide plus importante (en bleu). La rotation rapide de la planète fait que la force de Coriolis domine toutes les autres. Le fluide se meut alors selon des colonnes dont les axes sont alignés avec celui de la planète (en jaune). Dans ces colonnes, la rotation empêche tout mouvement du fluide dans la direction de l'axe. Les mouvements se font donc dans une géométrie bidimensionnelle, un plan perpendiculaire à l'axe de rotation de la planète. Cependant, la vitesse de rotation du fluide dans les colonnes dépend de la hauteur de la colonne. En considérant un volume de fluide constant, une colonne plus haute sera étirée et tournera plus vite, de la même façon qu'une patineuse accélère son mouvement de rotation si elle ramène les bras le long de son corps. La vorticité dépend donc de la latitude, ce qui, comme dans le modèle de couche mince, conduit à la formation de jets zonaux.

MODÈLE DE COUCHE MINCE



MODÈLE PROFOND



fonction de la distance à l'axe, son effet sur la vitesse des tourbillons est analogue à une variation avec la latitude de la vorticité, comme pour le modèle précédent: le modèle profond rend lui aussi compte de la formation d'ondes de Rossby et, au final, de jets zonaux.

Si les deux modèles se rejoignent dans la mesure où ils reposent tous les deux sur la nature quasi bidimensionnelle de l'écoulement et le concept de cascade inverse, ils se distinguent par la profondeur des jets impliqués. Historiquement, le modèle de couche mince, inspiré de la dynamique atmosphérique de la Terre, était le plus répandu. Mais, fin 2016, les premières données de la mission *Juno* ont surpris tout le monde. Des mesures de radiométrie ont suggéré que des structures cohérentes s'enfonceraient au moins sur plusieurs centaines de

L'ATMOSPHERE DE JUPITER SIMULÉE EN LABORATOIRE

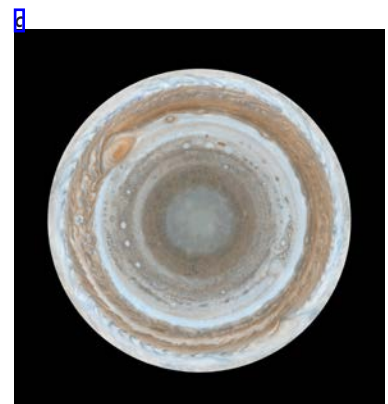
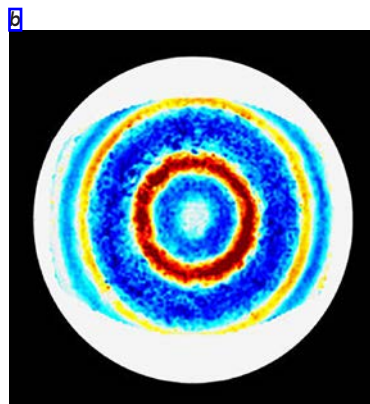
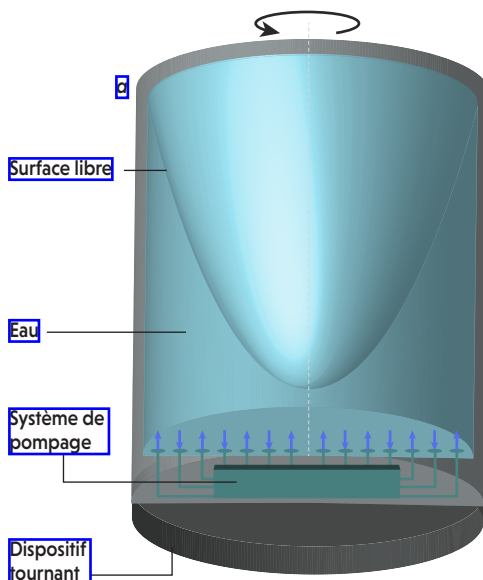
En laboratoire, il est très difficile de reproduire une géométrie sphérique comme celle des enveloppes planétaires avec une force de gravité orientée dans la direction radiale, c'est-à-dire vers le centre de la sphère. Cependant, il est possible de créer les conditions physiques nécessaires à la formation de jets zonaux

avec une géométrie cylindrique. Le dispositif conçu à l'Institut de recherche sur les phénomènes hors équilibre (Irphé), à Marseille, consiste en une cuve cylindrique de 1 mètre de diamètre contenant 400 litres d'eau et dont l'axe coïncide avec celui d'une table tournante sur laquelle elle est placée (a). De l'eau circule en circuit fermé par de petits trous à la base de la cuve, comme dans

un jacuzzi. Cette injection d'énergie à petite échelle modélise la formation de mouvements du fluide par les sources de chaleur interne et externe dans Jupiter. Dans d'autres expériences équivalentes, les chercheurs injectent l'énergie à l'aide de petits aimants entraînant de l'eau salée conductrice d'électricité ou en engendrant de la convection (comme dans une casserole d'eau que l'on fait bouillir) pour mettre le fluide en mouvement.

Une fois le cylindre mis en rotation (à 75 tours par minute), la surface de l'eau prend la forme d'une parabole en raison de la force centrifuge. Regarder le dispositif du dessus revient à regarder Jupiter depuis le pôle. La hauteur de fluide augmente en allant du centre de la cuve (le pôle de Jupiter) au bord du cylindre (les basses latitudes). On reproduit ainsi la configuration du modèle profond : le système en rotation rapide devient quasi bidimensionnel, permettant la formation de grandes structures par cascade inverse, avec une forte anisotropie de la topographie, qui conduit à la formation des jets zonaux.

Grâce à une profondeur d'eau assez grande (20 centimètres au centre et 90 centimètres aux bords) et une vitesse de rotation élevée, les auteurs ont pu approcher des régimes turbulents planétaires. Ils observent alors la formation de six jets zonaux (b, vue du dessus de la cuve en fausses couleurs indiquant la vitesse du fluide par rapport à la rotation de la cuve) dans l'écoulement sur la surface parabolique de leur dispositif, comparables à ceux de Jupiter vue depuis le pôle sud par la sonde Cassini (c).



kilomètres sous la couche nuageuse. Les bandes seraient plus profondes que prévu, relançant ainsi le débat sur le modèle le plus approprié pour expliquer l'origine des jets zonaux.

Afin de départager le modèle de couche mince et le modèle profond, les chercheurs s'appliquent à confronter les résultats des simulations aux observations directes de la géante gazeuse. Ils mettent au point des simulations numériques mobilisant de puissants ordinateurs pour modéliser les mouvements d'un fluide dans des géométries aussi complexes que peut l'être une enveloppe planétaire sphérique. Et ils conçoivent des dispositifs expérimentaux en laboratoire qui reproduisent les conditions planétaires souhaitées.

Les simulations numériques ont l'inconvénient d'être gourmandes en temps de calcul. Même en utilisant un supercalculateur à plusieurs dizaines de milliers de processeurs, il est impossible de simuler ne serait-ce que quelques

secondes de la dynamique complète de Jupiter. Une solution est de simplifier le problème pour réduire les calculs nécessaires.

En particulier, le temps de calcul d'une telle simulation dépend fortement de la résolution spatiale, c'est-à-dire du nombre de « pixels » utilisés pour décrire le mouvement du fluide. Or, comme nous l'évoquions précédemment, la formation des bandes à grande échelle repose sur des mouvements à petites échelles (mouvements turbulents). Si la résolution est trop faible, on risque de passer à côté du phénomène que l'on cherche à mettre en évidence. À l'inverse, si la résolution est trop importante, le temps de calcul sera inutilement long. Les physiciens adoptent donc la configuration qui offre le meilleur compromis entre une bonne résolution et des temps de calcul raisonnables.

Le cas du modèle de couche mince est très avantageux de ce point de vue, puisqu'il

Les premiers résultats de *Juno* penchent pour une origine des jets zonaux plus profonde qu'attendue

permet de négliger la composante verticale du mouvement du fluide. Le calcul se fait uniquement le long de la surface sphérique de la planète. Mais si ce modèle est peu coûteux en temps de calcul, il n'est pas pleinement satisfaisant lorsqu'on le confronte aux observations. En effet, les bandes de Jupiter obtenues par ce type de simulations reproduisent bien les bandes observées aux hautes latitudes, mais les mouvements dans la direction est-ouest à l'équateur deviennent presque systématiquement ouest-est, ce qui met en doute la fiabilité du modèle.

UNE SPHÈRE DE MIEL

Le modèle profond, lui, doit prendre en compte la totalité du volume fluide non conducteur. La question de la résolution devient alors critique, notamment dans la région de la «couche limite». Cette dernière correspond à une zone très étroite du fluide où l'écoulement passe d'une vitesse maximale, c'est-à-dire la vitesse des jets, à une vitesse faible voire nulle au fond de la couche planétaire. Ce saut de vitesse forcé, ou couche limite, est d'autant plus fin que la vitesse de rotation de la planète est élevée et que la viscosité du fluide est faible. Dès lors, des résultats réalistes ne seront obtenus que si une très haute résolution est adoptée dans cette région de l'écoulement.

Ainsi, si l'on impose une vitesse de rotation réaliste à la simulation, tout en gardant un temps de calcul raisonnable, il est nécessaire d'augmenter la viscosité du fluide (typiquement la viscosité du miel, bien supérieure à celle d'un océan d'hydrogène). Seulement, cette hyperviscosité a tendance à supprimer les jets zonaux dans les régions polaires des simulations les plus récentes du modèle profond. Ce modèle a néanmoins l'avantage sur son concurrent de bien reproduire les observations équatoriales de cette géante gazeuse.

Les études en laboratoire reproduisent la physique des écoulements naturels sans faire d'hypothèses simplificatrices comme les simulations numériques. Cependant, on est limité à des géométries moins réalistes. En effet, une géométrie sphérique avec la gravité dirigée vers le centre de la sphère impliquerait de s'affranchir de la gravité terrestre qui prévaut dans le laboratoire. Ainsi, il est plus courant de modéliser une enveloppe planétaire en laboratoire par un volume d'eau cylindrique soumis à une forte rotation. Dans cette configuration, la verticale et la gravité sont alignées convenablement (voir l'encadré page ci-contre). Sous l'effet de la rotation, la surface libre du volume d'eau prend la forme d'une parabole (la hauteur d'eau est faible au centre et maximale au bord); cette forme reproduit la courbure à grande échelle de la surface du fluide de la planète. Ce modèle a fait l'objet de nombreuses tentatives en laboratoire, mais en raison de faibles profondeurs d'eau et de vitesses de rotation trop lentes, l'écoulement zonal et multibande espéré n'était jamais apparu de façon convaincante.

Récemment, notre équipe a conçu le premier dispositif capable de reproduire la dynamique d'une couche planétaire profonde. Nous avons entraîné un «jacuzzi» de 400 litres d'eau à 75 tours par minute. Dans ce régime extrême, la rotation rigidifie les mouvements dans la direction de l'axe de rotation, ce qui force le phénomène de cascade inverse, décrit par le modèle profond. Des jets zonaux très énergétiques émergent spontanément, formant six bandes bien distinctes. Contrairement aux simulations numériques, les bandes proches du pôle de notre «planète» de laboratoire ont des propriétés proches de celles observées sur Jupiter. Cette expérience contredit les critiques faites jusqu'alors au modèle profond, et offre le premier modèle de laboratoire capable de reproduire convenablement les propriétés des vents observés à la surface des géantes gazeuses.

Si ces résultats sont favorables au modèle profond, la réponse n'est pas définitive. Les physiciens doivent encore affiner leurs modèles pour prendre en compte de nombreux phénomènes souvent négligés qui pourraient aussi jouer sur la dynamique atmosphérique, tel le rôle possible du champ magnétique jovien sur la dissipation de l'énergie turbulente.

Après les premiers résultats de la mission *Juno*, nous espérons beaucoup de la suite. Initialement, la sonde devait survoler 32 fois la planète géante. Cependant les risques d'une panne détectée sur un moteur ont poussé la Nasa à revoir son plan de vol. *Juno* ne survolera Jupiter que 12 fois d'ici à la fin de sa mission, en juin 2018. Les données récoltées seront moins nombreuses que prévu, mais elles devraient malgré tout aider à résoudre l'énigme des bandes zonales de la planète. ■

BIBLIOGRAPHIE

S. Cabanes et al., **A laboratory model for deep-seated jets on the gas giants**, *Nature Physics*, vol. 13, pp. 387-390, 2017.

S. J. Bolton et al., **Jupiter's interior and deep atmosphere : The initial pole-to-pole passes with the Juno spacecraft**, *Science*, vol. 356, pp. 821-825, 2017.

M. Heimpel et al., **Simulation of equatorial and high-latitude jets on Jupiter in a deep convection model**, *Nature*, vol. 438, pp. 193-196, 2005.

J. Y.-K. Cho et L. M. Polvani, **The morphogenesis of bands and zonal winds in the atmospheres on the giant outer planets**, *Science*, vol. 273, pp. 335-337, 1996.

L'ESSENTIEL

> D'après les auteurs, le statut scientifique de la sociologie n'est actuellement pas assuré.

> Ils pointent plusieurs des obstacles que la communauté des sociologues doit surmonter pour que leur discipline mérite pleinement le titre de science.

> Notamment, les théories sociologiques devraient

se conformer au principe de réfutabilité de Karl Popper.

> Les sociologues devraient aussi veiller à bien distinguer les jugements de fait des jugements de valeur, éviter d'invoquer des entités collectives, davantage recourir à l'expérimentation, tirer profit des résultats obtenus dans d'autres disciplines...

LES AUTEURS



GÉRALD BRONNER
professeur
de sociologie
à l'université
Paris-Diderot



ÉTIENNE GEHIN
ancien maître
de conférences
en sociologie à
l'université Nancy 2

La sociologie, une science en danger

LA SOCIOLOGIE EST-ELLE UNE SCIENCE ? ON POURRAIT EN DOUTER AU VU DES DÉRIVES INTELLECTUELLES DE CERTAINS SPÉCIALISTES DE CETTE DISCIPLINE, DÉNONCENT GÉRALD BRONNER ET ÉTIENNE GÉHIN DANS LEUR DERNIER LIVRE *LE DANGER SOCIOLOGIQUE*. POURTANT, UNE SOCIOLOGIE SCIENTIFIQUE EST POSSIBLE. DÉMONSTRATION.



Les problèmes liés aux « quartiers sensibles » sont-ils uniquement d'origine économique ? Pour avoir invoqué aussi des facteurs culturels, ce qui allait à l'encontre des opinions de beaucoup de ses confrères, le sociologue Hugues Lagrange a reçu de vives critiques, malgré le sérieux de son travail de terrain.

La sociologie a plus de cent cinquante ans d'existence. C'est fort peu pour une science, mais c'est bien assez pour faire ses preuves si l'on pense à l'exemple de la théorie darwinienne de l'évolution, née à la même époque.

Or malgré ses découvertes réelles, notamment dans les domaines des inégalités des chances sociales et de leur reproduction, de la théorie des réseaux ou encore de la socioéconomie, la sociologie ne paraît pas avoir produit un savoir cumulatif équivalent à celui des autres disciplines, et elle est confrontée un peu partout à des formes de défiance.

Ainsi, le 8 juin 2015, le ministre japonais de l'Éducation, de la Culture, des Sports, des Sciences et de la Technologie, Hakubun Shimomura, a adressé aux présidents des 86 universités de son pays une lettre les enjoignant d'interrompre l'enseignement des sciences sociales. Que ce soit en Suisse, aux États-Unis ou même en France, le scepticisme qu'inspirent certaines interprétations « sociologiques » s'est beaucoup exprimé. D'aucuns veulent y voir la preuve que le savoir sociologique est difficile à accepter, parce qu'il dévoile des réalités que le commun n'aime pas voir. S'il est vrai que les réalités scientifiques sont parfois contre-intuitives ou déplaisantes, ce serait exonérer un peu vite la sociologie de ses responsabilités dans cette situation.

Les sociologues, en effet, ne tiennent pas tous, ni toujours, bien compte des obligations, méthodologiques par exemple, qu'ils devraient respecter pour que leur discipline mérite pleinement le titre de science. Plusieurs d'entre eux, qui ne sont ni les moins renommés ni les moins présents sur la scène médiatique, se laissent aller à des errements intellectuels qui ont été connus et combattus comme tels dans toutes les communautés scientifiques, sauf dans celles qui s'occupent des sciences humaines et sociales, et en particulier dans celle des sociologues. Nous avons donc souhaité faire dans cet article un bilan provisoire et non exhaustif des obstacles que la sociologie ne doit qu'à elle-même et qui l'empêchent parfois d'être à la hauteur de ses ambitions scientifiques.

En 1996, le physicien américain Alan Sokal, de l'université de New York, a pu faire publier aux États-Unis, dans la revue universitaire *Social Text*, un article qu'il avait délibérément constellé de sottises. Il voulait en effet démontrer que les sciences humaines se payent parfois de mots, en particulier lorsqu'elles importent, sans les comprendre, des concepts des sciences de la nature. Les réactions que suscité cet article absurde et le livre écrit dans la foulée par Alan Sokal et le physicien belge Jean Bricmont, de l'université catholique de Louvain, furent violentes. Il est vrai qu'on

« FERMETURE ET STÉRILITÉ DE LA SOCIOLOGIE CRITIQUE »



NATHALIE HEINICH
directrice de recherche
au CNRS (EHESS, Paris)

Propos recueillis par Maurice Mashaal

Sociologue et ancienne élève de Pierre Bourdieu, Nathalie Heinrich a notamment travaillé sur l'art, sur l'identité féminine, sur l'épistémologie des sciences sociales, sur la question des valeurs. Son récent ouvrage *Des valeurs – Une approche sociologique* (Gallimard, 2017) a reçu le prix Pétrarque.

En 2009, vous avez publié *Le Bétisier du sociologue*. De quoi s'agissait-il ?

Je pointais dans ce livre des fautes de raisonnement commises de façon assez récurrente par les sociologues, des défauts de connaissances techniques, des formes d'idéologie non assumée qui viennent interférer avec le raisonnement scientifique. Je ciblais pour une grande part la « sociologie critique », héritière de Bourdieu.

Quels sont selon vous les problèmes méthodologiques les plus criants en sociologie ?
L'un des problèmes est

l'inculture de beaucoup envers la « sociologie compréhensive », qui cherche non seulement à expliquer par des causes extérieures (origine sociale, facteurs socioéconomiques, etc.) ce que disent et font les acteurs sociaux, mais aussi à analyser les motivations et les raisons invoquées par les individus. Est ainsi problématique la non-prise en compte des représentations mentales des acteurs sociaux (leurs valeurs notamment), souvent ignorées ou considérées comme des « illusions ». C'est une grande cause de fermeture et de stérilité de la sociologie critique.

Celle-ci tend par ailleurs à subordonner le travail scientifique aux impératifs normatifs et idéologiques (dénonciations d'inégalités, justifications de luttes, etc.), ce qui est suicidaire pour la sociologie en tant que science.

Ces problèmes touchent-ils particulièrement la France ?

Il me semble que oui, parce que ce pays a une tradition sociologique très développée, et parce que l'emprise de Bourdieu (du moins son approche des dix dernières années de sa vie) y est forte.

Vous plaidez pour une distinction nette entre les travaux scientifiques publiés dans les revues académiques et les prises de position publiques sur des questions politiques ou sociétales. Est-ce toujours possible ?

C'est une question centrale. Dans le contexte scientifique, le chercheur doit mettre de côté ses convictions personnelles, comme Max Weber l'a souligné avec son principe de neutralité axiologique. En revanche, prendre position est légitime quand on s'exprime dans d'autres supports (presse, revues d'opinion...) ou dans un contexte d'expertise. Les sociologues qui refusent de différencier ces postures nuisent beaucoup à la crédibilité des productions scientifiques. Et cet amalgame entre science et politique fait croire au grand public que la science peut résoudre des problèmes moraux ou politiques, ce qui n'est rien d'autre que du scientisme.

Il moquait quelques figures célèbres et respectées de la philosophie et de la sociologie.

Ce canular et d'autres du même genre ont à tout le moins montré que les critères de sélection des productions sociologiques ne sont pas toujours les mêmes que dans la plupart des autres disciplines académiques, et qu'ils s'éloignent assez notablement de ceux appliqués d'ordinaire par les revues scientifiques. D'ailleurs, victime récente d'un de ces canulars, Michel Maffesoli, sociologue français bien connu, n'a-t-il pas, pour se défendre, déclaré publiquement que «la sociologie n'est pas une science»?

UNE EXTRATERRITORIALITÉ PAR RAPPORT À LA SCIENCE PARFOIS REVENDIQUÉE

Sans aller aussi loin, d'autres sociologues cherchent cependant à conférer à leur discipline un statut d'extraterritorialité épistémologique qui la dispense de se plier aux contraintes usuelles de la méthode scientifique. Ils défendent par exemple l'idée que la sociologie se constitue dans un espace «non poppérien», c'est-à-dire qu'elle n'a pas à se conformer au critère de réfutabilité – devenu classique depuis que le philosophe viennois Karl Popper, il y a quelques décennies, en a fait un point essentiel pour démarquer la science de la non-science.

En vertu du critère de réfutabilité, une théorie peut être qualifiée de scientifique si



L'horreur qui avait régné dans les camps nazis a longtemps constitué un barrage à leur étude sociologique. Des chercheurs ont cependant pu mettre de côté leurs réactions émotionnelles et éthiques, et ainsi consacrer des travaux scientifiques à cet univers épouvantable.

ses affirmations sont réfutables, c'est-à-dire que des observations ou des expériences pourraient, selon leurs résultats, les contredire et ainsi invalider la théorie. Par exemple, l'énoncé «Au sein d'une société humaine, les conflits sont tous dus aux inégalités de richesse» est réfutable, car il suffirait de trouver un exemple de société égalitaire en proie à des conflits internes pour infirmer cet énoncé. En revanche, l'affirmation: «Faire la guerre est dans la nature humaine» n'est pas réfutable, car on ne voit pas comment on pourrait mettre à l'épreuve cette idée.

La notion de réfutabilité a été beaucoup débattue par les philosophes des sciences, mais rares sont les disciplines (sauf sans doute la psychanalyse) à revendiquer un espace intellectuel qui échappe aux contraintes de la réfutation. La question si brûlante de la radicalisation islamiste, par exemple, a donné lieu à toutes sortes de déclarations «sociologiques» qui prétendaient expliquer le phénomène par le ressentiment postcolonial ou encore par sa dimension économique, sans aucun regard pour les données statistiques existantes sur la question (par exemple celles recueillies en 2016-2017 par les sociologues Anne Muxel et Olivier Galland auprès de 7 000 lycéens en France, voir *l'entretien avec Olivier Galland* page 60). Ces idées sont pourtant facilement réfutables... et réfutées par le fait que plus de 60 nationalités sont impliquées dans le combat djihadiste et que l'idéologie religieuse y joue un rôle causal identifiable et important.

Le mécanisme de sélection des théories paraît donc plus lâche en sociologie que dans les autres disciplines scientifiques. Cela explique que l'on y observe plus rarement qu'ailleurs un processus d'accumulation des connaissances. Les sociologues donnent ainsi l'impression de débattre indéfiniment de



Les sociologues se permettent parfois de s'exonérer du critère poppérien de réfutabilité

▢ certaines questions dont la formulation est pourtant assez simple.

Un exemple est la question: «Le niveau scolaire s'améliore-t-il ou se détériore-t-il?» Il est aisé de constater que leurs avis sur ce sujet paraissent informés et sont cependant contradictoires. Sans doute est-ce dû au fait qu'ils ne prennent pas tous en considération les mêmes critères pour évaluer ce niveau scolaire. Mais cette absence de normalisation des éléments qui rendrait possibles les échanges académiques est un symptôme supplémentaire d'un état préscientifique de la discipline.

Elle révèle aussi la possibilité dont usent les sciences sociales de prendre en compte un type de données allant dans le sens des attentes du chercheur, tout en délaissant les données moins favorables à ces attentes. Cette tentation dite du *cherry picking* («cueillette de cerises») est un danger présent dans toutes les disciplines. Mais en sociologie, des théories douteuses sont favorablement reçues dès lors qu'elles vont dans le sens des attentes compassionnelles ou idéologiques. *A contrario*, parce que dans son livre *Le Dénî des cultures* (2010), et sur la base d'une sérieuse enquête de terrain, Hugues Lagrange proposait d'expliquer une partie des problèmes caractéristiques des «quartiers sensibles» par des causes culturelles et pas seulement économiques, ce sociologue du CNRS a reçu une volée de bois vert...



Des théories douteuses favorablement reçues parce qu'elles vont dans le sens souhaité

LIBERTÉ PAR RAPPORT AUX JUGEMENTS DE VALEUR

Cette situation permanente donne lieu à une très suspecte subordination des jugements de fait aux jugements de valeur. C'est bien perceptible dans les écrits de ceux qui, voulant être à la fois savants et militants, se consacrent à la dénonciation de tout ce qu'ils jugent insupportable dans le «système» social, économique et politique, qu'il s'agisse de pauvreté, de relations employeurs-employés, de discriminations, etc. Les travaux sociologiques de celles et ceux qui n'adoptent pas cette posture «critique» ne sont, à leur avis, que de la fausse science dont les puissances dominantes s'accommode fort bien. C'est pourquoi ils s'en prennent au principe méthodologique de la connaissance «libre par rapport aux jugements de valeur», pour reprendre les termes de Max Weber, l'un des fondateurs de la sociologie.

Au début du xx^e siècle, ce savant allemand a pris la peine d'exposer méthodiquement la signification de ce principe, bien qu'il l'ait tenu pour «une exigence extrêmement triviale». Généralement nommée neutralité axiologique, cette règle prescrit à ceux qui prétendent au titre de savant dans le domaine des sciences humaines et sociales de ne pas prendre ou faire prendre les jugements de valeur (indignés ou admiratifs) pour des jugements de science.

La neutralité axiologique n'est donc pas du goût de ceux, parmi les sociologues, qui font et refont le procès du capitalisme, des inégalités, de l'«ultralibéralisme», de la «violence des riches», de la mondialisation «sauvage», etc. Pour justifier le programme de leur sociologie «engagée», ils interprètent la neutralité axiologique comme un irrecevable principe d'indifférence éthique et politique.

Il faut dire que Leo Strauss, philosophe d'origine allemande qui n'était pas le premier venu, leur a donné l'exemple. Dans *Droit naturel et histoire*, paru en anglais en 1953, il expliquait que ce principe «pénalise l'attitude critique» parce qu'il conduit au nihilisme, et que, du reste, il est inapplicable étant donné que la description factuelle d'un camp de concentration, par exemple, ne pourrait être que «la satire féroce» de sa cruauté (page 59 de l'édition française de 1986).

Strauss se trompait pourtant. L'expression «neutralité axiologique» est sans doute une traduction discutable de «liberté par rapport aux jugements de valeur». Elle peut en effet laisser croire que Weber voulait des sociologues sans aucune préférence morale ou politique, alors qu'il les priait seulement de ne pas confondre «discussion scientifique des faits et raisonnement axiologique». Il savait que, pour un sociologue, faire cette distinction et s'y

À PROPOS DES AUTEURS

GÉRALD BRONNER est aussi membre de l'Académie des technologies. Il a notamment publié *La Pensée extrême* (2009 et 2015), *La Démocratie des crédules* (2013), *La Planète des hommes. Réenchanter le risque* (2014).

ÉTIENNE GÉHIN est coauteur avec Gérard Bronner de *L'Inquiétant Principe de précaution* (2010).

tenir est difficile. Mais contrairement à ce qu'affirmait Strauss, on y est cependant parvenu à propos des camps d'Auschwitz, du Struthof ou de Treblinka justement.

Le système concentrationnaire nazi avait longtemps échappé à l'analyse sociologique, pour diverses raisons. L'une des principales est que la révélation de l'incroyable malfeasance qui s'était donné libre cours dans les camps nazis avait suscité tant d'horreur que ces derniers apparaissaient comme des réalités dont on ne pouvait que décrire, sur le mode éthique et philosophique, l'inquiétante inhumanité.

Sans doute en serait-on resté là si quelques historiens et sociologues tels que Patrick Bruneteaux, en France, Gerhard Botz et Michael Pollak, en Autriche, et d'autres ne s'étaient libérés, pour les besoins de leur travail, des jugements de valeur horrifiés que l'on ne peut s'empêcher de porter sur la violence des *SS Totenkopfverbände* («unités SS à tête de mort», chargées de l'organisation et de la surveillance des camps) et sur les souffrances endurées par leurs innombrables victimes. Ce faisant, ils ont pu voir qu'en dépit des apparences, le «Monde de pierre» (titre du livre que l'écrivain et journaliste polonais Tadeusz Borowski, survivant des camps nazis, a publié en 1948), avec ses règles, ses inégalités, ses préséances, son économie, etc., ne différait du monde social ordinaire qu'autant qu'il en était l'abominable caricature.

Au fond, la neutralité axiologique s'impose à la sociologie comme à toute science positive (c'est-à-dire qui cherche à décrire les choses telles qu'elles sont et non telles qu'elles devraient être), pour la bonne raison que, si justifiés soient-ils, les jugements qu'inspirent l'admiration ou la désapprobation n'augmentent en rien la connaissance des réalités que l'on juge.

DES ENTITÉS COLLECTIVES AUXQUELLES ON PRÊTE DES INTENTIONS

Une partie des analyses sociologiques est adossée à une erreur de raisonnement qui constitue un autre obstacle important sur le chemin de la scientificité. Les sociologues qui considèrent leur discipline comme «un sport de combat», selon l'expression de Pierre Bourdieu, grande figure de la sociologie française disparue il y a quinze ans, ne peuvent bien fonder ce point de vue qu'en attribuant la responsabilité des malheurs du monde aux (mauvaises) intentions de telle ou telle *catégorie* d'acteurs.

Or il se trouve que nombre de phénomènes sociaux objectivement désagréables (un embouteillage par exemple) sont les effets de décisions et d'actions individuelles non coordonnées, et on ne peut les rapporter à des intentions qu'en cédant à l'un des principaux biais du raisonnement humain. Ce «biais

d'intentionnalité», repéré depuis assez longtemps par les psychologues, explique par exemple que la majorité des individus interrogés sur ce qui pourrait être à l'origine d'un incendie tendent à invoquer un incendiaire plutôt qu'à y voir un événement fortuit explicable par des circonstances naturelles.

La sociologie est loin de toujours céder à ce biais. Si l'on se réfère aux grands classiques de la discipline, on peut trouver facilement la vigilance nécessaire à l'égard des raisonnements trompeusement finalistes. C'est notamment le cas chez Weber où, dans son célèbre livre *L'Éthique protestante et l'esprit du capitalisme*, il propose de comprendre l'émergence du capitalisme comme une conséquence involontaire de l'éthique protestante.

Cette vigilance est évidemment présente chez nombre de sociologues d'aujourd'hui. Cependant, ceux qui cèdent au biais d'intentionnalité ne respectent guère le principe de parcimonie qui doit prévaloir en science et qui veut qu'on ne multiplie pas les entités conceptuelles sans nécessité. En ce sens, leur sociologie ne se distingue pas de la «sociologie spontanée» (celle qui relève du sens commun, des opinions et des jugements naïfs). C'est le cas chaque fois qu'un sociologue s'abandonne à l'emploi de ces entités collectives que sont *le peuple*, *la jeunesse*, *les paysans*, *le (grand) patronat*, *le corps électoral*, etc.

Par exemple, au soir d'un important scrutin, les commentateurs s'accordent à dire que «les électeurs» ont parlé et que les politiques doivent entendre le message du «corps électoral». Or dire d'un électoral qu'il a *voulu* ceci ou cela, c'est le traiter comme un personnage réel, alors qu'il n'a que l'existence logique d'un concept qui ne signifie rien de plus que l'ensemble des

Nombre de commentaires sociologiques prétendent expliquer la radicalisation islamiste par le ressentiment postcolonial ou par la dimension socioéconomique – au mépris des données statistiques qui nuancent ou démentent ces idées.



personnes susceptibles d'exercer leur droit de vote. Les décisions que nous lui attribuons sont, en réalité, les produits agrégés et non coordonnés de celles qu'ont prises tous ces individus, lesquels sont les seuls acteurs dans cette affaire et lesquels n'ont pas été aux urnes comme un seul homme après s'être réunis et concertés pour arrêter leur choix.

On pourrait dire que tout cela va de soi et n'a rien de gênant si ceux qui mettent en scène telle ou telle de ces entités collectives avaient tous conscience de ne le faire que par commodité de langage, et sans perdre de vue qu'en sociologie, «il n'y a pas de personnalité collective exerçant une activité» (Weber). Mais il est fréquent que ces sociologues prennent apparemment ces abstractions pour des réalités, puisqu'ils les mobilisent en leur attribuant des intentions et des pouvoirs dans lesquels ils croient trouver les causes des phénomènes sociaux qu'ils veulent expliquer.

LA THÉORIE DU COMLOT N'EST PAS LOIN

Il est vrai que les «explications» de ce genre viennent d'elles-mêmes à l'esprit. Spontanément, nous n'imaginons pas qu'un fait social puisse émerger d'un grand nombre d'actions et cela sans avoir été voulu par aucun des acteurs; nous cherchons donc à qui nous pouvons l'imputer. De là vient l'erreur commune (qui est le ressort du complotisme) consistant à personnifier des abstractions et à leur attribuer le pouvoir d'agir selon des fins qu'elles dissimulent, fins qu'une certaine sociologie se targue de savoir mettre en évidence.

C'est bien ce que cette dernière croit faire en soutenant par exemple que les pénitenciers n'ont été inventés que pour créer la délinquance (dans la lignée des idées du philosophe Michel Foucault), afin de permettre aux «dominants» d'exercer un contrôle encore plus serré des populations, ou qu'en exigeant des prérequis à l'entrée à l'université, «on vise les classes sociales les plus défavorisées» (propos d'une sociologue interrogée dans *Le Monde*, 21 juillet 2017). Mais qui donc est ce «on» porteur d'une intention si contraire à l'idéal d'égalité autant qu'à l'efficacité dans le recrutement des élites?

Dans tous les cas de ce genre, la maladroite manipulation de concepts collectifs aboutit à un finalisme qui n'est qu'un autre travers de la «sociologie vulgaire» (la sociologie non scientifique), et dont la naïveté n'est dissimulée que par une rhétorique obscure et pseudoscientifique.

Sur la route de la scientificité, la sociologie rencontre d'autres obstacles que les limites de cet article ne nous permettent pas d'exposer, mais qui n'en sont pas moins redoutables. C'est le cas du refus de recourir à l'expérimentation

« LES ÉTUDES STATISTIQUES SONT INDISPENSABLES »



OLIVIER GALLAND
directeur de recherche
au CNRS, à Paris

Propos recueillis par Maurice Mashaal

Les travaux d'Olivier Galland, sociologue au Groupe d'étude des méthodes de l'analyse sociologique de la Sorbonne (Gemass, CNRS/université Paris-Sorbonne), portent principalement sur les inégalités et la jeunesse. Il est l'auteur avec Yannick Lemel de *Sociologie des inégalités*, à paraître cette année chez Armand Colin.

Partagez-vous le constat de Gérald Bronner et Étienne Géhin sur la scientificité de la sociologie ?

Oui, surtout concernant la neutralité axiologique, principe qui devrait être une évidence pour les chercheurs se targuant d'avoir une pratique scientifique. Ce n'est pas tellement le cas en France, pays où les sociologues sont assez engagés, où la figure de l'« intellectuel » pousse à un tel engagement et où le marxisme a eu une très forte influence sur les sciences sociales. Cela dit, les chercheurs ne doivent pas se désintéresser de la chose publique et il est utile qu'ils transmettent leurs connaissances aux acteurs politiques et sociaux, en gardant une distance vis-à-vis de leurs propres convictions.

Vous pratiquez une sociologie quantitative sur la base d'études statistiques. Selon vous, la sociologie qualitative a-t-elle trop de place ?

Il ne doit pas y avoir de guerre méthodologique en sociologie. Il est vrai que, au moins en France, la sociologie qualitative domine. Cette démarche n'est pas inutile, car

les études qualitatives aident à défricher le sujet, à compléter des enquêtes quantitatives et à départager les diverses interprétations des corrélations observées dans ces enquêtes. C'est d'ailleurs l'objet de la seconde phase de notre étude sur la radicalité chez les lycéens en France. Mais les études statistiques sur de grands échantillons sont indispensables. Or elles sont trop peu pratiquées.

Les premiers résultats de votre enquête sur la radicalité contredisent-ils des idées dominantes sur le sujet ?

Tout à fait. L'idée dominante, sur la base de travaux monographiques et qualitatifs sur de petits échantillons, était que la radicalité religieuse résulte surtout de l'exclusion sociale et de la discrimination. Notre enquête, menée auprès d'un échantillon bien choisi de quelque 7 000 lycéens, a permis de comparer des jeunes radicaux et des jeunes non radicaux. Les questions posées ont testé les différentes hypothèses sur l'origine de la radicalité. Les résultats montrent que les facteurs économiques n'ont aucune influence, que le sentiment de discrimination joue, mais peu, et que l'idéologie religieuse est le facteur prépondérant. Ils invalident l'hypothèse répandue que l'extrémisme islamiste se développe de façon opportuniste sur une radicalité préexistante. Cependant, il reste à comprendre pourquoi l'influence du religieux est plus forte de nos jours.

pour tester l'influence de certaines variables. Par exemple, des sociologues peuvent se poser la question de savoir si les femmes sont davantage insultées dans certains quartiers que dans d'autres, mais sans considérer qu'un protocole d'expérimentation avec échantillon témoin leur permettrait de répondre rationnellement à cette question.

S'OUVRIR À L'EXPÉRIMENTATION ET À L'INTERDISCIPLINARITÉ

Selon ceux qui refusent le recours à l'expérimentation en sociologie, la démarche consistant à isoler les variables causales par un protocole n'a pas de sens pour approcher la vie sociale, dont les réalités ne se concevraient que «contextuellement». En d'autres termes, on ne peut à leur avis rien mesurer de la vie sociale par les protocoles expérimentaux classiques de la science qui ne soit pas un pur artefact.

Ce serait là une objection intéressante si la psychologie sociale ou la médecine n'avaient montré depuis longtemps, et de mille façons, que cette démarche était non seulement possible, mais utile à la constitution d'une connaissance cumulative. Pour n'en prendre qu'un exemple, le protocole des tests de médicaments en double aveugle a justement été conçu pour

maîtriser les variables complexes qui impliquent tout autant l'autorité de celui qui administre le médicament que la croyance en son efficacité par celui qui va le tester.

Un autre obstacle est celui du principe qu'Émile Durkheim a exprimé à la fin du XIX^e siècle dans un livre fondateur de la discipline, *Les Règles de la méthode sociologique* : «expliquer le social par le social». Ce principe, s'il est suivi aveuglément – ce que son auteur n'a pas fait –, entraîne une conception étroite de la sociologie au nom de laquelle elle se croit dispensée de prendre en considération les données provenant d'autres disciplines telles que les neurosciences ou les sciences cognitives, lesquelles éclairent pourtant bien les conduites des acteurs sociaux.

Cette absence de rigueur épistémologique et d'interdisciplinarité fait que la production sociologique est assez loin d'être toujours à la hauteur de ses prétentions scientifiques. Elle autorise trop souvent, en effet, une sorte de *anything goes* («tout est permis») qui donne libre cours au biais de confirmation, ce ressort de notre esprit qui nous prédispose à ne considérer et à ne retenir que les informations conformes à nos croyances, à nos convictions et à nos préjugés. ■

BIBLIOGRAPHIE

G. Bronner et É. Géhin, **Le Danger sociologique**, PUF, 2017.

N. Heinich, **Le Bétisier du sociologue**, Klincksieck, 2009.

R. Boudon et R. Leroux, **Y a-t-il encore une sociologie ?**, Odile Jacob, 2003.

M. Weber, **Essais sur la théorie de la science**, Plon, 1965.

LES {Partagez
les savoirs}

RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM



Entrée gratuite

Au Jardin des Plantes

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

POUR LA SCIENCE

CYCLE DE CONFÉRENCES DANS LE CADRE DE L'EXPOSITION MÉTÉORITES, ENTRE CIEL ET TERRE

Vendredi 20 octobre - 14h30
Météorites - Mythes et légendes
Avec M. Gounelle, professeur du Muséum, membre de l'Institut Universitaire de France

Lundi 23 octobre - 14h30
Les météorites : de l'astre à la chute
Avec E. Jacquet, maître de conférences au Muséum, Institut de Minéralogie, de Physique des Matériaux et de Cosmochimie

Mardi 24 octobre - 14h30
Rechercher les météorites en France : les programmes FRIPON et Vigie-Ciel
Avec B. Zanda, enseignant-chercheur au Muséum, spécialiste des chondrites, co-responsable du programme FRIPON et du programme de science participative Vigie-Ciel

Mercredi 25 octobre - 14h30
Ce que les météorites nous apprennent sur la formation de la Terre
Avec M. Roskosz, professeur de cosmochimie du Muséum, responsable de l'instrument NanoSIMS de la plateforme analytique du Muséum

Jeudi 26 octobre - 14h30
Matière extraterrestre et comètes
Avec C. Engrand, directeur de Recherche CNRS au Centre de Sciences Nucléaires et de Sciences de la Matière (CSNSM), Université Paris Sud-Paris Saclay (Orsay)



Nalanda

la plus vieille université du monde



L'ESSENTIEL

> Le monastère bouddhique de Nalanda, en Inde, a été fondé au IV^e ou V^e siècle avant notre ère.

> Son influence s'étendait jusqu'à la Chine et l'Indonésie. Des milliers de moines et de laïques y étudiaient les enseignements du Bouddha, la philosophie bouddhique, mais aussi des matières

profanes telles que la grammaire et la médecine.

> Les archéologues corrigent et complètent l'image donnée par les textes historiques sur Nalanda. Cet ensemble monastique n'aurait pas été détruit par des conquérants, mais aurait simplement décliné, avec la disparition du bouddhisme du nord de l'Inde.

L'AUTEUR



MAX DEEG
professeur d'études
bouddhiques à l'université
de Cardiff, au Royaume-Uni

ENVIRON 400 ANS AVANT LA PLUS ANCIENNE UNIVERSITÉ OCCIDENTALE, LE GRAND MONASTÈRE BOUDDHISTE DE NALANDA, EN INDE, ENSEIGNAIT DÉJÀ LA PHILOSOPHIE, LA LITTÉRATURE BRAHMANIQUE, LA LINGUISTIQUE, LA LOGIQUE ET LA MÉDECINE.

Des siècles durant, personne ne s'est douté qu'un certain champ de ruines de l'État indien du Bihar correspondait au plus ancien centre de formation bouddhique du monde: Nalanda. Dans la première moitié du XIX^e siècle, les archéologues amateurs Francis Buchanan-Hamilton et Markham Kitteroe examinèrent les vestiges visibles sur le site, qu'ils décrivirent ensuite de façon lapidaire comme une « colline ». Les deux Britanniques n'avaient pas perçu que l'endroit avait accueilli un florissant centre d'enseignement du bouddhisme.

Aujourd'hui, les spécialistes d'histoire religieuse reconnaissent même à cet établissement fondé au IV^e ou au V^e siècle le rang d'université. Pourquoi? Leur attention a d'abord été alertée

par les dimensions et le caractère monumental de l'architecture de Nalanda; les textes leur ont ensuite appris que l'institution attirait des étudiants de toute l'Asie, qui diffusaient ensuite le savoir acquis dans leurs pays d'origine; enfin, le cursus très général de l'enseignement rend l'influente Nalanda comparable à une université.

La petite ville de Rajgir se trouve aujourd'hui à seulement 12 kilomètres des ruines. Fondée au V^e siècle avant notre ère sous le nom de Rajagriha, elle a été la capitale du royaume de Magadha, qui exerçait son contrôle sur un territoire correspondant à peu près à celui de l'actuel État indien du Bihar. Point particulièrement notable, des sites importants de la vie du Bouddha (né au V^e ou VI^e siècle avant notre ère) se trouvent sur le territoire de l'ancien Magadha. On y trouve ainsi le pic des Vautours,



Les vestiges de la toute première université du bouddhisme se trouvent dans l'actuel État indien du Bihar, tout près de grands sites bouddhiques tels que Bodhgaya, le lieu réputé de l'illumination qui fit du prince Siddhartha Gautama le Bouddha.

où le Bouddha prêcha le bouddhisme à une importante assemblée; le monastère décrit dans les textes comme une bambouseraie, censé être l'un des plus anciens de la religion bouddhiste; mais surtout le Bodhgaya, le lieu légendaire de l'illumination du Bouddha.

Dès lors, quiconque cherchait à visiter les anciens centres économiques et religieux du bouddhisme dans le nord de l'Inde ne pouvait que passer par Nalanda. Buchanan-Hamilton et Kittoe visitèrent donc le site, mais, comme tous les chercheurs européens de leur époque, ils n'avaient aucune connaissance des sources écrites évoquant son importance. Cette situation changea en 1853, quand le sinologue français Stanislas Julien traduisit la biographie du moine chinois Xuanzang, puis, quatre ans plus tard, son récit de voyage.

Xuanzang (600/603-664) est l'un des quatre plus grands traducteurs chinois des sutras bouddhiques. S'il put accomplir ce travail important pour la diffusion du bouddhisme en Chine, c'est parce qu'il avait séjourné en Inde entre 629 et 645, en visitant et en décrivant de nombreux sanctuaires. Xuanzang étudia aussi plusieurs années l'enseignement et la philosophie bouddhiques à Nalanda. Après son retour, il écrivit son *Rapport du voyage en Occident à l'époque des Grands Tang*, où il décrit notamment le monastère Nalantuo, transcription chinoise de Nalanda. Dans sa biographie écrite par son disciple le moine Huili, est aussi raconté ce qu'a vécu Xuanzang à Nalanda.

MEYRICK BROADLEY QUALIFIE NALANDA D'UNIVERSITÉ

Grâce aux traductions de Julien, on put enfin trouver et identifier toute une série de sites bouddhistes dans le nord-est de l'Inde. Ce fut l'administrateur britannique de la région, Alexander Meyrick Broadley, qui associa en 1872 la colline examinée par Buchanan-Hamilton et Kittoe à Nalanda. Il fut aussi le premier à qualifier le monastère d'université. Pour autant, le privilège d'étudier le site pour la première fois revint au pionnier de l'archéologie indienne, Alexander Cunningham.

En tant qu'officier-ingénieur britannique, Cunningham avait déjà été confronté aux témoignages du passé indien, car il avait voyagé à travers tout le sous-continent. Il devint le premier directeur du Service archéologique d'Inde (*Archaeological Survey of India*), le célèbre ASI qui, après avoir été britannique, s'est mué en l'une des agences gouvernementales indiennes. C'est en particulier grâce à des inscriptions comportant le nom du monastère que Cunningham put confirmer l'identité des ruines.

Des inscriptions confirmèrent que le site était bien un *mahāvihāra*, c'est-à-dire un «grand monastère». Quand il le décrit dans la biographie de Xuanzang, Huili l'enjoliva quelque peu:



«Séparés, les monastères sont répartis en huit complexes; des plates-formes décorées sont alignées comme des étoiles; imposants, les bâtiments s'élèvent comme les sommets montagneux et des temples forçant le respect pointent dans la brume; les cellules de moines des monastères se trouvent dans des pavillons de quatre étages, dont les poutres faîtières prennent la forme de dragons cornus et dont la charpente est peinte aux couleurs de l'arc-en-ciel.»

A la fin du VII^e et au cours du VIII^e siècles, d'autres moines chinois ont visité l'Inde. Leurs récits offrent des détails intéressants sur le monastère. Yijing (635-713) en donne la description la plus complète. Elle diffère un peu, dans les détails, de celles de Xuanzang et de Huili: «La forme de base du monastère est à peu près rectangulaire; des avant-toits rectilignes protègent des corridors sur les quatre côtés. En briques, les cellules occupent trois étages, mesurant chacun à peu près un zhang (ancienne unité chinoise correspondant à environ trois mètres); les poutres transversales supportent des planches, mais il n'y a ni solives, ni tuiles et tout est couvert de briques. Chaque côté comporte neuf cellules de moines. Les portails des monastères sont dirigés vers l'ouest; des pavillons ouverts les dépassent, joliment réalisés et ornés de fins décors.»

D'après Yijing, 3 500 moines vivaient dans le monastère, auquel étaient affiliés plus de 200



D'élégantes représentations artistiques du Bouddha enrichissent aujourd'hui encore l'un des murs du temple n° 3 à Nalanda (ci-dessus). Selon la légende, l'un des reliquaires (*stūpas* en sanscrit) du temple n° 3 (ci-dessus à droite) contenait des reliques de l'un des élèves importants du Bouddha; sans doute constituait-il le centre de cet important temple.



villages. Le moine chinois évoque en outre dix étangs pour le bain à l'intérieur d'une enceinte. Plusieurs grands bassins existent aujourd'hui encore, qui comptent peut-être parmi ceux évoqués par Yijing, mais ils se trouvent à l'extérieur des ruines explorées actuellement.

Les structures de bâti et les artefacts retrouvés à l'intérieur des ruines le confirment aussi: aux VII^e et VIII^e siècles, le monastère était bien plus grand qu'on ne l'a initialement estimé. Sur la base de sondages, de découvertes fortuites et des bassins évoqués plus haut, les spécialistes estiment qu'il occupait 1 kilomètre carré, c'est-à-dire une

centaine d'hectares. Seuls 12 hectares de cette emprise ont été fouillés systématiquement entre 1915 et 1937, puis entre 1974 et 1983, donc un peu plus de 10 %. Seules quelques fouilles sporadiques ont été entreprises par la suite. Elles ont révélé les traces, simples et comparables à ceux d'autres monastères indiens, de 11 bâtiments monastiques et de 6 grands temples. Même s'il n'en reste que des ruines, les détails architecturaux et les fragments de décors prouvent assez que ces bâtiments étaient censés impressionner.

Partout sur le site, on retrouve par ailleurs des restes de ces marqueurs du bouddhisme que sont les *stūpas*, reliquaires bouddhiques, et les *caityas*, de petits lieux ou monuments commémoratifs typiquement bouddhiques. Les premiers sont plus grands et contiennent normalement des reliques du Bouddha, d'un bodhisattva (un bouddhiste avancé sur le chemin de l'éveil) ou d'un personnage éminent; les seconds étaient offerts par les pèlerins.

La plupart des sources écrites évoquent une fondation de Nalanda au IV^e ou V^e siècle, ce que confirment les plus anciennes des strates archéologiques. La dynastie des Gupta dominait alors le nord de l'Inde. Ces constatations archéologiques divergent cependant des descriptions datant des VII^e et VIII^e siècles.

Ainsi, celle de Xuanzang suggère que l'ensemble des bâtiments monastiques de Nalanda

Seuls 12 hectares de Nalanda ont été fouillés entre 1915 et 1937, puis entre 1974 et 1983

▢ dessinaient une sorte d'anneau, alors que leurs vestiges – mis à part ceux des bâtiments monastiques situés le plus au sud – sont plutôt disposés suivant un axe nord-sud. Les installations découvertes jusqu'à présent sont aussi moins nombreuses que ne l'évoquent les sources chinoises, où il est question de 7, 8, voire 9 «monastères». En revanche, le fait qu'ils ont comporté deux étages, voire plus, est confirmé par des restes d'escaliers et par les trous dans lesquels entraient les solives. Ces structures datent sans doute des phases de construction les plus tardives. Mais une datation précise est difficile, des structures d'époques différentes ayant été ajoutées les unes aux autres.

L'ALEXANDRIE INDIENNE ?

Les sources textuelles nous apprennent aussi que le savoir transmis à Nalanda avait une large base. On y apprenait la philosophie bouddhique et la vie monastique, comme la littérature brahmanique, la linguistique, la logique et la médecine. Au VII^e siècle, Nalanda était l'un des centres de l'idéalisme bouddhique, selon lequel toutes les choses que nous appréhendons sont des créations de l'esprit. De nombreux érudits célèbres ont œuvré à Nalanda, dont le logicien indien Dignaga (de 480 à 540 environ) ainsi que Shandineva, un fils de roi d'Inde du Sud, moine au VIII^e siècle d'après certaines sources et auteurs de grands textes.

Les historiens de l'art ont étudié les statues de bronze et les figurines de bronze et de pierre du Bouddha, des bodhisattvas et de divinités protectrices de Nalanda et de son voisinage. Ils concluent que le monastère, au moins à partir du séjour de Yijing, a aussi été un centre du bouddhisme tantrique, une école ésotérique qui, en plus de la méditation bouddhique classique, enseigne des rituels complexes menant vers l'illumination; cette école intègre tout un panthéon de bouddhas, de bodhisattvas et d'autres présences surhumaines. Dans son histoire du bouddhisme tibétain et indien, l'historien tibétain Buton Rinchen Drub, au XIII^e siècle, attribuait par ailleurs une importance suprarégionale à Nalanda.

Cette influence multiséculaire ainsi que son cursus dépassant largement le domaine religieux octroient à Nalanda le statut d'université, que l'on l'attribue, sinon, aux grandes madrasas (universités théologiques musulmanes) et aux universités européennes médiévales. Nalanda est toutefois la plus vieille institution de ce genre: la madrasa de la mosquée Zitouna, en Tunisie, n'est apparue qu'en 737 et l'université de Bologne en 1088.

Avec ses monastères et ses *stūpas* reconstruits, le site que l'ASI administre aujourd'hui suggère l'importance passée de Nalanda. Des statues de bronze et de pierre, des monnaies,



Des monastères et des sanctuaires alignés constituaient Nalanda, dont seuls 10 % de la surface ont été fouillés (flèche).

des sceaux d'argiles et des inscriptions conservées dans plusieurs musées illustrent l'intensité de la vie religieuse au grand monastère et sa profonde intégration dans son environnement politique et social.

Entre le XI^e et le XIII^e siècle, le bouddhisme disparut du nord de l'Inde, et Nalanda déclina. D'après les sources, le conquérant musulman Bakhtiyar Khilji l'aurait détruite en 1193. De fait, des traces d'incendie ne sont notables que dans les strates archéologiques correspondant à cette époque dans la partie sud du monastère, mais l'excellent état de conservation des autres ruines fait plutôt penser à une lente décadence. Nalanda est toutefois restée connue hors de l'Inde.

Le site ne retrouva une renommée mondiale qu'après la redécouverte de ses ruines imposantes au XIX^e siècle. Sa force symbolique réapparut alors. Ainsi, malgré le caractère plutôt laïque d'une Inde moderne dominée par l'hindouisme et par l'islam, on fonda en 1951, près de la ville de Nava, le «nouveau grand monastère de Nalanda», une institution de formation des moines bouddhistes. Et en 2010, l'université de Nalanda a été créée à Rajgir. Son architecture monumentale à base de formes rectilignes en forme de *stūpas*, de bassins et de tuiles est clairement d'inspiration historique.

Depuis 2016, l'Unesco a ajouté les ruines de Nalanda au patrimoine mondial de l'humanité. Espérons que cette remarquable inscription aidera à se souvenir de la toute première université de l'humanité. ■

BIBLIOGRAPHIE

M. L. Stewart, **Nālandā Mahāvihāra : A Critical Analysis of the Archaeology of an Indian Buddhist Site**, Manohar, New-Delhi, 2017.

F. M. Asher, **Nalanda : Situating the Great Monastery**, The Marg Foundation, Mumbai, 2015.

B. N. Misra, **Nalanda**, B. R. Publishing Corporation, New Delhi, 1998.

ABONNEZ-VOUS À **POUR LA SCIENCE**

NOUVELLE
FORMULE



FORMULE
PASSION
-27%



FORMULE
DÉCOUVERTE
-25%

FORMULE
INTÉGRALE
-41%



99€



79€



59€

BULLETIN D'ABONNEMENT

À 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** POUR 1 AN,
JE CHOISIS MA FORMULE CI-DESSOUS :

☐ FORMULE **INTÉGRALE**
12 n° de *Pour la Science* + 4 Hors-Séries
+ Accès illimité aux archives en ligne depuis 1996

11A99€

99€
Au lieu de 168,45€*

☐ FORMULE **PASSION**
12 n° de *Pour la Science*
+ 4 Hors-Séries

11A79€

79€
Au lieu de 108,45€*

☐ FORMULE **DÉCOUVERTE**
12 n° de *Pour la Science*

11A59€

59€
Au lieu de 78,45€*

J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme

Nom :

Prénom :

Adresse :

Code postal

Ville :

Téléphone

• Mon e-mail : (à remplir en majuscule)

@

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

• Je choisis mon mode de règlement :

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

☐ Par carte bancaire

N°

Date d'expiration :

Clé (Les 3 chiffres au dos de votre (B)) :

Signature obligatoire

* Par rapport au prix de vente en kiosque, l'accès numérique aux archives. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 31/12/2017 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*. Photos non contractuelles.

L'ESSENTIEL

> Recharger les batteries d'un appareil électronique sans l'intermédiaire d'un fil est pratique, voire nécessaire pour certaines applications.

> Dans les techniques actuelles de recharge sans fil, le chargeur et l'appareil à charger doivent être immobiles l'un par rapport

à l'autre et dans une position relative précise.

> Des chercheurs de l'université Stanford ont conçu un système insensible à l'écartement entre le chargeur et l'appareil. Cela ouvrirait la voie à un dispositif permettant de recharger pendant que l'appareil est en mouvement.

L'AUTEUR



GEOFFROY LEROSEY
chargé de recherche
à l'institut Langevin
(CNRS/ESPCI Paris),
à Paris

Article publié initialement par *Nature* le 15 juin 2017 sous le titre *Wireless power on the move* (www.nature.com/articles/546354a). Traduction et édition réalisées par *Pour la Science*.

Recharger sans fil et en mouvement

RECHARGER LES BATTERIES D'UN TÉLÉPHONE OU D'UN VÉHICULE ÉLECTRIQUE SANS QU'IL Y AIT CONTACT MATÉRIEL EST POSSIBLE. MAIS POURRAIT-ON LE FAIRE TOUT EN ÉTANT EN MOUVEMENT? OUI, GRÂCE À LA SYMÉTRIE PARITÉ-TEMPS...

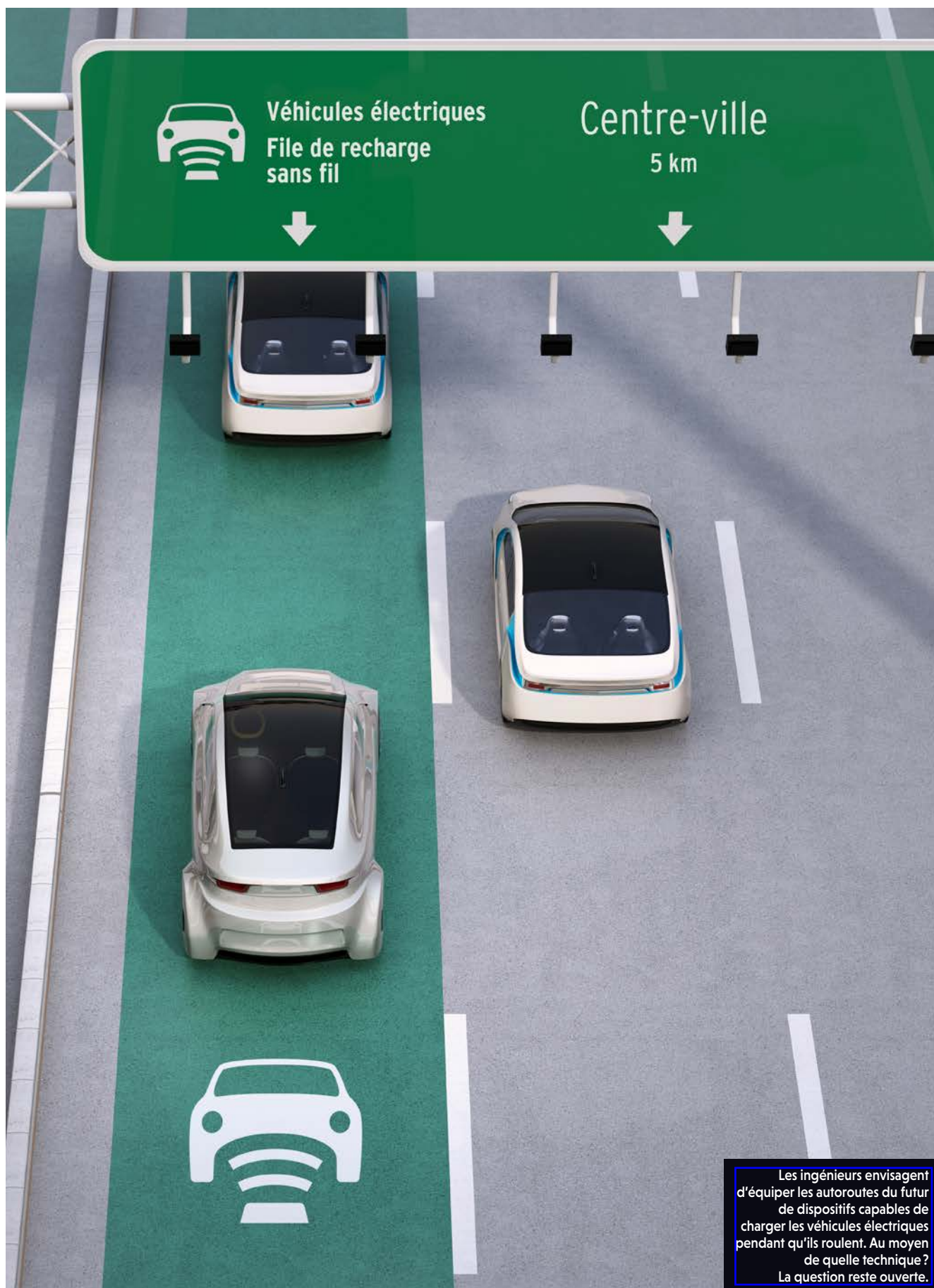
La notion de transmission d'énergie sans fil remonte aux travaux pionniers de l'ingénieur d'origine serbe Nikola Tesla il y a un siècle environ. Mais l'idée n'a refait surface qu'au cours des dernières décennies, motivée par le nombre croissant d'appareils électroniques alimentés par des batteries – des brosses à dents aux tablettes numériques en passant par les implants médicaux.

Figurant parmi les dernières propositions, le « transfert d'énergie sans fil par résonance » permet de transmettre sans fil, avec efficacité, de l'énergie électrique à un appareil immobile. Cependant, avec le développement rapide des véhicules électriques, il serait intéressant de fournir de l'électricité à des dispositifs en mouvement. Sid Assawaworrarit, Xiaofang Yu et Shanhui Fan, chercheurs au département de génie électrique de l'université Stanford, aux États-Unis, viennent de rapporter dans la revue *Nature* du 15 juin

dernier une stratégie astucieuse pour résoudre ce problème, en faisant appel à un concept de la physique fondamentale nommé symétrie parité-temps.

INDUCTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE ENTRE DEUX BOBINES

Les chargeurs sans fil modernes fonctionnent typiquement de la façon suivante (voir l'encadré page 70). On se sert d'ondes radio pour exciter une bobine de fil conducteur, que l'on qualifie d'inductance résonante et qui joue le rôle de réservoir d'énergie électromagnétique. Lorsqu'une seconde inductance résonante suffisamment similaire est approchée du premier, les inductances interagissent fortement; elles échangent de l'énergie plus vite qu'elles ne peuvent en acquérir ou en dissiper, et se comportent comme un circuit unique dans lequel l'énergie est uniformément répartie. Un circuit électrique nommé redresseur extrait alors l'énergie électromagnétique



Les ingénieurs envisagent d'équiper les autoroutes du futur de dispositifs capables de charger les véhicules électriques pendant qu'ils roulent. Au moyen de quelle technique ? La question reste ouverte.

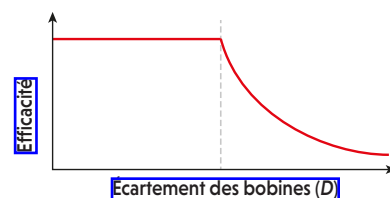
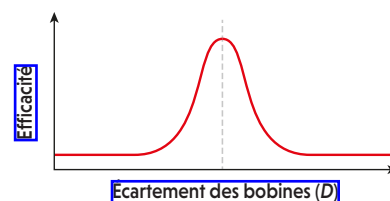
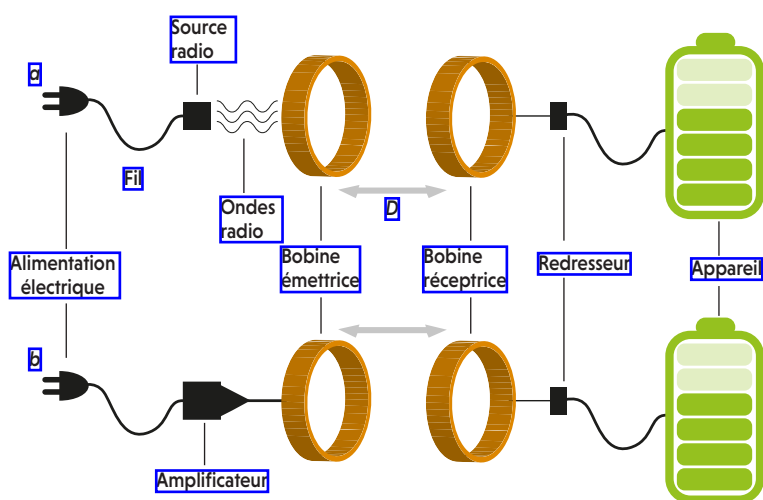
DEUX MÉTHODES POUR TRANSFÉRER SANS CONTACT DE L'ÉNERGIE

Dans des chargeurs modernes sans fil, on fournit de l'énergie électrique à une source d'ondes radio (a), lesquelles excitent une bobine de fil conducteur nommée inductance résonante (la bobine émettrice). Quand on approche une seconde inductance (la bobine réceptrice) de la première, la paire se comporte comme un seul circuit où l'énergie électromagnétique se répartit uniformément. Un circuit électrique nommé redresseur extrait alors l'énergie de la bobine réceptrice et la transmet à l'appareil à charger.

Dans cette approche, l'efficacité du transfert d'énergie entre les bobines n'est maximale que si leur écartement prend une

valeur donnée (ligne pointillée dans le graphique du schéma a).

Sid Assawaworrarit, Xiaofang Yu et Shanhui Fan, de l'université Stanford, ont fait la démonstration d'une méthode alternative où la source d'ondes radio est remplacée par un amplificateur, qui amplifie l'énergie électromagnétique dans la bobine émettrice (b). En exploitant une notion de physique fondamentale nommée symétrie parité-temps, ces chercheurs atteignent une efficacité maximale du transfert d'énergie entre les bobines quel que soit leur écartement, jusqu'à une distance de 70 centimètres environ (ligne pointillée dans le graphique du schéma b).



présente dans la seconde inductance et la transfère à l'appareil qu'il faut charger.

L'un des avantages de cette approche par rapport à d'autres techniques est qu'elle utilise des inductances et donc des champs pour l'essentiel magnétiques plutôt qu'électriques. Comme les champs magnétiques interagissent plus faiblement avec la matière vivante que les champs électriques, la méthode est plus sûre pour les applications pratiques. De plus, l'énergie peut être transmise sans fil sur des distances pouvant aller jusqu'à 1 mètre, selon la taille des bobines.

SENSIBILITÉ À L'ÉCARTEMENT DES BOBINES ET À LEUR ORIENTATION

Toutefois, cette approche présente un inconvénient majeur. Le fort couplage entre les inductances résonantes influe sur leurs propriétés électromagnétiques d'une façon qui dépend beaucoup de l'écart entre les inductances et de leur orientation relative. Par conséquent, les propriétés de la source radio doivent être finement ajustées à l'aide d'un

circuit électronique afin d'obtenir un transfert d'énergie efficace, ce qui est difficile à réaliser si les bobines ne sont pas immobiles.

Sid Assawaworrarit et ses collègues ont adopté une stratégie complètement différente, fondée sur la notion de symétrie parité-temps – propriété caractérisant les systèmes physiques qui ne changent pas sous l'effet combiné d'une réflexion dans un miroir et de l'inversion du sens d'écoulement du temps. La symétrie parité-temps puise ses racines dans la mécanique quantique, et la question de savoir si cette symétrie est une propriété fondamentale de la nature reste ouverte. Néanmoins, il est possible de construire des systèmes classiques (non quantiques) présentant une symétrie parité-temps, ce qui permet d'explorer à la fois le concept et ses applications potentielles.

De tels systèmes sont constitués de composants disposés symétriquement qui peuvent soit absorber l'énergie électromagnétique (canaux de dissipation) soit l'émettre et l'amplifier (canaux de gain). Ils jouissent de propriétés particulières qui ont conduit à de

nombreuses avancées, en particulier en optique physique. Par exemple, un laser multimode, qui comporte de nombreuses fréquences différentes, peut être transformé en un laser monomode grâce à la symétrie parité-temps.

La proposition des trois chercheurs simplifie grandement la conception des chargeurs sans fil

Sid Assawaworrarit et ses collègues ont pu exploiter cette idée en remarquant que tout appareil électrique (nommé charge) qui tire de l'électricité de la bobine réceptrice peut être considéré comme un canal de dissipation, tandis qu'un amplificateur connecté à la bobine émettrice peut être considéré comme un canal de gain (voir l'encadré page précédente, b).

UNE EFFICACITÉ DU TRANSFERT D'ÉNERGIE INDÉPENDANTE DE LA DISTANCE

Dès lors, si les inductances résonantes sont identiques, et si l'augmentation de l'énergie électromagnétique fournie par l'amplificateur dépasse une valeur donnée qui dépend de la charge, le système entier devient symétrique en parité-temps. Un tel système sélectionne automatiquement la fréquence de fonctionnement qui correspond à l'efficacité maximale du transfert d'énergie, indépendamment de la distance qui sépare les bobines. Il en résulte un transfert d'énergie qui ne nécessite ni bobines statiques, ni source d'ondes radio, ni circuit d'ajustement.

Après avoir validé leur stratégie grâce à des simulations, Sid Assawaworrarit et ses collègues en ont fait la démonstration expérimentale. Ils connectent une inductance résonante à un amplificateur et une inductance identique à une résistance, qui fait office de charge. Ils observent un transfert d'énergie sans fil avec un rendement de 100 %,

indépendamment de la distance entre les inductances, jusqu'à 70 centimètres environ. Plus spectaculaire encore, ils montrent que lorsqu'on remplace la résistance par une diode électroluminescente, la luminosité de la diode est indépendante de la distance de séparation. Les trois chercheurs ont utilisé des simulations numériques pour montrer que leur système ajuste automatiquement sa fréquence de fonctionnement en quelques dizaines de microsecondes.

Les résultats de Sid Assawaworrarit et ses collègues sont impressionnants à plus d'un titre. Tout d'abord, ils sont une preuve supplémentaire que des concepts fondamentaux de la physique quantique (une discipline scientifique assez absconse pour le non-spécialiste) peuvent déboucher sur des applications pratiques. Ensuite, la proposition des trois chercheurs simplifie grandement la conception des chargeurs sans fil, en remplaçant une source d'ondes radio finement ajustée par un amplificateur. Enfin, et surtout, ces travaux ouvrent la voie à un transfert d'énergie sans fil robuste et dynamique. C'est une idée extrêmement séduisante, qu'il s'agisse de charger des implants médicaux ou d'alimenter des véhicules électriques en mouvement.

Cependant, pour que ces applications se concrétisent, il faudra poursuivre les efforts de recherche. Par exemple, bien que Sid Assawaworrarit et ses collègues démontrent que l'efficacité du transfert d'énergie entre les bobines s'élève à 100 %, ce n'est pas le cas du transfert entre le bloc d'alimentation et la charge. Pour y remédier, il faudra un amplificateur hautement optimisé dont le coût pourrait se révéler déraisonnablement élevé.

Qui plus est, les trois chercheurs montrent que l'efficacité du transfert n'est pas dégradée si on déplace la bobine de réception le long de l'axe reliant les bobines émettrice et réceptrice. Mais dans les applications pratiques, la bobine réceptrice se déplacera probablement perpendiculairement à cet axe : par exemple, dans le cas d'un véhicule électrique, la bobine émettrice se trouverait dans le sol et la bobine réceptrice se situerait dans le dessous du véhicule, parallèle au sol. Cela affectera-t-il la symétrie parité-temps de ce système et son comportement ?

De plus, si la bobine réceptrice se déplace à relativement grande vitesse par rapport à la bobine émettrice immobile, la quantité d'énergie transférée sera-t-elle suffisante pour que la technologie soit utile ? Il est nécessaire de répondre à ces questions avant que ce concept élégant ne puisse trouver des applications dans des situations réelles. Toutefois, il jette d'ores et déjà un pont fascinant entre le monde de la physique quantique et celui de l'ingénierie. ■

BIBLIOGRAPHIE

S. Assawaworrarit et al., **Robust wireless power transfer using a nonlinear parity-time-symmetric circuit**, *Nature*, vol. 546, pp. 387-390, 2017.

J. Schindler et al., **PT-symmetric electronics**, *Journal of Physics A*, vol. 45, article 444029, 2012.

A. Kurs et al., **Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances**, *Science*, vol. 317, pp. 83-87, 2007.

L'ESSENTIEL

> Dans les Andes, au ^{xv}^e siècle, la coca était devenue un intermédiaire clé de l'économie de troc.

> Produite dans certaines vallées, elle était acheminée dans les mines et les champs, où, par ses propriétés médicinales, elle aidait les travailleurs à supporter leur labeur.

> Dès les débuts de la conquête du Pérou, en 1532, les Espagnols se ruèrent sur les champs de coca.

> Ils détournèrent ainsi l'économie locale à leur profit, exploitant les Indiens dans les mines et les champs en échange de la précieuse coca.

L'AUTEUR

SAMIR BOUMEDIENE
chargé de recherche au CNRS
au sein de l'Institut d'histoire
des représentations et
des idées dans les modernités,
à l'École normale supérieure
de Lyon

La coca arme des conquistadors

POUR LES ESPAGNOLS DU ^{xvi}^e SIÈCLE, L'EMPIRE INCA EST BIEN L'ELDORADO : UNE SOURCE QUASI INÉPUISABLE D'OR ET D'ARGENT. MAIS ON OUBLIE SOUVENT UN ACTEUR MAJEUR DE CE PILLAGE : LA COCA. CETTE PLANTE PERMET AUX CONQUÉRANTS D'ENVOYER LES INDIENS AU FOND DES MINES. ET DE FINIR DE DÉSTRUCTURER LA SOCIÉTÉ ANDINE.

Dans la seconde moitié du ^{xvi}^e siècle, l'or et surtout l'argent extraits des mines de Potosí, dans l'actuelle Bolivie, inondent le Vieux Continent. L'effet de cet afflux de métaux précieux sur l'économie européenne a fait l'objet de nombreuses études, décrivant l'inflation monétaire qui l'a suivi ou le basculement des capitaux de la péninsule Ibérique vers le nord du continent. À la suite d'innombrables circulations, le métal extrait par les mineurs des Andes se répand en effet dans de nombreuses régions, où il est converti sous de multiples formes : dans les pierres qui servent à construire les édifices baroques ou dans les guerres que se mènent les souverains.

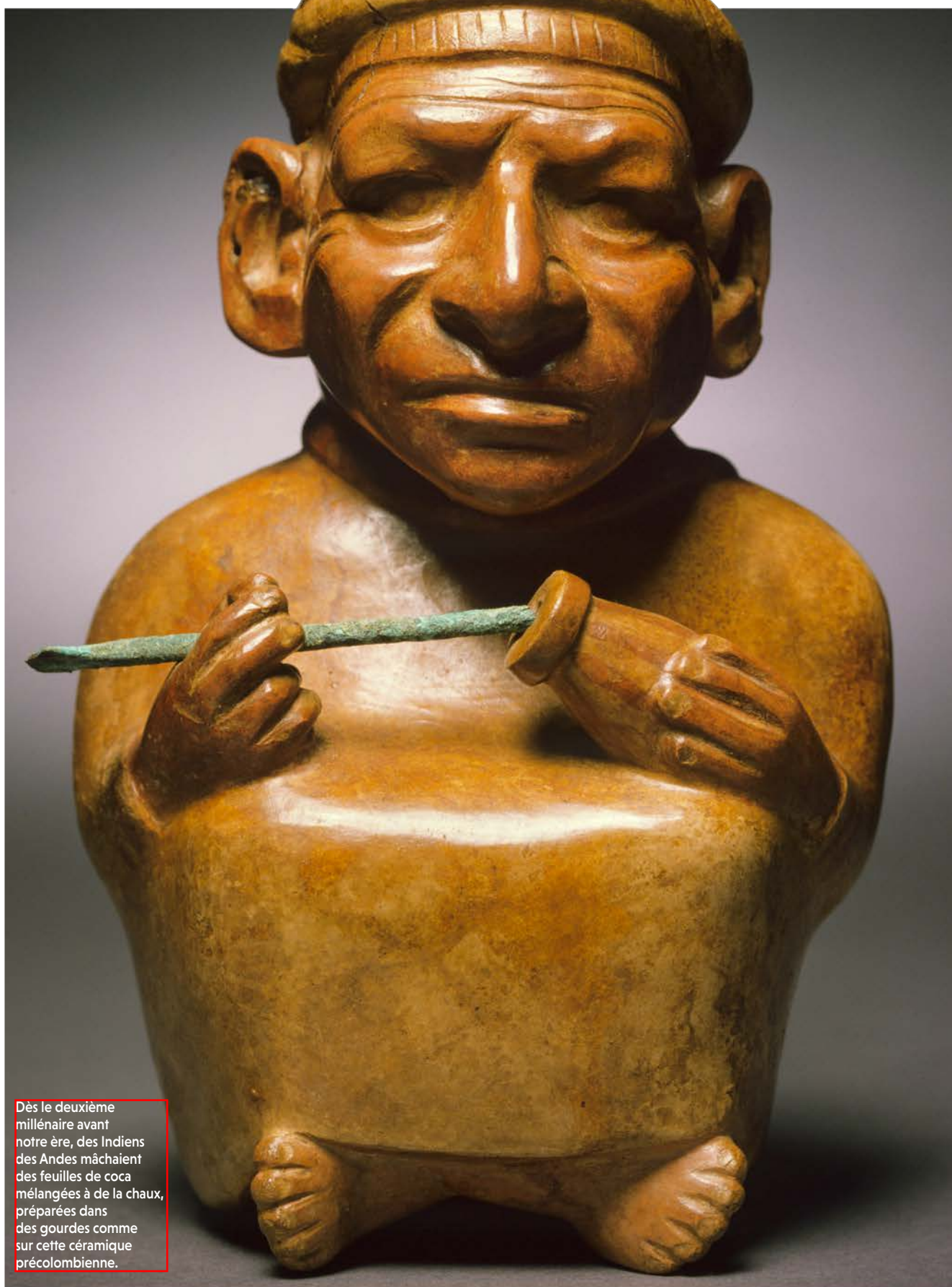
L'invasion du métal bolivien en Europe constituerait ainsi un exemple précoce de la «mondialisation» : intégration des économies, effets-retours spectaculaires, interdépendance croissante des sphères de production et de consommation. Mais à un bout comme à l'autre

de la chaîne, ce récit ne dit pas tout. D'une part, il exagère peut-être l'importance de ces métaux dans l'économie européenne et néglige en partie leur rôle en Asie. Surtout, il laisse de côté ce qui rend en grande partie possible cet afflux de capitaux : la mobilisation du travail des mineurs et, avec elle, tout un ensemble de circulations dont les logiques contredisent le récit sans doute trop unificateur de la mondialisation. Pour appréhender la complexité de la situation, il faut s'intéresser au destin d'une plante, la coca.

L'EMPIRE DE LA COCA

La coca est la feuille d'un arbuste originaire de l'Amazonie, répandu au fil des siècles de part et d'autre de la cordillère des Andes. L'avènement de l'Empire inca, le *Tawantinsuyu*, au ^{xv}^e siècle, a joué un rôle fondamental dans cette extension.

Du nord de l'actuel Équateur au nord de l'actuel Chili, le *Tawantinsuyu* s'étend sur trois étages écologiques : la côte Pacifique, les vallées humides et les montagnes. L'unité de base de cette organisation politique est l'*ayllu*, une communauté réunie autour d'un ancêtre commun et



Dès le deuxième millénaire avant notre ère, des Indiens des Andes mâchaient des feuilles de coca mélangées à de la chaux, préparées dans des gourdes comme sur cette céramique précolombienne.

➤ dirigée en général par un ou une chef (*curaca*). Afin d'assurer leur autosuffisance, les *ayllus* se déploient en sortes d'archipels verticaux sur plusieurs étages écologiques. La chefferie redistribue la production de chaque étage ce qui permet d'avoir, partout, accès aux patates ou au quinoa des montagnes, à la coca ou au coton des vallées, ainsi qu'aux ressources halieutiques de la côte.

Suivant le prestige de leur *curaca*, les *ayllus* sont incorporés au *Tawantinsuyu* dans un réseau de sujétions emboîtées. Maître des armées, l'Inca protège les chefferies en échange d'un tribut qu'il prélève sous forme de travail. Chaque *ayllu* est tenu d'exploiter une terre appartenant à l'Inca et une terre appartenant aux dieux. De plus, tout homme âgé entre quinze et cinquante ans doit effectuer un travail hors de sa communauté, dans le cadre d'un système de rotation appelé *mit'a*.

L'organisation de l'Empire inca repose donc sur un réseau de distribution vertical, matérialisé par des routes de pierre et des auberges-entrepôts. Ce réseau renforce la complémentarité entre étages en même temps qu'il limite la communication horizontale entre chefferies, afin de réduire les possibilités de sécession. Ce modèle, cependant, est plus visible dans les Andes centrales et méridionales que dans le Nord, où les *ayllus* sont davantage liés par des échanges horizontaux.

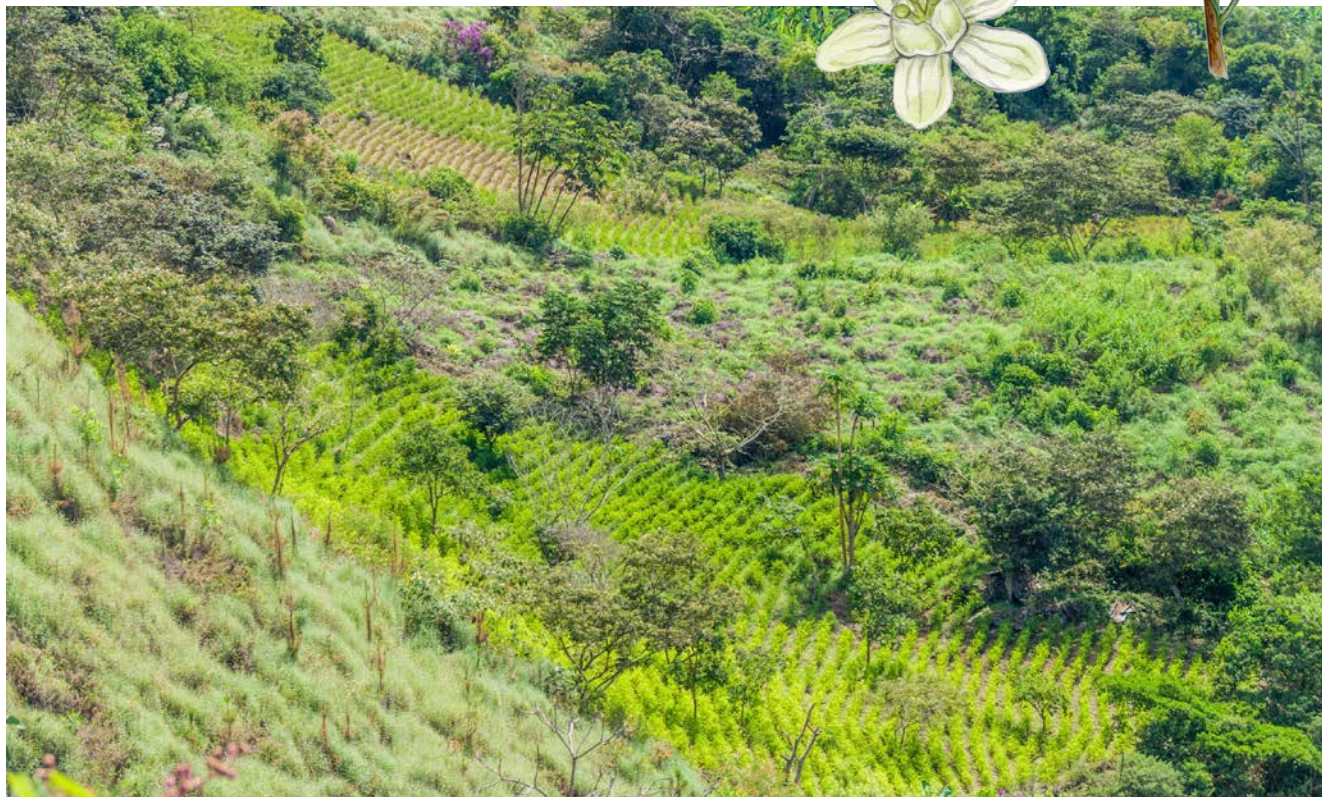
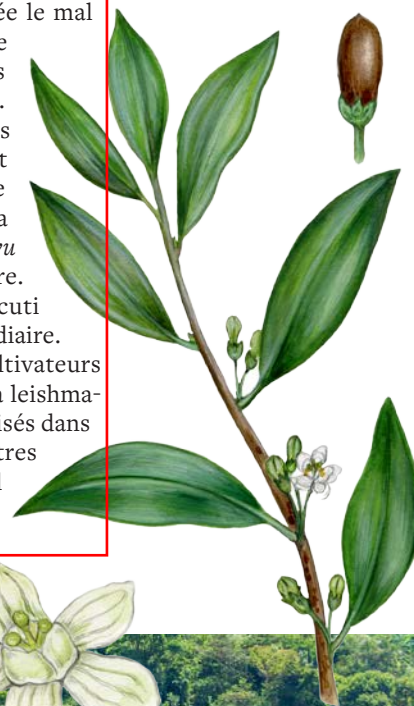
La coca est un élément essentiel de cette organisation. Elle est cultivée dans les vallées

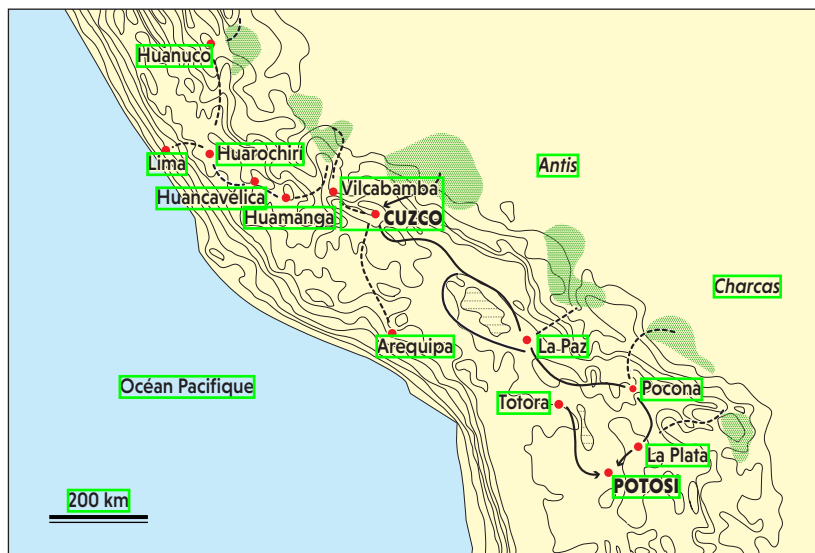
chaudes et humides, notamment celles du piedmont oriental des Andes, les *yungas*. Des différents sites de production, le plus important se situe dans la terre des Antis, à 160 kilomètres au nord-est de Cuzco, la capitale de l'empire. Les Antis, des communautés que les Incas considèrent comme des peuples de sauvages («chunchos»), ont donné leur nom à la région, Antis, par la suite devenue les Andes. C'est là qu'est produite la feuille sacrée et protégée par l'Inca, la *mama cuca*.

Mais dans les Antis, le *Tawantinsuyu* affronte deux difficultés : l'hostilité des «chunchos» et une maladie appelée le mal des Andes, une forme ravageuse de leishmaniose très répandue dans les vallées où l'on cultive la coca. Contrairement aux habitants des montagnes, les «chunchos» ont développé une résistance à cette maladie ; ce sont eux qui cultivent la coca et la vendent au *Tawantinsuyu* aux premiers temps de son histoire. Mais au ^{xv} siècle, l'Inca Pachacuti décide de se passer de cet intermédiaire. Il installe dans les vallées des cultivateurs ayant développé une résistance à la leishmaniose et y envoie des Indiens mobilisés dans le cadre de la *mit'a* ainsi que d'autres saisonniers, le recours à ce travail temporaire étant un moyen de limiter l'exposition à la maladie.

LA COCA

Connue aujourd'hui sous le nom *Erythroxylum coca*, la coca pousse naturellement dans la cordillère des Andes, où elle est aussi cultivée depuis longtemps (ci-dessous, un champ de coca dans la région des Yungas, en Bolivie) pour ses feuilles, aux vertus médicinales. La cocaïne est extraite de ces dernières.





Entre les Antis et Cuzco, des cités, des routes et des entrepôts sont installés pour faciliter l'acheminement de la coca. Les paniers sont transportés à dos d'homme par des personnes qui, tout au long de leur parcours, échan- gent la feuille contre des vivres. La coca institue ainsi une médiation dans l'économie de troc. Elle n'est cependant pas une monnaie dans la mesure où elle ne fait pas l'objet d'une thésaurisation. Échangée contre du maïs, de la pomme de terre, du quinoa, du piment ou des cochons d'Inde, elle constitue la variable nécessaire à l'activité agricole.

UN ANTIDOULEUR SACRÉ

Ce rôle attribué à la coca est lié à sa valeur rituelle. Des paysans se défont d'une partie de leur production pour obtenir des feuilles afin de les troquer de nouveau, mais aussi dans le but de les mâcher. Cette pratique permet de lutter contre la douleur qu'entraîne la dureté des travaux et des voyages, elle atténue les maux de dents et d'estomac, elle accroît la résistance face à l'altitude, la fatigue, la soif et la faim. La mastication de la coca peut aussi procurer des visions, à travers lesquelles les guérisseurs diagnostiquent les maladies ou prennent parole avec diverses entités: Inti, le Soleil, Pachamama, la Terre ou encore les *supay*, des esprits souterrains mi-bénéfiques mi-maléfiques.

Cette communication avec les entités invisibles a ses lieux et ses objets privilégiés, les *huacas*, terme qui désigne toute chose sacrée (une rivière, un lieu perché de la montagne, un instrument, etc.). La vénération de ces *huacas* implique souvent des offrandes dans lesquelles la coca joue également un rôle de premier plan. Aux côtés du cochon d'Inde ou du maïs, la feuille est ainsi brûlée pour nourrir les esprits

célestes ou enfouie sous terre pour être donnée aux *supay* ou à la Pachamama.

La plante aide les paysans non seulement à supporter la dureté de leur labeur, mais aussi à affronter les énergies souterraines lorsqu'il faut creuser des sillons pour semer des graines. Ses usages religieux et médicinal se nouent donc autour d'une signification essentielle: la coca constitue un médiateur entre les Indiens et la terre. Or parmi les activités qui obligent les travailleurs à se confronter aux énergies souterraines, l'une acquiert un rôle crucial après l'arrivée des Espagnols: l'extraction minière.

L'ARGENT DE LA COCA

Dès les débuts de la conquête du Pérou en 1532, les Espagnols se ruent vers les vallées à coca. Devenir propriétaires des champs de coca peut leur permettre, en effet, de mettre la main sur tout ce que s'échangent les Indiens, mais aussi de les faire travailler. Au cours des années 1540, ils envoient ainsi de nombreux indigènes travailler sur les nouveaux champs de coca qu'ils installent dans les Antis. La fortune de ces planteurs espagnols, pour la plupart établis à Cuzco, explose avec l'ouverture des mines de Potosí en 1548.

Pour accroître l'exploitation du gisement, les Espagnols adoptent le système inca de la *mit'a*. Les jeunes Indiens sont désormais soumis à une période de travail obligatoire dans les mines. Déplacés massivement à Potosí, dans les hauteurs de l'Altiplano et dans l'obscurité des galeries, ils trouvent dans la coca le meilleur secours à leur peine.

La précieuse feuille leur est apportée de Cuzco et dans une moindre mesure de La Paz. Sur les 1000 kilomètres qui séparent les Antis de Potosí, la circulation des paniers de coca est assurée à dos d'homme ou sur des mules par des colporteurs. Le long de leur route, ils troquent une partie de leur coca contre le bétail dont ils ont besoin pour transporter les paniers. Mais à Potosí, cette coca arrive sous la forme

LES ROUTES DE LA COCA

Produite dans les vallées à coca (en vert), la plante destinée à approvisionner les mineurs de Potosí au XVI^e siècle était acheminée de Cuzco et de La Paz, à dos d'homme ou de mule.

Échangée contre du maïs ou des cochons d'Inde, la coca constituait un pivot de l'économie de troc

▢ d'une marchandise qui s'achète : c'est avec de l'argent que les mineurs s'en procurent et cet argent est ensuite récupéré par les planteurs espagnols. Dans leur sillage, de nombreuses personnes s'enrichissent : les femmes indiennes que ces derniers épousent, mais aussi les Espagnols qui envahissent la sphère d'intermédiation de ce marché. De l'autre côté de l'Atlantique, c'est donc le commerce de la coca qui, indirectement, alimente les caisses du Trésor royal ainsi que l'Europe entière, submergée par les métaux de Potosí.

En s'accaparant les champs de coca, les Espagnols ont ainsi tout transformé. Ils ont réorienté la circulation des richesses vers la péninsule Ibérique et réorganisé le mouvement des personnes à l'intérieur du domaine andin. L'irruption et l'extension de la valeur d'échange ont conduit les Indiens à progressivement abandonner la solidarité communautaire fondée sur le troc pour devenir dépendants du marché colonial. Dans le rapport au temps et à l'espace, dans le rapport au corps aussi, cette dépendance a transformé la mastication ritualisée de la feuille en une consommation conditionnée par les impératifs du travail. La logique du salariat s'est ainsi perfusée dans l'organisme même des mineurs : sous la dépendance de la feuille, ils travaillent pour consommer la marchandise et consomment la marchandise pour travailler.

LE DILEMME DES ESPAGNOLS

Mais cette coca qui est mâchée par les mineurs est cultivée par d'autres travailleurs. Les souffrances qu'elle permet d'endurer à Potosí ont pour prix d'autres douleurs dans les Antis. C'est pourquoi la plante soulève un profond débat au milieu du xvi^e siècle. La monarchie a besoin de l'argent extrait des mines pour financer ses guerres et il lui paraît inenvisageable de faire travailler des esclaves à l'altitude de Potosí. Il lui faut donc mettre en balance la rente minière avec la vie des mineurs et des cultivateurs de coca, sans oublier la lutte contre l'idolâtrie.

Grossièrement, ce débat oppose deux camps. D'un côté, les prohibitionnistes, notamment des religieux et des juristes. De l'autre, les défenseurs de la coca, essentiellement des planteurs, mais aussi des officiers, voire des religieux.

En ce temps de crise démographique et de réforme catholique, l'argumentaire des prohibitionnistes se développe logiquement autour de deux idées fortes. La première est que la coca tue les Indiens : ceux qui la cultivent dans les vallées insalubres et ceux qui dans les mines se gâtent la santé en la mâchant. La seconde idée est que la feuille nourrit l'idolâtrie indigène, dont l'éradication est un aspect essentiel de la mission évangélisatrice des conquérants.



Pour les prohibitionnistes, les principaux responsables de cette situation sont les Espagnols, qui surexploitent les Indiens au mépris de leur santé et de leur conversion.

De leur côté, les défenseurs de la coca reconnaissent que sa production dans les Antis accroît la mortalité indigène. Mais c'est pour eux un mal nécessaire. D'une part, la mastication de la feuille n'a pas, d'après eux, les effets nocifs décrits par les prohibitionnistes. D'autre part, l'éradication des croyances préhispaniques leur paraît trop difficile pour être réglée par la seule interdiction de la coca. Avec ou sans la feuille, l'idolâtrie se maintiendra. Mais si la feuille venait à être interdite, les grands perdants seraient les Espagnols, car alors, c'est de l'argent que les Indiens offriraient à leurs *huacas*.

Très prisées des Indiens pour leurs effets contre la douleur, la fatigue et la faim, les feuilles de coca étaient aussi utilisées par les guérisseurs (ici un « sorcier des songes », un « sorcier du feu » et un « sorcier qui suce ») à qui ils procuraient des visions les aidant à diagnostiquer une maladie ou à entrer en communication avec les esprits.



Un échange de coca, représenté au début du XVII^e siècle par le chroniqueur indigène Felipe Guamán Poma de Ayala.

Sans coca, pas d'exploitation minière et sans exploitation minière, «pas de Pérou». La hiérarchie entre le métal et la feuille reflète celle qui existe entre les conquérants et les vaincus, mais aussi celle qui s'établit entre les impératifs de l'économie et ceux de la conversion. Or cette échelle des valeurs est partagée par certains religieux. En catimini, l'évêché de Cuzco a en effet prélevé une dîme sur la coca qui fut la base de sa fortune au XVI^e siècle.

DES LOIS AMBIGÜES

Dans les Andes, l'éradication de l'idolâtrie a donc été sacrifiée sur l'autel des rentes : l'économie a dicté sa loi, en infléchissant celle des vice-rois. Des premières mesures prises par le vice-roi Cañete aux cinquante ordonnances promulguées par le vice-roi Toledo en 1572, la

législation sur la coca a évolué entre fermeté et conciliation à l'égard des planteurs. Mais ces derniers n'ont jamais été réellement inquiétés par les dispositions prises, qui visaient à limiter plutôt qu'interdire l'exploitation de la coca. Le but de cette politique était, d'une certaine façon, de restreindre l'usage de la coca aux seuls centres miniers et, même, aux seuls mineurs. Dit autrement, la mise sous contrôle de la coca n'a fait que renforcer son articulation à l'économie minière. Avant les Indiens, c'est en effet la production d'argent qui est protégée par ces lois.

En suivant la voie de l'endiguement plutôt que celle de l'interdiction généralisée de la coca, les autorités espagnoles ont donc tenté de résoudre la contradiction entre deux objectifs différents : exploitation des mines d'un côté, lutte contre l'idolâtrie de l'autre.

Les effets de cette politique sont complexes à saisir, parce qu'ils impliquent d'autres paramètres, en particulier l'arrivée progressive, à partir de la fin du XVI^e siècle, de nouveaux mineurs (par exemple des esclaves venus d'Afrique) et de nouveaux produits de consommation (vin, bière de maïs, eaux-de-vie, etc.). Il est néanmoins possible de formuler l'affirmation suivante : là où les deux objectifs ont coïncidé – exploitation des mines et lutte contre les croyances locales –, le contrôle sur la coca a été d'une grande efficacité ; là où en revanche, la contradiction entre intérêt économique et christianisation a été forte, le contrôle sur la coca a eu des effets plus contrastés.

LE PARADOXE DE QUITO

Le premier cas de figure est parfaitement illustré par l'histoire de la coca dans la région de Quito. Là, l'activité minière est dominée par certains gisements d'or, comme celui de Zaruma, tandis que l'activité agricole repose, avant même la conquête espagnole, sur des formes d'échange moins communautaires que dans le reste du *Tawantinsuyu*. Quoi qu'il en soit, la coca y joue également un rôle central. Pourtant, elle disparaît presque entièrement de cette région au tournant des XVII^e et XVIII^e siècles.

La première raison de cette disparition est d'ordre démographique. Dans cette partie des Andes, la mortalité indigène, encore accentuée par la fuite des Indiens dépossédés, a été compensée au XVII^e siècle par l'installation d'esclaves, aussi bien sur les terres agricoles que dans les mines, dont l'altitude est inférieure à celle de Potosí. Les grands propriétaires terriens de la région, notamment les jésuites, décident alors de raser les arbustes à coca, puisque les Indiens qui la consommaient ont bien souvent disparu, et que les esclaves qui les ont remplacés apprécient d'autres substances, comme le vin ou les eaux-de-vie, dont la distillation permet aux Espagnols d'écouler

> leurs surplus. Autrement dit, les nécessités de l'économie ne justifient pas, dans cette région, le maintien de la coca. Si la feuille y subsiste en quelques endroits, les autorités religieuses entérinent son éradication à la fin du ^{xvii}^e siècle. Dans cette région, en effet, la mastication de la feuille a atteint les Espagnols, et même les prêtres, tous menacés d'excommunication par les évêques de Quito. Par cette coïncidence entre les intérêts économiques et les objectifs de l'encadrement religieux, la lutte contre la feuille opère sur deux fronts: les vallées et les centres urbains. Elle attaque conjointement la production et la consommation de la plante, qui finit par disparaître de l'actuel Équateur.

Cette situation est cependant exceptionnelle. En dépit de leur violence, les campagnes d'extirpation menées au ^{xvii}^e siècle dans le vice-royaume du Pérou ne parviennent jamais à réaliser le vœu du jésuite Pablo de Arriaga d'éradiquer les offrandes de coca. Car il faudrait, comme en Équateur, remplacer une structure agraire par une autre, un type de population par un autre, et ainsi briser tout le commerce qui met en rapport les vallées à coca aux centres de consommation.

TRAFIC DE COCA DANS LES BAS-FONDS DE LIMA

L'exemple de Lima le montre parfaitement. La feuille est consommée non seulement dans les quartiers majoritairement indigènes du Cercado ou du Surco, mais aussi dans le reste de la ville, où elle est manipulée par des « sorciers » et surtout des « sorcières » de toutes les castes. Selon les inquisiteurs, les femmes qui mâchent la plante font preuve d'incivilités, « cessent de prier, de se confier à Dieu, de dire bonjour ou bonsoir. »

Les religieux suspectent également la feuille de répandre toutes sortes de turpitudes et de superstitions dans la capitale vice-royale: ébriété, fornication, inceste, adultère, bestialité, sacrifices, idolâtrie et offrandes. Quant à la commercialisation de la feuille, elle est tout aussi subversive aux yeux des autorités. Des « Métisses », des « Mulâtresses » ou des Indiennes la diffusent incognito, ce qui oblige les « extirpateurs de l'idolâtrie » à « savoir où elles cachent malicieusement [la coca] hors de leurs maisons » (voir l'encadré ci-contre).

Or identifier les revendeurs et les vendeuses de Lima ne suffit pas. Tout un réseau invisible œuvre à l'importation de la coca, qui est cultivée à des centaines de kilomètres. Une série de perquisitions menée en 1668-1669 révèle que la feuille est apportée par des colporteurs qui font des allers-retours entre la ville et des localités situées à plus de 3000 mètres d'altitude, à proximité de Potosí.

SOUS LE JOUG DES EXTIRPATEURS DE L'IDOLÂTRIE

Lima, 14 mai 1669.
À 8 heures du soir Juan Sarmiento de Vivero, chargé par les autorités religieuses espagnoles de combattre l'idolâtrie, effectue en compagnie de notaires et de l'inspecteur Joseph de Torres une descente dans la maison d'une Métisse dénommée Ana María de Ribera. Connue dans son quartier pour vendre de la coca, Ana María de Ribera a échappé plusieurs fois à la vigilance de ceux que l'on appelle les extirpateurs de l'idolâtrie.

En ce soir de mai, ces derniers attendent devant la maison que la porte s'ouvre. Une jeune femme finit par sortir. Elle est interpellée. Les extirpateurs trouvent sur elle de la coca et décident de procéder à une perquisition. Ils entrent dans la demeure où, en dépit des protestations d'Ana María de Ribera, ils effectuent des fouilles une fois de plus infructueuses. Mais Joseph de Torres, qui se débat avec la Métisse, croit reconnaître l'odeur de la coca. Un seul

endroit n'a pas été inspecté ; les hommes de foi n'hésitent plus. Ils soulèvent la jupe de la jeune femme, sous laquelle ils trouvent un paquet de coca.

Ses aveux permettent de reconstituer un réseau bien implanté. Avec la complicité d'une « Quarteronne de mulâtre », la Métisse vend de la coca dans son quartier depuis maintenant cinq ans. Elle s'en tire avec une interdiction de poursuivre ce commerce, assortie d'une peine de deux cents coups de fouet et deux ans de bannissement en cas de récidive.

Mais le 5 septembre au soir, les extirpateurs, alertés par des rumeurs, font une autre descente. Ils envoient l'un des leurs acheter de la coca à Ana María de Ribera, qui ne tombe pas dans le piège. Ils pénètrent malgré tout le domicile et trouvent un petit sac de coca dans un recoin de la chambre. La Métisse est une nouvelle fois humiliée, traînée dans la rue sous les huées de ses voisins. Elle reçoit cent coups de fouet, défile sur un âne le torse nu et doit s'exiler pendant deux ans à plus de trente lieues de son quartier.

À la fin des années 1660, d'autres femmes connaissent un sort semblable. Sous l'impulsion de Juan Sarmiento, de nombreuses descentes sont menées pour mettre un terme à la vente de coca dans les quartiers de Lima. Pourtant, à 1 500 kilomètres de là, dans les mines de Potosí, la consommation de la feuille est permise, voire incitée par les autorités...

S. B.

La politique visant à restreindre l'usage de la coca aux centres miniers de l'Altiplano a donc eu un effet très limité. Non seulement la feuille a continué de circuler dans la zone de Potosí et le long de toutes les routes qui y mènent, mais elle s'est aussi diffusée bien au-delà du monde des mines et des vallées à coca, jusque dans les grands centres urbains comme Lima. Par ce même mouvement, la consommation de la feuille s'est diffusée du monde indigène aux mondes non indigènes.

Cette politique de limitation a néanmoins eu un effet majeur. Si elle n'a pas empêché, partout, la transmission de la plante, elle a en revanche rendu impossible son passage en Europe. Entachée d'une forte suspicion, diabolisée même par certains Espagnols, la plante n'a fait l'objet d'une véritable commercialisation en Europe qu'à partir de la seconde moitié du ^{xviii}^e siècle.

Le destin de la coca illustre donc bien les problèmes complexes que posent les circulations de personnes, de matériaux et de savoirs. Le rôle que la feuille joue dans l'approvisionnement des mines est à la fois nécessaire à la mobilisation des travailleurs vers les centres de production et au déplacement des capitaux vers l'Europe. Mais la plante, elle, ne circule que dans le domaine andin. Si certains Espagnols se sont approprié les pratiques qui lui sont liées, ces dernières ne transforment pas la médecine européenne avant le XIX^e siècle – époque durant laquelle l'usage de la cocaïne a entraîné de profondes mutations.

UNE PLANTE MÉDICINALE CÉLÈBRE, MAIS INTROUVABLE SUR LE VIEUX CONTINENT

De nombreux savants d'Europe, néanmoins, ont connu la coca dès le XVI^e siècle. Le débat qui opposa les défenseurs de la coca aux prohibitionnistes fut parmi les plus importantes controverses liées au gouvernement de l'Amérique et a mobilisé l'attention des juristes, des courtisans et du roi Philippe II. Alors qu'elle n'a pas traversé l'Atlantique, la coca est peut-être la plante américaine sur laquelle la documentation est la plus riche pour le XVI^e siècle. Elle est,

d'une certaine manière, connue sans être connue. À Séville, le médecin Nicolás Monardes en parle dans son *Histoire médicale des Indes occidentales*, et certains apothicaires semblent être parvenus à en récupérer des échantillons. Au milieu du XVIII^e siècle, l'une des grandes quêtes que poursuit Joseph de Jussieu lors de son voyage en Amérique est l'étude de la coca.

Si l'histoire de cette plante singulière rappelle que les personnes, les savoirs et les choses ne circulent pas de la même manière, elle invite aussi à comprendre politiquement les circulations, en mettant en avant le rôle des ruptures, des blocages, des barrières. Et, par là, à comprendre différemment ce que l'on nomme la mondialisation. Qu'on l'envisage sous son versant économique ou qu'on l'observe depuis une perspective plus large, celle-ci n'est pas que l'intensification des échanges. Elle repose, aussi, sur la mise en place volontaire de barrières. Ainsi que le suggère l'histoire de la coca, toute la question est de savoir comment s'articulent ces logiques; comment des circulations locales et des circulations transocéaniques se configurent; et comment, enfin, ces mises en mouvement peuvent, comme avec la coca dans les alentours de Quito, contribuer à la destruction d'un monde. ■

BIBLIOGRAPHIE

S. Boumediene, **La colonisation du savoir. Une histoire des plantes médicinales du « Nouveau Monde » (1492-1750)**, Les Éditions des mondes à faire, 2016.

R. Coronel-Feijóo, **El Valle sangriento 1580-1700 : de los señorios de la coca y el algodón a la hacienda cañera jesuita**, UASB, 2016.

J. V. Murra, **Formations économiques et politiques dans le monde andin**, Éditions de la MSH, 2013.

C. Salazar-Soler, **Anthropologie des mineurs des Andes. Dans les entrailles de la terre**, L'Harmattan, 2002.

M. Rostworowski De Diez Canseco, **Conflicts over Coca Fields in XVIth-Century Perú**, University of Michigan, 1988.



{ Partagez les savoirs }

LES RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM

Entrée gratuite

Au Jardin des Plantes

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

POUR LA SCIENCE

BAR DES SCIENCES

Dimanche 15 octobre - 17h30
En quête des origines de la vie
Avec J. Duprat, astrophysicien, CNRS – M.-Ch. Maurel, spécialiste de l'évolution moléculaire et des origines de la vie, Muséum – F. Raulin-Cerceau, astrophysicienne et exo/astrobiologiste, Centre Koyré – F. Robert, cosmochimiste, Muséum

Café-restaurant La Baleine
accès 47 rue Cuvier, Paris 5^e

FILMS DES 10 ANS

Samedi 14 octobre - 15h
Les gardiens du Mont de la Lune
par S. Gadmer Tiên - France - 2016 - 87 min.

Dimanche 15 octobre - 15h
The great white silence
par H. Ponting - 2011 - 108 min.

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

CONFÉRENCES-DÉBATS

Cycle L'archéozoologie, ou l'histoire des relations naturelles et culturelles entre l'homme et l'animal
Avec Ch. Lefèvre, professeur du Muséum

Jeudi 12 octobre - 18h : De l'anatomie comparée à l'anthropozoologie : évolution d'une discipline

Jeudi 26 octobre - 18h : Discours des os : méthodes et outils pour le décrypter

Cycle France-Colombie : une histoire humaine et naturelle en partage

Lundi 16 octobre - 18h : Émeraude colombienne d'hier et d'aujourd'hui - Avec G. Giuliani, directeur de recherche à l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), GET à Toulouse et CRPG à Vandœuvre-lès-Nancy

Lundi 23 octobre - 18h : Planchon et Triana : une collaboration scientifique à l'origine de la première Flore de Colombie - Avec M. Jeanson, responsable de l'Herbier National, Muséum

Lundi 30 octobre - 18h
La forêt vierge d'Amazonie n'existe pas ! 10 000 ans de présence humaine
Avec S. Rostain, archéologue et directeur de recherche au CNRS, Paris

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



R

ENDEZ-VOUS

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

121,404 ET AUTRES NOMBRES PALINDROMES

Visuellement faciles à identifier, ces nombres offrent des problèmes de tous niveaux et quelques défis informatiques. Les mathématiciens ont aussi trouvé de beaux résultats: ainsi, tout nombre entier peut s'écrire comme la somme de trois nombres palindromes.

L'AUTEUR



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

Jean-Paul Delahaye
a récemment publié:
**Les mathématiciens
se plient au jeu**,
une sélection de ses
chroniques parues
dans *Pour la Science*
(Belin, 2017).

Les mots «gag», «non», «elle», «rotor», «ressasser» se lisent de droite à gauche aussi bien que de gauche à droite. On dit que ce sont des palindromes. D'ailleurs, «ressasser» et «rotavator» sont les plus longs mots palindromes en français.

Si on néglige les espaces, les accents, les majuscules et la ponctuation, on sait composer des phrases et même de longs textes palindromiques tels que:

Élu par cette crapule (Marcel Duchamp); *Noël a trop par rapport à Léon* (Sylvain Viart); *Rue Verlaine gela le génial rêveur* (Jacques Perry-Salkow); *Ésope reste ici et se repose* (Maître Capelo); *Éric notre valet alla te laver ton ciré* (Maître Capelo).

Georges Perec a composé un texte palindromique de 1247 mots. Plus récemment, Frédéric Schmitter et Jacques Perry-Salkow ont écrit un récit palindromique, *Sorel Eros*, qui comporte 10 001 lettres. Romain Seignovet a trouvé des palindromes pour toutes les langues européennes (voir l'illustration 1 page ci-contre).

Jolis exploits, mais qui ne concernent guère le mathématicien. Ce dernier préfère envisager les nombres palindromes. En trouver est facile, puisque toute suite de chiffres ne commençant pas par 0 est un nombre et qu'on peut donc sans difficulté en écrire qui soient des palindromes: 242, 10001 ou 12321. Leur liste, bien sûr infinie, se programme aisément. C'est la suite A002113 de l'encyclopédie des suites numériques de Neil Sloane

(<https://oeis.org/A002113>). En voici le début: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 22, 33, 44, 55, 66, 77, 88, 99, 101, 111, 121, 131, 141, 151, 161, 171, 181, 191, 202, 212, 222, 232, 242, 252, 262, 272, 282, 292, 303, 313, 323, 333, 343, 353, 363, ...

Nous allons voir cependant que les jeux et problèmes que les mathématiciens envisagent à propos des nombres palindromes sont aussi variés et difficiles que ceux usuels de la discipline... et que certains restent irrésolus.

COMBIEN SONT-ILS? COMMENT SE RARÉFIENT-ILS?

Commençons par envisager des questions faciles. Combien existe-t-il de nombres palindromes en base 10 composés de n chiffres?

Si n est pair, pour avoir un nombre palindrome à n chiffres décimaux, il suffit de choisir comme on le veut ses $n/2$ premiers chiffres en imposant que le premier ne soit pas 0, et de les répéter en ordre inverse. Pour $n = 6$, on choisit par exemple 247, qui donne 247742. On en déduit que le nombre de palindromes à n chiffres, n pair, est exactement $9 \times 10^{n/2-1}$.

Pour $n = 1$, il y a 10 nombres palindromes: 0, 1, ..., 9. Si n est impair supérieur à 1, en raisonnant comme dans le cas pair, on trouve que le nombre de palindromes à n chiffres est $9 \times 10^{(n-1)/2}$. On en tire que le nombre de nombres palindromes inférieurs à 10^n pour $n = 1, 2, 3, 4, \dots$ est, respectivement: 10, 19, 109, 199, 1099, 1999, 10999, 19999, ... (ce qui est toujours supérieur à $10^{n/2}$).

Leur densité devient nulle à l'infini et elle est sensiblement inférieure à celle des nombres



L'EUROPE DES PALINDROMES

1

Un jeune Français, Romain Seignovet, fervent défenseur de l'idée d'une Europe unie, maintient un site Internet consacré à l'Europe (<https://europeisnotdead.com>). On y trouve notamment cette carte où chaque pays porte un palindrome dans sa langue.



2

LES NOMBRES NON PALINDROMES

premiers, ce que l'on démontre ou que l'on constate en examinant le nombre de nombres premiers inférieurs à 10^n pour $n=1, 2, 3, 4, \dots$, qui est 4, 25, 168, 1229, 9592, 78498, 664579, 5761455, ... (en ordre de grandeur: $10^n/n$).

La série des inverses des nombres palindromes converge vers la limite 3,37018..., alors que la série des inverses des nombres premiers a une somme infinie, marque d'une densité assez forte.

DIVISIBILITÉ, NOMBRES PREMIERS

Autre propriété élémentaire: si un nombre palindrome est formé d'un nombre pair de chiffres, alors il est divisible par 11, et ce n'est donc pas un nombre premier, sauf pour 11 lui-même. Pour le démontrer, on applique le critère de divisibilité par 11: «Un entier est divisible par 11 si et seulement si la différence entre la somme de ses chiffres de rang pair et la somme de ses chiffres de rang impair est un multiple de 11» (par exemple, 915123 est un multiple de 11 puisque $(9+5+2) - (1+1+3) = 11$). Pour un nombre palindrome N ayant un nombre pair de chiffres, les deux sommes en

Les nombres strictement non palindromes sont, par définition, les entiers n qui ne sont palindromes dans aucune base b avec $2 \leq b \leq n-2$. On impose la limite $n-2$ car, en base $n-1$, le nombre n s'écrit 11 et est donc toujours palindrome. La suite des nombres strictement non palindromes commence par : 0, 1, 2, 3, 4, 6, 11, 19, 47, 53, 79, 103, 137, 139, 149, 163, 167, 179, 223, 263, 269, 283, 293, ... qui est la suite A016038 de l'encyclopédie des suites numériques de Neil Sloane.

Une propriété intéressante des nombres strictement non palindromes est que ce sont tous des nombres premiers, à l'exception de 4 et 6.

En voici la démonstration. On se donne un nombre composé quelconque $n > 6$ et on montre que n est palindrome dans une base bien choisie.

• Si n est pair, n s'écrit 22 dans la base

$b = n/2 - 1$, car $n = 2(n/2 - 1) + 2$.

• Si n est impair, on écrit $n = pm$, où p est le plus petit facteur premier de n . Nécessairement, $p \leq m$.

• Si $p = m = 3$, alors $n = 9$ s'écrit 1001 en base $b = 2$.

• Si $p = m > 3$, alors n s'écrit 121 en base $b = p - 1$, car

$$121_{p-1} = 1 + 2(p-1) + (p-1)^2 = 1 + 2p - 2 + p^2 - 2p + 1 = p^2 = n$$

• Le cas $p = m - 1$ est impossible, car p et m sont impairs.

• Si $p < m - 1$, alors n est le palindrome pp en base $b = m - 1$, car $p(m-1) + p = pm$.

Sans mal, on contrôle à chaque fois que la base proposée vérifie $2 \leq b \leq n-2$ et que les chiffres du palindrome proposé sont des nombres entiers entre 0 et $b-1$.

(voir https://fr.wikipedia.org/wiki/Nombre_strictement_non_palindrome).

question sont égales; leur différence est nulle, donc N est multiple de 11.

On arrive maintenant en terrain moins facile. Qu'en est-il des nombres palindromes ayant un nombre impair de chiffres? Peuvent-ils être des nombres premiers? Plus généralement, qu'en est-il des diviseurs des nombres palindromes?

Voici d'abord le début de la suite des nombres premiers palindromes (<https://oeis.org/A002385>): 2, 3, 5, 7, 11, 101, 131, 151, 181, 191, 313, 353, 373, 383, 727, 757, 787, 797, 919, 929, 10301, 10501, 10601, 11311, 11411, 12421, 12721, 12821, 13331, 13831, 13931, 14341, 14741, 15451, 15551, 16061, 16361, 16561, 16661, 17471, 17971, 18181, ...

Le plus grand nombre premier palindrome connu aujourd'hui est $10^{474500} + 999 \times 10^{237249} + 1$, qui est formé de 474501 chiffres.

On cherche à démontrer qu'il existe une infinité de nombres premiers palindromes. Cela semble probable, car les deux propriétés «être un nombre premier» et «être un palindrome», au moins pour les nombres composés d'un nombre impair de chiffres, semblent indépendantes. Cependant, cette intuition un peu vague n'a pas pu être confirmée par une démonstration et donc l'affirmation «Il existe

une infinité de nombres premiers palindromes» reste à l'état de conjecture.

Il existe des méthodes pour construire des nombres palindromes qui ne sont pas des nombres premiers. En voici une.

$1 \times 1 = 1$
 $11 \times 11 = 121$
 $111 \times 111 = 12321$
 $1111 \times 1111 = 1234321$
 $11111 \times 11111 = 123454321$
 $111111 \times 111111 = 12345654321$
 $1111111 \times 1111111 = 1234567654321$
 $11111111 \times 11111111 = 123456787654321$
 $111111111 \times 111111111 = 12345678987654321$

Malheureusement, la méthode ne fonctionne plus au-delà :

$1111111111 \times 1111111111 = 1234567900987654321$

Le sixième des nombres de cette série de palindromes est vraisemblablement le premier palindrome à avoir attiré l'attention d'un mathématicien. En effet, il est mentionné par Mahāvīra, un mathématicien indien du IX^e siècle de notre ère. Dans son ouvrage en sanskrit *Ganita-sāra-sangraha*, il évoque ce carré parfait en le décrivant comme un nombre «commençant par 1 et allant jusqu'à 6, puis décroissant en ordre inverse».

DEUX FOIS PALINDROME

Voici les plus petits entiers palindromes dans deux bases a et b à la fois, a et b variant de 2 à 20 ($a < b$). Ce tableau a été établi par Erich Friedman. Ainsi, pour $a = 2$ et $b = 3$, il faut aller jusqu'à 6 643 pour trouver un nombre qui convient : $6643_{10} = 1100111110011_2 = 100010001_3$.

$a \backslash b$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
3	6 643																	
4	5	10																
5	31	26	46															
6	7	28	21	67														
7	85	8	85	24	92													
8	9	121	63	18	154	121												
9	127	10	10	109	80	40	154											
10	33	121	55	88	55	121	121	191										
11	255	244	255	12	166	24	36	60	232									
12	65	13	65	26	104	78	65	91	181	277								
13	313	28	42	98	14	235	154	70	222	84	326							
14	15	1210	15	408	135	135	45	30	323	60	253	379						
15	693	16	1265	1612	80	16	316	80	828	48	241	112	436					
16	17	68	17	119	385	85	170	136	353	221	1172	170	337	497				
17	341	784	341	18	1211	307	18	528	252	36	290	126	90	144	562			
18	325	1733	38	57	209	57	325	209	171	133	1462	209	323	361	433	631		
19	381	20	514	428	80	40	260	20	666	60	362	140	60	80	514	180	704	
20	21	1604	21	126	21	1944	63	273	252	84	761	42	105	421	273	126	541	781

3

Voici une série de formules qui, elles, donnent une infinité de nombres palindromes composés:

$11 \times 11 \times 11 = 1331$
 $11 \times 11 \times 111 = 13431$
 $11 \times 11 \times 1111 = 134431$
 $11 \times 11 \times 11111 = 1344431$
 $11 \times 11 \times 111111 = 13444431$
 ...
 Ajoutons encore deux séries infinies:
 $11 \times 111 \times (11...11) = 13566...66531$
 et $11 \times 111 \times (11...11) = 136899...9998631$

FACTEURS PREMIERS ET CONJECTURES

William Banks a démontré qu'il existe des nombres palindromes ayant un nombre de facteurs premiers aussi grand que souhaité. Il existe donc par exemple des nombres palindromes ayant plus de 1000 facteurs premiers. Il a aussi établi qu'il existe des nombres palindromes ayant des facteurs premiers aussi longs qu'on le désire; il existe par exemple des nombres palindromes ayant un facteur premier composé de plus de 1 million de chiffres.

Une autre étude, cette fois de William Banks, Derrick Hart et Mayumi Sataka, établit que la proportion d'entiers premiers parmi les n premiers nombres palindromes tend vers 0. On sait, d'après le théorème d'Hadamard et de La Vallée-Poussin, que la proportion de nombres premiers parmi les n premiers entiers est environ $1/\ln(n)$ ($\ln(x)$ désigne le logarithme népérien de x). On conjecture donc, sans toutefois savoir le démontrer, un résultat analogue pour les nombres palindromes: la proportion d'entiers premiers parmi les n premiers nombres palindromes serait $1/\ln(n)$.

Une conjecture intéressante a été imaginée en 2014 par Ivan Ianakiev: les seuls nombres palindromes premiers dont le numéro d'ordre dans la suite des nombres premiers est un nombre premier palindrome sont uniquement 3 (qui est deuxième), 5 (qui est troisième) et 11 (qui est cinquième). La conjecture a été testée pour les 8 premiers millions de nombres premiers ayant des numéros d'ordre qui sont des nombres premiers palindromes.

Par jeu, le mathématicien brésilo-canadien Paulo Ribenboim a proposé de dénommer «nombre premier triplement palindrome» un nombre premier palindrome de m chiffres décimaux, où m est un nombre premier palindrome de n chiffres décimaux, où n est lui-même un nombre premier palindrome. Le plus petit de ces nombres, nécessairement rares, est 10000500001, qui comporte 11 chiffres; 11 est un nombre premier palindrome lui-même constitué de 2 chiffres, 2 étant un nombre premier palindrome.

Nombre de chiffres	Formule	Palindrome
1	9	9
2	9+2	11
3	7×7×7	343
4	9×(9×9+2)	747
5	9×9×9×9-5	6556
6	3×7×7×8×8×8	65856
7	3×8×8×8×9×(9+2)	405504
8	8×9×9×9×9×9×9-4	4251524
9	8×8×(5×6×8×8×8×9+2)	8847488
10	7×7×7×8×(7×8×8×8×9-4)	88499488
11	6×8×8×8×9×(6×7×9×9×9+8)	846747648
12	7×8×8×8×8×9×(4×7×7×9×9-3)	4095995904
13	7×7×7×7×8×(7×7×7×8×8×8+6)	23613431632
14	9×9×9×9×9×9×(9×9+2)×(4×7×7×8-6)	68899199886
15	7×7×7×7×8×8×8×8×(2+9)×(9×9×9+3)	633498894336

UN JEU AVEC LES PALINDROMES

4

On recherche les combinaisons de chiffres qui, multipliés ou additionnés en utilisant la disposition de parenthèses qu'on veut, donnent le plus grand nombre palindrome. Par exemple, avec 4 chiffres, la formule $9 \times (9 \times 9 + 2)$ donne 747, qui est le plus grand nombre palindrome.

qu'on peut obtenir ainsi. Le tableau ci-dessus est dû à Erich Friedman (voir <http://www2.stetson.edu/~efriedma/mathmagic/0699.html>). Saurez-vous le poursuivre ? Ces résultats sont prouvés jusqu'à 9 chiffres utilisés, mais ils sont peut-être améliorables pour 10 chiffres utilisés ou plus.

Plus intéressant, $10^{11310} + 4661664 \times 10^{5652} + 1$ est formé de 11311 chiffres, le nombre 11311 étant un nombre premier palindrome qui a lui-même 5 chiffres, 5 étant encore un nombre premier palindrome. Bien évidemment, on ignore s'il existe une infinité de ces nombres premiers triplement palindromes.

ET QUAND ON CHANGE DE BASE ?

La notion de nombre palindrome dépend bien sûr de la base de numération, et jusqu'ici nous n'avons envisagé que la base 10. Que se passe-t-il pour les autres bases ?

Les calculs du nombre de nombres palindromes faits pour la base 10 se généralisent sans difficulté à une base $b > 1$. La propriété «Les palindromes ayant un nombre pair de chiffres en base 10 sont multiples de 11» devient sans surprise: «Les palindromes ayant un nombre pair de chiffres en base b sont multiples de $(b+1)$ ». Par exemple, le nombre N dont l'écriture en base 5 est 123321₅ est divisible par 6: $123321_5 = 5^5 + 2 \times 5^4 + 3 \times 5^3 + 3 \times 5^2 + 2 \times 5^1 + 1 = 4836 = 806 \times 6$.

Une étrange curiosité a été notée pour le nombre 5 et la base 24. Parmi les petites puissances de 5, 10 sont des palindromes en base 24:

5⁰=1₂₄; 5¹=5₂₄; 5²=11₂₄; 5³=55₂₄; 5⁴=121₂₄; 5⁵=5A5₂₄; 5⁶=1331₂₄; 5⁷=5FF5₂₄; 5⁸=14641₂₄; 5^A=15151₂₄ (en base 24, on convient de noter les 24 chiffres 0, 1, 2, ..., 7, 8, 9, A, B, C, ..., L, M, N, ce qui explique la présence des lettres dans ces formules).

Une question vient naturellement à l'esprit: «Existe-t-il des nombres n qui sont palindromes dans plusieurs bases de numération b à la fois?»

Remarquons d'abord que si n est un nombre quelconque, il est palindrome dans toutes les bases b où $b > n$, car n s'y écrit alors avec un seul chiffre. C'est un peu facile! Il n'est donc intéressant que de considérer des bases $b \leq n$.

La question devient: «Existe-t-il des nombres n qui sont palindromes dans plusieurs bases de numération b à la fois, avec $b < n$?»

Une petite exploration montre que oui. On en trouve aisément. Un bel exemple est 105. En effet: 105₁₀ = 1221₄ = 151₈ = 77₁₄ = 33₃₄.

Le tableau de la figure 3 donne les plus petits entiers palindromes dans deux bases a et b à la fois, pour a et b variant de 2 à 19. Il a été établi par Erich Friedman, de l'université Stetson, en Floride.

Bien évidemment, il est intéressant de savoir si les nombres de la suite F_n de Fibonacci ($F_0=1$, $F_1=1$, $F_n=F_{n-2}+F_{n-1}$ pour $n>1$) sont parfois des palindromes. Les seuls connus jusqu'à présent sont 0, 1, 1, 2, 3, 5, 8, 55. On démontre que la densité des entiers n tels que F_n est un palindrome est nulle à l'infini, mais on se demande si en réalité les termes palindromes de la suite cités au-dessus ne sont pas les seuls: encore une conjecture!

SOMMES DE NOMBRES PALINDROMES

En additionnant trois nombres premiers au plus, on peut obtenir tout entier impair. C'est l'affirmation dénommée conjecture faible de Goldbach, mais qui est maintenant un théorème puisqu'elle a été démontrée en 2013 par le mathématicien péruvien Harald Helfgott, qui est chercheur du CNRS à Paris. Lorsqu'on additionne deux nombres premiers, il semble possible d'obtenir tout nombre pair à partir de 4. C'est la fameuse conjecture de Goldbach, qui, elle, attend toujours une démonstration.

Qu'en est-il des sommes de nombres palindromes? Donnent-elles tous les entiers? Combien faut-il de palindromes pour obtenir tout entier dans le pire cas? Les nombres palindromes étant plus faciles à maîtriser que les nombres premiers, on connaît aujourd'hui parfaitement les réponses à ces questions.

Le premier résultat est que les sommes de deux nombres palindromes ne donnent pas tous les entiers. Voici la suite des nombres entiers qui ne s'écrivent pas comme la somme de deux palindromes:

21, 32, 43, 54, 65, 76, 87, 98, 201, 1031, 1041, 1042, 1051, 1052, 1053, 1061, 1062, 1063, 1064, 1071, 1072, 1073, 1074, 1075, 1081, 1082, 1083, 1084, 1085, 1086, 1091, 1092, 1093, 1094, ...

C'est la suite A035137 de l'encyclopédie de Neil Sloane. Il est assez aisé de vérifier qu'un nombre n de cette liste n'est pas la somme de deux palindromes. On considère les $n+1$ façons d'écrire n comme une somme $a+b$ de deux entiers, et on constate que a et b ne sont jamais simultanément palindromes.

PYRAMIDES

5

Si, en partant d'un chiffre considéré comme sommet, on cherche à construire une pyramide de nombres premiers palindromes dont chaque étage coïncide avec l'étage juste au-dessus et ne dépasse que d'un chiffre à droite et à gauche de l'étage juste au-dessus, on est vite arrêté. Seules les pyramides indiquées ci-contre sont possibles.

En s'autorisant un élargissement de deux chiffres à droite et à gauche à chaque étage, on obtient beaucoup mieux (toujours en n'utilisant que des nombres premiers palindromes).

La hauteur maximale des pyramides les plus hautes de sommet 2 est 26 et il y a deux solutions, la dernière ligne de

2	2	3	3	5	5	5	7
929	929	131	131	151	353	757	373
39293	39293	11311	71317	31513	33533	37573	93739
7392937	3392933			3315133	1335331	9375739	
373929373	733929337						

l'une d'elles étant :
13189272993373301274751519389
4339011971272339635702075369
33272179110933498915157472103
37339927298131. Si, au sommet, on place le chiffre 3, on trouve trois pyramides de hauteur 28. En partant de 5 ou 7, on trouve à chaque fois une pyramide de hauteur 29.

Tous ces résultats proviennent de G. L. Honaker et Chris Caldwell, deux passionnés américains des nombres

premiers. On trouvera ces résultats dans leur article « Palindromic prime pyramids », *Journal of Recreational Mathematics*, vol. 30(3), pp. 169-176, 2000, dont des compléments ont été ajoutés sur : http://www.utm.edu/staff/caldwell/supplements/step_size2.html et sur : <http://www.utm.edu/staff/caldwell/supplements/>.

BIBLIOGRAPHIE

J. Cilleruelo et F. Luca, **Every positive integer is a sum of three palindromes**, prépublication arXiv:1602.06208, 2016.

A. Bérczes et V. Ziegler, **On simultaneous palindromes**, *J. Comb. Number Theory*, vol. 6, pp. 37-49, 2014.

Y. Bugeaud, **Automatic continued fractions are transcendental or quadratic**, prépublication arXiv:1012.1709, 2010.

B. Adamczewski et Y. Bugeaud, **Palindromic continued fractions**, *Annales de l'institut Fourier*, vol. 57(5), pp. 1557-1574, 2007.

G. L. Honaker et C. Caldwell, **Palindromic prime pyramids**, *Journal of Recreational Mathematics*, vol. 30(3), pp. 169-176, 2000.

E. Friedman, **Problem of the Month**, juin 1999 : <http://www2.stetson.edu/~efriedma/mathmagic/0699.html>

Joseph DeVincentis et Ulrich Schimke ont démontré qu'il existe une infinité d'entiers qui ne sont pas somme de deux nombres palindromes. L'affaire est entendue: en effectuant la somme de deux nombres palindromes, on n'obtient qu'une petite partie des entiers.

Le plus beau résultat concernant les sommes de palindromes est récent, mais lui aussi tout aussi définitif: «Tout nombre entier est somme de trois nombres palindromes au plus.» Le nombre 2000, par exemple, est la somme de 616, 383 et 1001.

Le résultat a été obtenu en deux temps. D'abord, en 2015, William Banks a démontré qu'en base 10, tout entier est somme d'au plus 49 nombres palindromes. Il semblait alors qu'on était au début d'une série de résultats où, progressivement, on remplacerait 49 par des entiers de plus en plus petits.

En fait, l'affaire fut magistralement traitée d'un seul coup. Javier Cilleruelo, de l'université de Madrid, et Florian Luca, mathématicien roumain aujourd'hui à l'université de Witwatersrand, à Johannesburg (Afrique du Sud), ont en effet démontré en 2016 dans un article de 39 pages que: «Dans toute base $b \geq 5$, tout entier s'écrit comme une somme d'au plus trois nombres palindromes.» La démonstration est constructive, puisqu'elle décrit un algorithme qui conduit, pour tout entier donné, à la somme recherchée. Cette prouesse nous rappelle la démonstration de Gauss en 1796 établissant que tout nombre entier est la somme de trois nombres triangulaires (c'est-à-dire de la forme $n(n+1)/2$).

L'article revient aussi sur les sommes de deux palindromes et montre que les entiers qui ne sont pas somme de deux palindromes sont très nombreux dans le sens suivant: pour chaque base $b \geq 2$, il existe une constante strictement positive c telle que les nombres qui ne sont pas somme de deux palindromes représentent une proportion des nombres entiers supérieure à c . Javier Cilleruelo et Florian Luca conjecturent, sans toutefois réussir à la démontrer, une propriété analogue pour les nombres entiers qui sont la somme de deux palindromes.

INFINIMENT PALINDROME

Terminons par un remarquable résultat concernant les palindromes infinis et les nombres réels transcendants. Pour l'énoncer, il faut d'abord évoquer la notion de nombre infiniment palindrome et celle de fraction continue.

Considérons la suite de symboles composée uniquement de a et de b définie en partant de ab et en ajoutant son complément ba (chaque a est remplacé par b et chaque b par a), ce qui donne $abba$, puis en recommençant en ajoutant le complément de ce qu'on vient

d'obtenir, ce qui donne $abbabaab$, et en recommençant indéfiniment:

$abbabaabbaababba$,

$abbabaabbaababbabaababbaabbaabbaab$, etc.

On obtient une suite infinie de a et de b dont les 4 premiers symboles sont un palindrome, de même que les 16 premiers symboles, de même que les 64 premiers symboles, etc. On dit que c'est un mot «infiniment palindrome»: ses débuts sont une infinité de fois des palindromes.

Quand on dispose d'une suite infinie d'entiers positifs $a_0, a_1, a_2, \dots$ il est usuel en arithmétique de considérer le nombre réel suivant dénommé fraction continue associée à la suite $a_0, a_1, a_2, \dots$:

$$a_0 + \cfrac{1}{a_1 + \cfrac{1}{a_2 + \cfrac{1}{a_3 + \dots}}}$$

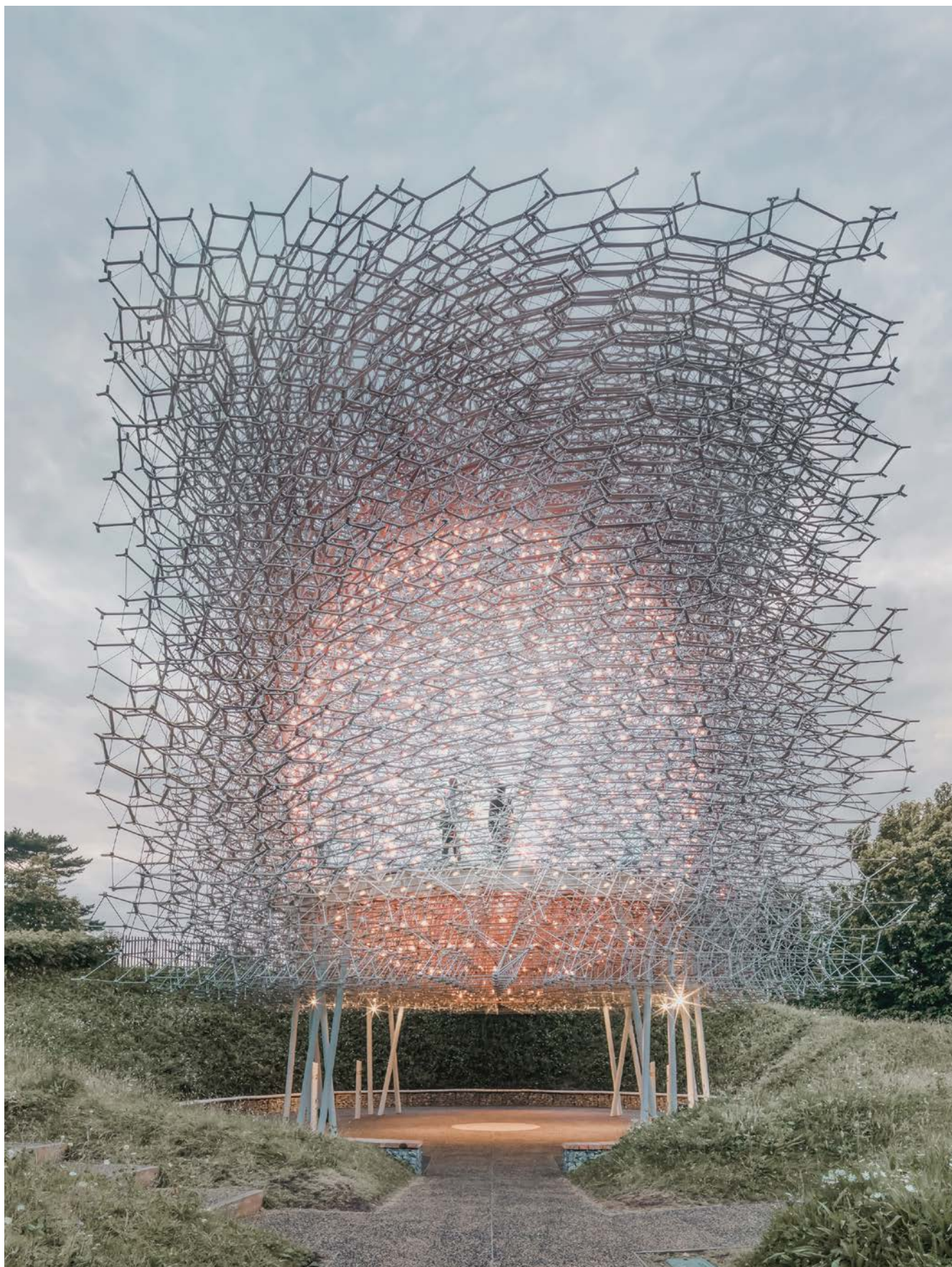
Un extraordinaire résultat de Boris Adamczewski et Yann Bugeaud établit que si la suite de nombres entiers est infiniment palindrome, alors le nombre réel défini par la fraction continue associée est soit un nombre quadratique, soit un nombre transcendant, c'est-à-dire que soit il est solution d'une équation polynomiale à coefficients entiers de degré 2 au plus, soit il n'est la solution d'aucune équation polynomiale à coefficients entiers.

Dit encore autrement, les nombres réels définis par des fractions continues infiniment palindromes sont élémentaires ou alors aussi compliqués que les nombres π ou e (qui sont transcendants). C'est bien sûr un moyen nouveau de définir des nombres transcendants. En particulier, le nombre x obtenu en prenant $a=1$ et $b=2$ dans le mot infiniment palindrome indiqué plus haut et en écrivant la fraction continue associée est transcendant:

$$x = 1 + \cfrac{1}{2 + \cfrac{1}{2 + \cfrac{1}{1 + \cfrac{1}{2 + \cfrac{1}{1 + \cfrac{1}{1 + \cfrac{1}{2 + \dots}}}}}}}$$

On aimerait avoir un résultat analogue concernant les nombres dont l'écriture en base B est une suite infiniment palindrome. Mais pour l'instant, les techniques disponibles achoppent et à nouveau on est réduit à des conjectures.

Amusements sans prétention ou résultats profonds et difficiles, voire seulement conjecturés, les palindromes occupent passionnément les mathématiciens qui y découvrent mille merveilles insoupçonnées. ■



Une sculpture métallique de 17 mètres de hauteur invite à s'immerger dans la vie d'une ruche.

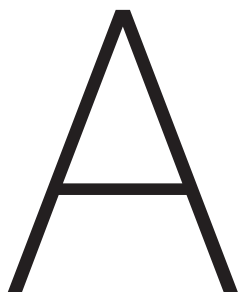
L'AUTEUR



LOÏC MANGIN
rédacteur en chef adjoint
à Pour la Science

LET IT BEE

**Entrer dans une ruche
bourdonnante de 17 mètres
de haut et plonger ainsi
dans la vie d'une colonie
de vraies abeilles :
une expérience étourdissante
à vivre à Kew Gardens,
près de Londres.**



u milieu du xx^e siècle, l'éthologue allemand Karl von Frisch a considérablement fait progresser les connaissances sur les abeilles. Par exemple, il perça à jour le langage de leur danse, découvrit les bases de leur sens de l'orientation, et élucida les modalités de leur odorat et de leur vue. Ces travaux lui valurent le prix Nobel de physiologie en 1973.

Que n'aurait-il pas donné pour pouvoir entrer dans une ruche et observer en temps réel ce qui s'y passe ? C'était difficile à son époque, mais ça l'est moins aujourd'hui grâce à l'œuvre de l'artiste britannique Wolfgang Buttress installée dans les jardins botaniques royaux de Kew, à Londres. *The Hive* n'est rien de moins qu'une ruche (*hive* en anglais) de 17 mètres de hauteur dans laquelle on peut déambuler.

Créée à l'origine pour le pavillon britannique de l'exposition universelle de Milan, en 2015, dont le thème était « Nourrir la planète, énergie pour la vie », l'installation a récemment rejoint la Grande-Bretagne. Ce ne fut pas une

mince affaire : il fallut quatre mois pour terminer ce puzzle géant de 170 000 morceaux d'aluminium et 1 000 ampoules à LED, pour un poids total de 44 tonnes. S'il est assez près, le spectateur distingue bien une structure en nid d'abeilles (des hexagones) qui monte doucement en spirale. Mais les points communs avec une vraie ruche vont bien plus loin que cette simple apparence.

SURVEILLEZ L'ESSAIM

Conscient des dangers que courent les abeilles (changement climatique, infections virales, usage abusif de pesticides...), l'artiste a voulu créer une œuvre propre à alerter le public sur ces menaces. Pour ce faire, il s'est entouré d'une équipe pluridisciplinaire et s'est notamment rapproché de Martin Bencsik, de l'université de Nottingham, en Grande-Bretagne. Celui-ci s'est particulièrement intéressé au comportement d'essaimage, c'est-à-dire quand une colonie décide de quitter une ruche pour aller s'établir ailleurs. Il a ainsi équipé des ruches avec des accéléromètres pour enregistrer l'activité de l'ensemble des insectes et y détecter les signes annonciateurs du départ.

Ce dispositif est la clé de voûte de *The Hive*. En effet, il équipe désormais une vraie ruche installée à Kew Gardens, dont il enregistre les sons et les vibrations créés par les bourdonnements d'environ 40 000 abeilles. Les signaux sont ensuite récupérés et traités par un logiciel qui

contrôle les lumières et les sons diffusés à l'intérieur de la sculpture.

Ainsi, le matin, quand l'activité dans la ruche est réduite, les ampoules clignotent lentement. En revanche, par un bel après-midi ensoleillé, l'installation est baignée de flashes rapides et intenses.

Quant aux sons entendus dans *The Hive*, ils sont constitués de ceux, très amplifiés, de la ruche auxquels s'ajoute un tapis sonore de violoncelles et de voix composé par Deirdre Bencsik, l'épouse de Martin, et chanté par Camille Buttress, la fille de l'artiste. D'autres musiciens (un percussionniste, un pianiste...) accompagnent ce trio abeilles, violoncelle et voix, tous étant désormais regroupés dans une formation nommée Be.

Plusieurs morceaux de musique ont été enregistrés (un album, *One*, est d'ailleurs disponible) et sont diffusés selon l'activité des abeilles de la ruche.

En fin de compte, lorsque le public se retrouve au cœur de *The Hive*, il est immergé dans une immense ruche bourdonnante d'une activité rendue palpable et sensible par les lumières et les sons. L'installation est une sorte d'écho amplifié de la vie d'une ruche.

L'histoire ne dit pas comment réagira l'installation quand les abeilles hébergées à ses côtés décideront d'essaimer et de quitter les lieux. *The Hive* s'éteindra-t-elle alors en devenant silencieuse ? ■

The Hive at Kew Gardens:

<http://bit.ly/PLS-ZeHive>

Le site de Wolfgang Buttress:

<http://www.wolfgangbuttress.com/>

M. Bencsik et al., Computers and

Electronics in Agriculture,

vol. 76, pp. 44-50, 2011.



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

LES AUTEURS



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



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

DÉCOLLAGES À CHAUD

En modifiant les conditions requises pour le décollage d'un avion, des températures inhabituellement élevées perturbent le fonctionnement de certains aéroports. Or avec le réchauffement climatique, ces situations risquent de devenir plus fréquentes.

En juin 2017, American Airlines a annulé 40 vols intérieurs au départ de Phoenix, dans l'Arizona. La presse a invoqué une température trop élevée, de l'air moins dense, une portance des ailes réduite avec pour conséquence une distance de décollage qui dépasse la longueur de la piste.

Vraiment ? Cette explication a suscité notre incrédulité et celle de plusieurs collègues. Pour en avoir le cœur net, nous avons creusé la question avec nos outils de physiciens. Nos évaluations ne rendent pas totalement compte des valeurs choisies par les constructeurs d'avions pour la sécurité des vols, mais elles confirment les explications données. Et les effets du réchauffement climatique ne s'arrêteront pas là : il faudra aussi s'attendre à des fluctuations plus fréquentes des temps de vol, dues à un jet-stream perturbé.

ATTEINDRE LA VITESSE REQUISE POUR LE DÉCOLLAGE

Suivons un avion au décollage. Une fois les freins relâchés, l'avion roule sur la piste en accélérant. L'écoulement de l'air autour des ailes et de la carlingue engendre alors une force aérodynamique proportionnelle à la masse volumique de l'air ambiant et au carré de la vitesse de l'avion par rapport à cet air, donc une

force de plus en plus intense. La composante horizontale de cette force, la traînée, s'oppose à la vitesse, tandis que la composante verticale, la portance, compense progressivement le poids.

Lorsque la vitesse est suffisante, le pilote actionne les ailerons des ailes pour incliner l'avion. Puis l'avion accélère encore jusqu'à atteindre la vitesse à laquelle la portance compense le poids, ce qui lui permet de décoller. En pratique, la vitesse de décollage est supérieure à la vitesse minimale permettant à l'avion de voler, marge de sécurité obtenue en mobilisant les volets des ailes, situés sur le bord de fuite de l'air.

Peut-on toujours atteindre la vitesse seuil sur une piste donnée ? Pour des raisons de sécurité, on impose une longueur de piste supérieure à 1,15 fois la distance nécessaire pour que l'avion s'élève à 10 mètres du sol. Or les données des constructeurs indiquent qu'il faut une piste de 2500 mètres de long à un moyen-courrier tel que le Boeing 737-800 pour décoller à pleine charge (79 tonnes, dont 37,5 tonnes de carburant et de fret, soit environ 180 passagers) au niveau de la mer et à température standard (15 °C). La vitesse atteinte est alors typiquement de l'ordre de 250 kilomètres par heure.

Si la piste est plus courte, la seule possibilité est d'alléger l'avion : avec une piste de 2133 mètres, ce même Boeing ne

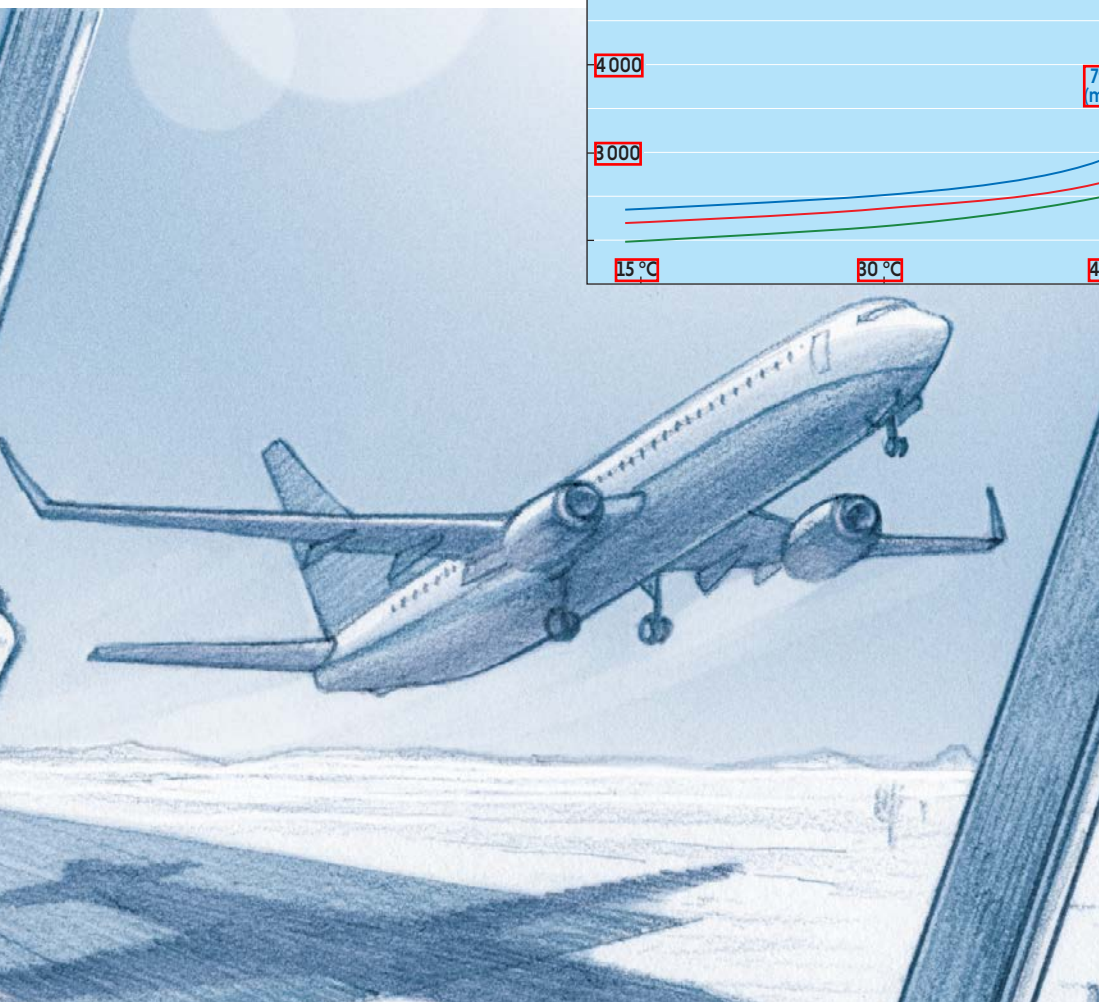
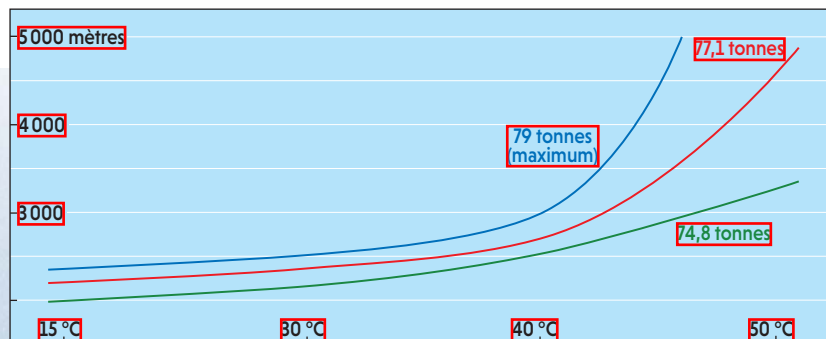


s'envolera ainsi qu'avec 75 tonnes. Quel pourrait alors être le problème avec l'aéroport de Phoenix et sa piste de 3500 mètres ?

La pression atmosphérique à Phoenix, ville située à 340 mètres d'altitude, est égale à 96 % de la pression régnant au niveau de la mer dans les conditions standard. En outre, un pic de température à 40 °C correspond à 8 % d'augmentation de la température (exprimée en kelvins) par rapport à ces mêmes conditions. L'air se comportant comme un gaz parfait, sa masse volumique est proportionnelle à la pression

LONGUEUR DE PISTE ET TEMPÉRATURE

Plus l'air est chaud, moins il est dense. Une température plus élevée diminue donc la force de portance s'exerçant sur l'avion (à vitesse égale). Pour décoller, l'avion a alors besoin d'une vitesse supérieure, atteinte au bout d'une accélération sur une piste plus longue. Le graphique ci-dessous, fondé sur les données du constructeur, indique comment la longueur de piste nécessaire à un Boeing 737-800 augmente avec la température de l'air au niveau du sol, et cela pour trois valeurs différentes de la masse au décollage de l'avion.



et inversement proportionnelle à la température exprimée en kelvins. Ainsi, lors d'un pic de chaleur à Phoenix, la masse volumique de l'air, et donc la portance, sont réduites de près de 12 %. Pour décoller, il faut donc une vitesse plus importante de 6 % et, partant, une piste plus longue de 12 %, en supposant que l'accélération de l'appareil reste la même.

DES PISTES À ALLONGER ?

Pour une distance initiale de décollage de 2500 mètres, cela correspond à un allongement de 300 mètres, ce qui est

loin d'être négligeable. L'explication donnée dans les médias est donc tout à fait plausible. Si, en plus, on prend en compte la réduction de la poussée des moteurs due à l'augmentation de température et les questions de sécurité, les données du constructeur Boeing annoncent une distance nécessaire de 3500 mètres !

Heureusement, la plupart des avions sont désormais équipés de *winglets* (ailettes verticales) aux extrémités des ailes, qui diminuent la traînée de quelques pour cent. L'avion peut donc, pour une même poussée des réacteurs, accélérer

davantage et ainsi atteindre la vitesse seuil au bout d'une distance plus courte. C'est pourquoi les 737-800 peuvent décoller de Phoenix jusqu'à 52 °C ; ils n'ont donc pas trop souffert de la vague de chaleur de juin, contrairement aux avions un peu plus petits et moins performants.

Cette vague de chaleur sur Phoenix peut être prise comme un événement



Les auteurs ont récemment publié : **En avant la physique !**, une sélection de leurs chroniques (Belin, 2017).

exceptionnel, mais elle sonne comme un avertissement. Les modèles des climatologues prédisent qu'avec le réchauffement global en cours, ces épisodes caniculaires se multiplieront sur toute la planète. Une équipe de l'université Columbia a donc entrepris d'étudier l'impact du réchauffement climatique sur le trafic aérien. Si certains aéroports ou appareils s'en sortent bien (Charles-de-Gaulle, à Paris, JFK, à New-York, les A320 et A380...), certains binômes seront fragilisés.

UN RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE PERTURBANT POUR LE TRAFIC AÉRIEN

Ainsi, vers 2050, à l'aéroport La Guardia, à New York, où la piste ne fait que 2 100 mètres, un avion 737-800 devra subir 40 jours par an des allègements d'au minimum 2,7 tonnes de sa masse à pleine charge pour décoller aux heures les plus chaudes de la journée. Sachant que sur cet appareil, 100 kilogrammes d'allègement s'obtiennent en enlevant 83 kilogrammes de charge utile et 17 kilogrammes de carburant, il faudra embarquer au minimum 22 passagers en moins ! La gestion du trafic aérien n'en sera pas facilitée...

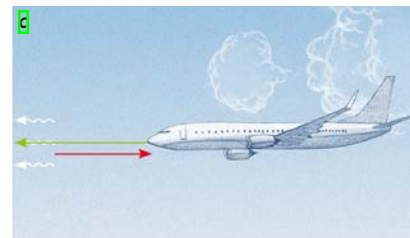
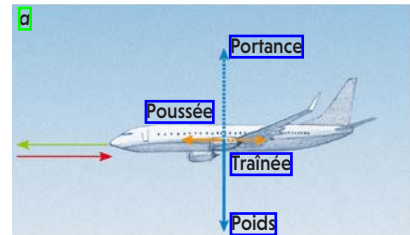
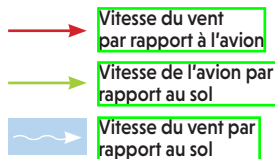
Qu'advient-il durant le vol si la hausse des températures modifie aussi la masse volumique de l'air en altitude ? Pour le coup, pas grand-chose. En vol de croisière, à vitesse constante, la portance compense le poids et la poussée des moteurs la traînée. Comme le rapport portance/traînée est presque une constante, il en est de même du rapport poids/poussée. L'énergie consommée pendant le vol (produit de la poussée par la distance parcourue) sera donc la même quelle que soit l'altitude choisie. Tout au plus l'avion devra-t-il augmenter sa vitesse de croisière pour compenser une diminution de la masse volumique : les moteurs devront fournir plus de puissance, mais le temps de parcours en sera réduit d'autant.

Plus inquiétantes sont les modifications prévues des jet-streams (ou courants-jets), couloirs venteux permanents qui règnent entre 8 000 et 12 000 mètres d'altitude, là où justement volent les avions de ligne. Ces « rivières » d'air, deux dans chaque hémisphère, sinueuses et changeantes, circulent d'ouest en est à une vitesse moyenne d'environ 21 mètres par seconde.

Face au vent, la vitesse de croisière de l'avion sera inférieure, car les forces aérodynamiques dépendent du vent relatif : la

VENT DE FACE OU VENT ARRIÈRE

En vol de croisière, le poids de l'avion est compensé par la portance aérodynamique, et la poussée fournie par les moteurs est compensée par la traînée aérodynamique (a). Comme la portance dépend de la vitesse de l'avion par rapport à l'air ambiant, la vitesse de l'air relativement à l'avion (flèche rouge) doit être la même, qu'il y ait ou non du vent et quelle que soit la vitesse de ce dernier. Par conséquent, en présence d'un vent de face de vitesse v , l'avion doit réduire sa vitesse par rapport au sol d'une valeur v (b), tandis qu'il doit l'augmenter de v en cas de vent arrière (c). Ainsi, contrairement à ce qu'on pourrait penser, le retard pris par un avion qui vole face au vent n'est pas dû à la résistance plus forte rencontrée par l'appareil, mais à la nécessité de ralentir pour garder une portance égale au poids.



condition de sustentation (portance égale au poids) sera donc atteinte à des vitesses plus basses, et le temps de vol sera rallongé. Avec un vent arrière, c'est le contraire (voir la figure ci-dessus).

Les passagers des vols transatlantiques le savent bien : entre New York-JFK et Londres-Heathrow (5 540 kilomètres), le temps de vol à 900 kilomètres par heure serait de 6 heures et 9 minutes s'il n'y avait pas de jet-stream. En raison du jet-stream et en optimisant la trajectoire de l'avion, on gagne ou perd environ une demi-heure sur ce trajet.

Or les modèles climatiques prévoient une augmentation de la vitesse moyenne du jet-stream, typiquement de l'ordre de 3 mètres par seconde, ainsi qu'une plus grande variabilité. Si l'impact moyen sera modeste (gain de 4 minutes de New York à Londres, perte de 5 minutes et 20 secondes dans l'autre sens), les probabilités de vol exceptionnellement courts (moins de 5 heures et 20 minutes) ou longs (plus de 7 heures) vont doubler, avec des perturbations associées du trafic aérien. Les voyageurs du XXI^e siècle ne sont donc pas au bout de leurs peines, entre retards et annulations. Et c'est sans compter avec l'accroissement prévu des turbulences aériennes ! ■

BIBLIOGRAPHIE

E. D. Coffel et al., **The impacts of rising temperatures on aircraft takeoff performance**, *Climatic Change*, pp. 1-8, juillet 2017 (doi 10.1007/s10584-017-2018-9).

P. D. Williams, **Transatlantic flight times and climate change**, *Environmental Research Letters*, vol. 11, article 024008, 2016.

737 : Airplane characteristics for airport planning, document Boeing, 2013 (www.boeing.com/assets/pdf/commercial/airports/acaps/737.pdf).

ABONNEZ-VOUS À **POUR LA SCIENCE** EN TOUTE LIBERTÉ

**NOUVELLE
FORMULE**



**FORMULE
PASSION**
-28%



**FORMULE
DÉCOUVERTE**
-25%



8,20€*

6,50€*

4,90€*

BULLETIN D'ABONNEMENT

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

☐ OUI, JE M'ABONNE À **POUR LA SCIENCE** EN PRÉLÈVEMENT AUTOMATIQUE, JE CHOISIS MA FORMULE ET JE COMPLÈTE L'AUTORISATION DE PRÉLÈVEMENT CI-DESSOUS.

☐ **FORMULE INTÉGRALE**
12 n° de Pour la Science + 4 Hors-Séries
+ Accès illimité aux archives en ligne depuis 1996

8,20€
Par mois
-42%
PV8EZU

☐ **FORMULE PASSION**
12 n° de Pour la Science
+ 4 Hors-Séries

6,50€
Par mois
-28%
PPV6E5U

☐ **FORMULE DÉCOUVERTE**
12 n° de Pour la Science

4,90€
Par mois
-25%
JPPV4E5U

MES COORDONNÉES

Nom : _____
Prénom : _____
Adresse : _____

Code postal : _____

Ville : _____

Tél. Pour le suivi client (facultatif) : _____

E-mail obligatoire : _____ @ _____

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

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) : _____

BAN : _____

(Numéro d'identification international du compte bancaire)

Etablissement teneur du compte

Nom : _____

Adresse : _____

Code postal : _____ Ville : _____

Date et signature

Organisme Créancier : Pour la Science
170 bis, bd. du Montparnasse - 75014 Paris
N° ICS FR92ZZ426900
N° de référence unique de mandat (RUM)

Merci de joindre impérativement un RIB

Partie réservée au service abonnement. Ne rien inscrire

* Par mois et par rapport au prix de vente en kiosque, l'accès numérique aux archives. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 31/12/2017 en France métropolitaine. 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. Photos non contractuelles.

L'AUTEUR



HERVÉ LE GUYADER
professeur émérite de biologie
évolutive à l'université
Pierre-et-Marie-Curie, à Paris

POURQUOI LE MAÏS VIENT DU POP-CORN

Ou comment la solution récente d'une énigme tricentenaire – de quelle plante sauvage le maïs est-il issu? – a renversé ce qui semblait une évidence: l'origine du pop-corn.

La provenance géographique du maïs est claire; en 1493, Christophe Colomb revient de son premier voyage avec des grains récoltés à Cuba. Plus tard, en 1535, lors de sa première remontée du Saint-Laurent, Jacques Cartier fonde Montréal au milieu de champs de maïs (ou blé d'Inde) cultivés par les Iroquois. Le maïs est donc américain. Mais de quelle plante sauvage provient-il? Dans la plupart des cas, la réponse à une telle question est évidente. Par exemple, quand on compare cerisiers sauvages et cerisiers cultivés, fraisiers des bois et fraisiers cultivés... inutile d'être un bon botaniste pour constater que, globalement, à part des variations sur le fruit, tout reste égal par ailleurs. Or, pour le maïs, aucune plante sauvage ne paraît lui ressembler. La réponse n'est apparue avec certitude que depuis peu de temps au terme d'une enquête longue et

conflictuelle, bousculant au passage une idée bien ancrée: non, le pop-corn ne vient pas du maïs...

ACTE I. LA VRAIE NATURE DE *ZEa CANINA*

Au milieu du XVIII^e siècle, le naturaliste suédois Carl von Linné nomme le maïs *Zea mays*. En 1784, l'agronome Antoine Parmentier publie le premier ouvrage sur le maïs. Un demi-siècle plus tard, en 1832, le botaniste allemand Heinrich Schrader décrit une poacée (autrefois graminée) d'Amérique centrale, appelée téosinte. Il la baptise *Euchlaena mexicana* et la considère comme proche du riz. Or, en 1896, José Segura, un agronome mexicain, découvre que téosinte et maïs sont interfertiles. Réalisant expérimentalement de tels croisements, il constate que les hybrides sont identiques à *Zea canina*, une plante trouvée dans la nature et décrite, en 1891, par le botaniste

L'épi femelle est petit et distique, c'est-à-dire que la douzaine de grains se distribue en deux rangées. Il peut se désarticuler, c'est-à-dire qu'à maturité, les grains se dissocient, ce qui facilite leur dissémination. Enfin, ces derniers sont protégés intégralement dans une enveloppe (cupule) coriace.



La téosinte

La téosinte forme un buisson: de la tige centrale partent plusieurs longues branches latérales, chacune portant de nombreux petits épis femelles et, en situation terminale, une inflorescence composée de fleurs mâles – une grappe de grappes appelée une panicule.

L'épi est polystique: ses quelque 300 grains sont organisés en plusieurs rangées. Les grains ne peuvent se désarticuler et sont enchâssés par deux dans des cupules très réduites qui les laissent à nu – des désavantages pour une plante sauvage, mais des avantages pour le cultivateur...

EN CHIFFRES

5 000

C'est le nombre de plantes de deuxième génération que George Beadle et Paul Mangelsdorf ont chacun produites en 1939 par croisements de maïs et de téosinte.

85 %

du génome de la lignée pure de maïs B73 est constitué de transposons, c'est-à-dire d'éléments mobiles qui s'y sont insérés. Ce génome de $2,3 \times 10^9$ bases compte environ 32 000 gènes codants.

7

C'est le nombre de taxons qui décrivent aujourd'hui ce que l'on appelait téosinte. Trois sont des sous-espèces de *Zea mays* (les sous-espèces *parviglumis*, *mexicana* et *huehuetenangensis*); quatre sont des espèces à part entière du genre *Zea* (*Zea luxurians*, *Zea nicaraguensis*, *Zea diploperennis* et *Zea perennis*).



Maïs moderne

Le maïs comporte une haute tige unique arborant à son sommet une panicule mâle. Une ou deux très courtes branches sont terminées par de gros épis femelles pourvus de nombreux grains.

américain Sereno Watson comme une nouvelle espèce. C'est une surprise de taille, car téosinte et maïs paraissent bien différents, tant dans leur structure que dans les caractères de leurs épis (voir la figure ci-dessus).

ACTE II. OÙ L'ON EXPLORE LES CHROMOSOMES

La découverte de cette interfertilité survient quelques années avant la « redécouverte », en 1901, des lois de Mendel sur l'hérédité. Les généticiens commencent alors à explorer le matériel héréditaire de divers organismes en utilisant des

mutants trouvés dans la nature. Parmi eux, Rollins Emerson, de l'université Cornell, aux États-Unis, s'intéresse au maïs. Il s'entoure de plusieurs étudiants, dont deux au nom désormais célèbre, George Beadle et Barbara McClintock.

Beadle, Prix Nobel 1958, est surtout connu pour ses travaux de génétique des mutants métaboliques du champignon *Neurospora crassa*. Avec Edward Tatum, il proposa, en 1941, l'hypothèse simplificatrice « un gène – une enzyme », étape qui se révéla indispensable pour approcher le fonctionnement du gène. McClintock, Prix Nobel 1983, est la cytogénéticienne de génie qui, en 1950, fut la première à détecter dans le génome l'existence d'éléments mobiles, appelés « gènes sauteurs » et aujourd'hui transposons.

En 1932, Emerson et Beadle arrivent à la conclusion que, suivant leur garniture chromosomique, il existe plusieurs formes de téosinte, dont les hybrides avec le maïs ont plus ou moins de succès reproducteur. Les hybrides maïs-téosinte mexicaine du type Chalco sont parfaitement fertiles, et la disposition des gènes sur les chromosomes est identique chez les deux espèces. Ils en déduisent que la



Retrouvez les Chroniques de l'évolution sur www.pourlascience.fr

La téosinte Chalco et le maïs sont une seule et même espèce et, en 1939, proposent cette solution pour l'origine du maïs. Mais ce n'est pas aussi simple, comme nous allons le voir. En 1972, d'ailleurs, ces deux plantes seront classées comme des sous-espèces (ssp.) différentes, respectivement *Zea mays* ssp. *mexicana* et *Zea mays* ssp. *mays*.

ACTE III. L'ÉNIGME DES CINQ GÈNES

Paul Mangelsdorf, un agronome très en vue aux États-Unis, travaillant à la station agronomique expérimentale du Texas, s'intéresse également aux hybrides téosinte-maïs. Comme Beadle, il mène des croisements jusqu'à obtenir des F₂, c'est-à-dire des plantes de deuxième génération. Indépendamment, en 1939, les deux généticiens arrivent au même résultat : 2 individus sur 500 présentent un retour vers l'une des deux plantes parentales, à savoir le maïs ou la téosinte. Les lois de Mendel leur font postuler l'existence de quatre ou cinq « gènes » majeurs. Mêmes résultats maïs, comme nous allons le voir, leurs interprétations sont complètement différentes !

Mangelsdorf est prisonnier d'une vision darwinienne orthodoxe, celle popularisée par le biologiste britannique Ronald Fischer : l'évolution procède par accumulation graduelle de petites modifications héréditaires (mutations), dûment sélectionnées. Il lui semble donc impossible d'imaginer que l'évolution de seulement cinq gènes puisse suffire à expliquer la domestication du maïs, avec des changements si profonds de l'aspect des plantes obtenus en si peu de temps.

Il propose alors l'« hypothèse tripartite » suivante : les cinq gènes sont, en réalité, cinq groupes de gènes qui ont évolué lentement. Cette évolution ne se serait pas réalisée à partir de la téosinte, mais d'un maïs sauvage, actuellement disparu. Or cette hypothèse amène une nouvelle question : d'où vient la téosinte ? Celle-ci serait d'origine hybride, le descendant d'un croisement entre cet hypothétique maïs sauvage et une autre plante, *Tripsacum dactyloides*, qui, elle aussi, peut s'hybrider avec le maïs. Enfin, la principale source de la diversité existante dans les variétés modernes de maïs aurait été une « infection » par ce *Tripsacum*...

Curieuse démarche, qui consiste à proposer une hypothèse indémontrable pour remplacer le problème de l'origine d'une plante cultivée (le maïs) par celui d'une plante sauvage (la téosinte) !



Une seule variété de maïs, *Zea mays* ssp. *mays* var. *everta*, est capable de produire du pop-corn. Mais la téosinte aussi...

Pourtant, ce sera longtemps l'hypothèse la plus populaire.

De son côté, Beadle n'a aucun carcan conceptuel. Il se tient au courant des résultats récents en génétique, et en particulier ceux du théoricien américain Sewall Wright, qui démontre mathématiquement qu'une évolution rapide peut se réaliser, à condition qu'il y ait, au départ, autonomie d'une très petite population – ce qu'on appelle un goulot d'étranglement.

Beadle se forge donc un tout autre scénario : les agriculteurs ont utilisé une petite population de téosinte à partir de plants judicieusement triés dans la nature, puis l'ont mise sous forte sélection – la domestication. Or les principaux caractères phénotypiques différenciant téosinte et maïs sont au nombre de cinq : une enveloppe – la cupule – qui entoure les grains ou non ; un ou deux grains par cupule ; désarticulation de l'épi ou non ; deux ou de nombreux rangs de grains par épi ; longues branches axillaires ou non.

Beadle postule alors que chacun de ces traits est sous la dépendance d'un des gènes mis en évidence par l'étude des plantes F₂ (de deuxième génération). Cette hypothèse, qu'on peut résumer par « un gène – un caractère », est vraisemblablement la première phase du raisonnement qui, plus tard, le conduira à la maxime « un gène – une enzyme », quand il comprendra que chacun des mutants

métaboliques de *Neurospora crassa* présente la déficience d'une enzyme.

ACTE IV. LA TÉNACITÉ DE JOHN DOEBLEY

L'énigme des cinq gènes reste plusieurs dizaines d'années sans réponse, mais n'est pas oubliée pour autant. Le généticien John Doebley, de l'université du Wisconsin, est dans la continuité intellectuelle de Beadle. Dans les années 1990, son laboratoire utilise les techniques et concepts les plus modernes pour trancher entre l'« hypothèse téosinte » de Beadle et l'« hypothèse tripartite » de Mangelsdorf. Tout d'abord, en analysant les propriétés physiques des protéines de différents plants de téosinte, il démontre qu'il existe une grande variété de téosintes, dont certaines sont actuellement répertoriées comme sous-espèces de *Zea mays*.

Par cette approche protéique, le maïs est pratiquement indistinguable d'une téosinte mexicaine appelée « Balsas », *Zea mays* ssp. *parviglumis*. Les protéines sont quasi identiques, mais les plantes sont très différentes ! Cela signifie que les gènes sont structurellement les mêmes, mais que leurs expressions diffèrent.

Des études menées en 2002, fondées sur la diversité de séquences répétées d'ADN dans le génome – dites microsatellites – confirmeront cette proximité et ajouteront deux informations majeures.

La domestication du maïs est un événement unique – ce qui n'était pas évident – et il est survenu il y a 9000 ans environ, ce qui est en accord avec les données archéologiques.

Mais revenons à John Doebley. Parallèlement à ses recherches sur les plants de téosinte, il lance des études ambitieuses qui conjuguent la recherche de nombreux marqueurs moléculaires et l'utilisation de nouvelles méthodes statistiques, ce qui permet de localiser des «locus de caractères quantitatifs» ou QTL (pour *quantitative trait locus*). Un tel élément est une région plus ou moins grande d'un chromosome associée à un caractère quantitatif – comme le nombre de rangs dans l'épi ou le nombre de ramifications de la plante. La plupart du temps, dans une telle région chromosomique sont localisés plusieurs gènes. Dès 1993, John Doebley arrive à un résultat majeur: cinq régions du génome ont un rôle particulièrement puissant quant aux principaux caractères phénotypiques. Cinq, le même nombre que celui trouvé auparavant par Beadle et Mangelsdorf!

ACTE V. LE MUTANT DU MAÏS QUI RESSEMBLAIT À LA TÉOSINTE

La localisation d'un QTL n'est qu'une étape, car on ignore s'il se compose de nombreux gènes interdépendants – l'hypothèse Mangelsdorf –, ou s'il contient un gène majeur à découvrir – l'hypothèse Beadle. Le gène *tb1* (pour *teosinte branched 1*) est connu depuis longtemps, car des mutants de ce gène trouvés en 1959 chez le maïs font surgir un port proche de celui de la téosinte: un maïs «branché», maïs dépourvu d'épis femelles fertiles. Or la situation du gène *tb1* sur le chromosome coïncide avec celle d'un des QTL trouvés.

Sa localisation chromosomique avait été déterminée par de la génétique classique à une époque où l'on ne pouvait aller plus loin; mais à présent, à la fin des années 1990, on peut avoir accès à la séquence du gène et étudier son expression spatiotemporelle. Étude délicate, car son expression est complexe, étant donné que les ARN messagers du gène, intermédiaires entre le gène et la protéine, sont trouvés dans de multiples organes (bourgeon, primordium d'étamine...). Pourtant un thème commun apparaît: tous les organes où le gène *tb1* s'exprime sont de taille réduite ou avortés chez le maïs normal, mais développés chez le maïs portant le gène *tb1* muté. Le gène *tb1* semble donc agir comme un régulateur négatif de la croissance des organes végétatifs.

La comparaison téosinte-maïs devient alors riche d'enseignement, car l'expression du gène *tb1* dans les inflorescences du maïs est deux fois plus importante que celle mesurée dans les inflorescences de la téosinte. Par ailleurs, il n'y a aucune expression de *tb1* dans les bourgeons axillaires de la téosinte, alors que l'expression est forte chez le maïs. Comme soupçonné précédemment, la mutation paraît donc concerner non pas la partie codant la protéine, mais la partie régulatrice de l'expression du gène.

La domestication du maïs s'est bien produite très vite, avec des changements drastiques

Or une analyse moléculaire fine le confirme en 2011: les parties codantes du gène diffèrent peu entre les deux espèces, alors qu'on observe de grandes différences entre leurs séquences régulatrices. Chez le maïs, on remarque que la séquence régulatrice a subi un «balayage sélectif» qui montre une baisse de diversité, signe d'une forte pression de sélection. Surtout, un transposon s'y est inséré, lequel change complètement le mode de régulation du gène. Ainsi voit-on revenir le rôle clé des éléments mobiles déchiffrés par Barbara McClintock!

Par conséquent, Beadle avait raison et le scénario de Mangelsdorf s'effondre: le maïs provient de la téosinte, et la domestication s'est vraisemblablement bien produite très vite, avec des changements drastiques de port et de structure de l'épi, comme le suggère l'évolution du gène *tb1*.

Et le pop-corn, me direz-vous? Beadle s'est évidemment demandé ce qui a poussé les agriculteurs à sélectionner des plantes pourvues de grains entourés de leur cupule coriace. Or des grains de téosinte projetés sur des pierres très chaudes éclatent et forment du pop-corn quand leur protection explose. L'invention du pop-corn est à l'origine du maïs, et non l'inverse! ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Doebley, **The genetics of maize evolution**, *Annu. Rev. Genet.*, vol. 38, pp. 37-59, 2004.

A. Weber et al., **The genetic architecture of complex traits in teosinte (*Zea mays* ssp. *parviglumis*): new evidence from association mapping**, *Genetics*, vol. 180, pp. 1221-1232, 2008.

Y. Matsuoka et al., **A single domestication for maize shown by multilocus microsatellite genotyping**, *PNAS*, vol. 99(9), pp. 6080-6084, 2002.

A. Studer et al., **Identification of a functional transposon insertion in the maize domestication gene *tb1***, *Nature Genetics*, vol. 43(11), pp. 1160-1163, 2011.

L'AUTEUR



HERVÉ THIS
physicochimiste,
directeur du Centre
international de
gastronomie moléculaire
AgroParisTech-Inra, à Paris

BAVAROIS SANS CRÈME

Comment s'affranchir de la crème et résoudre le problème délicat du mélange de la purée de fruits avec la crème fouettée froide?

Les bavares sont des entre-mets alliant le sucré et l'acide du fruit à la saveur douce et à la légèreté du foisonnement de la crème. En pratique, on mêle une purée de fruits additionnée de gélatine à de la crème Chantilly. Évidemment, il y a des variantes. Ainsi, en version salée, on peut remplacer la purée sucrée par une purée d'avocats, d'asperges, de tomate, de poisson, un caviar d'aubergine, etc., et la crème Chantilly par une crème fouettée non sucrée.

Il y a une difficulté : en mélangeant les deux masses essentielles, à savoir la purée gélifiée, qui ne doit pas être prise, et la crème fouettée, qui ne prend bien qu'à froid, le froid de la crème peut faire prendre la gelée localement et engendrer ainsi des grumeaux caoutchouteux. Examinons le problème.

La gélification des solutions de gélatine, qui produit un réseau emprisonnant la solution, s'effectue vers 36 °C. La crème fouettée s'obtient par stabilisation des bulles par des protéines, puis par l'établissement d'un réseau de matière grasse cristallisée, lorsque les globules gras de la crème sont malaxés à froid. Pour l'analyse, il est bon de savoir que la matière grasse commence à fondre dès -10 °C et finit de fondre à 55 °C, mais, pour constituer un réseau continu, un minimum de 5 % de cette matière grasse doit passer à l'état solide (c'est pourquoi, en été, la crème monte mieux si l'on y ajoute des glaçons).

Il y a quelques années, Keiichi Ihara et ses collègues, de la société japonaise Morinaga, ont examiné la structure des crèmes fouettées selon la température de battage (*Journal of Dairy Science*, vol. 93, pp. 2887-2895, 2010). Ils ont notamment

Un bavares à la fraise et au kiwi. Classique ou sans crème?



montré que la taille des bulles diminue quand les crèmes sont fouettées aux plus hautes températures utilisables.

Cependant, tout cela est classique. Pourrions-nous conserver le principe du bavares, sans crème? Oui, en confectonnant deux préparations dénommées *liebig* (une émulsion gélifiée) et *würtz* (une mousse gélifiée).

Partons d'environ 50 grammes d'eau, et dissolvons une feuille de gélatine (il faut faire tremper la feuille dans l'eau, puis chauffer quand elle est ramollie). Dans cette solution gélifiée, ajoutons de l'huile en fouettant : on obtient une émulsion blanche, qui gélifie quand elle refroidit et forme une émulsion gélifiée nommée *liebig* en l'honneur du chimiste allemand Justus von Liebig (qui a donné son nom à une société de concentrés de bouillon de viande). La transition de gélification de cette émulsion s'effectue vers 36 °C.

Par ailleurs, pour faire un *würtz*, partons d'un verre d'eau où l'on ajoute deux feuilles de gélatine. On laisse tremper, on chauffe, puis on fouette : on obtient une mousse blanche qui peut également gélifier quand on la refroidit à moins de 36 °C.

Avant la gélification de ces deux masses, mélangeons-les, comme on fait d'une crème fouettée et d'une purée de fruit gélifiée, et nous obtiendrons le même système physicochimique que

celui du bavares, sans l'écueil associé aux températures. Évidemment, l'eau pure est remplaçable par une autre solution aqueuse ou par une purée, solution aqueuse où sont dispersées des particules solides. Et l'on peut substituer à l'huile simple une macération, obtenue en laissant quelques jours du café moulu dans de l'huile, en cuisant des carapaces de crustacés dans l'huile, ou en macérant, toujours dans l'huile, de la cannelle... ■



LA RECETTE

- 1 Dans un récipient, verser 50 grammes de jus d'orange, ajouter une feuille de gélatine (environ 2 grammes) et une pincée de sel.
- 2 Laisser la gélatine s'amollir, puis chauffer doucement pour la dissoudre.
- 3 Ajouter un peu d'extrait liquide de vanille.
- 4 Fouetter en ajoutant de l'huile d'olive goutte à goutte, comme lorsqu'on monte une sauce mayonnaise, et s'arrêter quand on a une émulsion blanche de consistance crémeuse.
- 5 Dans un autre récipient, mettre 200 grammes de jus de carotte et deux feuilles de gélatine. Laisser reposer pour que la gélatine s'amollisse, puis chauffer doucement afin de la dissoudre.
- 6 Fouetter pour obtenir le würtz.
- 7 Mélanger les deux masses émulsifiées et foisonnées. Laisser prendre la préparation.

DÉCOUVREZ LES ARCHIVES DE **POUR LA SCIENCE**



RETROUVEZ TOUS
LES NUMÉROS
DEPUIS 1996

COMPLÉTEZ
VOTRE COLLECTION
SUR www.pourlascience.fr



A

PICORER

P. 80

6 643

est le plus petit entier palindrome à la fois en base 2 et en base 3 : il s'écrit 1100111110011 en base 2 et 100010001 en base 3 !

P. 88

VOLS ANNULÉS

A Phoenix, aux États-Unis, American Airlines a annulé 40 vols, en juin 2017. Pourquoi ? À cause des fortes chaleurs : plus la température est élevée, moins l'air est dense. L'avion doit alors atteindre une plus grande vitesse pour que la portance soit suffisante. Mais pour cela, encore faut-il que la piste d'envol soit assez longue ! À 40 °C, il faudrait ajouter 300 mètres à une piste de 2 500 mètres pour y faire décoller un Boeing 737-800 plein...

P. 54

« Les facteurs économiques n'ont aucune influence sur le développement de la radicalité religieuse. Le sentiment de discrimination joue, mais peu. L'idéologie religieuse est le facteur prépondérant. »

OLIVIER GALLAND
sociologue au CNRS

P. 38

700

C'est le nombre de neurones qui naissent chaque jour dans l'hippocampe d'un humain adulte âgé d'une cinquantaine d'années.

P. 24

POST MORTEM

Dans les principaux systèmes de croyance, le lieu où l'on est enterré n'a aucune importance : notre destination finale (paradis, enfer, antichambre d'attente) dépendra de nos mérites et n'aura pas grand-chose à voir avec le lieu de notre inhumation. Pourtant, la plupart des gens souhaitent être enterrés auprès d'un proche.

P. 17

ONDE COBRA

Entrecroisez des milliers de bâtonnets de bois semblables à ceux utilisés pour les glaces afin de former un serpent de plusieurs mètres. Puis retirez le premier. L'assemblage devient instable : il se soulève avant d'éjecter ses bâtonnets un par un, produisant une onde qui se propage le long de la structure – l'onde cobra... bit.ly/2xU3cmQ

P. 92

85 %

du génome d'une variété de maïs (le maïs B73) est constitué de transposons, c'est-à-dire des « gènes sauteurs » qui s'y sont insérés au fil des sélections menées par l'homme pour domestiquer le maïs.

Dans l'**inter**êt de la science

**mathieu
vidard**

**la tête au carré
14:05-15:00**



**france
inter**venez
franceinter.fr

Collecte et analyse de données texte de multiples sources (Text Mining)

Ecoute en temps réel des médias sociaux
(dont Twitter)

Import, collecte et analyse des données
de multiples sources

Traitement automatisé de grands
volumes de données

Optimisation par algorithme de
Machine Learning

Gestion de projet en équipe

