

■ POUR LA
SCIENCE

Mai 2011 - n° 403

www.pourlascience.fr

Édition française de Scientific American

Fluides et turbulences

Leurs équations
reflètent-elles
la réalité ?

**Le ballet
des chromosomes**

Une clef de l'activité
des gènes

Le mot juste

Comment le cerveau
l'acquiert et le choisit

Géométrie

L'art des figures infinies
et impossibles

M 02687 - 403 - F: 6,20 €



France métro : 6,20 € - DOM s : 7,30 € - BEL : 7,20 € - CH : 12 FS - CAN : 10,95 \$ can - Grèce : 7,60 € - LUX - Italie - PORT cont : 7,20 €
- AND : 6,20 € - ALL : 9,30 € - MAR : 60 DH - TUN : 6,70 TND - REU av : 9,30 € - TOM surf : 980 F CFP - TOM av : 1770 F CFP

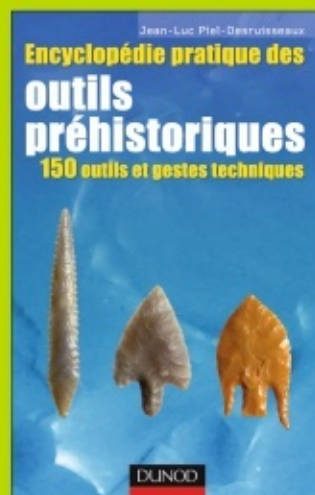
VARIEZ LES SAVOIRS AVEC DUNOD



J. GUESPIN-MICHEL

9782100557998 ■ 208 pages ■ 19,90 €
DUNOD / LA RECHERCHE

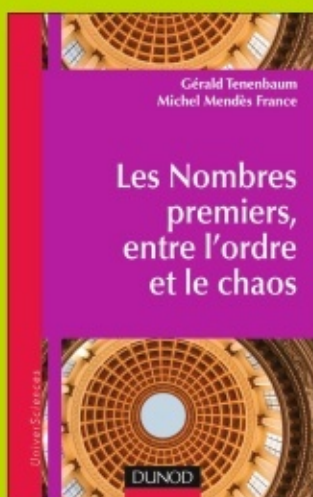
Des idées nouvelles sur un concept clé de la biologie moderne, l'interaction entre gènes et environnement, le hasard et la nécessité.



J.-L. PIEL-DESRISSAUX

9782100556328 ■ 208 pages ■ 19 €

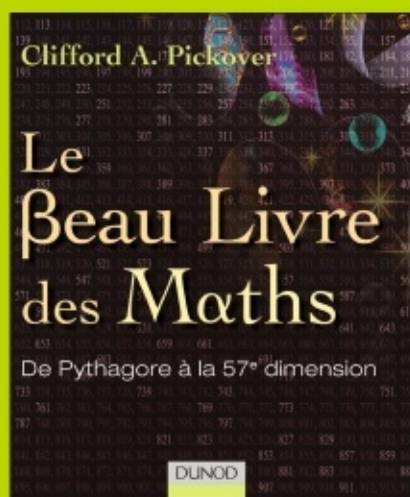
Un dictionnaire alphabétique illustré dans lequel la morphologie, la fabrication et l'utilisation possible de 150 outils préhistoriques sont décrites.



G. TENENBAUM, M. MENDES FRANCE

9782100545155 ■ 192 pages ■ 20 €

Ils fascinent depuis la plus haute Antiquité... Voici une concise mais solide introduction aux nombres premiers pour les passionnés des maths.



C. PICKOVER

9782100546404 ■ 528 pages ■ 27,90 €

Les mystères et les beautés de l'univers mathématique à travers 250 découvertes des plus grands mathématiciens.

Tous nos ouvrages sont disponibles en librairie

www.dunod.com

DUNOD
ÉDITEUR DE SAVOIRS

Groupe POUR LA SCIENCE

Directrice de la rédaction : Françoise Pétry

Pour la Science

Rédacteur en chef : Maurice Mashaal

Rédacteurs : François Savatier, Marie-Neige Cordonnier,
Philippe Ribeau-Gésippe, Bénédicte Salthun-Lassalle,
Guillaume Frasca

Dossiers Pour la Science

Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin

Rédacteur : Guillaume Jacquemont

Cerveau & Psycho

L'Essentiel Cerveau & Psycho

Rédactrice en chef : Françoise Pétry

Rédacteur : Sébastien Bohler

Directrice artistique : Céline Lapert

Secrétariat de rédaction/Maquette : Annie Tacqueten,

Sylvie Sobelman, Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy

Site Internet : Philippe Ribeau-Gésippe assisté de Ifédayo Fadoju

Marketing : Élise Abib

Direction financière : Anne Gusdorf

Direction du personnel : Marc Laumet

Fabrication : Jérôme Jalabert assisté de Marianne Sigogne

Presse et communication : Susan Mackie

Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé

Conseillers scientifiques : Philippe Boulanger et Hervé This

Ont également participé à ce numéro :

Ahmed Aarab, Christophe Bonnal, Frédéric Brechenmacher,
Cécile Chevrier, Ghislaine Dehaene-Lambert, Marcello
Fulchignoni, Peter Galison, Raphaël Garcia, Évelyn Host-Platret,
Étienne Koechlin, Marc Mauduit, Christophe Pichon, Géraldine
Rauchs, Daniel Tacqueten, Todd Treangen, Philippe Valet.

PUBLICITÉ France

Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin
(j.f.guillotin@pourlascience.fr), assisté de Nada Mellouk-Raja
Tél. : 01 55 42 84 28 ou 01 55 42 84 97 • Fax : 01 43 25 18 29

SERVICE ABONNEMENTS

Ginette Bouffaré. Tél. : 01 55 42 84 04

Espace abonnements :

<http://tinyurl.com/abonnements-pourlascience>

Adresse e-mail : abonnements@pourlascience.fr

Adresse postale :

Service des abonnements - 8 rue Férou - 75278 Paris cedex 06

Commande de dossiers ou de magazines :

02 37 82 06 62 [de l'étranger : 33 2 37 82 06 62]

DIFFUSION DE POUR LA SCIENCE

Canada : Edipresse : 945, avenue Beaumont, Montréal,
Québec, H3N 1W3 Canada.

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

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

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

SCIENTIFIC AMERICAN Editor in chief : Mariette DiChristina. Editors : Ricky
Rusting, Philip Yam, Gary Stix, Davide Castelvecchi, Graham Collins, Mark
Fischetti, Steve Mirsky, Michael Moyer, George Musser, Christine Soares, Kate
Wong. President : Steven Inchcoombe. Vice President : Frances Newburg.

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou
francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents conte-
nus dans la revue « Pour la Science », dans la revue « Scientific American »,
dans les livres édités par « Pour la Science » doivent être adressées par
écrit à « Pour la Science S.A.R.L. », 8, rue Férou, 75278 Paris Cedex 06.

© Pour la Science S.A.R.L. Tous droits de reproduction, de traduction, d'adapt-
ation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le
nom commercial « Scientific American » sont la propriété de Scientific Ame-
rican, Inc. Licence accordée à « Pour la Science S.A.R.L. ».

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de
reproduire intégralement ou partiellement la présente revue
sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français de
l'exploitation du droit de copie [20, rue des Grands-Augus-
tins - 75006 Paris].



Le temps des turbulences

Les nuages, l'eau qui tourbillonne dans une cascade, les fumées, des liquides colorés qui se mélangent... Les fluides semblent avoir des mouvements chaotiques. Toute perturbation modifie leur écoulement d'une façon généralement imprédictible. Dès lors, la mise en équations du comportement des fluides tient du défi. Toutefois, divers physiciens se sont attelés à la tâche, notamment le Français Claude Louis Marie Henri Navier (1785-1836) à qui l'on doit les équations de la mécanique des fluides, dites de Navier-Stokes. On n'a pas retenu le nom d'un autre physicien français qui a pourtant notablement amélioré la formulation de ces équations : Adhémar Barré de Saint-Venant (1797-1886). Il tomba dans les oubliettes de l'histoire, et c'est le Britannique George Gabriel Stokes (1819-1903) qui passa à la postérité.

Les phénomènes de turbulence restent mal compris, mais les équations de Navier-Stokes – que l'on ne sait pas toujours résoudre – sont utilisées par les ingénieurs et les physiciens qui s'intéressent au comportement des fluides (voir *Turbulences sur les équations des fluides*, page 26). Elles servent à élaborer des modèles numériques et à étudier l'écoulement des fluides, l'aérodynamique des trains à

Le modèle n'a aucune imagination.

grande vitesse et des avions, ou les mouvements des masses d'air qui circulent autour de la planète. On peut ainsi suivre le transport des éléments radioactifs en provenance du Japon.

Quand ils ont été construits dans les années 1970, les réacteurs de Fukushima ont été implantés dans une zone qui avait été déclarée sûre d'après les conclusions fournies par les modèles – les plus élaborés disponibles alors – du risque sismique au Japon. Les modèles se sont trompés (voir *Le mégaséisme de subduction du Japon*, page 34).

Les modèles numériques sont de puissants outils. Ils permettent notamment de tester des hypothèses de façon beaucoup plus rapide et précise que ne le feraient des expériences. On peut tester sans limite les conséquences dues à la modification de chacun des paramètres. Ils autorisent parfois même des prédictions sur des événements rares. Mais ce sont des outils au service de l'homme, qui ne remplacent pas l'homme, qui ne prévoient pas ce que l'homme n'aura pas anticipé. Le modèle n'a aucune imagination. Pas plus en matière de sécurité nucléaire que d'évolution des turbulences, qu'elles soient physiques... ou politiques et sociales. ■

1 ÉDITO

4 BLOC-NOTES

Didier Nordon

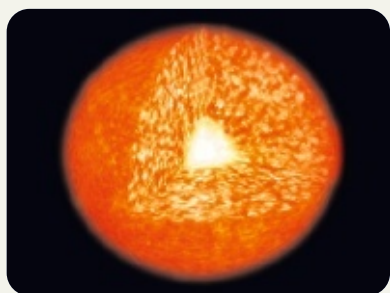
Actualités

6 Des Américains antérieurs à la culture de Clovis

8 Mieux soigner les épilepsies infantiles

9 Le prix Abel 2011 attribué à John Milnor

12 Le cœur des géantes rouges dévoilé



... et bien d'autres sujets.

16 ON EN REPARLE

Opinions

18 POINT DE VUE

Il est urgent de prévenir les troubles de l'audition chez l'adolescent

Michel Mondain et Frédéric Venail

19 ÉCONOMIE

Les pollueurs ne sont pas les payeurs

Ivar Ekeland

20 DÉVELOPPEMENT DURABLE

Végétaliser les toitures et terrasses

Maeva Sabre et Gaëlle Bulteau

22 VRAI OU FAUX

Les hommes sont-ils monotâches ?

Bénédicte Salthun-Lassalle

24 COURRIER DES LECTEURS

À LA UNE

26 MATHÉMATIQUES

Turbulences sur les équations des fluides

L'un des problèmes mathématiques les plus en vue porte sur les écoulements des liquides ou des gaz. Les équations dites de Navier-Stokes utilisées pour les décrire et les prévoir sont-elles valides ?

34 GÉOPHYSIQUE

Le mégaséisme de subduction du Japon

Pierre Henry

Les sismologues n'avaient prévu ni le mégaséisme qui a secoué la grande île de Honshu au Japon, ni le raz de marée de 20 mètres de haut qui a suivi. Des mécanismes inédits jusqu'à présent sont en cause.

41 DOSSIER

LE MOT JUSTE

Comment le cerveau l'acquiert, le choisit et le produit

→ **Comment les enfants (p. 42) apprennent leur langue maternelle**

É. Cauvet, P. Brusini, I. Brunet et A. Christophe

→ **La production des mots (p. 50)**

F.-Xavier Alario

→ **La musique de Enfin (p. 56)**

Mélanie Petit

62 **ASTRONOMIE****Les satellites les plus étranges du Système solaire***David Jewitt, Scott Sheppard et Jan Kleyna*

Évoluant sur des orbites étirées et dans le sens souvent inverse de celui attendu, les satellites irréguliers ouvrent une fenêtre sur la formation des planètes.

70 **CLIMATOLOGIE****Les victimes du changement climatique***Alex de Sherbinin, Koko Warner et Charles Ehrhart*

Les modifications des régimes de pluies et des rivages côtiers pourraient entraîner des migrations humaines d'une ampleur sans précédent.

76 **BIOLOGIE CELLULAIRE****La vie agitée du génome***Tom Misteli*

Entre deux divisions cellulaires, l'ADN des chromosomes se révèle plus organisé que prévu. L'activité des gènes dépend de leur position et de leurs déplacements dans le noyau : silencieux en périphérie, ils sont actifs au centre.

**Regards**

84

HISTOIRE DES SCIENCES**Le monde vivant selon al-Djâhiz***Meyssa Ben Saad et Mehrnaz Katouzian-Safadi*

Au Moyen Âge, dans l'Empire arabo-islamique, de nombreux savants décrivent le monde vivant. L'un d'eux, al-Djâhiz, érudit de la cour de Bagdad, apporte un regard nouveau fondé sur l'observation et la raison.

88

LOGIQUE & CALCUL**Infini et impossible !***Jean-Paul Delahaye*

Placer une infinité d'impossibilités dans un seul dessin peut sembler un peu futile. Cela produit pourtant de troublantes images où l'œil est mis à rude épreuve.

94

ART & SCIENCE**William Kentridge et la négation du temps***Loïc Mangin*

96

IDÉES DE PHYSIQUE**Des électrons en boîte pour donner des couleurs***Jean-Michel Courty et Edouard Kierlik*

101

SCIENCE & GASTRONOMIE**Brandade de morue***Hervé This*

102

À LIRE

Sur la totalité des numéros :
deux encarts d'abonnement pages 24 et 25.
Encarts commande de livres et abonnement pages 76 et 77.
Un encart *Sciences humaines* posé sur la diffusion abonné France.
En couverture : © Shutterstock/Leigh Prather

Rendez-vous sur **SCIENCE.fr**

Plus d'informations

- L'intégralité de votre magazine en ligne
- Des actualités scientifiques chaque jour
- Plus de 5 ans d'archives
- L'agenda des manifestations scientifiques

Les services en ligne

- Abonnez-vous et gérez votre abonnement en ligne
- Téléchargez les articles de votre choix
- Réagissez en direct
- Consultez les offres d'emploi

www.pourlascience.fr

→ LE MULTIVERS DE LA POLITIQUE

Selon les domaines, chaque individu est plutôt conservateur ou novateur, autoritaire ou laxiste, rationnel ou affectif, étroit ou large d'esprit. Il peut, par exemple, être effarouché en matière de mœurs, mais prêt à toutes les aventures technologiques – ou inversement. Il peut accepter de partager ses biens, mais ne pas supporter de renoncer à son pouvoir. Etc. Bref, il se manifeste par une nébuleuse d'options peu corrélées entre elles. Les notions politiques de gauche et de droite sont donc des synthèses trop sommaires pour être pertinentes. Plus grave, leur affrontement réducteur conduit les élus à se raidir et ne mène à rien de bon.

Les géomètres abstraits vont ici révéler leur utilité. Détruisons le Palais-Bourbon et le palais du Luxembourg, dont l'architecture favorise l'opposition stérile entre gauche et droite, et confions aux géomètres la construction de deux hyperhémicycles à 36 000 dimensions. Les hypersièges seront repérés par leurs coordonnées sur 36 000 axes correspondant à 36 000 types de problèmes (mœurs, techniques, religions, sciences, éducation, argent, pouvoir, arts, etc.). Sur chaque axe, gradué du plus réactionnaire au plus révolutionnaire, chaque élu choisira la coordonnée exprimant au mieux sa position.



Évidemment, nous qui, n'étant pas géomètres, manquons de familiarité avec les espaces à 36 000 dimensions, nous n'y verrons plus rien. Mais cela plaide pour ma proposition. Croire à une lisibilité de la société est en effet une erreur. La société est un fouillis d'actions et de réactions partant tout le temps dans tous les sens. Nul n'arrive jamais ni à analyser complètement le passé, ni à saisir tout ce qui est en train de se produire, ni à anticiper l'avenir. Pour être fidèle, la représentation nationale doit être à l'image de ce chaos. D'ailleurs, lorsque la réforme que je propose sera entrée en vigueur, on constatera que des hyperhémicycles à 36 000 dimensions pèchent encore par simplisme. Il sera temps, alors, de leur adjoindre des dimensions fractales.

→ HYPOCRISIE DURABLE

Si nous étions adeptes du développement durable, nous aspirerions à ce que l'ordinateur légué par nos parents soit celui dont, sans panne ni obsolescence, se serviront encore nos enfants et nos petits-enfants. Nous nous opposerions au progrès technologique, puisque celui-ci nous incite à nous débarrasser de nos objets, dépassés avant d'être usés, au risque de dilapider les ressources naturelles. Il n'est pas de développement durable sans objets durables.

En fait, peu de nous sont prêts à payer le prix du développement durable, c'est-à-dire à renoncer à la griserie des gains de puissance qu'apporte le progrès technologique. Mais nous ne voulons pas mettre nos paroles en accord avec nos actes et, comme ont fait tant d'autres, dire : « Après nous, le Déluge. » Ce serait reconnaître que nos technologies supérieures ne changent pas grand-chose à l'éternel humain. Du

coup, nous courons après le progrès tout en vantant le développement durable, faisant ainsi perdurer cet autre éternel humain qu'est l'hypocrisie.



→ VISION AVEUGLE

Une activité est d'autant plus scientifique, dirait-on, qu'elle laisse moins de place en son sein à l'expression du pessimisme. Quand un chercheur anticipe les conséquences de son travail, il se montre confiant et plein d'allant. « Grâce à nos recherches, on pourra faire ceci et cela », annonce-t-il, où « ceci » et « cela » désignent des rêves ou des désirs dont la réalisation sera éminemment bénéfique.

L'histoire devrait rendre prudent. Il n'est guère de progrès scientifique ou technique qui n'ait sa face d'épouvante. La chimie et les gaz, la physique et les bombes, la biologie et les armes bactériologiques ; la médecine, mise par les dictatures au service de tortures, d'exécutions, d'internements psychiatriques ; et peut-être, dans un avenir plus ou moins lointain, l'informatique, avec la surveillance systématique des populations.

Seulement, un chercheur qu'inquiéterait trop le risque de voir son travail engendrer une horreur serait paralysé. L'optimisme obligé de la recherche est un de ses points aveugles les plus critiquables. Une ques-

tion reste posée : quelle part de responsabilité le chercheur a-t-il dans l'utilisation qui sera faite de ses résultats ?

→ TRACES DÉLÉBILES

Selon certains commentateurs, les supports électroniques ne résisteront pas au temps. À leur confier tant de documents, nous risquons de ne pas laisser de traces durables. Les archéologues de l'avenir auront encore moins d'éléments sur nous que nous n'en avons sur les hommes qui ont peint Lascaux.

Soit. Mais pourquoi s'affliger devant cette perspective ? Soyons modestes : à ne pas nous connaître, nos descendants subiront-ils vraiment un dommage irréparable ? Et puis, s'ils commettent à notre sujet l'erreur que nous avons commise à propos des peuples que nous avons qualifiés de « primitifs », ils déduiront du manque de vestiges légués par notre histoire que nous n'avons tout simplement pas eu d'histoire. Ils concluront (pourvu qu'ils aient les mêmes dictons que nous) que nous avons été un peuple heureux.

Ainsi, notre absence de traces donnera de nous une image infidèle, mais attrayante. Avec un peu de chance, le mystère enveloppant notre civilisation fera rêver, et on prendra celle-ci pour un modèle idéal auquel aspirer. Que souhaiter de mieux ?



Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques

la plus importante collection d'instruments de travail pour la recherche en sciences humaines

Le regard de l'ethnologue n° 26



Être migrant et Haïtien en Guyane
Maud Laëthier
Préface de Marie-José Jolivet

320 pages
ill. noir et blanc
16 x 24 cm
26 €

CTHS Histoire n° 45



La province antiquaire
L'invention de l'histoire locale en France (1800-1870)
Odile Parsis-Barubé

464 pages
15 x 22 cm
28 €

CTHS Histoire n° 43



Hommes de la vigne et du vin
Sous la direction de Sophie Delbrel et Bernard Gallinato-Contino

208 pages
ill. noir et blanc
15 x 22 cm
20 €

* ventes@cths.fr * vente en librairie ou sur notre site : www.cths.fr * Distribution SODIS *

Préhistoire

Des Américains antérieurs à la culture de Clovis

Un atelier de taille d'outils en pierre, retrouvé dans le Texas, indique que des chasseurs-cueilleurs vivaient en Amérique avant l'apparition de la « culture de Clovis », qui caractérisait jusqu'ici les plus anciennes traces humaines connues sur ce continent.



Ci-dessus, une femme appartenant à la culture de Clovis revient de la pêche (restitution d'artiste). Cette culture, nommée d'après un site texan, est apparue dans toute l'Amérique du Nord il y a 13 000 ans et passait pour la première culture amérindienne. Ses pointes de flèche et de lance bifaciales en forme de feuille (au milieu) sont l'une de ses caractéristiques. On est désormais certain que la culture de Clovis a évolué à partir de cultures plus anciennes, qui produisaient des outils lithiques très différents (à droite).

Un site préhistorique texan change le scénario du peuplement des Amériques par l'homme.

Depuis une trentaine d'années domine le modèle du *Clovis first*, c'est-à-dire l'idée que les premiers humains de ce continent étaient les porteurs de la culture de Clovis. Ce type d'industrie lithique, apparu après la dernière glaciation il y a quelque 13 000 ans, se caractérise notamment par de magnifiques pointes bifaciales, qui rappellent les productions lithiques des Solutréens, la culture qui occupait l'Ouest de l'Europe pendant la glaciation. Les preuves de l'apparition en Amérique de cultures antérieures à Clovis s'accumulaient depuis quelques années. Mais les tenants du *Clovis first* les trouvaient toujours douteuses, leurs datations étant discutables.

Les fouilles de l'équipe de Michael Waters, de l'Université du Texas A&M, sur les rives du ruis-

seau Buttermilk au Texas, changent la donne. Là, non loin d'un site Clovis, des groupes de chasseurs-cueilleurs sont venus pendant des millénaires tailler des galets de silex, épars dans les environs, afin d'en tirer outils et autres microlithes pour découper les carcasses ; à chaque passage, ils ont laissé des milliers d'éclats, que les crues régulières ont ensuite recouverts.

Un empilement stratigraphique s'est ainsi constitué : tout en bas, une couche riche en outils n'appartenant pas à la culture de Clovis ; ensuite, plusieurs strates intermédiaires contenant des outils pré-Clovis ; puis une couche caractéristique de la culture de Clovis ; et ainsi de suite jusqu'à la Préhistoire tardive. Comme toutes ces couches ne contiennent aucun résidu organique, les chercheurs les ont datées par luminescence stimulée optiquement. Cette méthode permet de déduire, de l'énergie lumineuse encore pié-

gée dans les grains de quartz et de feldspath contenus dans l'argile, la date de la dernière exposition de ces grains au soleil. La couche située à la base de la pile remonte à quelque 15 500 ans, c'est-à-dire plus de 2 000 ans avant les premières traces matérielles de la culture de Clovis.

Le site confirme que l'on ne s'était pas trompé en datant d'avant Clovis plusieurs assemblages lithiques trouvés en Pennsylvanie, Wisconsin, Oregon, Floride et au Texas. À Buttermilk, un détail frappe : les outils provenant des couches intermédiaires, précédant la couche Clovis, ont été façonnés par réduction bifaciale, une technique proche de celle développée plus tard par la culture de Clovis. Cela suggère une continuité entre la culture de Clovis et celles qui l'ont précédée. Désormais, la question est : qui étaient ces prédécesseurs ?

→ François Savatier

Science, vol. 331, pp. 1599-1603, 2011

Climatologie

Traînées d'avions et réchauffement



Les traînées de condensation laissées par les avions contribuent de façon positive à l'effet de serre, mais de combien ? Les estimations étaient jusqu'ici peu précises et controversées. Ulrike Burkhardt et Bernd Kärcher, de l'Institut de physique de l'atmosphère de Wessling, en Allemagne, viennent de publier une étude détaillée de l'effet de ces sillages sur le bilan radiatif de la Terre.

Ces chercheurs ont intégré à un modèle climatique global un module qui simule l'évolution des traînées de condensation et leur effet. Les traînées ne disparaissent pas toujours vite. Selon les conditions météorologiques, elles peuvent se transformer en quelques heures en nuages ténus qui ressemblent à des cirrus et qui couvrent de grandes étendues. D'après les modélisations de U. Burkhardt et B. Kärcher, la couverture nuageuse due aux traînées de condensation, qui pourrait atteindre dix pour cent du ciel au-dessus de l'Europe centrale, réchaufferait la planète d'environ 30 milliowatts par mètre carré. Un effet supérieur à celui lié aux émissions de dioxyde de carbone par les avions !

→ Maurice Mashaal

Nature Climate Change, vol. 1, en ligne, 29 mars 2011

En bref

FOSSILE À DENTS DE SABRE

Un herbivore fossile vieux de 260 millions d'années, découvert au Brésil, se révèle être une espèce clef dans l'évolution des mammifères. *Tiarajudens eccentricus* avait des dents postérieures présentant une occlusion, caractéristique de la mastication d'herbes, et une paire de dents de sabre, cas unique chez les herbivores. Ce spécimen remet en question le statut déjà incertain des dents de sabre comme précurseurs des grandes canines ou des défenses, alors que les descendants de cette espèce ont développé les deux.

VIVRE VIEUX... ET STÉRILE !

On savait que la suppression des cellules germinales, à l'origine des gamètes, allonge la durée de vie des vers *Caenorhabditis elegans*. Des biologistes ont découvert que le maître d'œuvre de ce phénomène est le gène *nhr-80*. Il code un récepteur nucléaire qui, une fois activé, modifie l'expression d'autres gènes, dont *fat-6*. Celui-ci code une enzyme du métabolisme des lipides, ce qui place ces derniers au cœur des relations entre reproduction et durée de vie.

NEZ OU PAS NEZ...

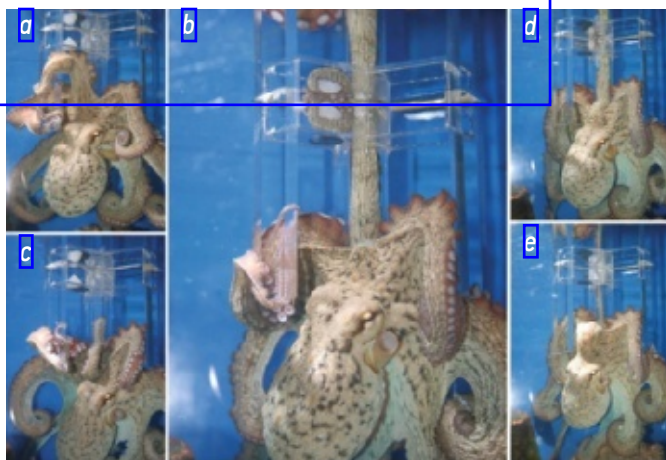
Peut-on combiner mentalement des odeurs et aboutir à de nouvelles fragrances ? Oui, à condition de s'entraîner, montrent des chercheurs de Lyon et Grenoble en comparant l'activité cérébrale de « nez » parfumeurs et d'apprentis. Les experts développent une telle capacité à imaginer les odeurs que, lors de cette tâche, ils mobilisent moins certaines régions cérébrales impliquées dans l'olfaction et la mémoire que les débutants. Si les prédispositions sont variables au départ, l'expertise se cultive.

Biologie animale

Tentacules et vision : la pieuvre par huit

Un simple geste, attraper une tasse de café par exemple, cache une grande complexité : d'abord, votre système visuel repère l'objet, code sa position, puis votre cerveau, via divers signaux, commande à vos muscles des mouvements coordonnés qui conduisent votre main à l'anse, puis la tasse à votre bouche. Pour accomplir cette action, un bras dispose de quelques degrés de liberté, au niveau de l'épaule, du coude, du poignet... Dès lors, comment s'y prend une pieuvre qui a huit tentacules, chacun étant suffisamment flexible (il n'y a pas d'ossature) pour autoriser une quasi-infinité de degrés de liberté ? Cette anatomie transforme en défi le contrôle visuel des mouvements par le céphalopode, au point que certains biologistes l'en pensaient dépourvu. Les travaux de Tamar Gutnick, de l'Université hébraïque de Jérusalem, et ses collègues contredisent cette idée.

Ils ont placé une pieuvre commune (*Octopus vulgaris*) dans un aquarium et lui ont proposé un récipient transparent en forme d'étoile à trois branches. Un ten-



Une pieuvre commune (*Octopus vulgaris*) glisse un tentacule dans un tube de verre qui se ramifie en trois voies, dont l'une contient un aliment.

tacule pouvait y pénétrer par le centre, via un tube, et avait ensuite le choix entre trois directions. À chaque expérience, un aliment était placé, aléatoirement, à l'une des trois extrémités et indiqué par un disque noir.

La plupart des pieuvres ont appris à associer cette marque à la présence de nourriture et dirigeaient leur membre directement vers le bon compartiment. L'usage

de la vision a été confirmé par le fait que les performances des céphalopodes étaient inférieures avec un récipient opaque.

Reste maintenant à déterminer si la pieuvre sait dès le départ où diriger son tentacule ou si elle procède par des réajustements permanents de la position du membre en fonction de l'objectif.

→ Loïc Mangin

Current Biology, vol. 21, pp. 460-462, 2011

Géophysique

Réchauffement magmatique rapide

Lorsqu'un volcan s'endort, le magma se refroidit dans la chambre magmatique, à quelques dizaines de kilomètres de profondeur. L'arrivée de magma profond peut réveiller le volcan. Alain Burgisser, de l'Institut des sciences de la Terre d'Orléans, et un collègue américain ont montré que ce phénomène peut se dérouler en quelques mois.

Refroidi, le magma forme une pâte visqueuse. Lorsque du magma profond arrive sous la chambre, celle-ci se réchauffe par conduction thermique. Dans l'ancien modèle, seul ce mécanisme très lent intervenait, fluidifiant la chambre en plusieurs siècles. Or lorsqu'il se réchauffe,

le magma devient moins visqueux et moins dense. Une couche instable apparaîtrait : elle se déformerait et créerait une colonne de magma chaud, plus léger, qui remonterait par convection, ce qui accélérerait le réchauffement de la chambre. Le contenu deviendrait fluide en quelques années, voire quelques mois (selon la température du magma profond et la viscosité du magma de la chambre).

Le modèle a été appliqué notamment à l'éruption de 1991 du Pinatubo, aux Philippines. En recréant les conditions extrêmes de la chambre magmatique (900 °C, 2 000 bars), les volcanologues ont mesuré la viscosité

du magma et en ont déduit la vitesse de sa remobilisation. Ils en ont conclu que la chambre magmatique du Pinatubo se serait réchauffée en 20 à 80 jours, contre plus de cinq siècles dans le modèle classique. Un résultat que corrobore un réexamen de l'enregistrement des secousses sismiques avant l'éruption : les géophysiciens y ont décelé deux mois avant l'éruption des ondes indiquant, selon eux, l'arrivée de la lave profonde. Si ces résultats précisent comment se réveille un volcan, d'autres facteurs contrôlent l'éruption elle-même.

→ Guillaume Frasca

A. Burgisser et al., *Nature*, vol. 471, pp. 212-215, 2011



L'éruption du Pinatubo, en 1991. Une éruption est précédée du réchauffement de la chambre magmatique, qui serait beaucoup plus rapide qu'on ne le pensait.

182 : c'est le nombre d'articles publiés en 2010 par *Nature* et ayant des auteurs du CNRS ; l'organisme français se classe ainsi deuxième, derrière l'Université Harvard.

Médecine

Mieux soigner les épilepsies infantiles

Sur les 50 millions d'épileptiques dans le monde, la moitié sont des enfants et, parmi eux, les bébés sont les plus nombreux. Pour stopper les crises d'épilepsie du nourrisson, on utilise deux molécules : le valium et le phénobarbital. Mais ce traitement devient peu efficace après plusieurs crises, voire les aggrave. Une équipe de l'Ins-

titut de neurobiologie de la Méditerranée (INSERM 901/Université de la Méditerranée), à Marseille, vient de montrer pourquoi le traitement devient inapproprié et propose une solution.

L'épilepsie se manifeste par des crises récurrentes dues à une activité électrique excessive du cerveau. Ces décharges sont provoquées par un fort déséquilibre des

charges reçues par les neurones sous la forme d'ions. Le traitement bloque les crises en renforçant l'action du GABA, un médiateur de l'inhibition cérébrale. Dans des conditions normales, le GABA provoque l'entrée d'ions chlore – chargés négativement – dans le neurone en se fixant sur son récepteur GABAR (une molécule canal), ce qui maintient la cellule sous le seuil d'excitabilité.

En déclenchant des crises dans des structures cérébrales de rat, les neurobiologistes ont montré que le GABA remplit son rôle inhibiteur lorsqu'il est utilisé au début des crises, et que le phénobarbital facilite cette action. En revanche, après plusieurs crises, le chlore s'accumule dans les neurones et le GABA finit par déclencher une sortie massive de chlore – sortie renforcée par le phénobarbital

(la molécule amplifie l'action du GABA quelle qu'elle soit).

En outre, l'accumulation de chlore est due à deux effets : au fil des crises, le transporteur KCC2, un canal exportateur de chlore, fonctionne moins bien, tandis que NKCC1, un transporteur importateur de chlore, fonctionne toujours. L'action inhibitrice du GABA (et donc le rôle premier du phénobarbital) pourrait ainsi être renforcée soit en protégeant KCC2, soit en diminuant l'activité de NKCC1. Si la première piste est en friche, la seconde est déjà prometteuse : des diurétiques agissent en bloquant les transporteurs NKCC1 des reins. Prescrits précocement avec le phénobarbital, ils pourraient préserver son action et empêcher l'aggravation des crises.

→ Marie-Neige Cordonnier

R. Nardou et al., *Brain*, en ligne, 24 mars 2011



Mathématiques

Le prix Abel 2011 attribué à John Milnor

Le prix Abel, de l'Académie norvégienne des sciences et des lettres, récompense chaque année depuis 2003 un mathématicien. Il se veut l'équivalent du prix Nobel pour les mathématiques (les médailles Fields, décernées tous les quatre ans, sont réservées à des mathématiciens âgés de moins de 40 ans). Cette année, c'est l'Américain John Milnor, de l'Université de Stony Brook, qui est distingué pour « ses découvertes pionnières en topologie, géométrie et algèbre ».

Beaucoup de ses travaux concernent la topologie et la géométrie des « variétés ». Une variété de dimension n est un objet mathématique qui, au voisinage de chaque point, peut être assimilé à un espace euclidien de dimension n (espace noté $\mathbb{R}^n$). Ainsi, une surface ordinaire constitue une variété de dimension deux, plongée dans l'espace de dimension trois. Mais on peut aussi concevoir des variétés de dimension 2, 3 ou n sans qu'il y ait un espace de dimension supérieure où la variété est plongée. Une variété fondamentale est la sphère de dimension n ; par exemple, la sphère unité de dimension trois est l'ensemble des points de coordonnées

(x_1, x_2, x_3, x_4) vérifiant $x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 = 1$; il n'y a que trois coordonnées indépendantes, et c'est pourquoi la dimension de la variété est trois.

En 1956, en étudiant la sphère de dimension sept, J. Milnor a découvert un objet mathématique exotique : une variété qui est homéomorphe à la sphère de dimension sept, mais qui ne lui est pas difféomorphe, situation inexistante en dimension inférieure et qui était très inattendue. En termes moins techniques, cela signifie que cette variété peut être transformée continûment (sans déchirures) en une sphère, mais que la transformation comporte nécessairement des changements brutaux (la transformation n'est pas différentiable).

« La découverte de J. Milnor a ouvert un nouveau chapitre des mathématiques, la topologie différentielle en grande dimension », souligne Valentin Poenaru, mathématicien de l'Université Paris-Sud et spécialiste du domaine. Depuis, J. Milnor a montré avec le mathématicien français Michel Kervaire (décédé en 2007) que la sphère de dimension sept a 28 structures différentiables distinctes, que ce nombre est égal à 2 en dimension huit, à 8 en dimension neuf, à 6 en dimension dix, à 992 en dimension 11, etc. Cette suite de nombres est reliée à d'autres phénomènes topologiques ainsi qu'à certains domaines de la théorie des nombres.

Ces travaux et bien d'autres, qui portent sur la topologie algébrique (propriétés de la sphère, des nœuds...), sur l'algèbre (rythme de croissance d'un groupe engendré par concaténation d'un nombre fini d'éléments), sur la dynamique holomorphe (étude de l'itération d'applications définies sur les nombres complexes), etc., font de J. Milnor l'un des grands mathématiciens du XX^e siècle.

→ M. M.

<http://www.abelprisen.no/en/prisvinnere/2011>



John Willard Milnor est âgé de 80 ans. Une médaille Fields lui a été décernée en 1962.



Ligue
Européenne
Contre la
Maladie d'Alzheimer



APPEL A CANDIDATURE POUR DES BOURSES POUR LA RECHERCHE BIOMEDICALE ET CLINIQUE FONDAMENTALE SUR LA MALADIE D'ALZHEIMER

La Ligue Européenne Contre la Maladie d'Alzheimer (LECMA) octroie des bourses pour la recherche scientifique sur la maladie d'Alzheimer destinées aux scientifiques d'institutions et universités françaises.

Les demandes de **bourse standard** sont acceptées à concurrence de 80 000 € pour deux ans avec un maximum de 40 000 € par an.

Les demandes de **bourse pour des projets pilotes** par de jeunes chercheurs sont acceptées à concurrence de 40 000 € pour deux ans avec un maximum de 20 000 € par an. Seuls les chercheurs avec une thèse de Sciences achevée au plus tard en novembre 2011 et ayant un maximum de 6 ans d'expérience en recherche scientifique sont éligibles.

Les candidatures pour des projets franco-allemands et franco-hollandais peuvent être déposées par des chercheurs en France, en Allemagne ou aux Pays-Bas. La valeur ajoutée de ces projets coopératifs doit être significative dans le domaine de recherche proposé. Les dossiers de candidature peuvent être envoyés à LECMA ou aux associations partenaires allemande ou hollandaise.

Les subventions accordées seront mises à disposition à partir de novembre 2011.

La date limite d'envoi des lettres d'intention est le **14 mars 2011**. Elles doivent être rédigées en anglais et envoyées à : e.wiese@alzheimer-research.eu.

Un original et une copie doivent être envoyés à : Ligue Européenne Contre la Maladie d'Alzheimer 94 rue La Fayette, 75010 Paris.

Des informations complémentaires et le formulaire de lettre d'intention sont accessibles sur :

www.maladiealzheimer.fr

Pour toute question, merci de contacter le Dr Ellen Wiese, PhD (coordinatrice scientifique internationale) au :

+ 49-211-86-20-66-21

ou par email :

e.wiese@alzheimer-research.eu

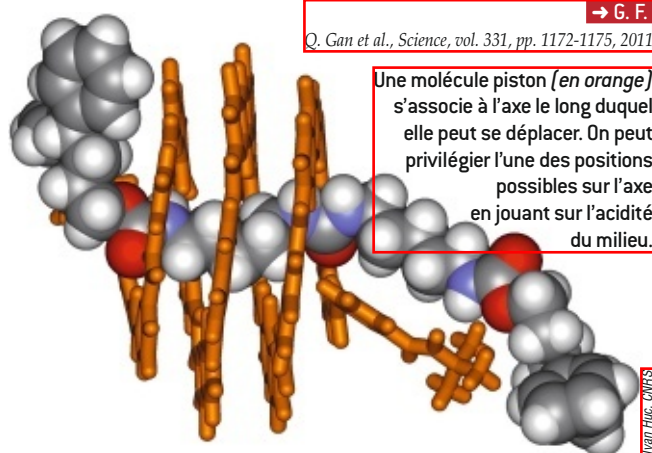
Depuis sa création en 2005, LECMA a financé 21 programmes de recherche pour un montant total de plus de 1,2 million d'euros.

Nanosciences

Un piston lilliputien

Un moteur peut transformer l'énergie chimique en énergie mécanique. L'équipe d'Ivan Huc, à l'Université de Bordeaux, et ses collègues chinois ont créé sur ce principe un piston moléculaire. Une molécule en forme d'hélice s'enroule autour d'un axe, une chaîne carbonée portant des atomes d'azote et dont les extrémités volumineuses bloquent la molécule hélicoïdale – le piston. Le couple, consolidé par des liaisons hydrogène, s'assemble spontanément dans les conditions expérimentales mises au point par ces chimistes. Le moteur assemblé, encore fallait-il l'actionner, ce qui a été obtenu en modifiant l'acidité du milieu. L'axe porte deux régions où le piston peut s'ancrer grâce à des liaisons hydrogène. Quand le milieu devient plus acide, une position acquiert une charge positive : le piston ne peut plus s'y fixer et se déplace vers l'autre site, neutre, distant d'environ un nanomètre (le moteur moléculaire mesure environ trois nanomètres). On peut imaginer des applications pour ce système : mis en série, ces moteurs se comprimeraient simultanément, offrant un équivalent de la contraction musculaire.

→ G. F.

Q. Gan et al., *Science*, vol. 331, pp. 1172-1175, 2011

Chimie

Manuscrits et oxygène

Utilisées du Moyen Âge au début du XX^e siècle pour l'écriture, les encres ferrogalliques altèrent le papier, qui devient brun et cassant au fil du temps : ses fibres de cellulose se rompent. Des chimistes du Centre de recherche sur la conservation des collections (MNHN/CNRS/MCC), à Paris, et de l'Université d'Anvers se sont interrogés sur la cause de cette dégradation. Est-elle due à l'hydrolyse de la cellulose, favorisée par l'humidité et l'acidité de l'encre, ou à son oxydation, provoquée par l'oxygène ambiant et exacerbée par la présence d'ions ferreux (Fe^{2+}) dans l'encre ?

En mesurant le degré de polymérisation de la cellulose – un indicateur de la longueur moyenne des molécules – sur des papiers modèles placés sous diverses conditions d'humidité et d'oxygénation, les chercheurs ont montré que la dégradation est seulement corrélée à la présence d'oxygène : les molécules de cellulose sont moins coupées quand la teneur en oxygène est inférieure à 0,1 pour cent. Reste à préciser le seuil d'oxygène au-dessous duquel la dégradation du papier peut être stoppée.

→ M.-N. C.

V. Rouchon et al., *Analytical Chemistry*, vol. 83 (7), pp. 2589-2597, 2011

Biophysique

Modéliser le fonctionnement d'une cellule

Et si les lois qui gouvernent les mécanismes cellulaires étaient plus simples qu'on ne le pensait ? Pourrait-on décrire le fonctionnement d'une cellule vivante en utilisant des lois de la physique ne faisant intervenir que des grandeurs électromagnétiques ? Ce pari repose sur le fait que la plupart des mécanismes à l'œuvre dans une cellule font intervenir des échanges de particules chargées. L'hypothèse a été discutée lors d'une rencontre tenue en mars 2011 à l'École polytechnique, à l'instigation de Laurent Schwartz, cancérologue à l'Hôpital universitaire Pitié-Salpêtrière.

Un pas dans cette voie a en effet été franchi par son équipe, qui associe mathématiciens, biologistes, biophysiciens et médecins. Elle a conçu un nouveau modèle électrophysiologique des cellules eucaryotes, c'est-à-dire celles dotées d'un noyau. Un système d'équations différentielles y décrit les relations entre le potentiel transmembranaire (la différence de potentiel électrique qui règne de part et d'autre de la membrane cellulaire), les flux d'ions à travers cette membrane et le volume de la cellule.

C'est la première fois qu'un modèle rend compte des interactions de ces trois grandeurs, qui jouent un rôle important dans la vie cellulaire. Il va au-delà de modèles précédents qui considé-

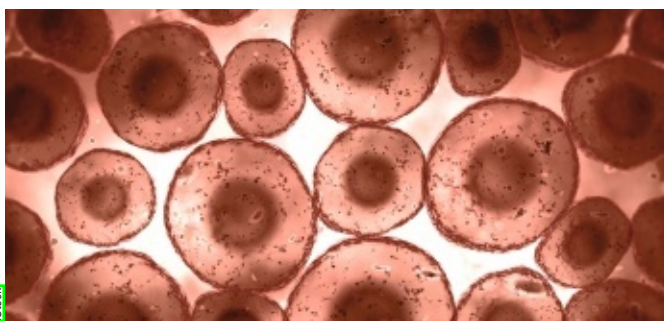
raient soit que le volume cellulaire était constant, soit que la régulation osmotique (ajustement de la concentration d'ions à l'intérieur de la cellule en fonction de la concentration extérieure) s'effectuait instantanément.

Mais le nouveau modèle fait encore mieux : il décrit l'évolution au cours du temps (de quelques secondes à quelques minutes) du volume d'une cellule après un choc osmotique (changement brusque de la différence de concentration des ions de part et d'autre de la membrane cellulaire), ce dont aucun modèle n'était capable jusqu'à présent. Les résultats ont été validés sur des cellules animales cultivées *in vitro*. « Les prévisions du modèle sur l'évolution de la taille de la cellule, qui se stabilise en quelques minutes, sont en parfait accord avec les observations », précise en outre Clair Poinard, de l'INRIA Bordeaux-Sud-Ouest, l'un des deux mathématiciens et informaticiens de l'équipe.

Certes, le modèle reste rudimentaire : il n'intègre qu'une petite partie des mécanismes cellulaires. Mais si l'intérêt de cette voie de recherche se confirmait, on pourrait modéliser de façon bien plus simple le fonctionnement de la cellule, par exemple la division cellulaire, fait remarquer L. Schwartz.

→ Danielle Duran

European Biophysics Journal, vol. 40(3), pp. 235-246, mars 2011



Un modèle simple rend compte de la variation du volume d'une cellule en fonction du potentiel électrique et des flux d'ions à travers la membrane.



Vous recherchez pour votre enfant des vacances originales, enrichissantes et sûres ? Des "colonies de vacances" vraiment différentes, sur une multitude de thèmes passionnants ? Ou des séjours linguistiques efficaces et ludiques ? Ou encore des séjours sportifs à teneur garantie en imaginaire et en découverte ? Votre solution a un nom : Telligo, leader des vacances à thèmes pour les 4-18 ans...

Nos 3 points forts

1. Des contenus enrichissants

Tous nos séjours – qu'ils soient scientifiques, artistiques, sportifs, linguistiques... – sont construits autour de sujets passionnants. Si vous recherchez pour votre enfant des vacances intelligentes avec des jeunes qui lui ressemblent, vous aurez l'embarras du choix parmi nos 122 thèmes différents (dont 22 nouveautés), proposés à près de 350 dates, dans 20 pays différents répartis sur tous les continents.

2. Tous les ingrédients des vacances

L'après-midi est – le plus souvent – consacré à la détente. Le grand jeu de milieu de séjour permet aux animateurs de dévoiler tous les talents, et aux enfants de lâcher la bride à leur imaginaire. Enfin, chaque soir, une veillée toujours différente ponctue la journée. C'est cet équilibre subtil entre détente et ateliers qui fait des séjours Telligo de vraies vacances !

3. Objectif : votre tranquillité d'esprit

Un taux d'encadrement d'1 animateur pour 5 à 8 jeunes selon l'âge et la gamme de séjours, des procédures très rigoureuses (notamment en matière d'activités sportives, de recrutement, d'hygiène de vie...), des nouvelles quotidiennes sur le web (sauf sur les séjours "Primo" et certains séjours à l'étranger), etc. : notre Charte de qualité et de sécurité garantissent la fiabilité de nos prestations. Nous vous garantissons aussi des tarifs, fermes et définitifs, même, pour les séjours à l'étranger, en cas de variation du cours des devises ou de hausse des taxes d'aéroport.

3 moyens pour recevoir nos catalogues :

- Tél. : 01 46 12 18 50 (lun.-ven. de 9h à 18h30, sam. de 9h à 13h)
- WEB : www.telligo.fr

- Renvoyez le coupon ci-contre (ou recopiez-le) à :

Telligo - 1 rue de l'Égalité 92227 BAGNEUX CEDEX

Telligo - SAS au capital de 1 440 000 €
RCS Nanterre 522 047 893 - APE : 7911Z
Immatriculation N° 104092700063 auprès du Régistre
des Opérateurs de Voyages et de Séjours
Assurance RC professionnelle HSCOX N°75 833

Je souhaite recevoir le catalogue des séjours été et Toussaint 2009

Nom : Prénom :
Adresse :
CP : Ville :
Année(s) de naissance du
(ou des) jeunes (s) :

PLS411

Continuer à la bibliothèque et à la page 1038 pour déposer du matériel. Le scellé et la suppression de données sont
interdits. Vous pouvez éventuellement : Telligo - 1 rue de l'Égalité - 92227 BAGNEUX CEDEX

En bref

NOCIFS AUSSI, LES UV A

Des chimistes français ont montré que les rayons ultraviolets de type A excitent la molécule d'ADN et favorisent ainsi la formation de liaisons chimiques entre certaines bases de l'ADN, notamment quand celui-ci est sous forme de double hélice. Des mutations dans le génome – porté par l'ADN – en découleraient, ce qui pourrait provoquer des cancers, notamment de la peau si celle-ci est trop exposée au soleil. On en conclut que pour les gènes, les ultraviolets A seraient aussi nocifs que les ultraviolets B.

PRÉHISTOIRE INDIENNE

L'homme est présent en Inde du Sud depuis au moins 1,07 million d'années. C'est ce qui ressort des travaux d'une équipe franco-indienne. Sur le site d'Attirampakkam, cette dernière a mis au jour 3 528 outils de quartzite taillés selon la technique acheuléenne, et les a datés en analysant le paléomagnétisme et la composition isotopique. Caractérisée par des haches bifaces et des hachereaux, la taille acheuléenne s'est développée en Afrique il y a 1,7 million d'années, puis diffusée en Europe et en Asie.

Astrophysique

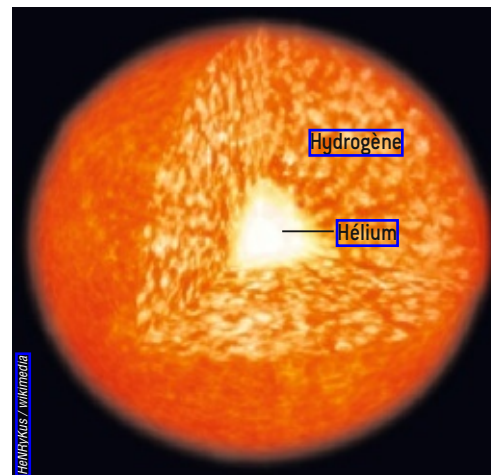
Le cœur des géantes rouges dévoilé

Dis-moi comment tu vibres, je te dirai ce que tu brûles. En observant les vibrations de la surface d'étoiles géantes rouges, les astrophysiciens de la collaboration KASC (*Kepler Asteroseismic Science Consortium*) ont sondé pour la première fois leur cœur, et montré que la signature sismique permet de distinguer celles qui brûlent uniquement de l'hydrogène de celles brûlant aussi de l'hélium.

Après avoir épuisé l'hydrogène dans leur cœur, les étoiles commencent en effet à brûler celui des couches plus externes, ce qui dilate l'étoile : elle devient une géante rouge. Par la suite, l'hélium peut entrer en fusion dans le cœur. Cependant, l'aspect de l'étoile reste inchangé. Comment distinguer les deux phases ? Grâce à l'« astérosismologie ».

Les étoiles sont parcourues d'ondes sismiques. Parmi elles, des modes de vibration dits mixtes couplent une composante qui se propage dans les régions internes et nous renseigne sur la structure profonde de l'étoile (mode G), et une composante décelable en surface (mode P).

Les scientifiques ont réussi à distinguer ces modes mixtes dans les spectres d'oscillation de près de 400 géantes rouges observées par le satellite *Kepler*. Deux groupes d'étoiles sont apparus : dans le premier, les écarts entre les périodes des modes mixtes successifs sont de 50 à 60 secondes, tandis que le



Vue d'artiste de la structure d'une géante rouge, où la fusion nucléaire de l'hélium est amorcée dans le cœur, tandis que l'hydrogène brûle dans des couches plus externes.

second est caractérisé par des périodes espacées de 100 à 300 secondes.

Les espacements des modes mixtes reflétant partiellement la structure profonde, cela implique l'existence de deux types de cœurs stellaires différents. D'après les modèles, les étoiles à courte séparation des périodes brûleraient de l'hydrogène dans des couches extérieures, tandis que les étoiles avec une longue séparation de périodes seraient à un stade plus avancé, où la fusion de l'hélium s'est amorcée dans le cœur.

→ Philippe Ribeau-Gésippe

T. R. Bedding et al., *Nature*, vol. 471, pp. 608–611, 2011

Biomédecine

Cellules grasses et cancer du sein

Le cancer du sein frappe plus d'une femme sur 1 000 chaque année. On a récemment montré que dans ce cancer, l'obésité augmentait les risques de dissémination des cellules cancéreuses. Pourquoi ? Les équipes de Catherine Muller et de Philippe Valet, à l'Université Paul Sabatier de Toulouse, ont montré que les cellules grasses (ou adipocytes) proches des tumeurs favorisent la dissémination de ces dernières, donc la formation de métastases.

Le cancer du sein naît dans les « lobes » du sein entourés de cellules grasses. Les biologistes ont mis en culture, au laboratoire,

des cellules tumorales avec des adipocytes et ils ont montré que les cellules cancéreuses ont des caractéristiques invasives en présence des adipocytes. Dans ces conditions, les adipocytes ont un aspect particulier et sécrètent notamment des facteurs pro-inflammatoires, telle l'interleukine 6. D'ailleurs, *in vitro*, cette molécule seule suffit à rendre métastatiques les cellules cancéreuses.

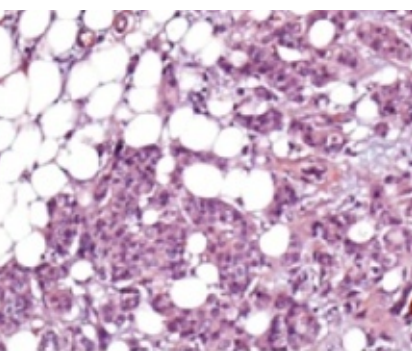
Chez la femme, les biologistes ont montré que ces adipocytes particuliers se retrouvent aussi autour de la tumeur. Et pour les patientes ayant les plus grosses tumeurs et des métastases, les quantités d'interleukine 6 expri-

mées par les adipocytes sont plus importantes.

Ainsi, les adipocytes acquièrent des caractéristiques spécifiques à proximité d'une tumeur mammaire et favorisent sa dissémination. Or la quantité de cellules grasses autour des lobes du sein dépend de facteurs génétiques et de la corpulence de la femme... Bien que l'on ignore les déterminants du « dialogue » entre les adipocytes et les cellules cancéreuses, il semble clair que la masse grasse augmente le risque de dissémination du cancer.

→ Bénédicte Salthun-Lassalle

B. Dirat et al., *Cancer Research*, 1^{er} avril 2011



Les cellules grasses (taches blanches) à proximité de cellules cancéreuses (en mauve) présentent des caractéristiques particulières.

OBSERVATOIRE DE PARIS

FORMATIONS EN ASTRONOMIE ET ASTROPHYSIQUE



L'Observatoire de Paris propose aux étudiants, aux amateurs d'astronomie, professeurs des écoles, collèges et lycées, différentes formations en Astronomie et Astrophysique.

MASTER À L'OBSERVATOIRE

SCIENCES DE L'UNIVERS ET TECHNOLOGIES SPATIALES

<http://master.obspm.fr/>
contact.master@obspm.fr

L'Observatoire de Paris propose un master spécialisé dans les Sciences de l'Univers et les Technologies Spatiales pour préparer aux métiers de la recherche et de l'ingénierie dans le domaine de l'astrophysique. Formations aux outils et techniques de pointe du spatial, en partenariat avec des universités d'Ile de France



ASTRONOMIE POUR LES ENSEIGNANTS

<http://formation-professeurs.obspm.fr/>

Travaux pratiques, enseignements théoriques pour les enseignants. Observations. Formations aux technologies de l'informatique et de l'Internet pour l'enseignement de l'astrophysique.

contact.formation-professeurs@obspm.fr

PARRAINAGES

<http://parrainages.obspm.fr/>

Professeurs des écoles, collèges et lycées, demandez un «parrain» ou une «marraine» astronome de l'Observatoire pour vous conseiller et participer à votre projet concernant l'astronomie.

contact.parrainages@obspm.fr

RENSEIGNEMENTS - INSCRIPTIONS

► <http://ufe.obspm.fr/>

DIPLÔMES D'UNIVERSITÉ À DISTANCE

<http://foad.obspm.fr/>

Formations à distance, sur **Internet**. Diplôme d'Université ou ECTS. Tutorat assuré par des astronomes de l'Observatoire.

«Astronomie et Mécanique Céleste»

Public et étudiants scientifiques.

Niveau Licence (L1)

Du Big Bang aux planètes - Mécanique Céleste, Temps et

Calendriers - Phénomènes Soleil, Terre, Lune -

Le Soleil - Histoire de l'Astronomie.

contact.amc@obspm.fr

«Fenêtres sur l'Univers»

Public et étudiants scientifiques.

Niveau Licence ou Master (L2, L3, M1) selon les parcours choisis.

Mesure de distance et de masse - Instrumentation - Chaîne de mesure et projets.

contact.fsu@obspm.fr

DIPLÔMES D'UNIVERSITÉ EN PRÉSENTIEL

<http://duop.obspm.fr/>

Diplôme d'Université ou ECTS. Cours magistraux, conférences, travaux dirigés et observations, assurés par des astronomes de l'Observatoire.

«Explorer et Comprendre l'Univers»

Public et étudiants scientifiques.

Niveau Licence (L1)

Cours magistraux le mardi de 17h à 20h à l'Observatoire de Paris

et stages pratiques : une semaine à l'Observatoire de Meudon et

une semaine à l'Observatoire de Haute-Provence. Accès sur le site de la formation aux vidéos des cours filmés.

«Structuration de l'Univers»

Exposés et préparation d'un mémoire.

contact.duop@obspm.fr



UNITÉ FORMATION ET ENSEIGNEMENT

OBSERVATOIRE DE PARIS - 5 PLACE JULES JANSEN - 92195 MEUDON

Astrophysique

Une étoile à 100 °C

La température des étoiles les plus froides est d'environ 3 000 °C. Mais les naines brunes, étoiles trop petites pour que la fusion nucléaire se maintienne dans leur cœur, sont beaucoup plus froides : quelques centaines à quelques milliers de degrés.

Philippe Delorme, de l'Institut de planétologie et d'astrophysique de Grenoble, et ses collègues viennent de découvrir la naine brune la plus froide : sa température est d'environ 100 °C, ce qui en fait l'objet le plus froid hors du Système solaire. L'astre est en orbite autour d'une autre naine brune, découverte en 2010 par la même équipe. Le couple est situé à 75 années-lumière. Cette température place l'astre à la frontière entre les petites étoiles froides et les planètes géantes et chaudes : les seules exoplanètes dont on a pu étudier l'atmosphère sont très chaudes (1 000 à 2 000 °C). À l'opposé, Jupiter et Saturne affichent une température de -150 °C et -190 °C respectivement. Les naines brunes sont à l'heure actuelle les seuls objets observables de température intermédiaire.

→ Ph. R.-G.

M. C. Liu et al., *Astrophysical Journal*, 23 mars 2011

Biologie animale

Tortues à GPS magnétique

Avant l'invention des GPS actuels, on déterminait la latitude grâce aux étoiles, mais la longitude a été un problème jusqu'à l'invention de chronomètres performants, à la fin du XVIII^e siècle. Qu'en est-il des animaux migrateurs ? Plusieurs espèces obtiennent des indications sur leur latitude lors de leurs pérégrinations, mais on pensait la longitude hors de portée du monde animal. Ce n'est pas le cas : Nathan Putman, de l'Université de Caroline du Nord, et ses collègues ont montré que la tortue caouanne (*Caretta caretta*) perçoit la longitude. Des tortues fraîchement écloses, en Floride, ont été placées dans des bassins où étaient reproduites les conditions magnétiques de deux zones (Porto Rico et le cap Vert), situées sur leur route migratoire à travers l'océan Atlantique, à la même latitude (20° Nord), mais à des longitudes différentes. Les premières ont nagé vers le Nord-Est, les secondes vers le Sud-Est, conformément au sens de leur migration. Elles se localiseraient grâce à l'intensité, mais aussi à l'inclinaison du champ magnétique.

→ L. M.

Current Biology, vol. 21, pp. 463-466, 2011

Chimie

Synthèse de molécules *cis*

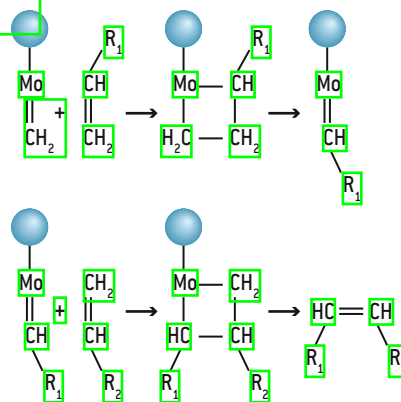
Au sein des molécules organiques, les atomes de carbone sont assemblés par des liaisons dites simples ou multiples. En 2005, Yves Chauvin, Robert Grubbs et Richard Schrock ont reçu le prix Nobel pour avoir mis au point la métathèse d'oléfines, une voie de synthèse où des liaisons doubles s'échangent et créent de nouvelles molécules. L'équipe de Amir Hoveyda, de l'Université de Boston, en collaboration avec R. Schrock, améliore encore la méthode : elle parvient à orienter la métathèse vers une seule des deux conformations, *cis* ou *trans*, que peut prendre la molécule synthétisée.

Chaque atome de carbone d'une liaison double porte deux groupes. Les groupes les plus volumineux peuvent se situer soit de part et d'autre de la liaison double (c'est la forme *trans*), soit du même côté (forme *cis*). Dans la conformation *cis*, ils sont plus proches : en raison de l'encombrement, cette forme est moins stable, donc moins facile à obtenir que la forme *trans*.

La métathèse d'oléfines est une réaction catalytique où l'atome central du catalyseur est en général un atome de ruthénium ou de molybdène (voir la figure). La voie mise au point par les chimistes américains permet de synthétiser la forme *cis* préférentiellement, grâce à un catalyseur original, où

l'atome de molybdène est lié à un atome d'oxygène qui porte un groupe volumineux. Ce dernier repousse les groupes liés aux oléfines du même côté de la double liaison formée par recombinaison des deux oléfines. On obtient la conformation *cis* dans plus de 90 pour cent des cas, avec un bon rendement. Cette métathèse sélective a permis de simplifier la synthèse de la forme *cis* d'un antitumoral, dont l'efficacité biologique est supérieure à celle de la forme *trans*.

→ G. F.

S. Meek et al., *Nature*, vol. 471, pp. 461-466, 2011

Lors d'une métathèse d'oléfines, l'atome de molybdène du catalyseur se lie tout d'abord à une première oléfine (portant un groupe noté R₁), puis à une seconde (groupe noté R₂). Une troisième oléfine portant les deux groupes R₁ et R₂ se forme. Le groupe volumineux (en bleu) permet d'orienter la réaction vers la forme *cis*.

DERNIÈRE minute ...

VIH ET SÉCRÉTIONS GÉNITALES

La concentration de virus du sida dans les sécrétions génitales (sperme chez l'homme, sécrétions au niveau du col de l'utérus chez la femme) d'un individu mesure-t-elle le risque de transmission du VIH à une autre personne ? Cette présumption a été confirmée par une étude internationale portant sur 2 500 couples africains hétérosexuels, dont l'un des partenaires

était séropositif et pas l'autre, après examen des 78 cas de transmission constatés en deux ans.

HOLOGRAMMES MULTICOLORES ET STABLES

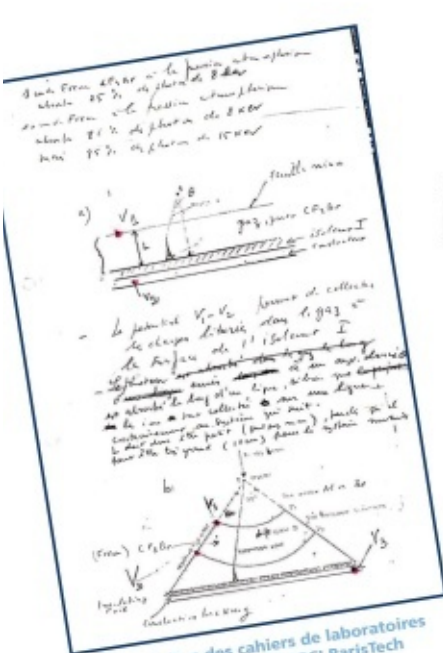
Satoshi Kawata et ses collègues, au Japon, ont réalisé des hologrammes en couleurs vus en lumière blanche ordinaire et fondés sur une nouvelle technique, mettant à profit les plasmons (excitations électroniques se propageant

à la surface d'un film métallique). Le grand intérêt de cette innovation est que les couleurs ne changent pas en fonction de l'angle de vue, contrairement aux hologrammes colorés existants, tels ceux de nos cartes bancaires.



Retrouvez plus d'actualités et toutes les références sur

www.pourlascience.fr



Une page d'un des cahiers de laboratoires de Georges Charpak à l'ESPCI ParisTech
© J. Lewiner/ESPCI ParisTech.

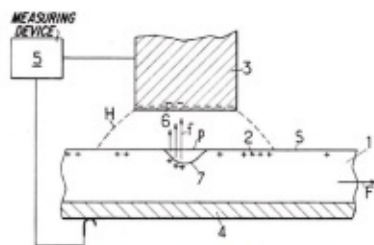


Schéma extrait du brevet international n°4,553,089 déposé par Jacques Lewiner et Georges Charpak (date de priorité : 17 mars 1982) décrivant des dispositifs permettant de mesurer localement les charges dans les diélectriques (à des fins d'imagerie par radiation, par exemple).
© ESPCI ParisTech



Georges Charpak à l'ESPCI ParisTech le 22 octobre 1992, quelques jours après l'annonce de son prix Nobel.
© D. Morisseau/ESPCI ParisTech

Georges Charpak et l'ESPCI ParisTech

Une rencontre prolifique et exemplaire

Georges Charpak (1924 - 2010) a trouvé à l'ESPCI ParisTech un environnement unique qui lui a permis de transformer avec brio ses inventions pionnières en applications révolutionnaires, en particulier dans le domaine biomédical.

Dès 1980, Georges Charpak rejoint en tant que Professeur associé le laboratoire d'Électricité générale dirigé par Jacques Lewiner. Sur ce terrain fertile, où l'innovation se cultive avec passion, le physicien développe les applications des chambres à fils qu'il avait mises au point au CERN. Il en démontre lui-même la portée concrète et captera ainsi l'attention du Comité Nobel. Au laboratoire d'Électricité générale, Georges Charpak déploie une activité prolifique et variée, à la fois en recherche (avec des publications multiples et régulières), en enseignement (dans le cadre du DEA d'électronique et sous forme de conférences passionnées pour les élèves-ingénieurs), dans le domaine de l'innovation (succession de brevets pris avec des chercheurs du laboratoire) et de la création d'entreprises (co-fondation de *Molecular Engines Laboratories*, *Biospace Instruments* (aujourd'hui *EOS Imaging*) et *Supersonic Imagine*).

Georges Charpak était un scientifique exceptionnel : contributeur à part entière de ses inventions géniales, il est le dernier physicien à recevoir un prix Nobel en son nom seul. Authentique pionnier, artisan véritable de ses prototypes, il se faisait le champion de la démarche expérimentale, passerelle indispensable entre la science fondamentale et les applications industrielles. Aussi Georges Charpak restera-t-il une figure emblématique de la pédagogie originale et de la culture scientifique de l'ESPCI ParisTech, et continuera à inspirer des générations d'étudiants et de chercheurs, par son panache et par l'exemple de son immense créativité scientifique.



L'École supérieure de physique et de chimie industrielles de la Ville de Paris est à la fois une Grande École d'ingénieurs originale, un centre de recherche de renommée internationale et un moteur d'innovations pour l'industrie. Fondée en 1882 par le Conseil municipal de Paris, l'ESPCI ParisTech attire depuis plus d'un siècle les plus grands esprits scientifiques novateurs : Pierre & Marie Curie, Paul Langevin, Frédéric Joliot-Curie, Pierre-Gilles de Gennes et Georges Charpak sont autant de noms illustres qui contribuent à la réputation de l'École, en France comme à l'international. Aujourd'hui, l'ESPCI ParisTech est membre fondateur de ParisTech et de Paris Sciences et Lettres.

Retour sur des sujets déjà traités dans nos colonnes

→ LES PALÉO-INDIENS D'ALASKA

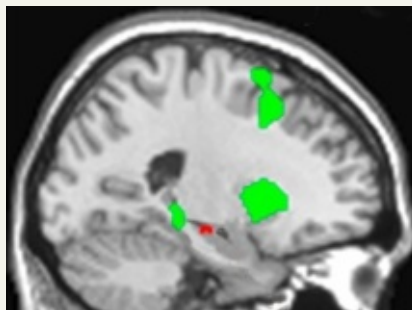
Les premiers hommes auraient foulé le sol américain il y a plus de 20 000 ans; les outils découverts en différents endroits, du Canada jusqu'en Amérique centrale, se ressemblent et les archéologues pensent qu'il y aurait eu une colonisation unique et une culture commune, qu'ils ont nommée Clovis (voir *Les premiers Américains*, *Pour la Science*, novembre 2000). Toutefois, cette hypothèse semble remise en cause par la découverte d'un site de crémation d'un enfant, dans les vestiges d'un foyer vieux de 11 500 ans et situé au centre de l'Alaska, à Upper Sun River (*Science*, février 2011). Les outils en pierre, l'habitation et les restes d'animaux ressemblent davantage à ceux découverts en Sibérie qu'à ceux de la culture Clovis, d'où la nouvelle hypothèse d'une origine plus diversifiée. En outre, ce site semble avoir été saisonnier et utilisé en été, contrairement aux campements temporaires et aux autres sites spécialisés de la culture Clovis. Les habitants se nourrissaient de poissons, d'oiseaux et de petits mammifères et l'enfant âgé de trois ans aurait été brûlé dans une fosse au centre de l'habitation (probablement après sa mort).

→ APPRENDRE EN DORMANT

Le sommeil participe-t-il à la mémoire? Oui, comme le confirme une étude récente de Géraldine Rauchs et de ses collègues, de l'INSERM à Caen et de l'Université de Liège. On savait que le sommeil est réparateur: quand le métabolisme ralentit, les cellules et les minuscules lésions cérébrales sont réparées (voir *Les clés du sommeil*, *Pour la Science*, janvier 2004, <http://bit.ly/plsoer315>). Depuis quelques années, les scientifiques s'accordent en outre sur le fait que le sommeil joue un rôle dans la mémorisation. Mais le sommeil consolide-t-il tout ce qui est perçu dans la journée ou effectue-t-il un tri? Les chercheurs ont demandé à 26 personnes âgées de 23 à 27 ans de retenir des mots, tandis

→ LA FUSION CRÉE DE NOUVELLES PROTÉINES

Au cours de l'évolution, certaines espèces divergent, d'autres convergent par des mécanismes dits de fusion. Le transfert de gènes entre deux espèces différentes est l'un des mécanismes d'évolution par fusion (voir *L'évolution par fusion*, *Pour la Science*, février 2011, <http://bit.ly/plsoer400>). Il est fréquent chez les bactéries et les procaryotes, organismes unicellulaires dont le matériel génétique n'est pas enfermé dans un noyau. Ces micro-organismes changent ainsi de répertoires de protéines en échangeant des gènes avec d'autres individus d'espèces différentes. On croyait jusqu'à présent que le transfert de gènes participait pour 25 pour cent à l'apparition de nouvelles protéines – ayant une fonction ou une structure différente. Mais Todd Treangen et Eduardo Rocha, de l'Institut Pasteur à Paris, ont analysé 110 génomes et 3 190 protéines appartenant à plusieurs espèces de procaryotes (*PLoS Genetics*, janvier 2011). Ils ont montré que plus de 88 pour cent des familles de protéines étudiées avaient évolué par transfert de gènes entre organismes. Et les gènes ainsi acquis restent plus longtemps dans les populations que les nouveaux obtenus par duplication de gènes (dans ce cas, un gène d'un organisme évolue au moment où il se réplique en subissant une ou plusieurs mutations). On aurait donc sous-estimé le rôle du mécanisme de transfert de gènes dans la diversification des protéines.



L'imagerie par résonance magnétique révèle les régions cérébrales (en vert) qui s'activent davantage pour des mots à retenir que pour des mots à oublier. Et l'hippocampe (en rouge) est plus actif pour les mots qui ont été bien mémorisés chez les sujets ayant dormi.

que d'autres devaient être oubliés, tout en enregistrant par imagerie par résonance magnétique fonctionnelle l'activité de leur cerveau. La moitié seulement des sujets a dormi après l'expérience, les autres ont été empêchés de dormir pendant la nuit, et les neuroscientifiques ont revu tous les participants trois jours plus tard pour tester leur mémoire (*Journal of Neuroscience*, février 2011). Résultats: l'hippocampe, une région du lobe temporal impliquée dans la mémoire, est plus actif pour les mots qu'il faut retenir. Et il s'active aussi davantage pour les mots mémorisés. En outre, cette activation est plus importante quand

les sujets ont dormi: pour les participants privés de sommeil, le tri se fait moins bien et ils mémorisent plus de mots censés être oubliés. En d'autres termes, plus l'hippocampe est activé pendant l'apprentissage, meilleure sera la mémorisation pendant le sommeil.

→ NETTOYER L'ESPACE

Les débris spatiaux (satellites en fin de vie, étage supérieur des lanceurs, etc.) sont de plus en plus nombreux (voir *Les débris spatiaux*, *Pour la Science*, juillet 2008, <http://bit.ly/plsoer369>). On envisage plusieurs stratégies pour les éliminer, notamment l'ajout de câbles qui freinent l'objet et lui font quitter son orbite. Mais pour accrocher un tel câble sur le débris (dont on ignore la masse), il faut s'en approcher et bloquer sa rotation éventuelle. Deux chercheurs japonais viennent de mettre au point et de tester en laboratoire un algorithme et un bras robotique équipé d'une brosse, qui freinent la rotation propre du débris. Ce dernier est ainsi stabilisé et l'on peut y accrocher le câble de « désorbitation » (*Acta Astronautica*, février 2011).

→ Bénédicte Salthun-Lassalle



SCIENCES SUR SEINE

2011

Jeudi 5 mai à 19h
Débat « Parlons-en! » :
*Lascaux, Versailles,
 Pompéi... :
 peut-on sauvegarder
 notre patrimoine ?*
 Musée du Quai Branly,
 7^e arr. / CNRS

Du 17 au 22 mai
**Les 117 heures
 de la chimie**
*Ateliers, expériences,
 conférences, théâtre...*
 Université Pierre
 et Marie Curie, 5^e arr.

Du 26 au 29 mai
**12^e Salon des Jeux
 mathématiques :**
« Maths et Chimie »
*Quatre jours d'intenses
 activités ludiques !*
 Campus de l'Université
 Pierre et Marie Curie,
 5^e arr. / Comité international
 des Jeux mathématiques

**Samedi 28 mai
 de 21h à minuit**
Nuit du film scientifique
Projections en plein air
 Parvis de l'Hôtel de Ville,
 4^e arr. / Association Science
 et Télévision

**Mercredi 15 juin
 de 21h30 à minuit**
**Soirée d'observation
 de l'éclipse de Lune**
 Parvis du Sacré Cœur,
 18^e arr. / Association
 française d'Astronomie

**Tous les week-ends
 du 4 au 26 juin**
Promenades scientifiques :
*Géologie, astronomie,
 histoire des sciences
 à Paris*
 Dans différents
 arrondissements de Paris
 / Société géologique
 de France / Association
 française d'Astronomie /
 Association Parcours
 des Sciences



Samedi 18 juin
**Les 100 ans
 de la supraconductivité**
*Démonstrations, animations,
 expos, conférences...*
 Collège de France, 5^e arr.
 Société française de physique
 CNRS

...
 et bien d'autres
 manifestations gratuites
 à venir !



POINT DE VUE

Il est urgent de prévenir les troubles de l'audition chez l'adolescent

Les jeunes s'exposent souvent à des bruits « toxiques » qui altèrent leur capacité auditive. Pourtant, quelques règles de prévention simples pourraient éviter cette atteinte.

Michel MONDAIN et Frédéric VENAIL

Beaucoup d'adolescents ont sans arrêt les écouteurs de leur baladeur sur les oreilles. Non seulement cette attitude énerve les adultes qui tentent de communiquer avec eux, mais elle menace aussi leur capital « audition ». Car contrairement à ce que l'on croit souvent, les oreilles des adolescents subissent régulièrement des traumatismes. Ce que l'on ignore aussi, c'est qu'il est possible d'éviter ces troubles de l'audition.

Le son, une onde captée par le pavillon de l'oreille, est transmis par le tympan et les osselets à l'oreille interne. Cette dernière contient des cellules spécialisées, les cellules ciliées, qui transforment le son en un signal électrique transporté par le nerf auditif au cerveau. On dispose à la naissance d'un capital de plus de 19 000 cellules ciliées. Ces cellules ne se renouvellent pas et leur nombre diminue naturellement avec l'âge. Ainsi, certaines personnes âgées deviennent incapables de distinguer les paroles dans le brouhaha : elles sont atteintes de presbycusie. Ces cellules sont aussi endommagées ou détruites par certaines infections ou drogues, et surtout par les traumatismes sonores, auxquels sont souvent exposés les adolescents.

Un son intense et prolongé peut détruire les cellules ciliées, car elles sont stimulées à l'excès. Les adolescents sont de plus en plus exposés aux baladeurs, concerts ou bruits violents : en France, dix pour cent des moins de 25 ans ont une atteinte de l'oreille interne.

Or elle passe souvent inaperçue et n'est donc pas prise en charge.

Les lésions provoquées par un son dépendent de son intensité et de la durée d'exposition. Un bruit peut être traumatique dès que son intensité dépasse 85 décibels si l'exposition est prolongée (au moins deux heures). Plus le bruit est intense, plus il provoque des lésions. On sait que le seuil douloureux est à 130 décibels, mais un baladeur réglé au maximum du volume peut fournir un son de 100 décibels, soit l'équivalent du bruit d'un marteau-piqueur. Et le bruit atteint 105 déci-

cent de sa puissance maximale, fournit entre 72 et 97 décibels de bruit. Si l'écoute au casque diminue la puissance reçue par rapport à un écouteur placé dans le conduit auditif, elle engendre déjà des perturbations, certes minimales mais réelles, de l'audition. Ces troubles peuvent être mesurés par audiométrie par exemple.

Qui plus est, quand on est peu vigilant, on ne perçoit pas forcément qu'un bruit est trop intense ou traumatisant. C'est le cas si l'on est fatigué, que l'on a bu trop d'alcool ou pris d'autres substances ; or c'est un cocktail fréquent lors des soirées entre adolescents.

Lorsque l'oreille subit un traumatisme, les lésions cellulaires sont soit réversibles, soit définitives. Quoi qu'il en soit, l'adolescent présente une déficience auditive, avec une sensation d'oreilles cotonneuses. Les acouphènes, c'est-à-dire la perception d'un bruit ressemblant à un sifflement ou à un bourdonnement, sont fréquents. Plus rarement, l'adolescent peut avoir une hyperacousie douloureuse, une sensation que les sons sont trop intenses et douloureux.

L'apparition d'un ou de plusieurs de ces signes traduit une lésion de l'oreille interne. Elle impose un arrêt immédiat de l'exposition au bruit, et un repos. Si les lésions sont réversibles, tout aura disparu après une nuit de sommeil. Dans le cas contraire, un otorhinolaryngologiste (ORL) doit être consulté très rapidement. Il évalue l'ampleur

SEULE LA PRÉVENTION
permet de protéger
l'audition, et il est grand temps
d'en informer les jeunes.

bels dans les concerts ou les discothèques : c'est le bruit d'une sirène.

Par conséquent, les adolescents sont exposés à des niveaux de bruits « toxiques ». De plus, le deuxième facteur de traumatisme est la durée de l'exposition, et il faut bien reconnaître que les adolescents passent des heures à écouter leur baladeur. En outre, les sons aigus sont plus nocifs que les sons intermédiaires, eux-mêmes plus nocifs que les graves. En 2010, Hannah Keppler et ses collègues, de l'Université de Gand en Belgique, ont montré qu'un baladeur, écouté pendant une heure entre 50 et 100 pour

de l'atteinte de l'oreille interne et propose un traitement ; par exemple, les anti-inflammatoires de type corticoïdes limitent la destruction des cellules ciliées, à condition d'être pris très rapidement. Si le traitement est inefficace, l'adolescent gardera toute sa vie soit un acouphène, soit une surdité qui s'aggravera avec l'âge : il a épuisé en peu de temps son capital sensoriel. Une seule solution : informer les adolescents pour prévenir ces troubles de l'audition.

En effet, en pratique, seule la prévention est efficace. Des campagnes de prévention, organisées chaque année lors des *Journées nationales de l'audition*, mais aussi proposées sous forme de plaquettes par l'Institut national de prévention et d'éducation pour la santé, informent le public. L'arsenal législatif soutient ces actions en imposant des normes techniques pour les casques et les

écouteurs, dont le niveau de sortie ne doit pas dépasser 100 décibels.

Quelques gestes simples sont aussi à conseiller : régler le volume de sortie du baladeur en dessous de la moitié de la puissance maximale et ce, dans un endroit calme. Il est difficile de recommander aux adolescents de réduire leur « consommation » de son, du moins peut-on leur conseiller avec insistance de faire des pauses régulières.

Lors d'un concert ou d'une sortie en discothèque, il est préférable de s'éloigner des enceintes ou de porter des protections auditives, par exemple des bouchons d'oreille. Ces dispositifs permettent une bonne qualité d'écoute et ne coupent pas les basses à forte intensité – tant appréciées des adolescents. Il est aussi conseillé de sortir de temps en temps pour laisser les oreilles « se reposer » : l'Institut national de prévention

et d'éducation pour la santé recommande une pause de 30 minutes toutes les deux heures ou de 10 minutes toutes les heures. Ces conseils sont identiques lors des répétitions musicales dans des endroits clos, par exemple un garage ou une cave, où le niveau sonore est élevé. Ils le sont aussi quand on écoute la radio en voiture, avec les vitres fermées. Seule la prévention permet de protéger l'audition, et il est grand temps d'en informer les jeunes. ■

Michel MONDAIN dirige le Service d'otorhinolaryngologie du CHU de Montpellier. Frédéric VENAIL est otorhinolaryngologue à Montpellier et chercheur à l'INSERM.

Sites de la Société française ORL : www.orlfrance.org et www.sforl.org



Réagissez en direct à cet article sur www.pourlascience.fr

ÉCONOMIE

Les pollueurs ne sont pas les payeurs

Dans les sociétés par actions, ni les actionnaires ni les dirigeants ne sont responsables sur leurs propres deniers.

Ivar EKELAND

La radio m'informe ce matin que des taux de radioactivité plusieurs milliers de fois supérieurs à la normale ont été relevés au large de Fukushima, et que l'opérateur craint qu'il y ait une fuite dans le réacteur, contaminant la mer en continu.

Le problème, bien sûr, c'est qu'on ne sait pas. L'opérateur est la seule source des informations, il était aux commandes au moment de la catastrophe, et il a donc tout intérêt à minimiser celle-ci. On ignore s'il dit la vérité, toute la vérité, rien que la vérité. On ne sait même pas s'il la connaît lui-même, ou s'il s'emploie activement à la rechercher. C'est ce que les économistes appellent un problème d'aléa moral : on voudrait bien que l'opérateur

prenne toutes les mesures nécessaires pour préserver la santé des populations, mais



comme il est le seul à savoir ce qu'il fait, on est incapable de vérifier s'il le fait ou pas.

Le problème ne date pas d'hier. On fouille maintenant dans le passé, et on trouve nombre d'exemples où TEPCO, la compagnie qui gère cette centrale et bien d'autres, a rogné sur les normes de sécurité ou sur les coûts de maintenance. Qui s'en est soucié, tant qu'il ne se passait rien ? Par définition, le risque est ce qui ne s'est pas encore produit, mais qui peut se produire. Dans une situation industrielle très technique, comme une centrale nucléaire, ou une station de forage en mer, l'opérateur est le mieux placé pour apprécier le risque, mais ce n'est pas lui qui en subira les conséquences, ou du moins de manière très limitée.

TEPCO, comme BP, est une société anonyme. Les actionnaires ne sont pas responsables : si vous détenez une action TEPCO, on n'ira pas vous poursuivre pour indemniser les victimes des irradiations, ou les pêcheurs qui ont perdu leur gagne-pain.

Certes, on peut poursuivre la société, et la faire condamner, mais elle ne pourra donner que ce qu'elle a. Au pire, elle se met en faillite, les créanciers se payent sur les actifs, bien dépréciés à l'heure qu'il est, et il faudra trouver (et payer) quelqu'un d'autre pour gérer les suites de la catastrophe – la centrale qui risque d'exploser, les déchets qui s'écoulent dans la mer, les déchets à garder au chaud pendant des siècles. Les actionnaires, eux, voient la valeur de leur action tomber à zéro : c'est une perte financière, mais cela s'arrête là, du moins si vous n'habitez pas le Japon et que vous êtes à l'abri des radiations.

Cela a un avantage : qui investirait dans le nucléaire s'il risquait d'être tenu responsable des accidents ? Personne, et c'est

pour cela que la société par actions est une grande invention pour drainer les capitaux. Vous me direz : les actionnaires ne paient pas de leur personne, mais ils payent de leur poche, et ils ont intérêt à ce que les dirigeants de la société prennent les mesures de sécurité qui assurent la survie de celle-ci. Mais voilà, on retrouve l'aléa moral : les actionnaires ne savent pas ce que font les dirigeants. Les petits actionnaires n'ont pas d'influence et n'ont de toute façon pas le temps de regarder ce qui se passe, les gros, ceux qui siègent au conseil d'administration, n'ont pas la compétence technique et sont bien obligés de croire ce qu'on leur raconte.

Les dirigeants sont donc livrés à eux-mêmes et agissent comme des propriétaires, sans en avoir les responsabilités. Au pire, ils perdent leur poste, éventuellement avec un parachute doré, et ils en retrouvent un autre, comme Tony Hayward, le PDG de BP. Adam Smith écrivait que les sociétés anonymes se caractérisaient par la négligence pour les intérêts des actionnaires, et l'opulence pour ceux des dirigeants.

gences pour les intérêts des actionnaires, et l'opulence pour ceux des dirigeants.

Mais, direz-vous, il y a eu Tchernobyl, et ce n'était pas une société par actions qui était aux commandes ? On retrouve toujours de l'aléa moral, mais dans un autre cadre : la bureaucratie soviétique prenait en compte les intérêts de ses dirigeants plutôt que la santé de la population.

Est-ce à dire que, quel que soit le système, l'énergie nucléaire est dangereuse ? Je ne sais pas. Ce qui est sûr, c'est que l'aléa moral se glisse partout où on lui laisse une ouverture. On ne peut pas faire confiance à l'opérateur, que ce soit TEPCO, l'Union soviétique ou EDF. Il faut des organismes de contrôle totalement indépendants, qui ne soient pas l'émanation de l'opérateur, et dotés de moyens puissants. Un peu comme le système judiciaire, où les professions de procureur et d'avocat sont séparées, et où les débats sont publics. C'est peut-être un rêve.

Ivar EKELAND est professeur d'économie.

DÉVELOPPEMENT DURABLE

Végétaliser les toitures et terrasses

La transformation des toits et des terrasses en espaces verts est peu coûteuse et apporte plusieurs bénéfices, notamment en termes d'économies d'énergie.

Maeva SABRE et Gaëlle BULTEAU

Des jardins sur les toits ? L'idée n'est pas nouvelle, les premières traces remontant au VII^e siècle avant notre ère avec les jardins suspendus de Babylone.

En fait, la végétalisation des toitures et façades des bâtiments améliore le cadre de vie en milieu urbain et correspond bien aux objectifs des accords du protocole de Kyoto. Encore faut-il quantifier cette amélioration et encourager davantage la mise en place de telles surfaces.

La Chambre syndicale française de l'étanchéité (CSFE) a mis en avant dès 2004 l'intérêt des différentes techniques de toitures et terrasses végétalisées (TTV) vis-à-vis des 14 cibles de la démarche HQE (Haute Qualité Environnementale). Ces cibles portent notamment sur la gestion de l'énergie, de l'eau, le confort hygrothermique, acoustique, visuel, olfactif, la qualité de l'air. Les enjeux se situent à trois échelles différentes : l'échelle globale, liée au climat et à l'environnement, celle de la ville – le cadre urbain entraînant

une densification, une imperméabilisation de la surface et une augmentation des températures – et enfin l'échelle du bâtiment.

L'un des grands avantages de la végétalisation des toits serait la diminution, surtout en été, de la consommation d'énergie. Mais les toitures végétalisées ont *a priori* de nombreux autres atouts. Parmi les plus cités figurent leur capacité à retenir l'eau, utile à la gestion, régulation et filtration des eaux pluviales ; leur rôle d'isolant acoustique, qui renforce le confort intérieur et extérieur ;

leur contribution à la lutte contre la pollution atmosphérique; la protection assurée au bâti (étanchéités bien contrôlées); leur influence sur le climat urbain (modération des températures); l'esthétique, avec plus d'espaces verts; le renforcement de la biodiversité urbaine... De même, en raison de leur teneur en eau, les TTV permettent de retarder la propagation d'incendies, du moins en l'absence de sécheresse prolongée.

Reste que les études permettant de quantifier ces bénéfices sont encore trop rares. L'une d'elles, réalisée au Laboratoire européen d'acoustique du bâtiment du CSBT, à Marne-la-Vallée, porte sur l'isolation acoustique. Elle indique que, selon que le substrat est sec ou gorgé d'eau, une toiture végétalisée permet d'amortir les bruits de 15 à 20 décibels par rapport à une toiture classique. Selon une étude américaine de 2001, la végétalisation de six pour cent des toits de Toronto, au Canada, réduit la température urbaine de un à deux degrés. Troisième exemple: d'après une étude allemande de 2004, une toiture végétalisée permettrait d'économiser jusqu'à environ 40 euros d'électricité (chauffage ou climatisation) par mètre carré et par an, par rapport à un toit classique recouvert de gravier.

Il faut aussi noter que les résultats des études dépendent du type de toitures considérées, leurs caractéristiques variant en outre d'un fabricant à l'autre. L'amélioration de ces surfaces fait d'ailleurs partie des activités de recherche et développement du domaine.

Les toits végétalisés peuvent être de véritables jardins ou de simples tapis végétaux. Le choix dépend de l'emplacement, mais aussi des contraintes esthétiques et de celles liées au bâti. Une toiture végétalisée est en effet constituée de différentes couches (un pare-vapeur, un isolant, une étanchéité, une couche de drainage, une couche filtrante, la couche de substrat et enfin la couche végétale) qui peuvent rendre la membrane d'étanchéité difficilement accessible et l'ensemble peut avoir un poids que la toiture existante ne peut supporter.

De par son expertise sur ces systèmes, le CSTB instruit des avis techniques sur la conception et la réalisation des toitures végétalisées. En outre, pour répondre à l'attente des professionnels soucieux de fournir un

produit de qualité, le CSTB a ouvert en novembre 2010, à Nantes, une grande plateforme de recherches et d'essais nommée AQUASIM. Cet équipement est dédié à l'étude, en conditions réalistes ou accélérées, du « petit cycle de l'eau », au sein du système bâtiment-parcelle-environnement. Les toitures végétalisées sont l'une des thématiques traitées, la plateforme disposant d'un plateau végétal et d'un mur végétalisable de 80 mètres carrés chacun.

Plusieurs équipes du CSTB participent à des projets de recherche liés aux toitures végétalisées, tels que HOSANNA et VegDUD. Le premier vise à réduire les nuisances sonores en combinant des moyens naturels (dont la végétation) et artificiels. Quant à VegDUD, financé pour quatre ans (2010-2013) par l'Agence nationale pour la recherche, il étudie le rôle du végétal dans le développement urbain durable.

La technique des toits végétalisés nécessite des moyens spécifiques et complexes, mais le surcoût associé est modeste. Globalement, sur dix ans, il est de quelques dizaines d'euros par mètre carré, avec un entretien qui consiste en une à trois visites par an.

Pourtant, les toits végétalisés ont des difficultés à trouver leur place sur les bâtiments français. Leur superficie totale est aujourd'hui de l'ordre de un million de mètres carrés (soit un trentième de la surface totale), 90 pour cent des chantiers étant réalisés dans le neuf. D'autres pays ont bien plus d'avance, en particulier l'Allemagne: le marché annuel y est estimé à plus de 13 millions de mètres carrés, soit un mètre carré de toiture sur six!

Que faire pour augmenter en France les surfaces végétalisées? L'un des moyens est de proposer des subventions. C'est ce que font le Conseil régional d'Île-de-France, le Conseil général des Hauts-de-Seine ou encore l'Agence de l'eau Seine-Normandie. Une autre voie est que les villes inscrivent les toitures et terrasses végétalisées dans leur plan local d'urbanisme, comme l'ont fait Paris et Grenoble.

Maeva SABRE et Gaëlle BULTEAU
sont ingénieurs au Département CAPE
(Climatologie-Aérodynamique-Pollution-Épuration) du Centre scientifique et technique
du bâtiment (CSTB, www.cstb.fr).



MUSÉUM NATIONAL
D'HISTOIRE NATURELLE

Biodiversité



**The
Natural
History
of Santo**

edited by
**Philippe Bouchet,
Hervé Le Guyader
& Olivier Pascal**

Les îles du Pacifique sont célèbres pour le très haut niveau d'endémisme et la grande vulnérabilité de leurs faunes et de leurs flores. L'île d'Espirito Santo, ou Santo, cumule les superlatifs: la plus grande et la plus haute du Vanuatu, Santo est un extraordinaire microcosme géographique et culturel, avec récifs, grottes, montagnes, îles et îlots satellites, et une occupation humaine qui remonte à 3000 ans. Renouant avec l'esprit des «Grandes Expéditions Naturalistes», l'expédition Santo 2006 avait mobilisé sur le terrain plus de cent cinquante scientifiques, bénévoles et étudiants de vingt-cinq pays. Petit tour de force éditorial avec plus de 100 auteurs, ce *Natural History of Santo* est un éloge de la biodiversité de cette «île-planète». À la fois beau livre richement illustré et bilan des connaissances scientifiques, *Natural History of Santo* se veut un outil de connaissance pour sa conservation durable. Il s'adresse autant aux acteurs locaux du développement et de l'éducation qu'aux naturalistes du monde entier.

ISBN: 978-2-85653-627-8 • format 210 x 297 mm
texte en anglais • impression quadrichromie
nombreuses photos • 544 p. • 59 € TTC

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES DU MUSÉUM

Commandes et renseignements:
Muséum national d'Histoire naturelle
Publications scientifiques
Case postale 41 • 57 rue Cuvier • 75231 Paris cedex 05
Tél.: 01 40 79 48 05 • Fax: 01 40 79 38 40
diff.pub@mnhn.fr • <http://www.mnhn.fr/pubsci>

VRAI OU FAUX

Les hommes sont-ils monotâches ?

Oui. Et les femmes aussi... En réalité, le cerveau est capable de traiter deux tâches si vite qu'elles semblent simultanées, alors qu'elles sont analysées en alternance.

Bénédicte SALTHUN-LASSALLE

En 1982, des anatomistes américains dissèquent 20 cerveaux humains et constatent que le faisceau de fibres nerveuses – le corps calleux – qui relie les deux hémisphères cérébraux est plus épais chez les femmes que chez les hommes. D'où l'idée que les hémisphères de la femme communiquent mieux entre eux et donc que les femmes peuvent mener à bien plusieurs tâches en même temps. Les hommes, eux, seraient monotâches. Cette idée prévaut encore aujourd'hui.

Pourtant, grâce à la neuro-imagerie fonctionnelle – la visualisation en temps réel de l'activité cérébrale –, plusieurs études scientifiques ont montré que le cerveau humain gère mal plus de deux tâches et qu'il n'y a pas de différence homme-femme.

Les régions cérébrales contrôlant l'exécution de tâches sont les deux lobes frontaux. D'après les travaux récents de l'équipe du neurologue français Étienne Koechlin, du Laboratoire de neurosciences cognitives de l'INSERM, à l'École normale supérieure de Paris, le cerveau est capable de traiter en parallèle deux tâches au maximum – par exemple écrire une lettre en parlant au téléphone –, une dans chaque lobe frontal.

Mais qu'est-ce qu'une tâche dans ce cas ? C'est une action maîtrisée et intentionnelle qui a un but précis. Appuyer sur un bouton quand une lettre apparaît à l'écran ou écrire une lettre sont des tâches. Les automatismes, tel faire du vélo, ou les activités perceptives et motrices en « toile de fond », tels écouter de la musique et regarder un enfant jouer, n'en sont pas. En fait, selon É. Koechlin, il faut bien distinguer les systèmes cérébraux cen-

traux et les systèmes périphériques. Ces derniers sont les systèmes perceptifs (auditifs, visuels, tactiles, etc.) et moteurs, qui fonctionnent souvent en même temps ; on peut voir une scène complexe (un film par exemple) tout en écoutant de la musique. En revanche, le système central, qui guide le comportement de l'individu en vue d'atteindre un but particulier, est monotâche.

Une mémoire tampon

Pourtant, dans leurs expériences, les neurologues français ont observé que les deux lobes frontaux s'activent simultanément, chacun traitant une tâche qui lui est propre. Alors multitâche ? Non, car ils ont aussi constaté qu'une autre région située derrière le front s'active en même temps. Or cette région préfrontale jouerait le rôle de mémoire tampon en coordonnant les deux activités et en permettant au cerveau de les traiter ensemble : la zone préfrontale garderait en mémoire les informations concernant une tâche pendant que l'autre lobe frontal analyserait l'autre tâche et *vice versa*. La zone préfrontale mettrait provisoirement en attente une des deux tâches pour que l'autre soit traitée. Mais comme le passage d'une tâche à l'autre se ferait en quelques millisecondes dans cette région, tout se passerait comme si les deux tâches étaient traitées simultanément.

Ainsi, on peut traiter deux tâches presque en parallèle. En revanche, dans les expériences de laboratoire avec trois tâches, les sujets font beaucoup d'erreurs et semblent se ramener systématiquement à un scénario à deux tâches, en oubliant la troisième. La mémoire



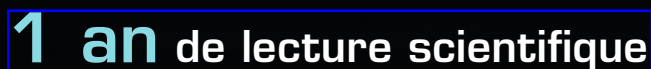
Shutterstock/Jean Tronier

tampon est limitée et ne gère que deux tâches quasi simultanément.

Ces résultats sont valables que l'on soit une femme ou un homme. Aucune étude n'a révélé de différence entre les sexes. L'idée reçue qu'il en serait autrement persiste depuis l'étude de 1982, qui a été largement médiatisée. Toutefois, É. Koechlin souligne que si les hommes et les femmes sont monotâches – pour le contrôle du comportement orienté vers un but –, on ne peut pas exclure l'hypothèse qu'il pourrait en être autrement du traitement émotionnel des objectifs à atteindre. Chez les femmes, le système émotionnel ferait émerger dans le système de contrôle frontal beaucoup d'objectifs potentiels en parallèle ; la femme aurait toujours en tête plusieurs choses à faire. En revanche, le système émotionnel des hommes favoriserait peut-être plus un objectif au détriment des autres. Voilà peut-être une autre raison qui entretient le mythe.

Bénédicte SALTHUN-LASSALLE
est journaliste à Pour la Science.

...abonnez-vous !



56 € seulement !

Vos avantages abonné :

- BULLETIN D'ABONNEMENT** ■ POUR LA **SCIENCE**

* Offre valable en France métropolitaine. Participation aux frais de port à ajouter au prix de l'abonnement : France d'Outre-Mer et Europe 12€ - autres pays 25€

****** Abonnement valable uniquement en France métropolitaine, renouvelable à échéance par tacite reconduction et dénonçable à tout moment avec un préavis de 3 mois.

Nom: _____ Prénom : _____

Adresse :

Code postal : Ville : Pays : Tél. (facultatif) :

☐ Je souhaite recevoir la newsletter *Pour la Science* à l'adresse e-mail suivante : | | | | | | | | | | | | | | | | @ | | | | | | | | | | | | | | | |

☐ J'accepte de recevoir également les informations des partenaires de *Pour la Science*.

Je choisis mon mode de règlement :

☐ Je règle mon abonnement en une seule fois **56 €** (+ frais de port en sus pour l'étranger)

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

N°:

Expire fin :

Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB) :

Signature obligatoire :

☐ Je préfère le règlement en douceur **14€/trimestre** + en cadeau le **Dossier Pour la Science n°68**. Je remplis la grille d'autorisation de prélèvement ci-dessous en joignant impérativement 1 RIB.

Autorisation de prélèvement automatique (France métropolitaine uniquement). J'autorise l'établissement teneur de mon compte à prélever le montant des avis de prélèvement trimestriel présentés par *Pour la Science*. Je vous demande de faire apparaître mes prélèvements sur mes relevés de compte habituels. Je m'adresserai directement à *Pour la Science* pour tout ce qui concerne le fonctionnement de mon abonnement.

Titulaire du compte à débiter

Nom, Prénom :

Nº .

Rue :

Code postal : | | | | | Ville :

Compte à débiter

Code quichet

N° de compte

Clé RIB

Clé RIB

Établissement teneur du compte à débiter

Établissement :

Nº.

Rue :

Code postal : | | | | | Ville :

Date et signature [obligatoire]

Organisme créancier
Pour la Science
de Férou - 75006 Paris
al d'émetteur : 426900



Pour réagir aux articles : courrier@pouirlascience.fr
ou directement sur les pages correspondantes du site www.pouirlascience.fr

✓ BANANIER PLIÉ

Selon l'article *Le bananier, un enjeu mondial* (*Pour la Science* n°400, février 2011, http://bit.ly/pls_400_bananier), le faux-tronc du bananier ne contient pas de lignine. Dès lors, comment est assurée sa rigidité ? Un bananier privé d'eau et fané devient-il mou ?
Joël Mathez

Le pliage à mi-hauteur. Le faux-tronc est très fragile et ne peut résister à des vents de plus de 50-60 kilomètres par heure. Même si les racines sont robustes, les cyclones sont ainsi très dévastateurs pour les bananeraies.

✓ LE NUAGE ET L'ÉTOILE

L'article *Étoiles : une naissance obscure* (*Pour la Science* n°401, mars 2011, http://bit.ly/pls401_etoiles) ne précise pas l'origine de la poussière dans les nuages interstellaires. Par ailleurs, ces nuages sont formés par la mort des étoiles, mais ils sont aussi nécessaires à la formation de celles-ci. N'y a-t-il pas un paradoxe ?
Christine Roche

Le mode de formation est encore très débattu. On sait cependant qu'ils sont créés dans les phases finales de l'évolution stellaire, lorsque les étoiles éjectent leurs couches externes ou explosent en supernova. Les éléments lourds formés par la fusion nucléaire et les molécules et petits grains de poussière formés en périphérie de l'étoile sont alors dispersés dans le milieu interstellaire dense et froid, où ils peuvent s'agglomérer pour former des grains de poussière de taille variée.

Les poussières sont des catalyseurs efficaces pour la formation d'hydrogène moléculaire, qui contribue à refroidir le gaz des nuages interstellaires en contraction. Mais elles ne sont pas indispensables. Sans poussière, le gaz refroidit plus difficilement, mais des étoiles peuvent néanmoins se former, bien que cela nécessite une masse initiale plus élevée. Les étoiles résultantes sont alors plus massives.

→ RÉPONSE DE ANDRÉ LASSOUDIÈRE

Le faux-tronc du bananier est tout à fait comparable à celui d'autres monocotylédones, comme le blé. Il ne contient pas de lignine. La rigidité est exclusivement assurée par la turgescence des tissus des gaines foliaires qui contiennent 97 pour cent d'eau. En cas de sécheresse, en effet, le faux-tronc se plie, devient mou, et se dégrade rapidement. Il est presque obligatoire de tuteurer ce faux-tronc peu de temps après l'émission de l'inflorescence pour éviter

→ RÉPONSE DE NICOLAS PERETTO

Les grains de poussière sont au cœur de l'équilibre thermique du milieu interstellaire. Leur

Mardi 24 mai 2011 à 18h30
au Palais de la Découverte
Avenue F.-D. Roosevelt • 75008 Paris

Raconte-moi un chercheur

Pour la Science, en partenariat avec le Palais de la Découverte, vous convie, chaque mois, à passer une heure avec un scientifique.

Comment est-il devenu chercheur ? Quelles sont les différentes facettes de son métier ? En quoi consiste son travail au quotidien ?

En vous faisant partager leur expérience et en rendant leur métier plus concret, ces chercheurs ont une ambition : vous communiquer leur passion pour la science !

Palais de la Découverte **SCIENCE**

Invitée

Valérie Masson-Delmotte

Valérie Masson-Delmotte, climatologue, est directrice de recherches au Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE), unité mixte du CEA, du CNRS et de l'Université de Versailles-Saint-Quentin, à Gif-sur-Yvette. Ses recherches portent sur l'évolution du climat, en particulier sur la reconstruction des climats passés.

DOSSIER POUR LA SCIENCE

- L'Univers avant le Big Bang
- Où est passée l'antimatière ?
- Matière noire et énergie sombre
- Comment finira l'Univers ?

N° 71 Avril-Juin 2011

Le magazine thématique de l'actualité scientifique

La face cachée de l'Univers

Comment explorer
les âges sombres
et le contenu manquant ?

120 pages - prix de vente : 6,95 €

À découvrir en kiosque
et sur www.pourlascience.fr

TURBULENCES

sur les équations des fluides

L'un des problèmes mathématiques les plus en vue porte sur les écoulements des liquides ou des gaz. Les équations dites de Navier-Stokes utilisées pour les décrire et les prévoir sont-elles valides ?

Thomas Sonar

A l'occasion du passage au nouveau millénaire, en l'an 2000, le *Clay Mathematical Institute*, une fondation américaine privée, a proposé une liste de sept problèmes dont la résolution sera récompensée d'un prix de un million de dollars pour chacun. La plupart de ces défis sont d'une grande abstraction et peuvent sembler éloignés de toute réalité physique. Par contraste, au sein de cette liste, le problème des équations de Navier-Stokes apparaît bien concret : ces équations sont censées décrire les écoulements des fluides (liquides ou gaz) ordinaires.

Afin de déterminer comment un fluide se comporte dans une situation donnée, on peut réaliser des expériences. Mais en pratique, c'est souvent trop difficile ou trop coûteux. Dans ce cas, il est possible de s'appuyer sur des simulations numériques, par ordinateur, des équations qui régissent les écoulements. C'est ainsi que les ingénieurs-architectes calculent le comportement des grandes structures, tels



1. LA TURBULENCE DES FLUIDES est un phénomène mal compris. Cette incompréhension reflète les difficultés que posent les équations de Navier-Stokes, tant sur le plan de leur analyse mathématique que sur celui de leur simulation numérique.

les ponts ou les gratte-ciel, sous l'action du vent. La simulation numérique permet aussi de déterminer les caractéristiques aérodynamiques d'une automobile, d'un train à grande vitesse ou d'un avion, sans avoir à construire au préalable des prototypes de ces appareils et à les tester dans une soufflerie.

La simulation numérique en mécanique des fluides est fondée sur une stratégie de résolution approchée des équations de Navier-Stokes. Ces équations, qui se révèlent donc cruciales pour les activités des constructeurs automobiles ou des bureaux d'ingénieurs, s'invitent même à Hollywood afin, par exemple, de simuler le tourbillon où s'enfonça le *Titanic* lors de son naufrage.

L'existence et l'unicité des solutions sont à prouver

La résolution des équations de Navier-Stokes joue donc un rôle important, qu'il s'agisse de science ou de technologie. Pourquoi ces équations figurent-elles sur la liste des « problèmes du millénaire » ? Des équations dont des programmes informatiques calculent des solutions approchées présentent-elles encore un réel intérêt pour les mathématiciens ou les physiciens ? Le problème, c'est que l'on n'est pas sûr que ce qui est calculé est réellement une solution approchée et si le résultat est fidèle à la réalité.

Une comparaison avec un exemple très classique éclairera ces questions. Afin de décrire les phénomènes naturels par des équations, Isaac Newton avait énoncé les lois régissant la mécanique d'un point matériel, par exemple la loi selon laquelle la force agissant sur une masse ponctuelle est égale au produit de sa masse par son accélération. Considérons un nombre fini de masses ponctuelles, par exemple les corps célestes du Système solaire, dont on connaît les positions et vitesses à un instant donné. Supposons en outre que ces masses ponctuelles soient soumises aux seules forces de la gravitation newtonienne.

Dans ces conditions, toute l'évolution du système est mathématiquement déterminée : connaissant les positions et vitesses des points matériels à un instant donné, les équations de la mécanique permettent en principe de déterminer les positions et vitesses à tout instant ultérieur. Les mathé-

matiques offrent dans ce cas une image déterministe de la nature : des conditions initiales identiques impliquent toujours une même évolution au cours du temps.

Or les équations de Navier-Stokes ne présentent malheureusement pas un tel déterminisme. Il n'a pas été possible à ce jour de prouver, pour ces équations, qu'il existe en toutes circonstances une solution complètement déterminée par les conditions initiales. La situation reste par conséquent confuse. Du reste, l'Institut Clay n'a pas fixé comme objectif la démonstration de l'existence de solutions pour les équations de Navier-Stokes et la démonstration que les solutions, si elles existent, sont uniques ; il a plus humblement proposé de récompenser des « progrès essentiels » sur le sujet.

Pourquoi cette classe d'équations soulève-t-elle autant de difficultés ? C'est ce que nous allons expliquer dans la suite de cet article. Une première réponse, incomplète, est qu'avec les équations de Navier-Stokes, on passe du discret au continu. Il s'agit d'« équations aux dérivées partielles », et non d'équations différentielles ordinaires comme en mécanique du point.

Qu'est-ce que cela signifie ? Pour un point mobile, la deuxième loi de Newton, selon laquelle la force est égale à la masse multipliée par l'accélération, équivaut à une équation différentielle, l'inconnue étant la position $x(t)$ du point et l'accélération étant la dérivée $dv(t)/dt$ de la vitesse $v(t)$ par rapport au temps, c'est-à-dire la dérivée seconde $d^2x(t)/dt^2$ de la position : dans les équations de la mécanique du point n'interviennent que des fonctions d'une seule variable, le temps t .

En revanche, la description d'un fluide repose sur des fonctions de deux variables au moins : la position (décrite par une, deux ou trois coordonnées) et le temps. La vitesse d'un fluide au point r et à l'instant t est ainsi notée $v(r, t)$. En plus des dérivées par rapport au temps qui proviennent, comme dans le cas classique, de la deuxième loi de Newton, on a des dérivées par rapport aux coordonnées de position, car l'état (la vitesse, la pression) d'un fluide en un point dépend de, et influe sur, l'état du fluide aux points voisins (on parle de dérivées partielles, car il s'agit de dérivées par rapport à l'une seulement des variables de la fonction).

Comme on introduit au moins une fonction pour chaque point de l'espace et que ces points sont en nombre infini (un infini

L'ESSENTIEL

- ✓ Les équations de Navier-Stokes sont censées décrire les écoulements des fluides.
- ✓ Elles modélisent un fluide comme un milieu continu, c'est-à-dire caractérisé par des grandeurs physiques définies en tout point de l'espace et à tout instant.
- ✓ À ce jour, la cohérence mathématique de ces équations n'a pas été prouvée.
- ✓ Le phénomène de turbulence est l'un des principaux obstacles à une telle démonstration.

continu, et non discret), alors que dans le cas habituel seul un nombre fini de fonctions du temps interviennent (les positions ou vitesses des points mobiles considérés), on devine que les équations aux dérivées partielles sont bien plus complexes que les équations différentielles ordinaires. Mais il ne s'agit là que d'une petite partie de l'explication de la difficulté.

Examinons de plus près ces équations de Navier-Stokes. Elles décrivent les comportements tant des liquides que des gaz. Dans notre expérience quotidienne, l'eau et l'air semblent se comporter très différemment, mais ce phénomène tient essentiellement à la différence de masse volumique, la densité de l'eau étant un millier de fois supérieure à celle de l'air. Dans les équations, la densité du fluide apparaît sous la forme d'un paramètre constant, qui ne change donc pas fondamentalement le comportement des solutions.

Une autre différence apparente entre un liquide et un gaz est la compressibilité. Avec une simple pompe à bicyclette, on peut aisément comprimer un volume d'air. L'eau, de son côté, est incompressible, ce que l'on peut ressentir douloureusement en sautant mal d'un plongeur. L'expérience de la pompe



2. UN ÉCOULEMENT dans une cavité carrée plane où, initialement, le fluide est au repos, est un système souvent utilisé pour tester des algorithmes de résolution numérique des équations de la mécanique des fluides. Ici, le fluide est entraîné de gauche à droite au niveau de la paroi supérieure. Les lignes de courant correspondant à une rotation horaire sont en bleu, celles correspondant à une rotation antihoraire sont dans des teintes rouges.

à vélo est cependant atypique: au sommet des gratte-ciel, pour les trains rapides ou les avions, l'air, à des vitesses de l'ordre de 300 kilomètres par heure, se comporte comme s'il était incompressible.

Si le fluide doit être considéré comme compressible, c'est-à-dire si sa densité peut notablement varier, la situation est plus complexe. Aussi, nous nous limiterons dans la suite de cet article au cas des fluides incompressibles.

250 ans d'histoire

D'où viennent les équations de Navier-Stokes? Leur histoire remonte au XVIII^e siècle. En 1755, dans un mémoire intitulé *Principes généraux du mouvement des fluides*, le grand savant suisse Leonhard Euler donna corps à l'hydrodynamique classique ou, plus précisément, à la mécanique des fluides sans frottements.

En appliquant les lois de Newton à des volumes infinitésimaux de fluide, Euler aboutit à un système d'équations qui porte aujourd'hui son nom (voir l'encadré ci-dessous), et il donna la première définition rigoureuse de la pression p d'un fluide. Les équations d'Euler sont un système de trois

LES ÉQUATIONS D'EULER

Afin d'établir les équations qui régissent l'écoulement des fluides, notamment celles d'Euler et de Navier-Stokes, les physiciens considèrent un minuscule « volume test » de position fixée et cherchent à déterminer les forces agissant sur le fluide qu'il contient.

La gravité est en général une première force extérieure à considérer. Il faut ensuite prendre en compte la pression, qui varie *a priori* d'un point à l'autre de la surface du volume test. Les liquides et les gaz tendent en effet à s'écouler dans la direction où la pression est la plus faible. Il faut enfin faire le bilan des entrées et sorties de fluide dans le volume test.

Grâce à l'analyse infinitésimale, on peut ensuite passer à la limite où le volume test se réduit à un point. La différence entre l'état du fluide au bord droit du volume test et son état au bord gauche correspond alors à une dérivée partielle (une dérivée par rapport à

la coordonnée dont l'axe va de gauche à droite). On obtient ainsi des équations aux dérivées partielles, c'est-à-dire des équations où figurent des dérivées (partielles) de fonctions inconnues de la position et du temps.

Notons u, v, w les composantes de la vitesse de l'écoulement selon les axes Ox, Oy, Oz respectivement et f, g, h les trois composantes d'une force extérieure donnée. L'écriture $\partial u / \partial t$ désigne la dérivée de la composante u de la vitesse par rapport au temps t , l'écriture $\partial p / \partial z$ désigne la dérivée de la pression par rapport à la coordonnée z , et ainsi de suite. Avec ces notations, les équations d'Euler s'écrivent :

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial p}{\partial x} &= f \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial p}{\partial y} &= g \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial p}{\partial z} &= h \end{aligned}$$

Elles sont une traduction de la loi de Newton selon laquelle le produit de la masse par l'accélération est égal à la force appliquée.

L'accélération (dérivée de la vitesse) correspond aux quatre premiers termes de chaque équation du système (la dérivée partielle par rapport au temps est complétée par trois termes en raison du fait que la vitesse intervenant dans ces équations est celle caractérisant le fluide en un point donné de l'espace, et non la vitesse d'une particule fluide suivie dans son mouvement).

Le cinquième terme (par exemple $\partial p / \partial x$) est la force due à la pression, qui est une force interne au fluide. Par convention, on place les forces extérieures dans le membre de droite des équations.

Par ailleurs, dans ces équations où l'on suppose le fluide incompressible, la densité (ou la masse) du fluide ne figure pas explicitement; pour simplifier l'écriture,

elle est intégrée dans les définitions de la pression et de la force extérieure.

Grâce aux notations de l'analyse vectorielle, on peut exprimer ces trois équations en une seule formule compacte et élégante. Notons $\mathbf{v} = (u, v, w)$ le vecteur vitesse et $\mathbf{f} = (f, g, h)$ le vecteur force extérieure. Avec l'opérateur « nabra » $\nabla = (\partial / \partial x, \partial / \partial y, \partial / \partial z)$, les équations d'Euler s'écrivent alors :

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} + \nabla p = \mathbf{f}$$

où $\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}$ désigne le produit scalaire de deux vecteurs $\mathbf{a}$ et $\mathbf{b}$.

Cette expression (trois équations pour quatre fonctions inconnues) doit être complétée par une autre équation, qui exprime l'incompressibilité et la conservation de la masse et qui s'écrit :

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{v} &= 0 \\ \text{c'est-à-dire} \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0 \end{aligned}$$

équations comportant quatre fonctions inconnues de la position et du temps : les trois composantes (u, v, w) de la vitesse du fluide (selon les axes Ox , Oy et Oz respectivement) et la pression p . Afin de déterminer un système unique de solutions, il est nécessaire d'introduire une équation supplémentaire, qui traduit localement la conservation de la masse du fluide.

Euler avait également énoncé ces équations dans le cas de fluides compressibles ; le cas incompressible s'en déduit en supposant que la densité du fluide est une constante, indépendante du temps et de la position.

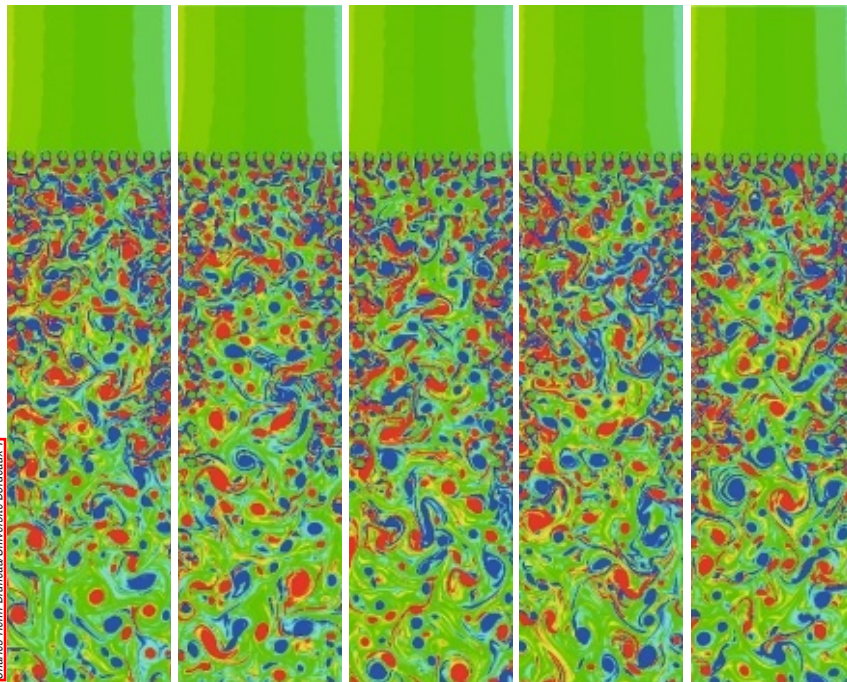
Il est facile de voir que les équations d'Euler sont un cas particulier des équations de Navier-Stokes : les secondes se ramènent aux premières en annulant le terme de viscosité, lié aux frottements.

Les équations d'Euler font apparaître une difficulté qu'elles partagent avec les équations de Navier-Stokes : elles sont non linéaires. La propriété de non-linéarité, qui peut se lire aisément sur une équation, signifie que la somme de deux solutions possibles de l'équation ne constitue pas, en général, une autre solution possible.

Cela implique des différences importantes par rapport aux équations linéaires. Par exemple, des ondes régies par des équations linéaires peuvent se maintenir et se superposer sans interagir et se perturber mutuellement. En outre, les solutions d'équations linéaires ne peuvent pas devenir beaucoup plus complexes que les conditions aux limites (la donnée des vitesses du fluide sur le bord de la région qu'il occupe) ou les conditions initiales (la donnée des vitesses initiales du fluide). En revanche, dans le cas d'une équation non linéaire, même une situation géométrique très simple peut donner lieu à une solution (un écoulement) d'une grande complexité.

La viscosité, facteur de régularité

Le frottement, qui entraîne une dissipation d'énergie, est un élément modérateur dans les écoulements. Cela explique que les équations d'Euler soient souvent plus « turbulentes » encore que celles de Navier-Stokes. Par exemple, les solutions des équations d'Euler peuvent décrire des écoulements où le fluide est cisailé et où, par conséquent, la vitesse du fluide n'est pas définie sur toute une surface. En fait, pour ces raisons, on sait qu'il n'est



3. SIMULATION NUMÉRIQUE DE L'ÉCOULEMENT d'un film d'eau savonneuse, de haut en bas, à travers lequel sont installés des obstacles (dix petits cercles en amont, analogues à des piliers de pont sur une rivière, et une autre série de petits cercles disposés sur le bord gauche). Les cinq images montrent l'état du fluide à des instants successifs. Les parties en bleu correspondent à des tourbillons tournant dans un sens, les parties en rouge à des tourbillons tournant dans le sens contraire. Les obstacles sont responsables de la turbulence de l'écoulement en aval. Il s'agit là d'une turbulence à deux dimensions, que les mathématiciens et physiciens comprennent mieux qu'en trois dimensions. En fait, en deux dimensions, les équations de Navier-Stokes sont aussi mieux maîtrisées, et on a su prouver dans ce cas à la fois l'existence et l'unicité de solutions régulières.

pas possible d'obtenir un énoncé général d'unicité des solutions pour les équations d'Euler.

Dans la réalité cependant, les fluides ne souffrent pas de ces ambiguïtés et semblent avoir des vitesses bien définies partout. On en conclut qu'un élément crucial n'est pas pris en compte dans les équations d'Euler. Cela a conduit Gregori Tokaty, mécanicien des fluides d'origine russe disparu en 2003, à proposer la métaphore suivante : avec ses équations, le tailleur de génie Euler nous a confectionné un pantalon, certes magnifique, mais dépourvu de tout bouton. Ce qui empêche ce pantalon de glisser (ou les fluides de se décomposer), c'est l'omniprésence d'un frottement qui, dans le cas des fluides, est désigné par le terme de viscosité. Si ce phénomène est familier pour des liquides tels que le miel ou l'huile, il l'est moins pour les gaz ; les scientifiques ont d'ailleurs mis longtemps à appréhender le rôle crucial joué par la résistance de l'air et à élaborer une théorie des fluides visqueux.

L'AUTEUR



Thomas SONAR est professeur de mathématiques appliquées à l'Université technologique de Braunschweig, en Allemagne. Il y dirige le Département *Équations aux dérivées partielles* de l'Institut de mathématiques computationnelles.

Laure Saint-Raymond (Département de mathématiques de l'École normale supérieure, Paris), a aidé à l'adaptation de cet article en français. Elle sera par ailleurs l'invitée de « Raconte-moi un chercheur » le 26 avril à 18h30 au Palais de la découverte, à Paris.

BIBLIOGRAPHIE

É. Guyon *et al.*, **Ce que disent les fluides**, 2^e édition, Belin-Pour la Science, 2011.

É. Guyon *et al.*, **Hydrodynamique physique**, 2^e édition, EDP Sciences-CNRS Éditions, 2011.

C. Sabbah *et al.* (éds.), **Facettes mathématiques de la mécanique des fluides**, Journées X-UPS 2010, École polytechnique/Ellipses, 2011.

V. Šverák, **PDE aspects of the Navier-Stokes equations**, colloque De Giorgi, 2007, téléchargeable sur : www.math.umn.edu/~sverak/publications/DeGiorgi_colloquium2007

L. Saint-Raymond, **Le comportement des gaz : d'une limite à l'autre**, *Pour la Science*, n° 324, pp. 52-59, octobre 2004.

P. G. Lemarié-Rieusset, **Recent Developments in the Navier-Stokes Problem**, Chapman & Hall/CRC, 2002.

Newton avait déjà formulé l'hypothèse selon laquelle, dans un fluide visqueux s'écoulant entre deux parois, apparaissent des forces de cisaillement proportionnelles à la vitesse du fluide. Cent cinquante ans plus tard, l'ingénieur polytechnicien français Claude-Louis Navier, avec son *Mémoire sur les lois du mouvement du fluide* de 1822, réalisait une percée dans la prise en compte de la viscosité.

Attiré par l'atomisme de Pierre-Simon de Laplace (1749-1827), Navier a inscrit ses travaux dans le cadre de la théorie moléculaire. Mais il s'est appuyé sur les méthodes de la mécanique des milieux continus et la théorie de l'élasticité, développées en particulier vers 1820 par le mathématicien français Augustin-Louis Cauchy.

Pour expliquer la viscosité, Navier postula l'existence d'une force d'attraction entre deux molécules, l'intensité de cette force décroissant rapidement avec la distance, et il en déduisit de façon remarquable une équation utilisable à l'échelle macroscopique. Il énonça aussi qu'un fluide visqueux ne peut glisser parfaitement le long des parois d'un conduit ; au contraire, sa vitesse au niveau des parois doit être proche de zéro. C'est la « condition de non-glissement » du fluide le long des parois.

Certains désaccords entre la théorie de Navier et les observations, ainsi que le besoin de clarifier plusieurs points dans

les raisonnements, ont rendu Navier perplexe et les autres scientifiques ne furent pas convaincus. Mais les équations étaient en place.

Quelques années plus tard, toujours en France, Adhémar Barré de Saint-Venant parvenait à faire progresser la théorie des fluides visqueux sans utiliser d'hypothèses de nature moléculaire. Dans son *Mémoire sur la dynamique des fluides* présenté en 1834 à l'Académie des sciences, Barré de Saint-Venant se concentrait sur la modélisation de la vitesse relative des particules de fluide, le terme « particule » devant ici se comprendre au sens de la mécanique du continu, c'est-à-dire comme un volume infinitésimal de fluide. Si l'on considère deux particules de fluide adjacentes se déplaçant à des vitesses différentes, une force de cisaillement résulte du frottement entre les deux particules.

La viscosité modélisée

Contrairement à la pression hydrostatique, la force de cisaillement ne s'exerce pas perpendiculairement à l'interface des deux particules fluides, mais tangentielle. Barré de Saint-Venant adopta alors pour hypothèse que les forces de cisaillement apparaissent dans la direction de l'écoulement – plus précisément dans le sens du mouvement relatif des deux particules de fluide – et qu'elles sont proportionnelles à la vitesse relative des deux particules.

On montre qu'il résulte de ces forces de cisaillement, qui s'opposent à la vitesse relative de deux particules fluides en contact, une viscosité qui lisse les différences de vitesses entre un point du fluide et ses voisins. La force de viscosité correspond alors, dans les équations de Navier-Stokes, à un coefficient de viscosité, noté par la lettre grecque ν , multiplié par la somme des dérivées spatiales d'ordre deux de la vitesse (voir l'encadré ci-contre).

Ainsi, Barré de Saint-Venant avait franchi un pas significatif pour établir les équations de Navier-Stokes. Et pourtant, son nom ne leur est pas associé. Pourquoi ? En fait, les travaux de Barré de Saint-Venant n'ont été imprimés, et donc diffusés, qu'en 1843. Indépendamment, le physicien britannique George Gabriel Stokes publia en 1845 des résultats similaires dans sa thèse *On the theories of the internal friction of fluids in motion*. De façon un peu

LES ÉQUATIONS DE NAVIER-STOKES

Dans l'espace tridimensionnel, les équations de Navier-Stokes censées régir l'écoulement d'un fluide incompressible s'écrivent :

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial p}{\partial x} - \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) &= f \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial p}{\partial y} - \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) &= g \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial p}{\partial z} - \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) &= h. \end{aligned}$$

Elles reviennent à ajouter aux équations d'Euler un terme correspondant à la force de viscosité. Le terme de viscosité se compose du coefficient de viscosité ν multiplié par une somme de dérivées secondes de la vitesse. Cette somme s'exprime de façon compacte à l'aide de l'opérateur « laplacien », noté par la majuscule grecque Δ (delta) et défini par :

$$\Delta u = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

Les équations de Navier-Stokes prennent alors l'expression vectorielle suivante :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\mathbf{v}) + \nabla (\mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{p}) - \nu \Delta \mathbf{v} = \mathbf{f}$$

La conservation de la masse est également vérifiée par les équations de Navier-Stokes, et s'exprime par la même équation que pour les équations d'Euler ($\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$).

injuste, sur les deux noms, seul celui de Stokes, en plus de celui de Navier, s'est imposé pour désigner les équations du mouvement d'un fluide.

Revenons aux difficultés associées aux équations de Navier-Stokes. L'une des principales concerne la turbulence, très souvent constatée dans les écoulements rapides. Le caractère fascinant et intrigant de ce phénomène peut être constaté sur une expérience très simple. Il suffit d'observer un lent écoulement d'eau dans un tube horizontal en verre auquel on ajoute une goutte colorée : la goutte s'étire en un fil qui, au bout d'une certaine distance, se met à tourbillonner et ainsi à se mélanger de façon chaotique avec l'eau. Le courant est devenu spontanément turbulent !

Un problème épineux : la turbulence

La turbulence est un phénomène auquel les physiciens et mathématiciens s'intéressent depuis longtemps, sans qu'ils soient parvenus à en proposer une explication et une description satisfaisantes. Cela n'empêche pas son exploitation par les ingénieurs. On sait par exemple qu'un sillage turbulent derrière un mobile entraîne une résistance, ou force de traînée, moins importante qu'un sillage laminaire (non turbulent). C'est pourquoi le profil des casques de moto modernes comporte des creux, qui rendent turbulent l'écoulement de l'air en aval du casque.

La turbulence est un phénomène qui met en jeu de multiples échelles de longueur, qui vont jusqu'à l'échelle microscopique. Or à cette échelle, la description d'un fluide en tant que milieu continu, qui est à la base des équations de Navier-Stokes, perd sa pertinence. Qui plus est, les méthodes numériques pour résoudre ces équations procèdent par discrétisation, un découpage de l'espace en petits volumes où l'écoulement est supposé uniforme – ce qui n'est pas une bonne approximation si l'écoulement est turbulent jusqu'à des échelles plus petites que celle de la discrétisation.

Il n'est donc pas du tout assuré que, dans des régimes turbulents, la résolution numérique des équations de Navier-Stokes fournisse des solutions qui ressemblent suffisamment au comportement réel du fluide. En fait, en simulation numérique, on s'appuie sur ce que l'on appelle des modèles de turbulence, où l'on intro-



4. UN VENT FORT RENCONTRANT UNE ÎLE subit des turbulences et forme un sillage de tourbillons alternés visibles dans la couverture nuageuse. Les modèles météorologiques et climatiques utilisent eux aussi les équations de Navier-Stokes pour décrire et prévoir la circulation atmosphérique. Une illustration supplémentaire de l'importance de bien comprendre ces équations.

duit de façon *ad hoc*, phénoménologique, des paramètres censés englober les détails inaccessibles de la turbulence. Ces modèles, dont il existe des familles entières, aboutissent à des résultats plus ou moins utiles selon les champs d'application. Mais ils ne sont qu'un pis-aller en l'absence d'une véritable compréhension de la turbulence.

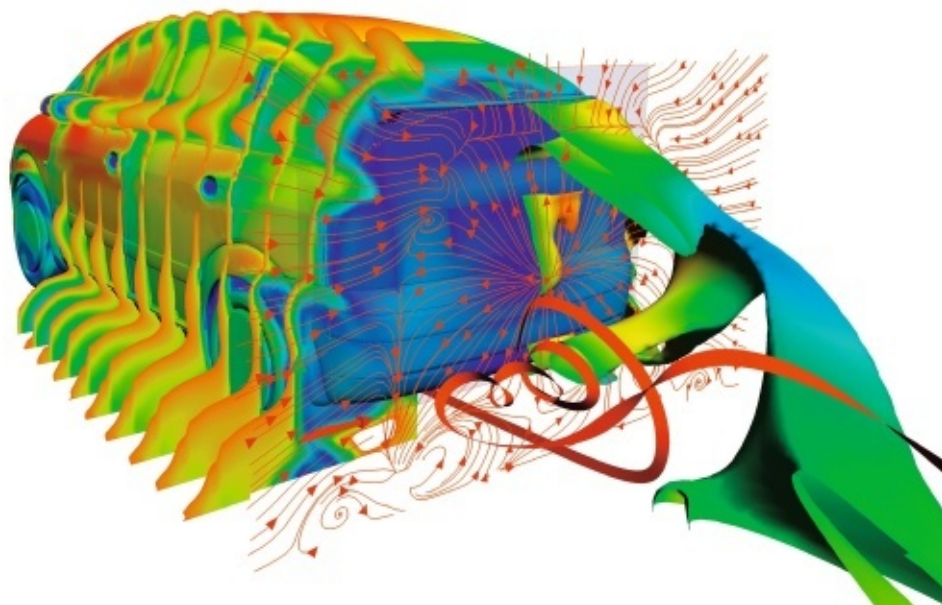
Il faut aussi souligner que les algorithmes numériques ne résolvent pas vraiment les équations de Navier-Stokes : ils visent des approximations des solutions de ces équations, en supposant que celles-ci existent. Par exemple, la discrétisation remplace les dérivées, mathématiquement définies par un passage à la limite, par de simples quotients de différences. Autrement dit, on remplace la question posée par une autre, plus simple et qui approche autant que possible la question originale, tout en espérant que la solution de ce nouveau problème sera elle aussi assez voisine de la solution de la question initiale. Cela doit cependant être prouvé au cas par cas.

Le modèle reflète-t-il la réalité ?

On croit souvent qu'une procédure fiable de vérification est de comparer les solutions numériques avec des données expérimentales. Mais il s'agit là d'une idée fausse. On peut certes ajuster progressivement un modèle de turbulence jusqu'à ce que la solution numérique approche les données expérimentales avec une grande précision, mais ce n'est pas ainsi que l'on améliore notre compréhension de la turbulence.

Par ailleurs, comme j'y ai fait allusion, les équations de Navier-Stokes ne constituent qu'un modèle mathématique de l'écoulement d'un fluide visqueux, et il n'est pas garanti que ce modèle soit toujours conforme à la réalité physique.

En premier lieu, le fait de manipuler une fonction dérivable $v(r, t)$ sous-entend qu'il existe un milieu uniforme où l'on peut en chaque point et à tout instant associer une vitesse. Or une situation plus conforme à la réalité est celle où de très nombreuses molécules se déplacent de façon désordonnée, échangeant entre elles quantité de mouvement et énergie. Au sens strict, la grandeur $v(r, t)$ représente en fait une moyenne sur toutes les molécules présentes dans un petit volume entourant le point r .



Martin Schmitz, Sciences+Computing AG, Löhningen

5. L'ÉTUDE DE L'ÉCOULEMENT DE L'AIR ET DE LA FORCE DE TRAINÉE que cet écoulement engendre est importante pour la tenue de route des véhicules. La modélisation de l'écoulement est surtout très complexe à l'arrière du véhicule, et une procédure dérivée de la théorie cinétique des gaz se révèle plus appropriée qu'une résolution approchée des équations de Navier-Stokes.

En effet, il est possible de s'appuyer sur une description de nature microscopique pour aboutir aux équations de Navier-Stokes, moyennant certaines approximations. On peut en particulier s'appuyer sur la théorie cinétique des gaz, élaborée par le physicien autrichien Ludwig Boltzmann (1844-1906), qui donne une description probabiliste et statistique de ce qui se passe à l'échelle moléculaire. Mais le passage de l'échelle moléculaire à des moyennes définies en tout point est délicat, et il n'est pas sûr que la viscosité d'un fluide autre qu'un gaz parfait soit correctement décrite par le terme correspondant dans les équations de Navier-Stokes. Peut-être faut-il aller au-delà des dérivées d'ordre deux et inclure des dérivées d'ordre supérieur pour une modélisation plus précise ?

Il y a quelques années, le mathématicien tchèque Jindřich Nečas (1929-2002) a proposé un modèle alternatif de la viscosité avec l'espoir de prouver l'existence de solutions pour les équations ainsi modifiées. Il n'y est cependant pas parvenu, et les équations de Navier-Stokes représentent toujours la meilleure modélisation dont nous disposons.

Comme un énoncé d'existence et d'unicité des solutions semble pour le moment hors de portée, les mathématiciens se concentrent sur des objectifs intermédiaires. Par exemple, existe-t-il une solution manifestement non physique des

équations de Navier-Stokes ? Si tel était le cas, il apparaîtrait clairement que ces équations ne constituent pas une description adéquate de la réalité. Si, au contraire, on réussissait à exclure qu'apparaissent certaines solutions non physiques, on s'approcherait un peu plus de la preuve recherchée.

Une solution non physique serait, par exemple, une solution pour laquelle les énergies cinétique et potentielle du système augmentent. En effet, puisque les frottements dissipent de l'énergie cinétique en chaleur, la somme de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle doit rester inférieure, ou au plus égale, à sa valeur initiale. Il est relativement facile de prouver que cela est le cas pour les équations de Navier-Stokes.

Des solutions qui explosent...

Une autre situation non physique correspondrait à une concentration de l'énergie du système au voisinage d'un seul point, la densité d'énergie tendant ainsi vers l'infini en ce point. Les spécialistes nomment *blow-up* (explosion) ce cas de figure.

Pour mieux comprendre ce problème, faisons l'expérience de pensée suivante : avec une grande cuillère, on imprime un mouvement de rotation à l'eau dont un seau est rempli. Une fois la rotation lancée, nous définissons à un certain instant

l'écoulement rotatif obtenu comme étant les conditions initiales des équations de Navier-Stokes. En un point quelconque du seau, la vitesse du fluide peut-elle augmenter sans limite et ainsi donner lieu à un *blow-up* ? Un tel comportement n'a, bien entendu, jamais été observé. Mais y a-t-il pour autant, dans les équations, une propriété qui empêcherait le développement d'un tel *blow-up* ?

Les mathématiciens connaissent en effet d'autres équations différentielles non linéaires qui présentent des phénomènes non physiques de *blow-up*. C'est d'ailleurs le cas des équations d'Euler : par exemple, il en existe des solutions qui correspondent à une évolution explosive du fluide, alors que ce dernier est initialement partout immobile !

Sauf dans quelques rares situations extrêmement simples, on ne sait pas trouver de solutions mathématiquement explicites (c'est-à-dire non numériques) aux équations de Navier-Stokes. Aussi, pour rechercher des solutions ou pour les caractériser même sans les avoir trouvées, les mathématiciens sont obligés de recourir à des voies indirectes.

Par exemple, ils considèrent qu'*a priori* une solution des équations est une certaine fonction appartenant à un espace fonctionnel approprié, c'est-à-dire un espace abstrait de dimension généralement infinie dont les points sont des fonctions ayant des propriétés pas trop restrictives. En se déplaçant continûment dans cet espace, on passe continûment d'une fonction à une autre. Et pour que l'on puisse comparer des fonctions et considérer des suites de fonctions, l'espace fonctionnel doit être muni d'une notion de distance et de limite.

Dans un premier temps, les mathématiciens ont choisi des espaces fonctionnels dont les éléments sont des fonctions suffisamment régulières (ce qui signifie par exemple des fonctions dérivables plusieurs fois). Mais cela s'est révélé insuffisant et il a fallu se placer dans des espaces plus vastes, contenant aussi des fonctions discontinues ou non différentiables.

En considérant non pas ces fonctions au sens strict, mais les intégrales de leur produit avec une « fonction test » (une fonction en partie arbitraire, ayant toutefois des propriétés telles que l'intégrale considérée a toujours une valeur bien définie), on parvient à une notion de « solution faible » des équations de Navier-Stokes,

l'ensemble des solutions faibles englobant celui des solutions régulières.

En 1933 et 1934, le mathématicien français Jean Leray a pu prouver l'existence de telles solutions faibles. Il a aussi démontré l'existence et l'unicité de solutions régulières, mais seulement pour des temps finis, c'est-à-dire sans pouvoir garantir que ces solutions ne deviennent pas singulières au bout d'un temps suffisamment long.

Trente ans plus tard, en 1964, les Japonais Hiroshi Fujita et Tosio Kato ont étendu le résultat de Leray avec une méthode beaucoup plus robuste, que nombre de mathématiciens ont adoptée. Les deux chercheurs ont ainsi prouvé l'existence et l'unicité de solutions régulières globalement en temps, mais pour des données petites (fluide proche de l'immobilité).

Un autre résultat important a été obtenu avec une méthode similaire à celle de H. Fujita et T. Kato : vers 1993, Marco Cannone et Yves Meyer, de l'Université de Paris-Dauphine, avec Fabrice Planchon, de l'École polytechnique, ont prouvé

qu'il existe des solutions régulières globalement en temps, pour des données fortement oscillantes.

Plus récemment encore, vers 2010, Jean-Yves Chemin, à l'Université Pierre et Marie Curie, et Isabelle Gallagher, de l'Université Paris-Diderot, ont présenté des classes de données, ni forcément petites ni forcément oscillantes, pour lesquelles les équations de Navier-Stokes ont une solution régulière globalement, dans tout l'espace.

Malgré des progrès, le problème résiste

Malgré ces avancées et d'autres, on ne dispose pas encore d'un énoncé général d'existence et d'unicité de solutions régulières. Les tentatives ont jusqu'ici échoué, car en essayant de passer de solutions faibles à des solutions régulières, des singularités apparaissent, comme celle évoquée à propos du seau d'eau.

Certaines études se sont donc concentrées sur l'évaluation de la quantité de

points où des singularités peuvent se développer. En 1982, l'Argentin Luis Caffarelli, l'Américain Robert Kohn et le Canadien Louis Nirenberg ont montré que l'ensemble de ces points est au plus de mesure nulle (cela signifie qu'il y en a éventuellement une infinité, mais qu'ils sont infiniment plus rares que les points où la solution est régulière).

Ce résultat a été sensiblement amélioré vers 2003 par l'Espagnol Luis Escauriaza et les Russes Gregory Seregin et Vladimir Šverák, qui ont étudié la régularité locale des solutions faibles de Leray et établi un critère permettant d'affirmer qu'une solution conduise à un *blow-up*.

Pour résumer, deux solutions sont envisageables au problème proposé par l'Institut Clay. Soit on montre que, sous des hypothèses réalistes, une solution régulière des équations de Navier-Stokes existe pour tous les temps, soit, au contraire, que des singularités apparaissent en général. Dans tous les cas, le résultat représentera un progrès considérable dans l'étude de ces équations aux dérivées partielles. ■



le collège
universcience
universcience.fr

Conférences
Le mardi à 18 h 30
Cité des sciences et de l'industrie

Des chimistes dans la société

À l'occasion de l'année internationale de la chimie, des chercheurs présentent une chimie au service de l'Homme.

10 mai
Comment parler de la chimie ? Ni en bien, ni en mal !
Pierre Laszlo, professeur de chimie honoraire à l'école polytechnique et à l'université de Liège.

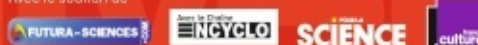
17 mai
D'où vient la peur de la chimie ?
Bernadette Bensaude-Vincent, professeure d'histoire et de philosophie des sciences à l'université de Paris-I Panthéon-Sorbonne.

24 mai
La chimie, pour percer le secret des œuvres d'art
Philippe Walter, directeur de recherche au CNRS, codirecteur du laboratoire du Centre de recherche et de restauration des musées de France.

31 mai
Les bioraffineries du futur
Franck Dumeignil, professeur des universités, membre de l'Institut universitaire de France, unité de catalyse et de chimie du solide, université de Lille.

Auditorium, entrée libre dans la limite des places disponibles
Programme complet : universcience.fr

Avec le soutien de



Le mégaséisme

Pierre Henry

Les sismologues n'avaient prévu ni le mégaséisme qui a secoué la grande île de Honshu au Japon, ni le raz de marée de 20 mètres de haut qui a suivi. Des mécanismes inédits jusqu'à présent sont en cause.

Le 11 mars 2011, une demi-heure après un mégaséisme, un raz de marée frappe la côte Nord-Est de la grande île nipponne de Honshu. Il atteint 20 mètres de haut face à certains endroits encaissés et 10 mètres à Sendai, la plus grande ville de la région. Ces amplitudes expliquent la terrible dévastation due à la vague, mais elles sont relativement modestes si l'on considère la violence inouïe du séisme qui l'a formée : sa magnitude est de 9, ce qui en fait le quatrième plus grand séisme jamais enregistré.

Pareille magnitude est une très mauvaise surprise : personne ne s'attendait à un séisme de cette ampleur à cet endroit. Comment cette possibilité a-t-elle pu échapper à la vigilance des sismologues, notamment de ceux qui furent consultés lors de l'implantation des centrales nucléaires de la région, dans les années 1970 ? Nous expliquons ici les origines de cette erreur d'appréciation et les implications de la nouvelle vision sismologique de la région qui émerge aujourd'hui.

Les Japonais nomment le tremblement de terre du 11 mars 2011 séisme du Tohoku. Ce terme, qui signifie Nord-Est en japonais, désigne la partie Nord de la grande île de Honshu secouée par le séisme. Bien connue pour sa constante activité sismique, la zone dont il provient – la fosse du Japon – se trouve au Nord du point triple du Japon, lieu où se rencontrent les plaques eurasiennne, philippine et pacifique (voir la figure 2). La subduction (plongement d'une plaque sous une autre) qui s'y produit depuis des millénaires engendre de nombreux séismes, parfois accompagnés d'importants tsunamis. Ainsi,



1. LE TSUNAMI DU 11 MARS 2011, consécutif à un mégaséisme, a emporté de nombreuses maisons de la ville japonaise de Natori, qui comptait plus de 72 000 habitants. Ces derniers n'ont eu que 30 minutes pour se mettre en sécurité après que le quatrième plus puissant séisme jamais enregistré a secoué leur ville.

de subduction du Japon



L'ESSENTIEL

- ✓ Le quatrième plus grand séisme jamais mesuré a eu lieu le 11 mars 2011 dans la fosse du Japon.
- ✓ Les sismologues ne s'attendaient pas à un tel séisme à cet endroit.
- ✓ Le Tohoku, la côte Nord-Est de la grande île de Honshu, avait été jugé assez sûr pour que l'on y plante des centrales nucléaires.
- ✓ La très grande longueur de faille qui a rompu montre qu'il faut désormais compter avec de tels mégaséismes au Japon.
- ✓ Les dépôts de tsunami retrouvés sur la plaine côtière de Sendai suggèrent qu'ils ont lieu tous les 1 000 ans environ.

© AP/WIDEWORLD/ANSA/REUTERS

en 1896, la moitié du Tohoku située au Nord de Sendai avait encaissé un raz de marée comparable à celui qui vient de se produire : sa vague excédait 25 mètres. Ce séisme a longtemps intrigué les sismologues, car la hauteur du tsunami était sans commune mesure avec l'intensité sismique perçue alors, ce qui introduisit un doute sur sa magnitude réelle. Comme celui du 11 mars 2011, ce tsunami était lié à la rupture d'une portion de faille proche de la fosse de subduction située à 120 kilomètres de la côte Nord-Est, là où la plaque pacifique s'enfonce sous le Japon à une vitesse d'environ neuf centimètres par an (voir la figure 2).

Soulignons que tous les séismes comparables à celui du Tohoku ont aussi été créés par le glissement brusque de failles de subduction. Dès lors, se demande-t-on, comment les sismologues ont-ils été

conduits à estimer que la zone de subduction située face à la côte Nord-Est du Japon ne produirait probablement jamais un séisme d'une telle magnitude ?

S'ils se sont laissés abuser, c'est parce que cette zone de subduction a une activité sismique régulière en apparence et distribuée sur l'ensemble de la surface de glissement (le plan de faille). De par le monde, on connaît en effet de nombreuses failles, ou segments de faille, qui n'engendrent que de petits séismes, les deux surfaces en contact ne coulissant pas forcément de façon constante, mais du moins sans grandes secousses. Le segment central de la faille de San Andreas, entre Hollister et Parkfield, en Californie, est dans ce cas. Il en serait de même de certaines failles de subduction, comme la fosse des Mariannes (connue pour sa profondeur de 11 000 mètres), dont, semble-t-il, la zone sismogène est très réduite.

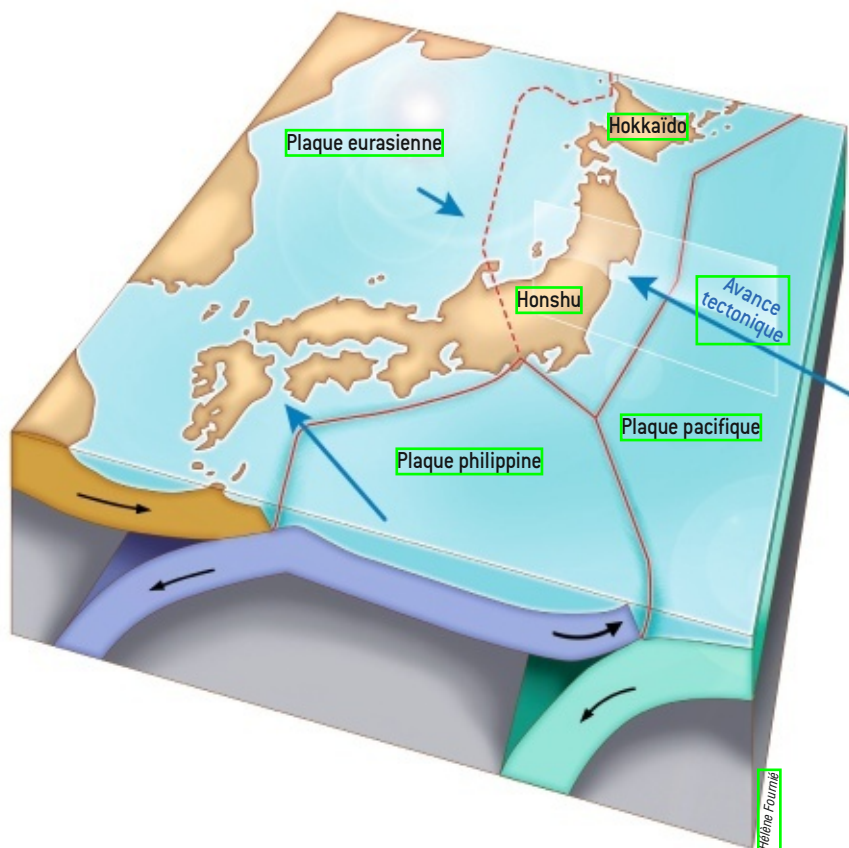
Toutefois, la plupart des failles de subduction produisent de gros séismes, tout en ayant le reste du temps une activité limitée à quelques essais de séismes bien localisés. On dit de telles failles qu'elles sont bloquées, c'est-à-dire que l'essentiel de leur subduction est compensé par le mouvement se faisant à l'occasion de rares mégaséismes. Ces événements majeurs sont suivis de nombreuses répliques. Quand ces mégaséismes arrivent avec une certaine régularité, on les qualifie de séismes caractéristiques. Tel est le cas de la faille de subduction de Nankai, où un *Big one* est attendu.

Premiers calculs du couplage sismique

D'autres failles encore ont un comportement plus complexe, qui ne facilite pas l'estimation du risque. Il en est ainsi de celle de la fosse du Japon. À la fin des années 1960, les modèles de tectonique des plaques avaient déjà fourni une bonne description de la subduction de la plaque pacifique. Les sismologues ont alors pu commencer à estimer le « couplage sismique », qui indique quelle fraction de l'avance de la plaque est compensée par les brusques glissements à l'origine des séismes. Le séisme du 11 mars 2011 aurait ainsi entraîné un glissement le long du plan de faille dépassant la vingtaine de mètres face à Sendai, qui s'est traduit par un déplacement de plusieurs mètres vers l'Est de la côte du Tohoku.

En 1977, Hiroo Kanamori, de l'Institut californien de technologie (Caltech), fut le premier à estimer le couplage sismique de la plaque pacifique. Il obtint un résultat de l'ordre de 25 pour cent, confirmé par tous les travaux qui suivirent. Ainsi, même si la faille de la fosse du Japon produit de forts séismes (jusqu'à 8,2 de magnitude), l'activité sismique est insuffisante pour compenser l'avance de la plaque pacifique. Plus on va vers le point triple situé au Sud, plus l'activité est insuffisante (voir la figure 2).

Dans la zone de subduction de la fosse du Japon, il n'y a donc pas assez de séismes pour compenser la progression de la plaque : les sismologues parlent de déficit sismique. Un détail rendait cette constatation plus inquiétante encore. Le plus gros séisme jamais enregistré dans la zone, le séisme de Sanriku en 1933 (8,4 de magnitude), ne s'est même pas déclenché sur le plan de subduction, mais



2. L'ARCHIPEL NIPPON se trouve sur la ceinture de feu. Cet alignement de volcans, qui borde le Pacifique par le Nord depuis l'Amérique du Sud jusqu'à la Nouvelle-Zélande, coïncide partout avec des frontières de plaques tectoniques et des failles. Au Japon, deux plaques tectoniques – la plaque pacifique au Nord et la plaque philippine au Sud – y passent sous la plaque eurasiennne et la plaque Nord-Amérique. Ces mouvements de subduction ont créé de profondes fosses à l'Est de l'archipel nippon : au Sud, la fosse de Nankai longe l'archipel jusqu'à la région de Tokyo ; elle est reliée par la fosse de Sagami au point triple du Japon, le lieu où se rencontrent les plaques eurasiennne, philippine et pacifique ; de là partent vers le Sud la fosse d'Izu-Bonin et vers le Nord la fosse du Japon. Des failles (en rouge) longent toutes ces fosses, où s'accumulent les contraintes créées par les mouvements de subduction et qui sont responsables de nombreux séismes.

de l'autre côté de la fosse sur la plaque pacifique. Il ne peut avoir contribué à la compensation du mouvement de subduction de la plaque pacifique.

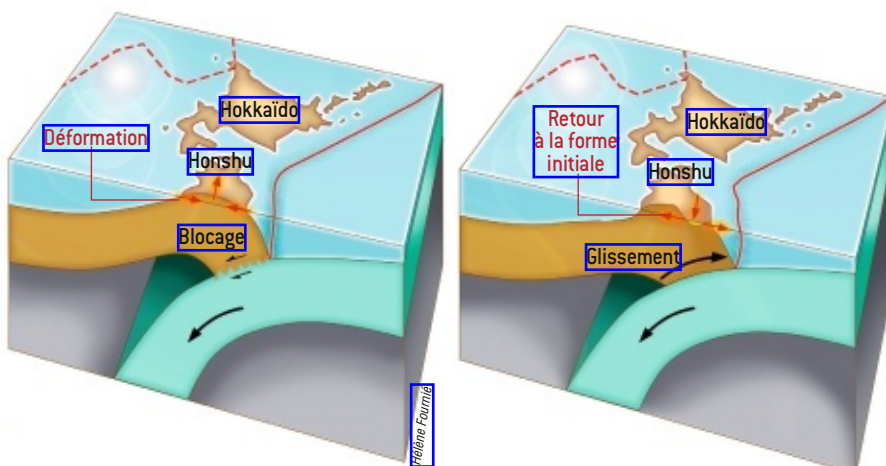
Les sismologues voyaient deux explications possibles au déficit sismique : soit l'essentiel de l'avance de la plaque est compensé par des glissements aismiques, c'est-à-dire sans secousses ; soit il manque de gros séismes dans l'historique sismique nipponne. Cette seconde explication passait pour improbable, l'histoire de l'activité sismique au Japon étant l'une des mieux connues au monde. Quatre événements majeurs sont connus pour la partie Nord du Tohoku (1896, 1677, 1611 et 869), mais aucun séisme majeur ne semble s'être produit dans la partie Sud depuis 800 ans au moins. C'est donc l'hypothèse d'un glissement au moins en partie aismique qui a été retenue.

La construction des six réacteurs nucléaires à Fukushima-Daïchi dans les années 1970, et de quatre autres à Fukushima-Daïni au début des années 1980, passa alors probablement pour une bonne idée par rapport à d'autres implantations dans l'archipel nippon...

La découverte d'une... faille dans cette logique viendra de la mesure de la déformation géométrique de l'île de Honshu. L'analyse des données de la géodésie classique (non satellitaire) a en effet révélé que depuis les débuts de l'ère Meiji (1868-1912), le Nord du Japon subit une déformation liée à l'accumulation des contraintes dues à la subduction. Or si seulement un quart (la valeur supposée du couplage sismique) du mouvement de la plaque pacifique était compensé par les séismes connus, cette déformation aurait dû être bien plus faible...

En 1994, les Japonais décident, notamment pour cette raison, d'implanter un réseau dense de stations GPS de surveillance satellitaire permanentes. En trois ans, 1000 stations sont opérationnelles. Les données qu'elles livrent confirment une importante déformation liée à l'accumulation de contraintes sur la faille de subduction.

Comment interpréter ce fait ? En 1983, James Savage, de l'Université Purdue aux États-Unis, avait donné les deux principes du raisonnement permettant de prévoir les effets de la subduction. Le premier est qu'à long terme, la croûte terrestre ne se déforme de façon notable qu'à proximité de la faille ; le second est que la déformation des blocs de part et d'autre de la faille est élastique et réversible.



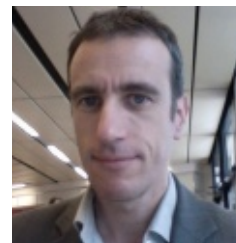
3. CES COUPES DE HONSHU ET DE LA FOSSE DU JAPON (plan de coupe indiqué sur la figure 2) montrent (à gauche) le blocage, avant le séisme, de la plaque pacifique sur la plaque eurasiennne portant l'île de Honshu, qui se raccourcit de plusieurs centimètres par an, tout en se bombant à mesure qu'elle accumule des contraintes et que le bord de la plaque eurasiennne plonge. Pendant le séisme (à droite) et juste après, ces contraintes se relâchent et l'île de Honshu reprend sa surface et sa forme initiales. C'est la brusque remontée du bord de plaque qui crée un tsunami.

La conséquence immédiate de cette logique est que si, pendant les périodes dénuées de séismes majeurs, l'archipel nippon a été contracté par la subduction (d'environ deux centimètres par an), il reprendra par à-coups la surface perdue à la faveur de grands séismes. Ainsi, au Japon, la déformation enregistrée en période intersismique détermine la proportion du mouvement de subduction qui se traduit par une déformation de la croûte ; cette proportion mesure le « couplage mécanique de la subduction ». Dans le cas d'une subduction aismique, ce couplage est nul ; il est de 100 pour cent quand le contact d'une croûte avec la plaque de subduction la bloque entièrement. Dans ce cas, la croûte ne peut que se déformer à mesure que progresse la plaque, phénomène qui trouve nécessairement sa limite un jour (voir la figure 2).

Couplage mécanique de 100 pour cent

Dans des travaux publiés entre 1998 et 2001, une équipe franco-japonaise, dirigée du côté français par Xavier Le Pichon, du Collège de France, a montré que le long du plan de subduction de la fosse du Japon, le couplage mécanique est de 100 pour cent. Selon ces chercheurs, cette valeur se maintient jusqu'à environ 50 kilomètres de profondeur, c'est-à-dire presque jusqu'à la verticale de la côte. Il résulte de cette découverte que le modèle de H. Kanamori d'un couplage sismique de 25 pour cent dans la fosse du Japon ne tient plus.

L'AUTEUR



Pierre HENRY, géophysicien, est directeur de recherches au CNRS et travaille au Centre européen de recherche et d'enseignement des géosciences de l'environnement (CEREGE), à Aix-en-Provence.

BIBLIOGRAPHIE

S. Mazzotti *et al.*, Full interseismic locking of the Nankai and Japan - West Kurile subduction zones [...], *J. Geophys. Res.*, vol. 105, pp. 13159-13177, 2000.

K. Minoura *et al.*, The Jogan tsunami deposit and recurrence interval of large-scale tsunami on the Pacific coast of northeast Japan, *Journal of Natural Disaster Science*, vol. 23, pp 83-88, 2001.

En fait, tout se passe comme si l'arc insulaire japonais était un énorme bloc de caoutchouc qui se contracte sous la poussée de la plaque pacifique, et qui reprend entièrement sa forme lors d'un grand séisme. Si la subduction nipponne fonctionne ainsi, le couplage sismique dans la fosse du Japon, c'est-à-dire la fraction de l'avance de la plaque pacifique qui sera compensée par les futurs séismes, ne peut qu'être égal au couplage mécanique, c'est-à-dire à la fraction de l'avance de la plaque compensée par la déformation enregistrée en période intersismique.

De ces considérations, les sismologues ont déduit qu'une énorme énergie élastique s'accumulait dans la faille de la fosse du Japon, qui serait relâchée un jour, probablement par un grand séisme.

Toutefois, les circonstances du séisme de magnitude 7,6 qui se produisit en 1994 au Nord de l'île de Honshu les ont induits en erreur. Le réseau GPS japonais enregistre alors un vaste mouvement postsismique, qui crée l'impression que des mouvements asismiques sont possibles le long de la faille de la fosse du Japon. Naturellement, les sismologues se sont demandé si ces glissements sans secousses pouvaient absorber le déficit sismique. Ils ont vite incliné à le penser, quand, en 1997, Kosuke Heki, de l'Université d'Hokkaido, montra

que le mouvement postsismique qui se produisit dans le Tohoku équivalait à un séisme de magnitude 7,7!

L'explication suivante du déficit sismique de la faille de la fosse du Japon s'est alors imposée. Après chaque séisme, la plaque en subduction continue à glisser aux environs de la zone venant de rompre : elle dissipe ainsi le reste de l'énergie élastique stockée dans la déformation, avant de se bloquer à nouveau en quelques années. Même si l'existence de tels mouvements de relaxation est avérée, depuis le 11 mars 2011, il est clair que cette explication ne suffit pas!

Les aspérités d'un séisme

L'existence le long du plan de subduction de la fosse du Japon d'un couplage sismique proche de 100 pour cent est désormais établie. Du reste, des simulations réalisées récemment à partir des données GPS à l'*Earth Simulator* de l'Agence japonaise pour les sciences et technologies marines (JAMSTEC) l'ont confirmé – à la nuance près que, près du point triple du Japon, la plaque pacifique semble glisser sous la plaque eurasiennne.

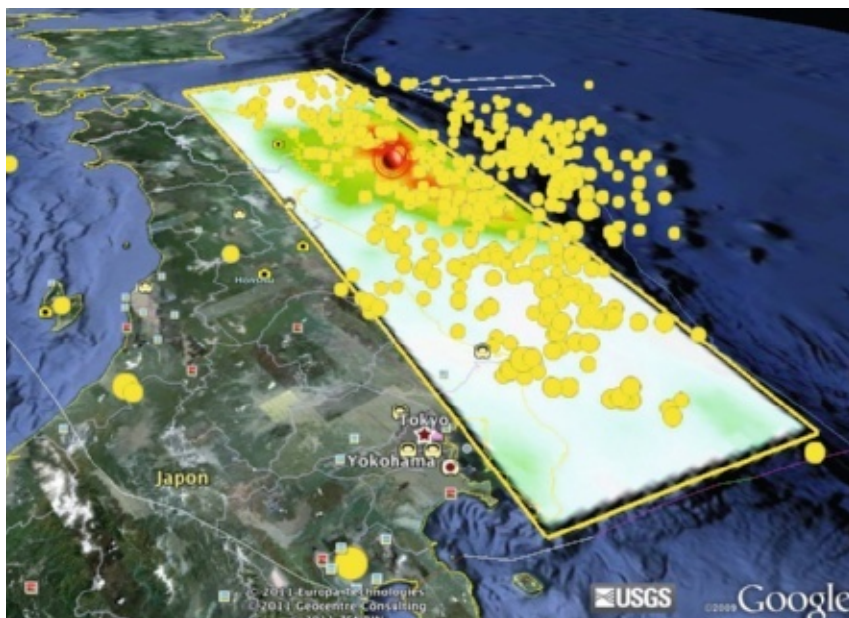
Malheureusement, ce genre de calcul ne permet pas d'anticiper l'étendue

des ruptures. Il faudrait pour cela connaître d'avance la longueur de faille concernée. Or non seulement on l'ignorait dans le cas du mégaséisme du 11 mars 2011, mais la possibilité d'une rupture affectant le plan de faille depuis le point triple (au Sud) jusqu'à la zone du séisme de 1896 (au Nord) n'avait pas été imaginée.

En effet, les sismologues considéraient cela comme improbable à cause de la segmentation supposée de la faille de la fosse du Japon. L'idée qu'une faille est segmentée en tronçons rompant indépendamment les uns des autres s'applique en effet souvent, tout particulièrement aux failles en décrochement (verticales et coulissantes), telle celle de San Andreas, aux États-Unis ; elle semble pouvoir l'être aussi à certaines failles de subduction. Ce serait le cas pour la faille de Nankai, où la subduction s'effectue le long de deux segments principaux, rompant en général à quelques heures ou quelques années d'intervalle, bien qu'il soit arrivé qu'ils rompent ensemble.

Il apparaît aujourd'hui que la faille de la fosse du Japon serait mieux décrite à partir de la notion plus floue d'aspérité. On désigne ainsi les parties du plan de faille où le glissement est le plus important lors des grands séismes (voir la figure 4). Ces zones de glissement maximal sont aussi censées être les zones de blocage maximal en période intersismique. La magnitude d'un séisme dépend alors aussi bien de l'étendue du plan de faille que de la taille de l'aspérité et de l'amplitude du mouvement.

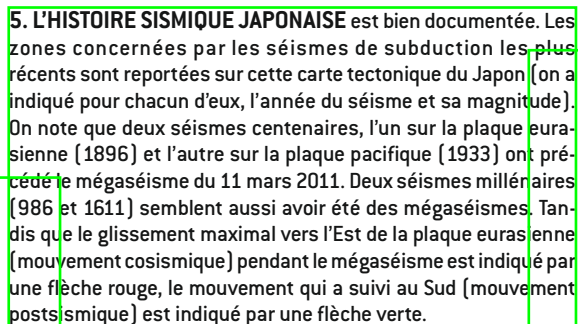
Ainsi, le séisme de magnitude 9,1 du 26 décembre 2004 dans l'océan Indien a été provoqué par une rupture qui, durant neuf minutes, s'est étendue sur 1 200 kilomètres. Celui du Tohoku a été beaucoup plus bref et concentré : il semble que l'essentiel de l'énergie ait été libéré en trois minutes seulement par une rupture longue de 500 kilomètres. Plus précisément, les calculs réalisés par diverses équipes à partir des données sismologiques et géodésiques (GPS) montrent que des glissements de 20 à 40 mètres ont été atteints sur 200 kilomètres de part et d'autre de l'épicentre, situé face à Sendai. Mis en ligne sur le site Internet *Tohoku-oki* dédié au séisme du 11 mars 2011, plusieurs de ces résultats suggèrent en outre que la zone de fond de mer dont le mouvement a créé le tsunami a été d'extension réduite ; elle serait située près de la fosse, comme lors du séisme de 1896.



4. LE MÉGASÉISME DU 11 MARS 2011 résulte de glissements le long d'un plan de faille de plus de 500 kilomètres de long, dont la projection à la surface est marquée ci-dessus par un cadre jaune. L'aspérité de la faille mise en jeu par le séisme, c'est-à-dire la zone où les mouvements ont été maximaux – supérieurs à dix mètres –, est indiquée en rouge et vert ; elle ne mesure que 200 kilomètres de long. Tandis que l'épicentre du séisme est signalé par un gros point rouge, les répliques le sont par des points jaunes.

Par ailleurs, le suivi sismographique depuis 1896 avait plutôt conduit les sismologues à définir des zones de rupture d'une taille de 100 à 200 kilomètres de long. Le plan de rupture du mégaséisme du 11 mars 2011 est bien plus long et son aspérité s'étend – sans les recouvrir complètement – sur les zones de rupture de plusieurs séismes précédents. Il apparaît en plus que la partie centrale de la rupture (là où le mouvement fut maximal) semble s'être déjà à nouveau bloquée, tandis qu'un mouvement postsismique accompagné de nombreuses répliques a commencé au Sud, qui rappelle celui observé au Nord en 1994.

Tous ces mouvements ne peuvent qu'avoir modifié la répartition des contraintes dans la croûte autour de la zone de rupture. Il en résulte une augmentation du risque de séisme dans la plaque pacifique (de la même façon que le séisme de 1896 a favorisé le séisme de 1933) et sur les parties adjacentes du plan de subduction, où se produisent aussi des répliques. Plus au Sud, les fosses de Sagami, où s'est produit le grand séisme de Kanto, en 1923, et de Suruga, où le dernier séisme date de 1854, sont également dans la zone d'influence. La situation y est cependant compliquée par la présence du point triple. Les calculs effectués montrent que l'évolution peut être différente sur chaque portion de faille; il en résulte que sans carte précise du glissement, il n'est pas encore possible d'apprécier l'évolution du risque dans cette région.



que des séismes millénaires géants, correspondant à la rupture simultanée de deux segments ou plus de la faille, se sont produits occasionnellement au cours des derniers millénaires, en plus de séismes séculaires dans chaque segment.

La subduction des Cascades, face à la côte de l'Amérique du Nord, entre l'île de Vancouver et le Nord de la Californie, fournit un cas remarquable d'un tel mégaséisme à venir. Malgré notre connaissance limitée de l'histoire sismique de la région, les sismologues ont pu montrer que l'on doit s'attendre à des séismes de magnitudes supérieures à 9 et aux tsunamis d'une trentaine de mètres correspondants. Toutefois, les intervalles entre ces mégaséismes restent mal définis. Un tsunami arrivé au Japon le 26 janvier 1700, et qui n'avait pas été précédé d'un tremblement de terre, a cependant permis de connaître la date du dernier. La probabilité qu'un tel mégaséisme se produise dans les 50 ans à venir serait de dix pour cent.

Dans la fosse du Japon face au Tohoku, les séismes de 1611 et de 869 pourraient correspondre à de tels événements. Des travaux menés par l'Université de Sendai ont mis en évidence en 2001 que le séisme de 869 a produit un grand tsunami dans la baie de Sendai, lequel a laissé des dépôts de sable jusqu'à quatre kilomètres à l'intérieur des terres. Les chercheurs ont montré que de tels événements exceptionnels se sont produits tous les 1 000 ans environ aux époques préhistoriques, et conclu que le suivant était imminent. Il a eu lieu le 11 mars 2011.

S'il y a désormais un consensus sur ce point, quelles conséquences pratiques en tirer ? Peut-on se protéger contre un tel mégaséisme et son tsunami ? D'un point de vue sismologique, l'histoire de la recherche sur la subduction de la plaque pacifique sous le Japon montre qu'il faut réévaluer régulièrement l'aléa sismique en fonction des nouvelles connaissances. Plus globalement, il se confirme une fois de plus que la pertinence des modèles scientifiques et de leurs prévisions dépend des ingrédients que l'on y met. Or on sait rarement tout d'avance...

Rendez-vous sur www.pourlascience.fr

- Retrouvez gratuitement les actualités scientifiques quotidiennes.
- Recevez nos lettres d'information et réagissez aux articles en vous inscrivant sur le site.
- Recherchez et commandez les archives parues depuis 2004 de *Pour la Science* et des *Dossiers Pour la Science*.
- Accédez aux numéros numériques compris dans votre abonnement en créant votre compte.



À très bientôt sur www.pourlascience.fr !

POUR LA
SCIENCE.fr

Le site de référence de l'actualité scientifique

LE MOT JUSTE

Comment le cerveau l'acquiert, le choisit et le produit

- Comment les enfants apprennent leur langue maternelle, É. Cauvet, P. Brusini, I. Brunet et A. Christophe, p. 42
- La production des mots, F.-Xavier Alario, p. 50 • La musique de *Enfin*, Mélanie Petit, p. 56

Le langage parlé – comme le rire – serait le propre de l'homme. Si la capacité de parler est codée dans les gènes, le chemin est long de l'acquisition du vocabulaire et de la grammaire à l'expression du mot juste en toute occasion. Comment l'enfant acquiert-il sa langue maternelle ? Comment trouve-t-on presque toujours le mot juste ? Comment attribue-t-on leur sens aux mots ?

In utero, le fœtus perçoit les sons et en privilégie certains, notamment la voix de sa mère. Dès la naissance, l'enfant apprend à reconnaître les mots de sa langue, avant de leur attribuer un sens. Les scientifiques découvrent que les enfants de 18 mois – voire moins – distinguent un verbe d'un nom, connaissent la signification des mots, alors qu'ils s'expriment encore avec difficulté et n'acquièrent la grammaire que vers deux ans et demi ou trois ans.

C'est aussi à cet âge que l'enfant trouve le mot juste adapté à chaque situation, disposant d'un vocabulaire déjà riche. Les mécanismes cérébraux mis en jeu pour puiser dans ce « sac de mots » se dévoilent : un réseau complexe, qui existerait dès les premiers

mois de la vie, permet d'émettre le mot juste au bon moment, sans y prêter attention. Pourtant, chacun a été confronté aux situations embarrassantes que représentent les lapsus. Ces erreurs d'aiguillage verbal révèlent les conflits cognitifs auxquels le cerveau est sans cesse confronté quand il doit sélectionner le mot juste avant de le produire.

Si attribuer un sens à un mot est une étape essentielle à l'acquisition d'une langue, elle n'est pas facile et recouvre nombre de mécanismes encore plus subtils. Dans la phrase *Enfin, tu arrives*, que signifie *enfin* pour l'enfant à qui l'on s'adresse ? *Ce n'est pas trop tôt, je m'impatientais* ? Ou *Heureusement que tu es là, je m'inquiétais* ? Un même mot, à l'instar de ces « petits » mots tels que *enfin*, peut avoir des sens différents selon l'intonation. L'étude de la musique des mots est l'un des multiples aspects des recherches menées en linguistique et en neurobiologie. Parler semble si simple qu'on en oublie la complexité des mécanismes qui sous-tendent l'acquisition et la production du langage.

Comment les enfants apprennent leur langue maternelle

É. Cauvet, P. Brusini, I. Brunet et A. Christophe

Les enfants comprennent la structure grammaticale de leur langue maternelle bien plus tôt qu'on ne le pensait, avant même de faire des phrases. Ils s'en serviraient pour apprendre le sens de mots nouveaux.

Le langage est-il inné ? De la naissance à l'âge de trois ans en moyenne, les bébés apprennent, apparemment sans effort, une ou plusieurs langues maternelles. De nombreux arguments suggèrent que cette capacité fait partie du bagage génétique des êtres humains. Tout d'abord, tous les hommes parlent, quels que soient leur culture et leur pays d'origine : on n'a pas trouvé de groupe humain, si reculé soit-il, qui n'ait de langage. Ensuite, toutes les tentatives d'apprendre une langue à d'autres espèces animales, même très évoluées, ont été un échec : les chimpanzés ou les dauphins apprennent un vocabulaire de plusieurs centaines de mots (contre environ 50 000 pour un être humain), mais ne peuvent jamais combiner des mots pour former des phrases.

Qui plus est, l'apprentissage d'une langue ne dépend pas de l'intelligence : certains enfants naissent avec une difficulté spécifique du langage (ils sont « dysphasiques »), alors que leur intelligence est normale. Et d'autres enfants souffrent d'un retard de développement important, mais ont un langage quasi normal. Enfin, si des enfants naissent dans un environnement linguistique appauvri (on leur parle peu ou ils sont sourds par exemple), ils reconstruisent spontanément la complexité naturelle des langues. Ce phénomène a été observé au Nicaragua dans les années 1980-1990,



1. L'ACQUISITION DU LANGAGE ORAL
commence *in utero* et s'achève vers l'âge de cinq ans.

© Shutterstock.com

lorsque de jeunes sourds ont créé une langue des signes pour communiquer. Ainsi, les enfants humains naissent avec la capacité d'apprendre à parler. Voyons comment elle se développe.

À partir du monde qui l'entoure et de ses prédispositions génétiques, l'enfant apprend une ou plusieurs langues maternelles pour les maîtriser presque complètement à l'âge de trois ans. Il acquiert plusieurs compétences en même temps. Tout d'abord, le flux de paroles à l'oral est continu (alors qu'à l'écrit, les mots sont séparés) et l'enfant doit extraire les mots de ce flux de paroles. Les langues utilisent un répertoire de sons différents (les consonnes et les voyelles), et l'enfant apprend à représenter les mots à l'aide des sons pertinents pour sa langue maternelle. Il doit aussi mettre un sens sur chacun des mots, afin d'acquérir le vocabulaire. Puis il combine les mots selon les règles de sa langue (la syntaxe) pour former des phrases et transmettre des informations.

Nous allons préciser comment l'enfant franchit ces différentes étapes, qui se chevauchent dans le temps (voir la figure 2). Par exemple, lorsque quelques mots ont été extraits et ont reçu un sens, ils aident à délimiter les nouveaux mots qui les encadrent et à restreindre les sens possibles des autres mots. En outre, nous allons voir que l'enfant utilise le contexte des mots et la syntaxe des phrases bien avant de savoir lui-même prononcer des phrases, ce qui lui permet de donner un sens aux mots nouveaux.

Certains chercheurs sont convaincus que les enfants n'ont pas du tout accès à la structure syntaxique, ni aux différentes catégories grammaticales, avant l'âge de deux ans et demi ou trois ans, âge auquel ils commencent à prononcer des phrases plus complexes. De ce fait, ils pensent que l'acquisition du lexique s'effectue en l'absence de connaissances syntaxiques. Selon eux, les enfants de moins de deux ans répètent des morceaux de phrases qu'ils ont déjà entendus, et ne peuvent pas généraliser un mot nouvellement appris à d'autres structures syntaxiques que celles où ils l'ont entendu : ils n'ont donc pas encore accès aux catégories grammaticales. Or nos dernières études, que nous allons présenter, prouvent que les enfants de deux ans, voire de 18 mois, sont capables d'utiliser la syntaxe pour donner un sens à un mot.

L'acquisition du langage commence alors que le bébé n'est encore qu'un fœtus

dans le ventre de sa mère. À partir du dernier trimestre de grossesse, le fœtus utilise son oreille interne pour entendre les sons émis par sa mère et ceux de l'extérieur (voir la figure 1). La paroi utérine et le liquide amniotique forment un filtre qui atténue les sons extérieurs ; leur perception auditive est donc différente et ressemble à ce que vous entendriez si vous étiez dans une piscine. Mais le fœtus perçoit les voix même modifiées ; dès la naissance, le nouveau-né préfère écouter des gens parler, plutôt que du bruit.

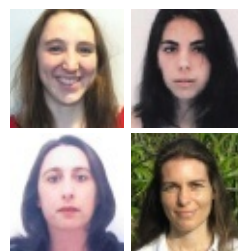
Avant la naissance, la voix de la mère est celle que le fœtus entend le mieux et le plus distinctement, car elle est non seulement transmise par le milieu extérieur, mais aussi par l'intérieur du corps. En 2003, en mesurant le rythme cardiaque du fœtus, Barbara Kisilevsky, de l'Université d'Ontario au Canada, et ses collègues ont montré que le fœtus reconnaît la voix de sa mère par rapport à celle d'une inconnue : en effet, le rythme cardiaque accélère quand on lui fait entendre la voix de sa mère, tandis qu'il ralentit s'il s'agit de l'inconnue. En outre, le fœtus perçoit déjà le rythme et la mélodie, c'est-à-dire la prosodie (l'intonation), de sa langue maternelle.

La voix de la mère

En 1988, Jacques Mehler, de l'École des hautes études en sciences sociales à Paris, et ses collègues ont montré que les nouveau-nés préfèrent écouter leur langue maternelle plutôt qu'une langue étrangère. Pour ce faire, ils ont relié une tétine, placée dans la bouche du bébé, à un capteur de pression, et ils ont fait écouter des phrases françaises et russes à des enfants nés de parents francophones ; ils ont observé que les nouveau-nés têtent davantage pour entendre leur langue maternelle que pour écouter une langue étrangère.

L'audition fœtale de la langue maternelle influe non seulement sur la perception de la parole, mais aussi sur la production orale du nouveau-né : en 2009, en collaboration avec Birgit Mampe, à l'Université de Würzburg en Allemagne, et ses collègues, nous avons montré que le contour mélodique – c'est-à-dire les variations d'intonation – des pleurs du bébé dépend de celui de sa langue maternelle ; les bébés allemands pleurent plus fréquemment avec un contour mélodique proche des phrases de l'allemand, tandis que les pleurs des bébés français

LES AUTEURS



Elodie CAUVET, Perrine BRUSINI et Isabelle BRUNET travaillent au Laboratoire de sciences cognitives et psycholinguistiques du CNRS et de l'École normale supérieure à Paris, dirigé par Anne CHRISTOPHE.

L'ESSENTIEL

✓ Un fœtus reconnaît déjà la voix de sa mère – comparée à celles d'inconnues – et en perçoit le rythme et la mélodie.

✓ L'enfant apprend ensuite à reconnaître les sons de sa langue, puis à extraire les mots des phrases, avant de leur attribuer un sens.

✓ Le contexte et la syntaxe des phrases permettraient à l'enfant de 18 mois de donner un sens aux mots nouveaux.

✓ Ces capacités précoces de grammaire sont-elles innées ? On l'ignore.

suivent le plus souvent un contour reflétant le phrasé du français.

Puis, après la naissance, les bébés ont accès à des propriétés acoustiques plus fines de leur langue, notamment les sons qui la composent – les consonnes et les voyelles, ou phonèmes. En français, pour les consonnes, les sons *b* et *v* permettent de discriminer des mots : *boire* et *voir*. Cependant, toutes les langues n'utilisent pas cette distinction : par exemple, en espagnol, il n'y a que le son *b*. Les locuteurs adultes perçoivent très bien les distinctions utiles dans leur langue, mais sont incapables d'entendre celles qui ne servent pas. Par exemple, le japonais ne possède pas le contraste entre les sons *r* et *l* et les adultes japonais n'entendent pas la différence entre ces deux sons. De même, les Français ne perçoivent pas les différences d'accent tonique utilisées en espagnol ou en anglais, ni celles de tons présentes dans certaines langues, tels le chinois et le thaï.

Les jeunes enfants doivent donc apprendre à percevoir les sons spécifiques de leur langue maternelle et à ignorer ceux qui ne servent pas. Plusieurs expériences ont montré que les enfants acquièrent les catégories de consonnes et de voyelles propres à leur langue entre 8 et 12 mois : avant l'âge de huit mois, les jeunes enfants différencient tous les contrastes sonores utilisés dans les langues du monde, qu'ils appartiennent ou non à leur langue maternelle. Après l'âge de 12 mois, à l'instar des adultes les entourant, ils sont incapables de discerner des sons qui n'existent pas dans leur langue maternelle.

C'est Janet Werker, de l'Université de Vancouver au Canada, qui a pour la première fois en 1986 réalisé ce type d'expé-

rience. Elle a entraîné des bébés de 6, 8, 10 et 12 mois à tourner la tête lorsqu'un changement de syllabe se produisait, puis elle a testé deux syllabes provenant du hindi, deux variantes de la syllabe *ta*. L'une contenait un *t* dit dental (celui que l'on trouve en français et en anglais), l'autre un *t* dit rétroflexe qui n'existe ni en français ni en anglais. De fait, les bébés anglophones de six mois distinguaient les deux types de syllabes, puis perdaient progressivement cette capacité jusqu'à devenir incapables de les distinguer à l'âge de 12 mois. En revanche, un groupe de bébés dont la langue maternelle était le hindi, testés à l'âge de 12 mois, pouvaient entendre la différence entre ces deux syllabes.

Découper les mots

Beaucoup d'adultes s'adressent aux jeunes enfants de façon particulière : l'intonation est gaie, le rythme de parole ralenti, le vocabulaire et la structure des phrases se simplifient. On sait que cette parole dirigée vers les enfants attire leur attention, notamment à cause de son contenu affectif. De plus, son débit lent et sa mélodie exagérée rendent plus saillantes les caractéristiques prosodiques de la langue maternelle, et peuvent aider les enfants, par exemple, à découper les phrases en mots.

En effet, l'une des sources d'information que les enfants utilisent pour découvrir les mots dans les phrases est l'intonation et le rythme de la parole, c'est-à-dire sa prosodie. Lorsqu'on parle (aux enfants ou à d'autres adultes), on ne produit pas une suite de syllabes toutes équivalentes sur un ton monocorde. Au contraire, les mots sont regroupés dans de petites unités d'into-

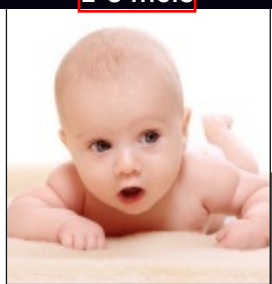
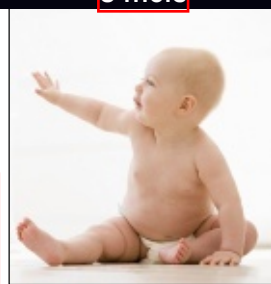
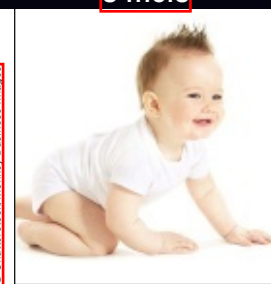
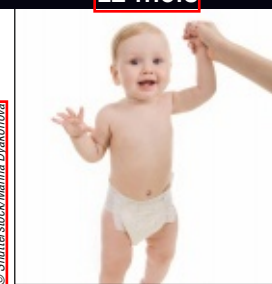
nation. Par exemple, une phrase comme *le petit garçon a mangé une pomme* sera produite selon deux unités, *le petit garçon* et *a mangé une pomme*.

En 2010, nous avons montré que les enfants de 16 mois perçoivent ces unités prosodiques et les exploitent pour découvrir les frontières de mots. Dans cette expérience utilisant la technique de conditionnement de l'orientation du regard, des enfants sont entraînés à tourner la tête vers la gauche pour le mot *balcon* : chaque fois qu'ils entendent *balcon*, s'ils regardent sur leur gauche, ils sont récompensés par un petit nounours qui s'éclaire et qui s'anime (s'ils ne regardent pas, il ne se passe rien et l'expérience continue).

Lorsque les enfants ont appris à réagir au mot *balcon*, ils reviennent une semaine plus tard pour la phase de test. Cette fois, ils entendent des phrases entières, dont certaines contiennent le mot *balcon*, comme [*le grand balcon*] [*faisait face*] [*au cloître du monastère*], tandis que d'autres contiennent les deux syllabes de *balcon*, séparées par une frontière prosodique, comme [*ce grand bal*] [*consacrera leur union*] (les crochets marquent les frontières prosodiques).

Dans cette expérience, les enfants ont réagi plus souvent aux phrases qui contenaient vraiment *balcon* qu'aux autres. Ainsi, les enfants français de 16 mois, comme les adultes, sont capables d'exploiter les frontières prosodiques pour trouver certains mots. Pour aller plus loin et segmenter les unités prosodiques comme *le grand balcon* en mots, les enfants utilisent plusieurs stratégies complémentaires.

L'une d'elles consiste à identifier les mots (ou morphèmes) grammaticaux, à savoir les articles, auxiliaires, terminai-

Naissance	1-5 mois	6 mois	8 mois	12 mois
				
Les nouveau-nés reconnaissent et préfèrent leur langue maternelle, comparée à celles d'étrangers ou à de la musique.	Les nourrissons reconnaissent les sons et les syllabes de leur langue dans des énoncés différents.	Les nourrissons babillent et peuvent associer les mouvements des lèvres à des sons.	Les nourrissons produisent leurs premières voyelles et peuvent détecter les frontières de groupes syntaxiques.	Les enfants comprennent et produisent leurs premiers mots.

sons verbales, etc. Comme ces petits mots sont fréquents et se produisent le plus souvent en bordure d'unités prosodiques, les enfants les repèrent facilement. En effet, plusieurs expériences ont montré que les enfants reconnaissent déjà les mots grammaticaux de leur langue maternelle avant leur premier anniversaire.

Par exemple, en 2008, Rushen Shi, de l'Université du Québec à Montréal, a montré que des enfants de huit mois, familiarisés avec une suite de syllabes comme *des preuves*, reconnaissent ensuite le mot *preuves* pendant la phase de test (ils regardent plus longtemps vers le haut-parleur qui émet le mot *preuves*). En revanche, un autre groupe d'enfants, familiarisés avec les syllabes *ké preuves*, où *ké* n'est pas un mot grammatical du français, ne reconnaissent pas le mot *preuves* pendant le test. Ainsi, dans une unité prosodique comme *le grand balcon* avec le mot *le* au début, les enfants pourraient identifier *le* comme étant un mot grammatical, ce qui ne laisse plus que *grand balcon* à découper.

Une autre stratégie pour trouver les mots est d'exploiter la probabilité qu'une syllabe en suive une autre. En effet, à l'intérieur d'un mot, la probabilité que la deuxième syllabe suive la première est plus grande qu'entre deux mots. Par exemple, dans la suite de syllabes *grand balcon*, la syllabe *grand* peut être suivie d'un grand nombre de syllabes différentes (parce que n'importe quel nom convient), de sorte que la probabilité que *grand* soit suivi de *bal* est faible. Au contraire, la probabilité que *bal*

soit suivi de *con* est, elle, plus élevée, car le mot *balcon* existe (même si d'autres suites sont possibles, comme *balançoire*).

En 1996, Jenny Saffran, de l'Université de Rochester aux États-Unis, et ses collègues ont montré que les probabilités d'apparition des syllabes permettent aux enfants de moins d'un an de découvrir des mots dans un flux continu de paroles. En effet, après avoir écouté pendant deux minutes une suite de « mots » répétés les uns après les autres sans interruption, par exemple *pakotipibularemidopakoti*,

pattes et non du fait qu'il court ou qu'il est noir ou doux par exemple. Se pose à ce moment le problème de la multiplicité des sens soulevé par le philosophe américain Willard Van Orman Quine en 1960. Quels indices permettent à l'enfant d'associer la forme sonore *chien* avec son sens ?

Les enfants utilisent tout d'abord une première série d'indices liés au contexte social et pragmatique de l'interaction de l'enfant avec celui qui lui parle : par exemple, l'attention conjointe, c'est-à-dire la capacité à analyser la direction du regard du locuteur pour deviner de quoi il parle. Entre 10 et 12 mois, les enfants sont ainsi capables d'analyser le contexte pour apprendre des mots nouveaux.

Par exemple, en 1996, Dare Baldwin, de l'Université d'Oregon, et ses collègues ont comparé deux situations d'apprentissage. Dans la première, une expérimentatrice, assise à côté de l'enfant, jouait avec lui avec des objets nouveaux, tels des dinosaures de différentes sortes, et disait en même temps : *oh, regarde, un modi ! tu as vu, c'est un modi !*, etc., tout en regardant alternativement le jouet et l'enfant, donc en lui montrant qu'elle parlait du dinosaure. Dans la seconde situation, le téléphone sonnait dès que l'expérimentatrice s'asseyait ; elle se levait pour répondre, puis, parlant au téléphone et tournant le dos à l'enfant, elle énonçait exactement la même série de phrases.

Dans les deux cas, l'attention de l'enfant était tournée vers le nouveau jouet. Dans la phase de test, les expérimentateurs ont montré que seuls les enfants de la

L'HYPOTHÈSE D'INITIALISATION SYNTAXIQUE

repose sur l'idée que les très jeunes enfants exploiteraient la syntaxe des phrases où ils entendent des mots nouveaux pour leur donner un sens.

les enfants préféreraient écouter une liste des mots qu'ils venaient d'entendre, comme *pakoti*, plutôt que des mots qui contenaient les mêmes syllabes dans un ordre différent, par exemple *dopabu*.

Dès qu'un mot est extrait, reste à lui assigner un sens et à le rajouter dans le dictionnaire mental, ou lexique. Cette tâche d'assignation, d'apparence anodine, est cruciale et ardue. En effet, rien dans la forme sonore *chien* ne permet de déduire qu'il s'agit de l'animal à quatre pattes : la relation entre le son et le sens est arbitraire. De plus, les situations sont souvent ambiguës : même si vous pointez du doigt vers un chien tout en disant *voilà un chien*, l'enfant doit faire l'hypothèse que vous parlez de la catégorie d'animal à quatre

18 mois



© Shutterstock/Donna Thompson

Les enfants comprennent des phrases et produisent leurs premiers verbes. Ils utilisent le contexte pour donner un sens aux mots.

2 ans



© Shutterstock/Jamie Dupress

Les enfants comprennent des phrases de plus en plus complexes et produisent leurs premières phrases.

3 ans



© Shutterstock/Don Vanders

Les enfants ont acquis la grammaire de leur langue.

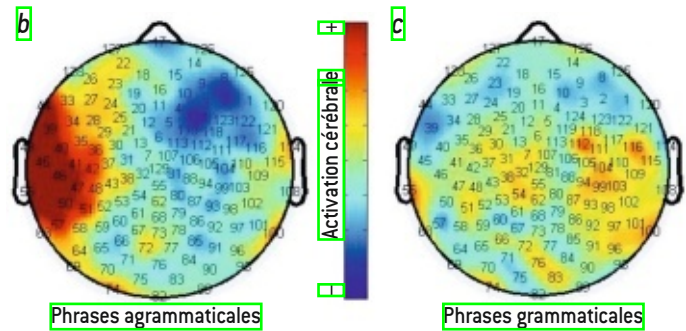
4-5 ans



© Shutterstock/Alina H

Les enfants ont acquis le langage oral et ils ont leurs premières expériences avec le langage écrit.

2. CHEZ L'ENFANT, le développement du langage prend en moyenne cinq ans. Si le nouveau-né est capable de reconnaître sa langue maternelle, la production des premiers mots apparaît vers un an et les premières expériences avec le langage écrit vers quatre ou cinq ans.



3. LES ENFANTS DE DEUX ANS connaissent déjà la syntaxe de leur langue maternelle. Pendant qu'ils enregistrent l'activité cérébrale des enfants par électroencéphalographie (a), les chercheurs leur ont fait écouter des phrases grammaticales (correctes) et agrammaticales (incorrectes). Les cercles ci-dessus représentent l'activité électrique mesurée à la surface du scalp, vue du dessus (les oreilles sur les côtés, le nez devant) et moyennée sur une fenêtre temporelle comprise entre 400 et 600 millisecondes. Pour les phrases agrammaticales (b), on observe une importante activité électrique dans la partie gauche du cerveau, proche de l'oreille (région temporale, l'une des aires cérébrales qui traitent le langage chez l'adulte), qui n'est pas présente pour les phrases grammaticales (c).

première situation avaient appris que *modi* désignait le dinosaure; ceux de la situation du téléphone n'avaient rien appris du tout – ce qui est normal, puisqu'il n'y avait aucune raison de penser que l'expérimentatrice au téléphone parlait de l'objet auquel ils prêtaient attention. Les jeunes enfants peuvent donc identifier visuellement les situations les plus susceptibles de leur apprendre de nouveaux mots.

En 1990, Lila Gleitman, Barbara Landau et leurs collègues, de l'Université de Pennsylvanie aux États-Unis, ont suggéré que les très jeunes enfants peuvent exploiter l'ensemble des structures syntaxiques dans lesquelles un mot nouveau se produit pour deviner une partie de son sens. Cette hypothèse, nommée hypothèse d'initialisation syntaxique, a été développée pour expliquer les étonnantes compétences linguistiques d'une petite fille aveugle. En effet, le vocabulaire de cette petite fille était normal dès l'âge de deux ans, et elle connaissait même la différence subtile entre *voir* et *regarder*, alors qu'en ne voyant pas, elle était privée d'une grande partie des informations concernant le contexte où les mots se produisent.

Comme elles disposaient des enregistrements vidéo de ce que cette petite fille avait entendu au cours de son apprentissage du langage, L. Gleitman et B. Landau ont recherché les différences entre les scènes contenant le mot *voir* et celles contenant le mot *regarder*; la seule différence provenait des structures syntaxiques, car certaines d'entre elles sont compatibles avec un verbe de perception

passive (voir), mais pas avec un verbe de perception active (regarder), et *vice versa*. Par exemple, on peut dire *je vois que le chien gratte la terre*, mais pas *je regarde que le chien gratte la terre*.

L'importance de la syntaxe

Plus généralement, un verbe de transfert tel *donner* ou *prendre* peut avoir jusqu'à trois groupes nominaux comme arguments (*quelqu'un donne quelque chose à quelqu'un d'autre*), tandis qu'un verbe de pensée, tel *penser* ou *croire*, prend une proposition entière comme complément (*je pense que...*). On retrouve ces relations entre la structure syntaxique et le sens du verbe dans toutes les langues du monde, car elles correspondent à la structure sémantique de ces verbes. Bien qu'elle soit privée des informations visuelles, la petite fille avait un vocabulaire normal, car la structure syntaxique des mots favorisait son apprentissage de mots nouveaux. Ainsi, l'hypothèse d'initialisation syntaxique repose sur l'idée que les très jeunes enfants exploiteraient la syntaxe des phrases où ils entendent des mots nouveaux pour leur donner un sens.

Toutefois, cette hypothèse, contre-intuitive, a été controversée dès sa proposition en 1990. En effet, intuitivement, on s' imagine plutôt que l'enfant travaille « de bas en haut » : il commence par apprendre les sons de sa langue (les phonèmes) entre zéro et un an, puis les mots entre un et deux ans, et s'intéresse

enfin à la syntaxe, qui permet de décrypter les relations entre les mots, à partir de deux ans et demi ou trois ans.

On a d'abord validé l'hypothèse d'initialisation syntaxique avec des expériences sur des adultes; ces derniers devaient deviner le sens d'un mot à partir de petits extraits vidéo, présentés sans bande sonore, qui montraient une mère jouant avec son enfant. En particulier, en 1999, Jane Gillette, de l'Université de Pennsylvanie aux États-Unis, et ses collègues ont montré que pour deviner un verbe, les adultes y parvenaient mieux s'ils avaient accès aux structures syntaxiques où le verbe était utilisé.

Aujourd'hui, des expériences sur les jeunes enfants viennent conforter l'hypothèse d'initialisation syntaxique. En 2007, nous avons testé si les enfants de deux ans sont capables d'utiliser la catégorie grammaticale d'un mot nouveau (nom ou verbe) pour deviner son sens. La distinction entre verbes et noms est elle aussi signalée par les structures syntaxiques dans lesquelles ces mots apparaissent. Par exemple, *dase* est un nom dans *la dase est jolie*, mais un verbe dans *elle la dase joliment*. Or les noms se réfèrent à des objets, mais les verbes le plus souvent à des actions.

Dans cette expérience, les enfants regardaient une vidéo d'un objet qui accomplissait une action simple (par exemple, une pomme qui tourne sur elle-même), en même temps qu'ils entendaient une voix commenter la vidéo. Les phrases contenaient toutes un mot nouveau – *dase* –, et ce mot était présenté comme un nom à un groupe d'enfants (*regarde la dase! Tu vois la dase? La dase est*

encore là, etc.), et comme un verbe à un autre groupe d'enfants (*regarde, elle dase! Tu la vois qui dase? Elle dase encore là, etc.*).

Pendant la phase de test, nous présentons deux images à l'enfant, une à droite et une à gauche, en lui demandant de montrer du doigt *la dase* (pour le groupe nom), et *celle qui dase* (pour le groupe verbe). Les résultats montrent que les enfants du groupe verbe pensent que *daser* veut dire *tourner*, tandis que les enfants du groupe nom pensent que *dase* veut dire *pomme*. Donc, à l'âge de deux ans, les enfants utilisent les structures syntaxiques des phrases qu'ils entendent pour déduire la catégorie grammaticale d'un mot nouveau, et contraindre son sens.

Des enfants encore plus jeunes sont-ils sensibles aux contextes dans lesquels les noms et les verbes sont produits? Dans une deuxième expérience, nous avons cherché si les enfants de 18 mois connaissent déjà les contextes d'apparition des noms et des verbes, en utilisant la technique de conditionnement de l'orientation du regard. Les résultats montrent que les enfants reconnaissent le mot cible dans les contextes corrects, c'est-à-dire si

le nom est précédé d'un article ou si le verbe est précédé d'un pronom (*voir l'encadré ci-dessous*).

Ainsi, les enfants de 18 mois qui ne produisent pas (ou très peu) de phrases sont pourtant déjà sensibles à la place des mots dans les phrases. Un mot connu ne peut pas apparaître n'importe où. Les enfants de 18 mois se servent du contexte d'un mot pour le repérer, et de ce fait, pourraient utiliser le contexte d'un mot nouveau pour déterminer son sens.

Combiner les mots pour former des phrases

Une caractéristique du langage humain est qu'il est structuré selon des règles précises et complexes, les règles syntaxiques. Ainsi, le sens d'une phrase n'est pas un simple amalgame du sens des mots qui la composent, mais prend en compte la position des mots dans la structure de la phrase. Par exemple, la phrase *le chien a mordu le facteur* a un sens différent de la phrase *le facteur a mordu le chien*. Et même

BIBLIOGRAPHIE

S. Bernal et al., Two-year-olds compute syntactic structure on-line, *Developmental Science*, vol. 12, pp. 69-76, 2010.

B. Mampe et al., Newborns' cry melody is shaped by their native language, *Current Biology*, vol. 19, pp. 1994-1997, 2009.

R. Shi et M. Lepage, The effect of functional morphemes on word segmentation in preverbal infants, *Developmental Science*, vol. 11, pp. 407-413, 2008.

P. Picq et al., *La plus belle histoire du langage*, Seuil, 2008.

S. Bernal et al., Syntax constrains the acquisition of verb meaning, *Language Learning and Development*, vol. 3, pp. 325-341, 2007.

B. de Boysson-Bardies, *Comment la parole vient aux enfants*, Odile Jacob, 1996.

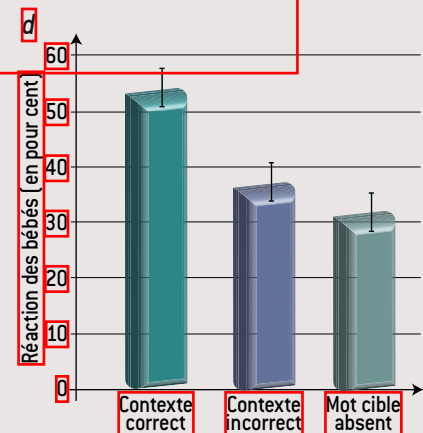
SUR LE WEB

Site du « labo bébé » à l'ENS Paris : <http://sapience.dec.ens.fr/babulab/>

LE CONTEXTE GRAMMATICAL D'UN MOT FACILITE SA RECONNAISSANCE

Le contexte grammatical d'un mot permet à un enfant de 18 mois de le reconnaître. Au cours de l'expérience, la moitié des enfants est entraînée à repérer le nom *balle* et l'autre moitié le verbe *manger*. L'enfant est installé sur les genoux d'un parent et son attention est attirée par une expérimentatrice qui manipule des jouets. Sur la gauche de l'enfant, un haut-parleur émet un mot sans intérêt particulier. Lorsque le mot cible est présenté (*mange* ou *balle*), si l'enfant regarde sur sa gauche, un jouet s'éclaire et s'anime au-dessus du haut-parleur. L'enfant associe le mot cible et le jouet. À la fin de l'entraînement, l'enfant a compris que s'il tourne la tête vers le jouet lorsqu'il entend le

mot cible, alors le jouet s'éclaire. La semaine suivante, l'enfant revient au laboratoire et écoute des phrases, dont un tiers contient le mot cible dans un contexte d'apparition correcte, c'est-à-dire que *balle* est précédé d'un déterminant (*a, J'adore les balles rebondissantes*), un tiers contient le mot cible dans un contexte d'apparition incorrect, c'est-à-dire que *balle* est précédé d'un pronom (*b, Demain, tu balles chez mamie*), et un dernier tiers ne contient pas le mot cible (*c, J'adore les fraises au sucre*). Résultats : les enfants regardent vers le jouet lorsque le mot cible apparaît dans un contexte correct plus souvent que dans un contexte incorrect ou lorsque le mot n'est pas présent (*d*).



L'IMAGERIE DU LANGAGE CHEZ LE BÉBÉ

Grâce à l'imagerie cérébrale, les chercheurs ont désormais accès aux mécanismes neuronaux qui sous-tendent le langage et son développement. Pour ce faire, ils utilisent chez les jeunes enfants des techniques non invasives telles l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), la topographie optique (la spectroscopie en proche infrarouge ou NIRS, une nouvelle méthode utilisant une lumière proche de l'infrarouge dont la composante réfléchie dépend de l'activation cérébrale) ou l'électroencéphalographie, qui mesure l'activité électrique du cerveau à la surface de la tête. L'IRM fonctionnelle et la NIRS mesurent l'oxygénation du sang et indirectement l'activité cérébrale : plus une région cérébrale est active, plus elle consomme d'oxygène et cette variation d'oxygénation sanguine est mesurée. L'IRM est une technique sen-

sible au mouvement, de sorte que l'on peut tester des nourrissons éveillés ou endormis qui ne bougent pas beaucoup et des enfants dès cinq ou six ans qui restent immobiles dans la machine. En revanche, passé l'âge de quelques mois et jusqu'à cinq ou six ans, les scientifiques privilégient des techniques d'imagerie différentes, telle l'électroencéphalographie, qui ne nécessitent pas une immobilité totale.

L'imagerie permet de compléter les recherches comportementales et d'essayer de répondre aux questions suivantes : les réseaux du langage sont-ils déterminés et actifs dès la naissance ? Sont-ils identiques aux réseaux mis en jeu chez les adultes ?

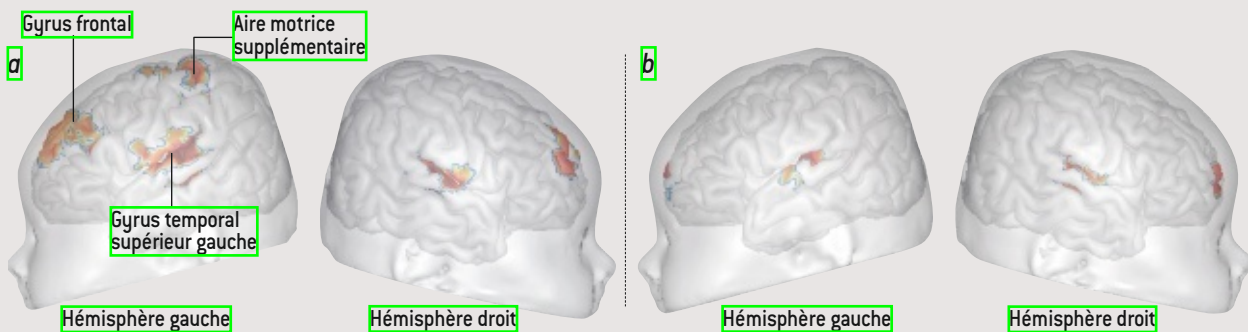
En 2002, Ghislaine Dehaene-Lambertz, qui dirige aujourd'hui l'Équipe de neuro-imagerie du développement de l'INSERM 562 au CEA

à Gif-sur-Yvette, et ses collègues ont fait écouter des phrases à l'enfant ou à l'envers à des nourrissons de deux à trois mois, éveillés dans l'IRM ou qui s'y étaient endormis, et ont enregistré leur activité cérébrale. L'IRMf a montré que le gyrus temporal supérieur (la région temporale) gauche était plus actif dans ces deux cas. Ces régions gauches sont aussi cruciales pour le traitement du langage chez l'adulte, mais sont-elles spécifiques du langage ou traitent-elles tous types de stimulation auditive ? En 2009, la même équipe a montré que l'asymétrie gauche-droite pour le langage n'est pas retrouvée lors de l'écoute de stimulus musicaux.

Qui plus est, en 2011, en utilisant la topographie optique sur des nourrissons français ou japonais de quatre mois, des chercheurs de notre équipe et des chercheurs japonais

ont mis en évidence la latéralisation à gauche du langage, ainsi que la sensibilité particulière à la langue maternelle. Ils ont mesuré l'oxygénation cérébrale pendant que les bébés écoutaient leur langue maternelle, une langue étrangère, des sons humains émotionnels (comme le rire) ou des sons produits par des singes. Dès quatre mois, le cerveau des enfants traite la langue maternelle différemment d'une autre langue ; de plus, le langage engendre des réactions cérébrales localisées uniquement dans l'hémisphère gauche, ce qui n'est pas le cas avec des bruits.

En conséquence, les activations cérébrales des nourrissons face au langage sont assez semblables à celles des adultes, et spécifiques du langage quand on les compare à d'autres stimulations auditives, avec une activation plus importante s'il s'agit de la langue maternelle.



LES NOURRISSONS RECONNAISSENT LA VOIX DE LEUR MÈRE. Dans l'hémisphère gauche de bébés de deux mois, les activations du gyrus temporal supérieur, du gyrus frontal et de l'aire motrice supérieure sont plus

importantes quand les enfants entendent la voix de leur mère (a), comparée à celle d'un étranger (b). Ces stimulations cérébrales des nourrissons face au langage sont assez semblables à celles des adultes.

Dehaene-Lambertz et al., Brain and Language 2010

si la seconde phrase décrit une situation peu plausible, nous n'avons aucune difficulté à imaginer la scène.

L'acquisition des spécificités syntaxiques de la langue maternelle d'un enfant correspond à une étape essentielle du développement du langage. Toutefois, les chercheurs sont partagés quant à l'âge auquel les enfants commencent à avoir des connaissances syntaxiques, et à la façon dont ils ont pu acquérir ces connaissances.

En 2010, pour déterminer si des enfants de deux ans savent repérer si la structure syntaxique d'une phrase est correcte ou non, nous avons utilisé la technique des potentiels évoqués. Celle-ci consiste à mesurer l'activité électrique du cerveau du bébé pendant qu'il écoute des phrases,

à l'aide d'un appareil d'électroencéphalographie (voir la figure 3).

Dans cette expérience, les enfants regardent de petites histoires filmées, dans lesquelles nous avons glissé des phrases-tests : la moitié d'entre elles sont grammaticales, comme *alors elle la mange* et *la poule prend la fraise*, et l'autre moitié sont agrammaticales, parce que nous avons échangé les noms et les verbes, comme dans *alors elle la fraise* et *la poule prend la mange*. Dans tous les cas, le mot critique, *fraise* ou *mange*, est précédé du mot grammatical *la*, qui peut être soit un article, comme dans *la poule prend la fraise*, soit un pronom objet direct, comme dans *alors elle la mange*.

Les résultats montrent une réaction cérébrale très différente pour les phrases

grammaticales par rapport aux phrases agrammaticales. Cette activation cérébrale se produit dans la partie gauche du cerveau – les régions cérébrales où les adultes traitent le langage – et démarre avant même la fin du mot critique, environ 350 millisecondes après le début du mot.

En conséquence, en entendant le début d'une phrase, les enfants de deux ans construisent des attentes sur la catégorie grammaticale du mot qui vient ensuite ; ils peuvent ainsi repérer les cas où il y a une incohérence entre le type de mot attendu et le type de mot qu'ils entendent.

Nous reproduisons en ce moment même cette expérience avec des enfants plus jeunes, âgés de 18 mois. Les résultats préliminaires suggèrent qu'eux aussi distinguent

les phrases grammaticales des phrases agrammaticales. Or jusqu'alors, on pensait que les jeunes enfants n'apprenaient le rôle du mot grammatical *la* comme pronom objet direct que relativement tard : en effet, ils ne commencent à l'utiliser correctement que vers l'âge de deux ans et demi ou trois ans. De fait, cette expérience qui mesure directement l'activité électrique du cerveau dévoile une compétence bien plus précoce que ce qu'on pourrait estimer en se fiant à ce que disent les enfants.

Enfin, dans une troisième expérience, nous avons comparé des phrases grammaticales et agrammaticales en utilisant des mots nouveaux, et non des mots connus des jeunes enfants (comme *fraise* ou *mange*). Par exemple, nous leur avons enseigné que *rane* veut dire *vautour*, et que *dumer* signifie *pêcher du poisson* ; pendant la séance d'apprentissage, l'expérimentatrice faisait attention de ne jamais prononcer ni *le rane* (elle disait *un rane*, *ce rane*, *notre rane*, mais jamais *le rane*) ni *le dume* (elle disait *il dume*, *il a dumé*, *Martin va dumer*, mais jamais *il le dume*). Ainsi, pendant la phase de test (où l'expérimentatrice disait alors *le rane* et *le dume*, mais pas les autres structures utilisées pendant l'ap-

prentissage), aucune des phrases n'avait été entendue par les enfants, qu'elles soient grammaticales ou agrammaticales.

Cette fois encore, nous avons observé des réactions cérébrales différentes pour les phrases grammaticales et agrammaticales. Les enfants de deux ans, après avoir entendu un mot nouveau dans un certain nombre de contextes, sont capables de généralisation : parmi les nouveaux contextes qu'on leur propose, ils savent lesquels sont corrects et lesquels ne le sont pas. L'ensemble de ces résultats montre que les enfants de deux ans possèdent déjà certains éléments de la syntaxe de leur langue. Reste maintenant à découvrir par quel mécanisme d'acquisition les enfants ont réussi à apprendre ces éléments.

Inné ou acquis ?

L'apprentissage du langage par les enfants est sujet à controverse dans le milieu scientifique. En effet, s'il est maintenant admis par l'ensemble de la communauté scientifique que les bébés humains naissent avec des capacités qui leur permettent d'acquiescer un langage, la nature de cette prédisposition innée n'est pas établie.

Certains pensent que cette prédisposition est spécifique au langage et contiendrait tous les aspects de la grammaire, qui sont communs à toutes les langues du monde. C'est la « grammaire universelle », présentée pour la première fois par le linguiste et philosophe américain Noam Chomsky en 1957.

En revanche, d'autres scientifiques pensent que cette capacité est certes spécifique à l'homme, mais non au langage ; par exemple, ce serait la capacité d'effectuer des calculs récursifs, ou encore celle de coopérer et de vouloir spontanément transmettre de l'information à ses congénères.

En pratique, il est difficile de trancher en faveur de l'une ou l'autre théorie. Par exemple, nous avons montré que les enfants de deux ans (et même de 18 mois) ont déjà une connaissance des catégories grammaticales nom et verbe, et des contextes dans lesquels ces catégories sont utilisées. Cela suggère que les enfants ont réussi à apprendre ces notions pendant leurs 18 premiers mois de vie (grâce à une analyse de la parole qu'ils entendent), mais nous ignorons si le mécanisme d'apprentissage est fondé ou non sur des éléments de grammaire universelle. ■

Et tout s'éclaire

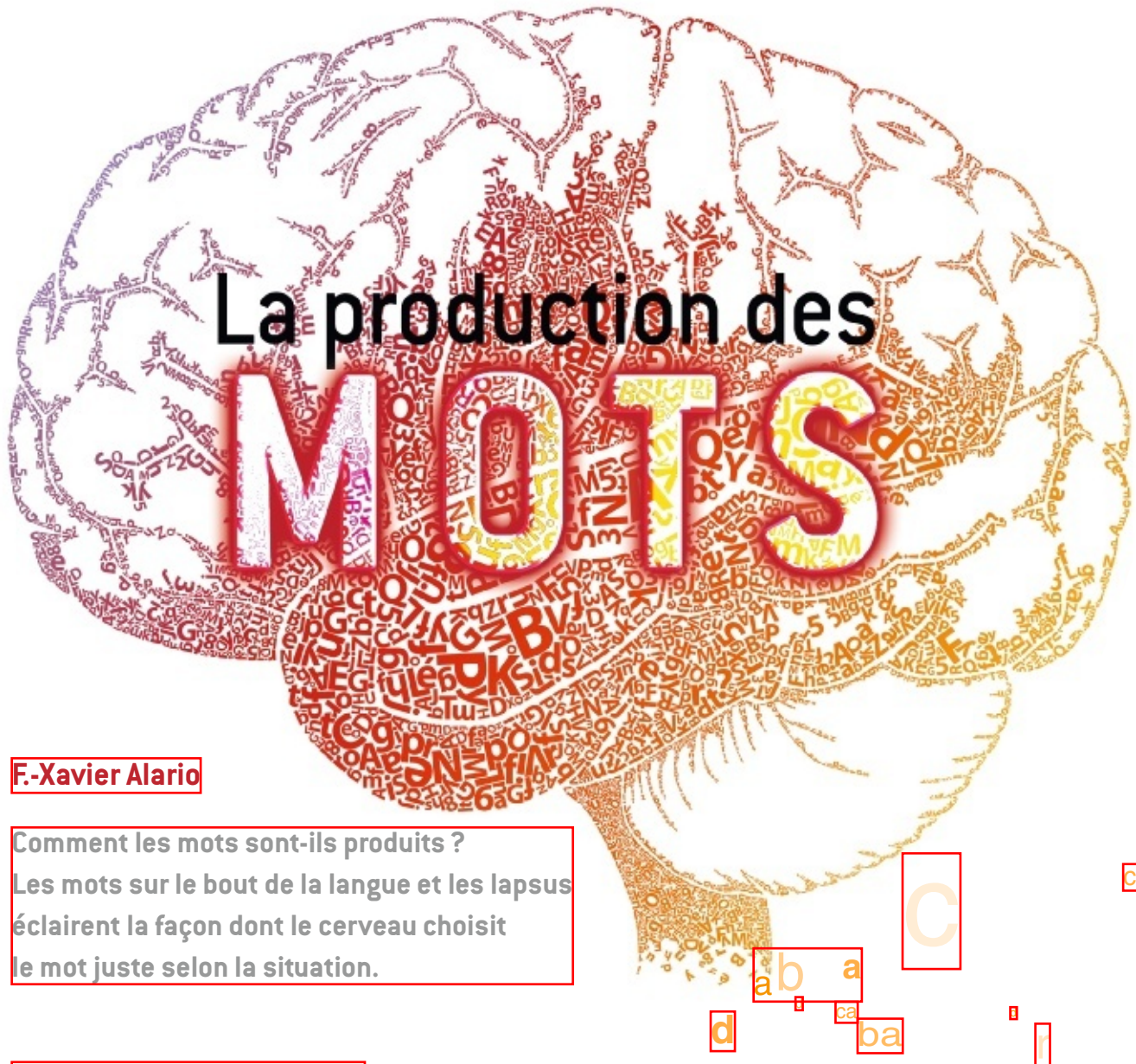
france culture

La marche des sciences
14h/15h jeudi

avec Aurélie Luneau
en partenariat avec le magazine Pour la Science

franceculture.com

DREAM ON - Radio France / Christophe Altamirano



F.-Xavier Alario

Comment les mots sont-ils produits ?

Les mots sur le bout de la langue et les lapsus éclairent la façon dont le cerveau choisit le mot juste selon la situation.

En 1981, dans un entretien à la télévision britannique BBC, le physicien Richard Feynman racontait comment il avait essayé d'expliquer à son père l'émission de photons par un atome. « Est-ce que le photon attend quelque part dans l'atome avant d'être émis ? » avait demandé son père, « Et sinon d'où vient-il ? ». Pour répondre, Feynman conta une anecdote concernant son propre fils. Ce dernier découvrait le langage et, un jour, avait dit : « Je ne peux plus dire le mot *chat*... je n'en ai plus dans mon sac de mots, j'ai utilisé tous mes mots *chat*. » Et Feynman de clarifier que, de même que l'on n'a pas de sac de mots dont on pourrait épuiser les réserves, l'atome n'a pas à proprement parler de sac où les photons attendraient d'être

émis. Les mots, comme les photons, sont créés au moment de leur émission.

Un sac de mots inépuisable

Allons plus loin dans la description du sac de mots ou, pour utiliser un terme plus précis, du lexique mental. On estime qu'un locuteur adulte connaît plusieurs dizaines de milliers de mots de sa langue (entre 20 000 et 60 000 selon l'individu et la façon dont on les dénombre). L'avantage d'une telle collection de mots est que l'on peut espérer y trouver le ou les mots justes pour chaque occasion. L'inconvénient est qu'elle exige des procédures efficaces pour rechercher ce mot.

Des mécanismes cérébraux performants sont nécessaires pour récupérer les mots en mémoire rapidement, en moyenne trois fois par seconde dans une conversation usuelle. Depuis les publications du médecin, anatomiste et anthropologue français Paul Broca il y a exactement 150 ans, on sait que des lésions de certains sites cérébraux peuvent engendrer des déficits spécifiques de la fonction linguistique. Ainsi, les connaissances linguistiques, par exemple la capacité à produire des mots, sont associées à des régions particulières du cerveau. Aujourd'hui, grâce aux expériences de psychologie cognitive et à l'imagerie cérébrale, on comprend beaucoup mieux comment se fait la sélection des mots dans le lexique mental et comment

les mots sont ensuite construits et articulés. L'identification des processus mis en jeu et des régions cérébrales impliquées vient notamment d'une meilleure compréhension des situations où la production du langage est prise en défaut, par exemple dans le cas des lapsus et des pathologies de la fonction linguistique (que l'on nomme aphasies).

Pour expliquer le fonctionnement du lexique mental, commençons par clarifier pourquoi on doit effectivement choisir les mots pour parler. Dans le flux d'une conversation ordinaire, la première préoccupation du locuteur est de décider ce qu'il veut dire et, accessoirement, de comprendre ce qui lui est dit. Cette activité porte sur les idées et le contenu des propos, pas sur les mots qui servent à les exprimer. Nous envisageons ici des conversations usuelles et banales, par exemple raconter sa journée de travail ou ses vacances. Ce ne sont pas des situations où le choix des mots peut avoir des conséquences notables, comme c'est le cas lors de l'expression de sentiments complexes ou contradictoires, de propos politiques ou de contenu juridique. Dans ces derniers cas, choisir ses mots peut être laborieux et nécessiter un effort conscient important.

« Je l'ai sur le bout de la langue »

La plupart du temps, dans une conversation quotidienne, la sélection de mots suit de façon automatique la sélection de l'idée. Concrètement, une fois que l'on a choisi de parler de son mode de transport habituel, le mot bicyclette, par exemple, s'impose de lui-même, et il ne semble pas nécessaire de le choisir. De même, les verbes se conjuguent tous seuls, et les accords en genre et en nombre se font sans que l'on supervise consciemment quoi que ce soit. Pourtant, même dans cette situation qui semble simple, tout n'est pas si facile. L'opération mentale consistant à choisir un contenu ou un message est distincte de celle consistant à choisir le mot juste pour l'exprimer. Il ne suffit pas de savoir ce que l'on veut dire pour pouvoir le dire. En voici la preuve dans deux situations courantes : les mots sur le bout de la langue et les lapsus.

Le phénomène du mot sur le bout de la langue n'est pas rare, chacun l'a ressenti plus d'une fois dans sa vie. Lorsqu'un locuteur se retrouve dans cette situation, il sait pertinemment de quoi il

veut parler (un objet, une personne). Toutefois, de façon souvent transitoire, il est incapable de retrouver le mot correspondant. Ainsi, il apparaît que le choix d'un message à communiquer et le choix du mot correspondant sont des opérations distinctes, qui se trouvent dissociées dans cette situation.

Une autre situation où la production du langage est prise en défaut est celle des lapsus. Lorsqu'un locuteur commet un lapsus en choisissant un mot pour un autre – par exemple, il dit « J'ai mal à l'épaule... euh au coude » ou un enfant appelle sa maîtresse « Maman » –, il sait en général sans ambiguïté de quoi il veut parler. L'erreur provient bien du choix du mot nécessaire à exprimer le message.

Les lapsus suggèrent que plusieurs mots sont possibles au moment d'exprimer une idée à voix haute (voir la figure 2). Nous pouvons décrire schématiquement – ou modéliser – un tel phénomène en imaginant que chaque mot est représenté par une case en mémoire. Trouver un mot en mémoire pour exprimer une idée revient à activer la case correspondante plus fortement que les autres, de sorte que le mot sélectionné devient disponible et utilisable. Quand un lapsus se produit, diverses cases s'activent en même temps : plusieurs mots se présentent comme candidats possibles. Face à cette incertitude, la mauvaise case (le mauvais mot) se trouve la plus activée en mémoire et est choisie.

Les raisons pour lesquelles les mots s'activent en mémoire sont diverses. La façon la plus simple de décrire ce mécanisme est de penser au phénomène d'association d'idées : penser à une chose fait penser à une autre qui lui est reliée.

La mémoire lexicale, ou mémoire des mots, et la mémoire sémantique, ou mémoire du sens des mots et des connaissances, sont souvent décrites comme des réseaux interconnectés. Le fait de penser à une chose dont on veut parler, par exemple une partie du corps, active en mémoire les nombreux mots qui serviraient à exprimer ce message. L'accumulation d'autres caractéristiques concernant cette partie du corps – par exemple il s'agit d'un membre, situé en haut du corps – conduit en principe et le plus souvent au choix correct du mot – *bras* dans l'exemple ci-dessus. Mais ce processus actif de récupération et de choix n'est pas parfait. De mauvaises activations peuvent se produire en cas d'inattention, de fatigue et selon le contexte – notamment

L'ESSENTIEL

- ✓ Avant d'être énoncé, un mot est sélectionné dans le lexique mental, construit, puis articulé.
- ✓ Les lapsus et les mots sur le bout de la langue renseignent sur la façon dont les mots sont choisis : des conflits entre des mots de sens proches peuvent se produire.
- ✓ Les pathologies de la fonction linguistique (les aphasies) et l'imagerie cérébrale révèlent les régions de l'hémisphère gauche impliquées dans la sélection des mots.
- ✓ Le système cognitif de la production du langage est complexe, mais efficace : on produit environ trois mots par seconde.

© S. HUBER / SCIENTIA

L'AUTEUR



F. Xavier ALARIO est chercheur au Laboratoire de psychologie cognitive, unité mixte de recherche de l'Université de Provence Aix-Marseille 1 et du CNRS.

des mots qui viennent d'être prononcés ou sont préparés pour la suite de la phrase.

Cette description peut être reformulée en termes de conflit entre les mots. Le système cognitif qui produit la parole doit résoudre ce conflit pour que les bons mots soient produits au bon moment. Le terme de conflit ne doit pas laisser croire que ce phénomène se produit seulement quand on fait des lapsus. De nombreuses données montrent que même lorsque le mot choisi est correct, il a, avant d'être choisi, subi la concurrence d'autres mots possibles. Ces données proviennent d'expériences de psychologie cognitive menées en laboratoire.

Des conflits entre les mots

La psychologie cognitive s'occupe surtout de décrire des processus mentaux élémentaires, par exemple la reconnaissance de formes visuelles, la mémorisation d'un chiffre ou la production d'un mot. Pour ce faire, les spécialistes cherchent à isoler des processus élémentaires parmi la richesse des événements de notre vie mentale : ils

recrutent des volontaires qui participent à des tâches expérimentales aux caractéristiques très bien contrôlées.

Par exemple, on demande à des locuteurs en bonne santé de produire des mots isolés, tels des noms de véhicules ou d'animaux, selon une séquence précise imposée par un ordinateur (voir la figure 3). Plusieurs variables peuvent alors être mesurées : le temps de réponse (c'est-à-dire le temps séparant la présentation d'un stimulus de la réponse verbale), l'activité électrique du cerveau par électroencéphalographie, ou son activité métabolique (indiquant les régions cérébrales qui consomment de l'énergie) par imagerie par résonance magnétique. C'est l'analyse de ces mesures qui permet de déterminer où, quand et comment les mots produits ont été choisis.

Les mots subissent-ils un conflit ou une compétition avant d'être énoncés ? Oui, les variables mesurées changent selon le contexte dans lequel les mots sont produits. Les sujets sont en effet plus lents à produire oralement des mots proches par leurs sens, c'est-à-dire appartenant à une même catégorie sémantique – animaux ou outils –, que des mots sans aucune relation. En effet, plusieurs mots proches se présentent simultanément à l'esprit du sujet, de sorte que son cerveau doit « choisir » le bon, ce qui prend du temps.

En outre, des aires du lobe frontal gauche et du lobe temporal gauche s'activent davantage lors de la production de séquences de mots proches que lors de celle de mots éloignés. Les processus mentaux mis en œuvre dans ces régions cérébrales de l'hémisphère gauche permettraient de résoudre les conflits entre mots de sens proches.

SÉLECTION
des mots justes
dans un contexte
donné

ALIGNEMENT
des phonèmes
et des syllabes
constituant le mot

PRONONCIATION
du mot grâce à la
coordination des muscles
articulateurs

1. POUR PRODUIRE UN MOT, il faut d'abord sélectionner le mot approprié dans un contexte donné. Puis il faut choisir les sons et les syllabes le constituant avant de le prononcer en articulant.



2. LES LAPSUS créent des quiproquos et on en rit souvent, le rire ayant notamment pour fonction de détendre une situation qui pourrait être critique : ainsi, le « fautif » n'est pas mal à l'aise quand il prend conscience de son erreur. Les lapsus suggèrent que plusieurs mots sont activés en mémoire au moment d'exprimer une idée.

Les aires cérébrales ont été identifiées

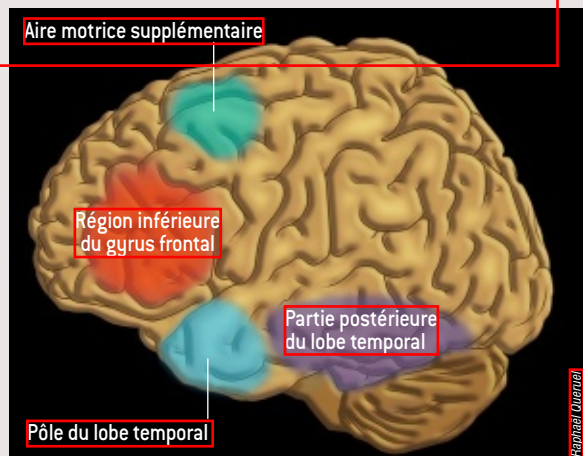
Ces observations ne signifient pas que ces aires cérébrales soient les seules impliquées dans la production du langage, ni qu'elles soient le siège du langage parlé. En effet, elles ont été identifiées dans ces expériences parce qu'elles s'activent davantage lorsque les conditions de production de mots sont difficiles. Elles reflètent les étapes de traitement où cette difficulté doit être résolue, les étapes qui permettent de choisir le bon mot au bon moment (voir l'encadré page ci-contre).

Par ailleurs, d'autres régions sont nécessaires pour parler ; selon les cas, ce

LES RÉGIONS CÉRÉBRALES IMPLIQUÉES DANS LA SÉLECTION DE MOTS

Pour produire oralement des mots, il faut d'abord les sélectionner dans le lexique mental : différentes structures cérébrales sont mises en jeu. Le pôle du lobe temporal (*en bleu*) est associé au stockage des informations que l'on peut « mettre en mots » ; c'est le lieu de la mémoire sémantique. La partie postérieure du lobe temporal (*en violet*) correspond au traitement lexical, au sens large, c'est-à-dire à la mémoire des mots. La région inférieure du gyrus frontal (*en rouge*), qui comprend l'aire de Broca, coordonne notamment les mécanismes de sélection d'informations sémantique et lexicale, les mécanismes d'articulation et divers aspects du traitement linguistique.

En outre, l'aire motrice supplémentaire (*en vert*) est aussi associée aux mécanismes de sélection d'informations, parfois linguistiques. Ce schéma ne représente pas le réseau impliqué dans l'encodage de la forme phonologique des mots (à savoir les processus de construction de la prononciation et de l'articulation). Et seul l'hémisphère gauche est indiqué, car c'est le principal impliqué dans les mécanismes décrits.



sont par exemple des aires situées dans le lobe frontal médian ou des aires prémotrices et motrices, qui rendent possibles la programmation et la commande des mouvements d'articulation.

Revenons au mécanisme par lequel les mots sont choisis pour parler. Nous avons évoqué la notion d'association d'idées, d'après laquelle les contenus proches s'activent dans un même réseau cérébral. Mais, dans certains cas, se produit un conflit entre les mots, conflit qui s'accroît lorsqu'on doit énoncer rapidement des mots proches par leur sens. Ainsi, deux mots proches par leur sens sont-ils plutôt amis ou plutôt ennemis ?

En fait, ces deux aspects seraient à l'œuvre lors de la production des mots. Le cœur de la question est de savoir comment le système cérébral contrôle la propension à penser à plusieurs choses à la fois (à travers les associations d'idées, ou lors de la description d'événements complexes), et le fait de devoir choisir le mot adapté. Ainsi, on peut lier le phénomène de propagation d'idées aux aires cérébrales temporales (et à d'autres régions impliquées dans la mémoire non linguistique), et les contraintes de sélection aux aires frontales (celles du raisonnement). Ces deux forces s'équilibrent souvent, ce qui permet de produire les mots appropriés. Parfois, un déséquilibre conduit à des lapsus.

Les résultats décrits ci-dessus, concernant la sélection des mots et obtenus sur des sujets sains, sont cohérents avec les observations faites auprès de patients qui ont eu des lésions cérébrales ayant entraîné des troubles de la parole. Ils souffrent

d'aphasie, ensemble des troubles de l'utilisation et de la production du langage dus à des lésions cérébrales.

Certains patients ayant été victimes d'un accident vasculaire cérébral dans une des aires postérieures du lobe temporal gauche sont handicapés par un nombre de mots sur le bout de la langue bien supérieur à la moyenne. Là où un locuteur n'arrive pas à retrouver un mot peu fréquent, par exemple *chevalet* ou *piranha*, ou le nom d'une personne qu'il n'a pas vue depuis longtemps, un patient de ce type bute sur de très nombreux mots fréquents ou usuels, et ce, jusqu'à un mot sur trois ou sur quatre.

Des patients aphasiques

D'autres patients souffrant de lésions frontales ont des difficultés à produire des mots d'une catégorie grammaticale particulière ; par exemple, ils n'arrivent pas à énoncer des verbes alors qu'ils produisent assez bien les noms communs, ou bien l'inverse. Ces observations suggèrent que les informations linguistiques sont ordonnées dans le cerveau, et qu'une région spécifique serait dédiée à une catégorie grammaticale par exemple.

Quand on étudie l'aphasie, on examine en général des patients à un moment où leur maladie est stable, souvent des mois après un accident vasculaire cérébral. Mais comment le substrat neuronal et le comportement se sont-ils adaptés à la pathologie ? La performance des patients renseigne-t-elle sur le fonctionnement cérébral du sujet sain ?

Certaines équipes se sont récemment intéressées à ces phénomènes chez des patients testés dans les heures ayant suivi un tel accident. En raison du peu de temps qui séparait l'accident de l'observation, on considère qu'il n'y avait pas encore eu de réadaptation fonctionnelle. En d'autres termes, ce sont des cerveaux sains dont on aurait éliminé des compétences spécifiques, à cause de l'accident vasculaire cérébral, sans y ajouter de nouvelles aptitudes ou modifier celles qui avaient été préservées. La plupart des informations obtenues chez ces patients confirment les observations faites longtemps après l'accident cérébral.

Par exemple, en 2003, l'équipe de Argye Hillis, de l'Université Johns Hopkins aux États-Unis, a montré que des déficits de circulation sanguine dans certaines parties du lobe frontal étaient associés, six heures après l'accident, à des difficultés importantes dans la production de verbes (plus que pour les noms communs). Qui plus est, ces déficits se résorbaient largement si la circulation sanguine était rétablie par des méthodes chirurgicales ou la prise de médicaments.

Ce qui est remarquable dans cet exemple, c'est que non seulement la lésion organique est associée à un déficit, mais aussi que la résorption de la lésion suffit à faire disparaître le déficit. Cela implique un lien fort entre l'aire cérébrale et la fonction testée : les régions cérébrales impliquées dans l'exemple ci-dessus sont « essentielles » à la production des verbes.

Le périple de la production de la parole ne s'arrête toutefois pas à la sélection de mots. La sélection de mots et leur

prononciation reposent sur des processus différents. Broca, déjà évoqué, est célèbre pour sa description du patient surnommé Tan. Le surnom provient de la seule syllabe qu'il était capable de prononcer (*tan*), en plus de quelques interjections blasphématoires. En 1861, Broca décrit ces déficits : « Ce qui a péri en lui, ce n'est donc pas la faculté du langage, ce n'est pas la mémoire des mots, ce n'est pas non plus l'action des nerfs et des muscles de la phonation et de l'articulation [...], c'est la faculté de coordonner les mouvements propres au langage articulé. »

En d'autres termes, ce qui était anormal chez ce sujet, c'était la coordination

de muscles par ailleurs fonctionnels, selon des contraintes linguistiques (par exemple pour produire des syllabes). L'autopsie de ce patient a permis de relier, certes de façon approximative pour nos normes actuelles, ces déficits à une aire devenue depuis l'aire de Broca, impliquée notamment dans la coordination des commandes motrices du langage.

Quand les mots sont choisis, il reste à récupérer en mémoire la façon dont ils se prononcent (voir la figure 1). À nouveau, les lapsus sont révélateurs de phénomènes intéressants. Un locuteur en bonne santé, mais dont la langue a four-

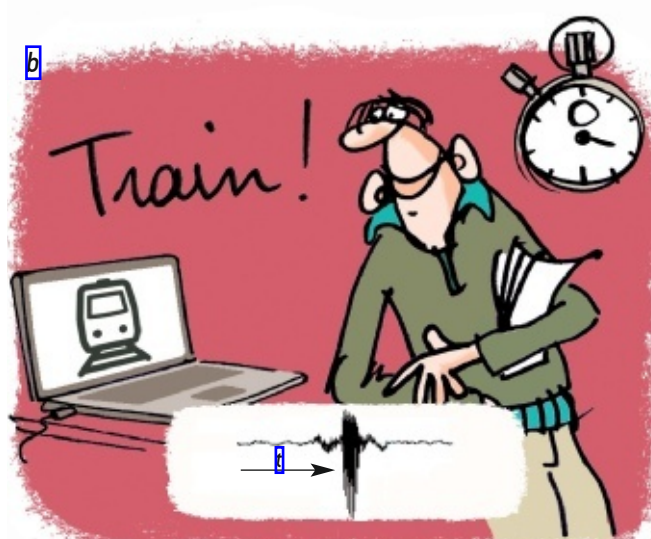
ché, a pu dire « Le chour est faud », échangeant le premier son des deux mots de la phrase « Le four est chaud ». Ces sons sont nommés phonèmes en linguistique. Ils sont définis comme la plus petite unité sonore qui permet de distinguer deux mots dans une langue.

Choisir ne suffit pas ; il faut reconstruire

Ce que l'échange de phonèmes montre, c'est que les mots récupérés en mémoire ne sont pas directement disponibles pour être prononcés. Le système de production



3. DES CONFLITS COGNITIFS entre des mots ayant des sens proches peuvent se produire. C'est le cas lorsqu'on demande à des participants de regarder une succession de dessins et de les nommer le plus vite possible. Certains dessins sont reliés, par exemple ce sont tous des moyens de transport,



tandis que d'autres n'ont aucun point commun. En général, les sujets répondent plus lentement quand les mots sont reliés (a), que s'il s'agit de mots non reliés (b). Des opérations mentales complexes sont mises en œuvre pour résoudre les conflits entre des mots de sens proches.

Que se passe-t-il quand on parle correctement une langue autre que sa langue maternelle ? Les aires cérébrales mises en jeu par les deux langues sont assez semblables, que ce soit pour la production ou la compréhension du langage. Quand un expérimentateur demande à une personne de parler dans l'une ou l'autre des langues qu'elle maîtrise, tout en enregistrant par imagerie par résonance magnétique fonctionnelle les régions cérébrales activées, les mêmes aires s'activent pour le choix de mots semblables. Ainsi, il paraît difficile de dire si les mots ou les deux langues sont stockés à des endroits différents dans le cerveau, peut-

être parce que les résolutions spatiales des méthodes actuelles d'imagerie cérébrale ne sont pas suffisantes.

Toutefois, on peut aussi se poser la question d'un point de vue fonctionnel ou comportemental, plutôt qu'anatomique. Des expériences ont été faites pour mesurer la vitesse à laquelle un locuteur bilingue réussit à retrouver les mots de l'une et l'autre langue, en particulier s'il doit alterner souvent (par exemple, nommer des dessins dans une langue, puis dans l'autre). Les résultats suggèrent qu'utiliser une langue à un moment donné s'accompagne d'une inhibition de l'autre langue ; cela rendrait les mots de l'autre langue moins

disponibles pour laisser le champ libre à la langue parlée. Mais une telle interprétation repose sur des hypothèses complexes qui ne font pas l'unanimité. Si elle se confirme, elle signifierait qu'on a la capacité de traiter séparément les mots de chaque langue et que, d'un point de vue fonctionnel, les mots sont « stockés » séparément.

Quoi qu'il en soit, plusieurs travaux ont montré que les personnes bilingues tirent un avantage de leur état. Elles ont en effet un meilleur contrôle cognitif et attentionnel : elles réussissent mieux à exclure des informations non pertinentes de leur champ mental ou à sélectionner parmi plusieurs possibilités. Ce supplément d'habileté mentale leur

viendrait de la pratique quotidienne du choix entre deux langues, qui est absente chez les monolingues. La sélection des mots d'une langue plutôt que d'une autre demanderait bien un petit effort mental.



© Shutterstock.com / Schwaiz

de parole reconstitue les mots à chaque occurrence et peut faire des erreurs. En général, cette reconstruction implique tout d'abord les petites unités, les phonèmes, puis des unités plus vastes, les syllabes, qui seraient à l'interface des traitements linguistiques et des traitements moteurs guidant l'articulation. De sorte qu'après avoir choisi un mot, on doit en choisir les phonèmes, les syllabes, etc.

En 2010, nous avons montré comment différentes aires cérébrales semblent être associées à différents niveaux de traitement linguistique. Les régions en charge de ces processus de reconstruction phonologique et phonétique se répartissent sur des régions du lobe temporal gauche supérieur, ainsi que sur des zones autour de l'aire de Broca (dans la partie frontale gauche du cerveau), et entre les deux, dans les régions du cerveau dédiées à la programmation et au contrôle de la motricité.

Des sacs de syllabes et de phonèmes

Le processus d'encodage ressemble à un « mecano » phonologique, où les différents morceaux d'un mot d'une phrase sont imbriqués les uns avec les autres. Il n'y a donc pas seulement un sac de mots parmi lesquels on peut choisir, il existe aussi un sac de syllabes et un sac de phonèmes, dans lesquels on puise quand on parle.

L'existence d'un tel mecano soulève une question : pourquoi cette complication ? Pourquoi reconstruire à chaque fois les mots plutôt que de les garder entiers en mémoire ? La réponse la plus simple est la flexibilité. Contrairement au langage écrit, où les mots ont une forme fixe (en français, les mots écrits sont des séquences de lettres particulières, séparées par des espaces), le langage oral est plus variable. Les mots sont prononcés différemment selon leur contexte (les mots qui les entourent), si on parle vite ou si l'on murmure, ou encore si l'on veut insister sur tel ou tel aspect du propos. Garder en mémoire les mots en pièces détachées permet de fabriquer des variantes et d'adapter la production à tous les contextes.

Que l'on soit bavard ou taciturne, la facilité avec laquelle on puise dans son sac de mots reste déconcertante, au regard des opérations mentales et cérébrales nécessaires à ce petit exploit reproduit des centaines de fois chaque jour. La capacité à produire environ trois mots par seconde requiert que ces opérations soient effectuées en quelques dixièmes de seconde, de façon répétée et efficace. Assurant la construction d'un message, la sélection des mots pour l'exprimer, le choix des phonèmes et syllabes, et leur articulation, un dense réseau cérébral est au service des idées et de leur partage avec autrui. Et tout cela, sans même que l'on n'ait à y penser...

BIBLIOGRAPHIE

M. G. Peeva et al., Distinct representations of phonemes, syllables, and supra-syllabic sequences in the speech production network, *Neuroimage*, vol. 50, pp. 626-638, 2010.

A. Costa et al., The time course of word retrieval revealed by event-related brain potentials during overt speech, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 106, pp. 21442-21446, 2009.

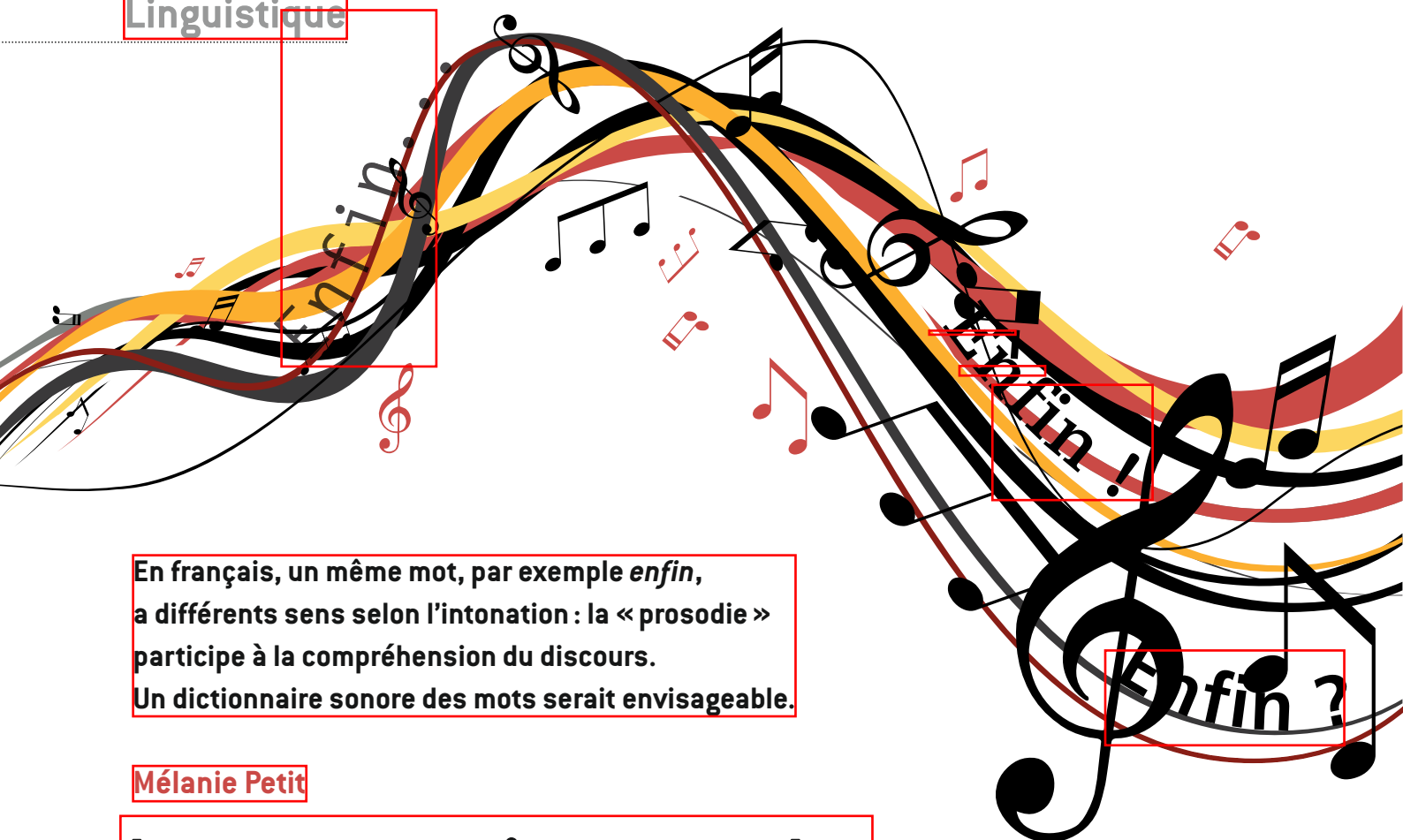
C. Pallier, Imagerie cérébrale du cerveau bilingue, *Neurophysiologie du langage*, Elsevier, [éds. C. Liégeois-Chauvel et al.], 2006.

F.-X. Alario et al., The role of the supplementary motor area in word production, *Cognitive Brain Research*, vol. 1076, pp. 129-143, 2006.

M. Rossi et E. Peter-Defare, Les lapsus, ou comment notre fourche a langüé, Presses Universitaires de France, 1998.

SUR LE WEB

Le texte des « Remarques » de Broca : <http://psychclassics.yorku.ca/Broca/aphemie.htm>



En français, un même mot, par exemple *enfin*, a différents sens selon l'intonation : la « prosodie » participe à la compréhension du discours. Un dictionnaire sonore des mots serait envisageable.

Mélanie Petit

La musique de *enfin*

L'AUTEUR



Mélanie PETIT est postdoctorante au Centre interdisciplinaire de recherches sur les activités langagières (CIRAL) de l'Université Laval, au Québec.

« **M**'enfin ?! » est l'expression favorite de Gaston Lagaffe, le personnage créé par André Franquin en 1957. Il l'emploie souvent, et même si le mot est composé des mêmes lettres, il a un sens différent selon le contexte dans lequel il est employé et l'intonation qu'on lui donne. Ce terme illustre toute la subtilité de l'intonation – ou prosodie – dans l'expression des intentions et émotions, et toute la difficulté de la retranscrire à l'écrit. Pour ce faire, *M'enfin* est toujours écrit en très grosses majuscules, souvent en gras, mais avec des ponctuations différentes et par-

fois même de façon incurvée. L'écoute des différentes versions de *M'enfin* faciliterait son interprétation.

La langue peut s'étudier selon deux approches ; soit en tant que système ou structure (avec des règles grammaticales et morphologiques par exemple), soit en tant que discours dans lequel un même mot peut présenter différents emplois. Par ailleurs, lorsqu'un locuteur s'exprime, il associe, comme dans une chanson, des paroles (les mots) à une musique (l'intonation).

Quelle est l'importance de l'intonation dans le discours ? Les études sur l'intonation se sont surtout développées

depuis une quarantaine d'années ; elles ont par exemple porté sur le lien entre une émotion et une intonation particulière. Mais elles s'intéressent aussi à la prosodie avec laquelle sont réalisés les différents types de phrases, par exemple interrogatives où la voix monte : « Tu viens demain ? » En outre, les chercheurs étudient les incises, ces petites phrases qui apparaissent comme des commentaires de moindre importance dans un discours, souvent prononcées avec une intonation plus basse que le reste de la phrase : « Ma fille, qui est arrivée la semaine dernière, nous a annoncé sa grossesse. » Ils se sont aussi orientés vers l'étude de l'accentuation et du phénomène de focalisation prosodique ou emphase, c'est-à-dire quand on exagère l'intonation d'un constituant de la phrase.

L'intonation au service du sens

Le rapport entre l'intonation et le discours fait l'objet de nombreuses recherches, mais il n'est en général envisagé que pour identifier la syntaxe, c'est-à-dire l'organisation des mots dans la phrase ou le type de phrase utilisé. Par exemple, on s'intéresse à la façon dont l'intonation permet à un auditeur de distinguer les différentes interprétations de la phrase : « La belle porte le voile. » Si *belle* est un nom, *porte* un verbe, *le* un déterminant et *voile* un nom, on interprète la phrase ainsi : « La jolie fille est parée d'un foulard. » Mais si *belle* est un adjectif, *porte* un nom, *le* un pronom et *voile* un verbe, on comprend alors : « La jolie porte cache quelqu'un. »

Dans le domaine du traitement automatique du langage (la lecture automatique, la reconnaissance vocale, le dialogue avec un ordinateur, etc.), on pense que le sens est « calculable » à partir des mots et de la syntaxe. L'intonation est étudiée pour son ajustement aux fonctions des noms ou des propositions. Or la prosodie participe au sens ; pour créer les voix de synthèse par exemple, outre le fait qu'il reste surtout à améliorer la modélisation de la co-articulation des sons pour éviter d'obtenir un discours haché, la prise en compte de la prosodie des unités lexicales pourrait rendre les énoncés produits plus naturels.

Nous avons abordé un thème inhabituel pour les spécialistes de l'intonation,

L'ESSENTIEL

✓ Les « petits mots », tels que *enfin*, présentent plusieurs sens, parfois très différents.

✓ *Enfin* exprime par exemple une justification, un soulagement, une résignation ou une reformulation.

✓ On ne se trompe jamais sur l'interprétation de *enfin* quand on l'entend.

✓ L'intonation que l'on prend pour énoncer *enfin* lui confère un sens.

✓ Reste à incorporer l'intonation des mots prononcés à leur définition dans les dictionnaires.

© STILIEROCK/ALPHABET FANTASME

car nous nous intéressons à l'influence de l'intonation sur l'interprétation d'un seul mot, *enfin*. *Enfin* est un connecteur discursif. Ce sont ces petits mots que l'on ne remarque pas, tels que *même si* ou *disons*, et qui présentent deux fonctions. D'une part, ils structurent la langue et ont une valeur logique, d'autre part, ils soulignent l'intention du locuteur qui doit, par exemple, convaincre son interlocuteur. En outre, comme tous les mots que l'on emploie beaucoup, ils présentent plusieurs sens, parfois différents. Nous avons fait l'hypothèse que l'intonation que l'on prend pour énoncer ces mots permet de discriminer leurs différents sens.

Peu d'études de ce type ont été réalisées jusqu'alors. Par exemple, en 1999, Isabelle Légise, de l'Université de Tours, a associé les différentes interprétations de *Hein* – demandes de répétition, d'autorisation, etc. – à des intonations particulières.

Nous présenterons donc la façon dont nous avons recueilli les données orales, l'analyse pratiquée et les résultats obtenus, avant d'évoquer les différentes applications ; nous espérons notamment créer un dictionnaire électronique sonore qui associerait l'intonation et les mots.

De m'enfin à enfin

Quand on entend le mot *enfin* seul, une intonation particulière semble lui être associée, selon qu'il exprime la résignation, le soulagement ou l'exaspération (ce mot peut en effet exprimer des sentiments opposés). Et on ne se trompe jamais sur son interprétation. Mais est-ce vraiment l'intonation qui donne un sens à *enfin* ?

En 2009, pour comprendre le lien entre l'intonation et le sens d'un mot (soulagement, résignation, etc.), nous avons étudié un grand nombre d'énonciations orales de *enfin*. Au Laboratoire ligérien de linguistique de l'Université d'Orléans, nous disposons d'une enquête – l'Enquête sociolinguistique à Orléans ou ESLO. Celle-ci comprend plus de 300 heures de discours authentiques d'habitants de la région orléanaise, enregistrés entre 1968 et 1971. Puisqu'il s'agit d'une étude sur l'intonation, mieux vaut travailler à partir de données réelles, et non construites, car ces dernières ne seraient que la simulation enregistrée d'un discours inventé pour l'occasion, où se multiplieraient les *enfin*. Avec un logiciel



discours judiciaires. Par exemple, elle rend plus saillante l'énonciation de certains arguments.

Disposant de 200 occurrences orales de *enfin*, nous avons défini les différents sens – ou polysémie – de ce mot avant de voir si une intonation donnée correspondait toujours à un même sens. Pour ce faire, nous avons appliqué plusieurs tests linguistiques. L'un d'eux consiste à se demander quel type de problème est posé dans le discours, *enfin* signalant toujours qu'un problème a lieu à un temps donné et qu'il a été résolu ensuite. Par exemple, le problème peut être la nécessité d'une reformulation ou une irritation. Nous avons aussi considéré les types d'éléments qui suivent *enfin* (des justifications, des résumés, des corrections de ce qui a été dit, etc.) ou encore les mots, tels que *mais*, qui se retrouvent souvent à côté de *enfin*.

Ainsi, nous proposons 12 sens différents pour *enfin* (voir la figure 2). Par exemple, *enfin* exprime soit une justification, soit un soulagement, soit une résignation, soit une reformulation. Nous pouvons désormais étudier l'intonation de *enfin* avec ces données.

1. Dans les discours préparés à l'avance, l'intonation révèle toute son importance quand il s'agit d'influencer l'auditoire, ou de le convaincre, sans en avoir l'air...

d'extraction de données sonores, nous avons écouté nombre d'enregistrements pour trouver les occurrences de *enfin*. Toutefois, dans ces discours d'Orléanais, certains sens de *enfin* ne sont pas apparus en quantité suffisante pour être analysés.

Nous avons donc cherché le mot *enfin* dans d'autres types de discours, tels que des émissions de radio et de télévision, des films, des pièces de théâtre, des journaux télévisés et des discours politiques. Certes, l'authenticité de ces discours était moindre, mais les emplois de *enfin* qui faisaient défaut étaient présents.

Si la spontanéité disparaît des discours préparés, l'importance du recours à la prosodie sur l'impact des propos est en revanche intéressante. La tentation d'influencer l'auditoire par un moyen aussi discret que la prosodie est bien entendu un enjeu important pour les spécialistes du discours public (voir la figure 1).

Beaucoup de travaux ont analysé les discours publics, notamment du point de vue de la mise en place de l'argumentation. Mais peu d'études se sont intéressées au lien entre discours préparés et intonation. En 2009, Georges Boulakia, de l'Université Paris Diderot, et ses collègues suggèrent que la prosodie intervient dans les stratégies de communication des

Donner du sens au son

Nous avons constaté que les différentes intonations que l'on peut produire à l'oral ne dépendent que d'un petit nombre de paramètres : la mélodie (ou hauteur du son, qui permet de percevoir un son comme grave ou aigu), l'intensité (ou l'énergie du son, qui permet de percevoir un son comme fort ou faible) et la durée du son (bref ou long). À cela s'ajoutent le débit de parole (le nombre de mots ou de syllabes prononcés en un temps donné) et la présence des pauses dans le discours. Nous avons caractérisé la prosodie des 200 occurrences de *enfin*, à l'aide d'un spectrogramme, c'est-à-dire une représentation du signal qui décompose le son en ces différents paramètres. Et nous avons cherché si la « configuration prosodique » des énonciations était liée à l'interprétation des mots ou à leur place dans la phrase.

Rappelons notre hypothèse : une intonation spécifique est associée à un sens particulier de *enfin*, indépendamment du contexte. Or nos résultats ont infirmé cette supposition. En revanche, nous avons

✓ SUR LE WEB

Le projet de sémantique instructionnelle et prosodie : <http://www.lattice.cnrs.fr/Projet-SIP-Semantique->

L'enquête sociolinguistique à Orléans : <http://www.univ-orleans.fr/eslo/>

réussi à établir des corrélations entre une intonation et une interprétation de *enfin*, mais à un niveau de sens plus subtil. Pour le comprendre, prenons trois exemples d'emploi de *enfin*: « Enfin! Paul arrive! », « Les jeunes sont moins sérieux, enfin, la société est comme ça maintenant » et « Je ne suis pas très fort en cuisine, mais enfin je sais quand même faire une omelette ».

Le premier exemple marque un soulagement, le deuxième un sentiment de résignation et le troisième annonce une reformulation. Mais il est possible d'associer différentes interprétations à chacun d'entre eux. On peut comprendre le premier exemple de deux façons différentes: « Ouf! J'étais très inquiète et je suis pleinement soulagée que la venue de Paul mette un terme à mon angoisse. » Ou « Je commençais vraiment à en avoir assez d'attendre Paul; il m'énervé. » Les deux interprétations sont possibles, mais si vous aviez entendu la phrase au lieu de la lire, vous n'auriez pas hésité.

Pour le deuxième exemple, nous pouvons aussi imaginer deux interprétations: « Les jeunes n'y sont pour rien, ce changement de mentalité est dû à l'évolution de la société. On ne peut pas leur en vouloir. » Ou « Je ne suis pas d'accord avec cette situation, mais malheureusement je ne peux rien y faire. La société telle qu'elle est ne me satisfait guère. » Et pour le dernier: « Certes je ne sais pas cuisiner, mais attention! Il ne faut pas exagérer et mal interpréter mes propos, je sais faire une omelette! » Ou « Je ne sais pas cuisiner, mais il est bien évident, et vous vous en doutez, que je sais comment faire une omelette. »

Un mot aux multiples interprétations

L'intonation ne permet pas de distinguer résignation ou soulagement, mais elle est en revanche nécessaire pour interpréter *enfin* comme une des deux propositions des exemples précédents. Il existe donc des « sous-sens » à chacun des sens de *enfin*, et l'on ne peut les déterminer qu'à condition d'avoir accès au son. C'est la musique de la parole qui donne le sens.

Reprenons l'exemple de Paul. Lorsque *enfin* est énoncé avec une montée de la voix en fin de phrase et un allongement de la durée de la dernière syllabe, il s'agit de l'interprétation exprimant un soulagement avec de la satisfaction.

En revanche, si la voix est plus forte sur la première syllabe, avec un allongement de sa durée, nous comprenons *enfin* comme un soulagement avec de l'énervement (voir l'encadré page 60).

Et les autres mots de la langue française ?

Nous avons ensuite élargi notre étude à d'autres mots, connecteurs discursifs ou non, en pratiquant le même type d'analyses. Nous en avons conclu que pour *eh bien* ou *en fait*, l'intonation signale le caractère étonnant ou non de ce qui est dit. Par exemple, dans l'énoncé « Comment une pile peut-elle produire de l'électricité ? Eh bien, grâce à la réaction chimique qui se produit quand on plonge deux métaux différents dans de l'acide », soit la réponse proposée après *eh bien* est simplement logique et scientifique, soit elle est surprenante. De même, prenons la phrase: « On va pouvoir mettre au point des protocoles de thé-

rapie anticancéreuse, donc en fait, on va rendre des souris malades pour tester des traitements. » Soit on l'interprète comme: « Pour expliquer les choses différemment et qui vont dans le sens de ce que vous avez compris, on va rendre des souris malades. » Soit on comprend: « Pour expliquer les choses différemment et même si cela est surprenant, on va rendre des souris malades. »

S'agissant de *bien*, l'intonation confirme un fait, et renseigne sur l'importance du doute qui a été soulevé (ou au moins de la perception subjective qu'en a l'auditeur). L'énoncé « C'était donc bien Patrick Henry qui était l'auteur des cambriolages suivis d'incendies » s'interprète de deux façons. Soit: « Comme les autorités le supposaient et comme on pouvait s'y attendre, il a été confirmé que c'était Patrick Henry le coupable. » Soit: « Bien que les indices pouvaient laisser à penser qu'il était innocent, il s'avère que c'était finalement Patrick Henry le coupable. »

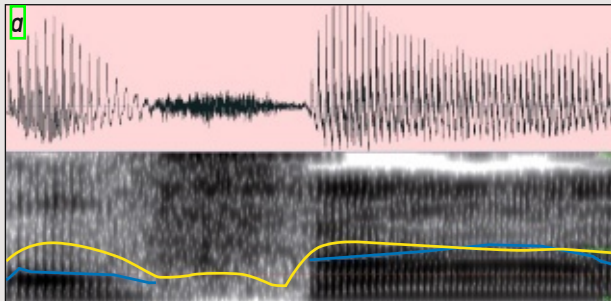
De même, nous avons observé que l'intonation de *quelques* n'indique rien sur

SENS DE ENFIN	EXEMPLE
La reformulation correctrice	« Trois Français sur quatre vivent en ville, enfin en zone urbaine. »
Le signalement d'une inadéquation lexicale	« Ils font appel à... enfin au peuple... »
La correction argumentative	« Je ne suis pas très fort en cuisine, mais enfin je sais quand même faire une omelette. »
La complétude discursive	« Il passe un bac scientifique, un diplôme d'informatique et enfin une licence en mathématiques. »
La reformulation résomptive	« Elles ont des troubles fonctionnels énormes, des troubles rénaux, hépatiques, enfin elles sont démolies. »
La justification	« Elle a tendance à déformer certains mots en parlant, enfin elle n'a que cinq ans. »
Le soulagement	« C'est peut-être le visage du coupable, voilà enfin un premier indice. »
La résignation	« Ils ont tellement de choses qu'ils jouent deux ou trois jours avec, et après c'est mis de côté, enfin la vie est comme ça hein ? »
L'irritation	« Elle m'a dit qu'elle voulait divorcer, mais enfin tu te rends compte ? »
L'incompréhension	« Enfin réponds-moi, quel est le problème ? »

2. **ENFIN** peut avoir différents sens. Ici, quelques exemples analysés par l'auteur.

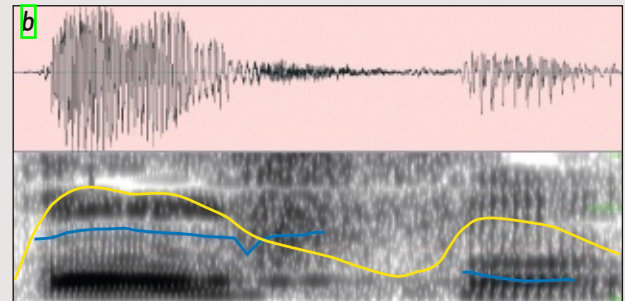
LES INTONATIONS DE ENFIN

L'intonation d'un mot reflète un sens, qui ne peut être compris qu'en écoutant le mot. Il est possible de décomposer le son d'un mot en différents paramètres, représentés sous forme d'un spectrogramme. Par exemple, dans la phrase « Enfin ! Paul arrive ! », *Enfin* s'interprète comme un



« Ouf ! J'étais très inquiète et je suis pleinement soulagée que la venue de Paul mette un terme à mon angoisse. »

soulagement avec de la satisfaction (a) ou comme un soulagement avec de l'énervement (b). Sur les spectrogrammes de *enfin*, représentés ci-dessous, la ligne bleue correspond à la mélodie ou hauteur du son (grave ou aigu), et la ligne jaune à son intensité (forte ou faible).



« Je commençais vraiment à en avoir assez d'attendre Paul ; il m'énervé. »

BIBLIOGRAPHIE

M. Petit, *Discrimination prosodique et représentation du lexique : application aux emplois des connecteurs discursifs*, Thèse de doctorat, Université d'Orléans, 2009.

G. Boulakia et al., *Un plaisir coupable... mais un plaisir (Étude prosodique de la rhétorique de plaidoiries et de réquisitoires)*, Actes d'IDP 2009, Paris, pp. 123-135, septembre 2009.

R. Bertrand et C. Chanut, *Fonctions pragmatiques et prosodie de enfin en français spontané*, *Revue de Sémantique et Pragmatique*, vol. 17, pp. 41-68, 2005.

P. Cadiot et Y.-M. Visetti, *Motifs, profils, thèmes : une approche globale de la polysémie*, *Cahiers de lexicologie*, vol. 79, pp. 5-46, 2001.

F. Nemo, *Enfin, encore, toujours entre indexicalité et emplois*, Actes du XXII^e Congrès international de linguistique et de philologie romanes, Niemeyer Max (éd.), Tübingen : Verlag, pp. 499-511, 2000.

I. Léglise, *Contraintes de l'activité de travail et contraintes sémantiques sur l'apparition des unités et l'interprétation des situations*, Thèse de doctorat, Université Paris 7-Denis Diderot, 1999.

la quantité (forte ou faible) évoquée, mais elle renseigne sur l'importance que cette quantité a dans l'argumentation. Par exemple, dans « Il a fait des miracles en quelques jours », on comprend « Il a fait des miracles rapidement » ou « Il a fait des miracles, et notez qu'en plus, il les a faits en très peu de jours ».

En outre, combien de fois un *oui* que notre interlocuteur aurait voulu franc et sincère apparaît-il teinté de réticence ? Si le *oui* est franc, la voix est montante, sinon, elle retombe après s'être un peu élevée. Et toutes les nuances vocales correspondent à différents degrés de franchise. Nous avons aussi constaté que le plus souvent, quand quelqu'un évoque une couleur, l'intonation permet de deviner si elle lui plaît ou non.

Ce que l'analyse de *enfin* nous a appris pourrait s'appliquer à d'autres connecteurs discursifs et à d'autres mots. Lorsqu'un locuteur s'exprime, il révèle également une partie de ses pensées, volontairement ou non. On peut ainsi savoir ce qu'il pense, ou s'il considère un point comme important ou négligeable. L'expression d'un sentiment est inhérente à la parole et les connecteurs discursifs permettent de le révéler. De fait, il serait peut-être nécessaire de revoir le sens conventionnel des mots, en tenant compte de l'intonation.

Aujourd'hui, c'est une réécriture des dictionnaires qui peut être envisagée. En utilisant un support multimédia, on pourrait différencier les sens des mots selon leur intonation. L'intégration de la prosodie dans les dictionnaires électro-

niques peut commencer avec les « mots de discours » tels que les connecteurs ou les adverbes (« Tu es toujours là » ou « Tu es déjà là » peuvent être interprétés comme un reproche ou un contentement selon l'intonation).

Créer un dictionnaire sonore

Pour ce faire, il reste à proposer diverses représentations de la prosodie, sous forme de courbes par exemple, et à approfondir la description du sens des connecteurs. Ce dictionnaire sonore serait alors utile dans le domaine du traitement automatique de la langue, quand il s'agit de reconnaissance vocale ou de voix artificielle.

Les enseignants du français comme langue étrangère souhaitent aussi intégrer l'intonation des mots dans les cours qu'ils dispensent. Une étude comparative de la prosodie des unités lexicales entre différents types de français (de France, québécois, etc.), mais aussi selon son évolution au fil des années, est une perspective de recherche. La deuxième Enquête sociolinguistique à Orléans est en cours. Elle permettra de comparer les intonations des Orléanais sur le même type de mots à 40 ans d'intervalle. Bien sûr, nous étudierons aussi le rôle de l'intonation dans la discrimination des autres types d'unités lexicales tels que les verbes, les adjectifs, les noms communs ou les noms propres. Un dernier conseil : faites bien attention à la façon dont, finissant de lire cet article, vous allez dire *enfin*. ■

universcience présente

esuper.fr

OCEAN CLIMAT ET NOUS

EXPO > 6 AVRIL 2011 > JUIN 2012

© PORTE DE LA VILLETTE / UNIVERSCIENCE.FR



EN PARTENARIAT AVEC :

Ifremer



SCIENCE



VALEURS
VERTES



Nature
& Découvertes

FUTURA - SCIENCES

thalassa





DIFFORME ET GLACÉE, la plus grosse lune irrégulière de Saturne, Phœbé, ressemble à une comète qui aurait été arrachée à son orbite autour du Soleil. Les cratères portent les noms des héros du mythe grec des Argonautes : le plus grand, au sommet, est le cratère Jason, à sa gauche se trouve Erginos, et celui dans l'ombre en bas est Oïlée.

Les satellites

les plus étranges du Système solaire

David Jewitt, Scott Sheppard et Jan Kleyna

Évoluant sur des orbites étirées et dans le sens souvent inverse de celui attendu, les satellites irréguliers ouvrent une fenêtre sur la formation des planètes.

Il y a dix ans, deux d'entre nous, David Jewitt et Scott Sheppard, firent un pari sur le nombre de satellites qu'il restait à découvrir dans le Système solaire. D. Jewitt paria 100 dollars qu'une recherche avec des télescopes dédiés n'en dénicherait pas plus de dix nouveaux. Après tout, les astronomes n'en avaient trouvé que très peu durant tout le XX^e siècle. S. Sheppard, plus optimiste, en prédit le double, au vu de la sensibilité accrue des instruments astronomiques.

S. Sheppard est aujourd'hui plus riche de 100 dollars : depuis ce pari, notre équipe a découvert 62 nouveaux satellites et il en reste sans doute d'autres à découvrir dans les données. Si nous faisons le compte des découvertes des autres équipes, le nombre total de nouvelles lunes découvertes est passé de 11 à 105 (au sens strict, il n'y a qu'une Lune, le satellite de la Terre, mais le terme « lune » est communément employé pour désigner un satellite naturel).

Personne n'avait prédit que la famille du Soleil recélait autant de membres cachés. Ces satellites discrets sont « irréguliers », ce qui signifie que leurs orbites sont larges, très elliptiques et inclinées par

rapport à l'équateur de leur planète-hôte. Les lunes dites régulières, comme celle de la Terre ou les satellites galiléens de Jupiter, ont par comparaison des orbites serrées, quasi circulaires et pratiquement équatoriales.

De façon encore plus étonnante, la plupart des lunes irrégulières sont sur des orbites rétrogrades, c'est-à-dire qu'elles tournent autour de leur planète-hôte dans le sens contraire à celui de la rotation de la planète sur elle-même. *A contrario*, les satellites réguliers tournent dans le même sens que leur planète (orbites progrades). Par exemple, vue d'au-dessus du pôle Nord de la Terre, la Lune tourne dans le sens contraire des aiguilles d'une montre, comme la Terre autour de son axe (et autour du Soleil). Les autres planètes tournent aussi dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, ce qui reflète sans doute le mouvement du disque de gaz et de poussières à partir duquel elles se sont formées, il y a 4,5 milliards d'années. Les satellites réguliers partagent ce mouvement, car ils se seraient formés à partir de disques entourant leurs planètes respectives. La rotation contraire

L'ESSENTIEL

✓ Par opposition aux satellites classiques, les lunes irrégulières parcourent des orbites très allongées et inclinées, parfois dans le sens opposé à celui de la rotation de leur planète sur elle-même.

✓ D'après les observations récentes, les satellites irréguliers sont la règle plutôt que l'exception.

✓ Leurs caractéristiques orbitales indiquent que les planètes les ont capturés après leur formation autour du Soleil.

✓ Ils nous renseignent sur les processus à l'œuvre dans les débuts du Système solaire.

SCOTT SHEPPARD / NASA / JPL

des satellites irréguliers est par conséquent le signe d'une origine différente.

Les modèles classiques ne rendent pas bien compte de cette famille d'objets, et une vague de nouveaux travaux théoriques est en cours. Il semblerait que les satellites irréguliers soient des survivants d'une époque révolue depuis longtemps, où l'attraction gravitationnelle exercée par les planètes nouvellement formées a extirpé les petits corps de leurs orbites initiales. Leur étude permettra de mettre en lumière les premières étapes du développement du Système solaire.

Bien que la première lune irrégulière connue, Triton, satellite de Neptune, ait été découverte dès 1846, la plupart d'entre elles n'ont été détectées que récemment, car elles sont souvent plus petites, donc moins lumineuses, que leur cousines régulières. S'ajoute aux difficultés le fait qu'elles soient distribuées dans une région de l'espace beaucoup plus vaste.

Par exemple, le satellite régulier de Jupiter le plus externe, Callisto, est en orbite à 1,9 million de kilomètres de la planète géante, alors que ses satellites irréguliers sont répartis dans un rayon de 30 millions de kilomètres. Cette taille est comparable à celle du domaine d'influence gravitationnelle de Jupiter, ou sphère de Hill, au-delà de laquelle le Soleil arracherait tout satellite à la planète. Si elle était visible à l'œil nu, la sphère de Hill aurait un diamètre apparent de dix degrés, soit 20 fois celui de la pleine Lune. C'est énorme comparé au champ de vision de la plupart des télescopes.

Des lunes à foison

Pour explorer une telle région à la recherche de satellites, il faut disposer des capteurs numériques les plus modernes et analyser presque 100 gigaoctets de données par nuit (voir l'encadré page 68). Notre propre relevé, *Hawai Moon survey*, entre 2000 et 2003, s'est focalisé initialement sur Jupiter, dont la proximité nous permet de détecter des petites lunes qui seraient trop faibles pour être vues autour des autres planètes géantes, plus lointaines. Des équipes menées par Brett Gladman, de l'Université de Colombie-Britannique, Mathew Holman, du Centre d'astrophysique Smithsonian à Harvard, et de John Kavelaars, de l'Institut d'astrophysique Herzberg, au Canada, ont mené des recensements similaires pour Saturne, Uranus et Neptune.

Les quatre planètes géantes se révèlent être accompagnées de lunes irrégulières. En extrapolant les découvertes actuelles, on estime que chacune d'entre elles possède environ 100 satellites irréguliers ayant un diamètre de plus d'un kilomètre. Ces corps célestes occupent une large gamme de tailles, les plus petits étant beaucoup plus représentés. Dans le cas de Jupiter, les tailles des lunes irrégulières vont de 180 kilomètres pour la plus grosse, J6 Himalia, jusqu'à des objets qui ne font qu'un ou deux kilomètres.

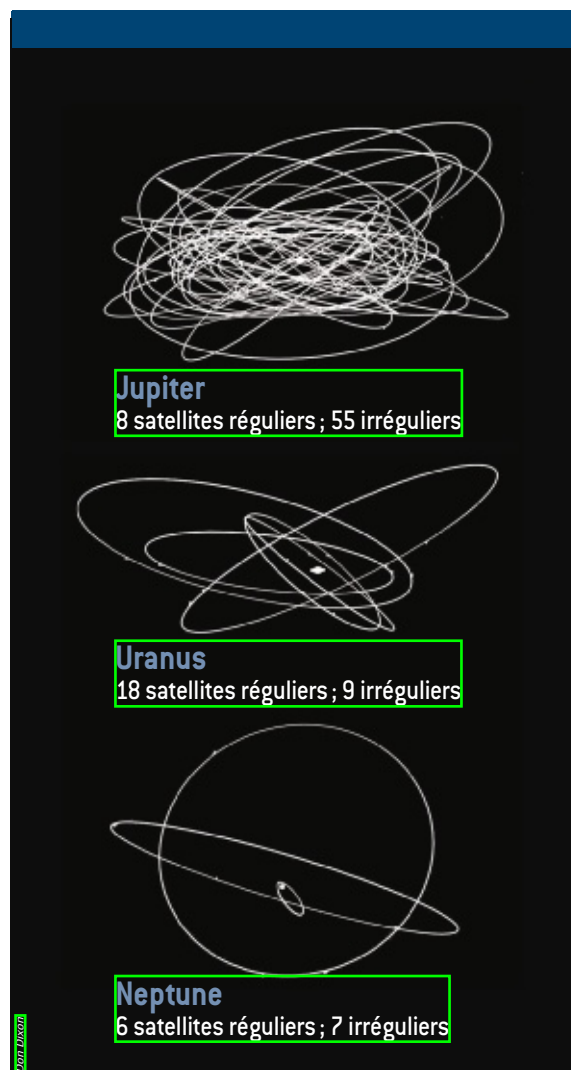
Résonances célestes

Les orbites de ces lunes sont parmi les plus compliquées du Système solaire. Comme elles gravitent loin de leur planète-hôte, elles sont tiraillées entre l'attraction du Soleil et celle de leur planète, si bien que leurs orbites ont un fort taux de précession (décalage du grand axe de l'ellipse au fil du temps). La précession est souvent si rapide qu'il n'est même pas adéquat de considérer que la trajectoire est une boucle fermée. Ces lunes irrégulières tracent dans le ciel des orbites étranges, semblables à des rosaces.

Quand les différentes influences gravitationnelles agissent de façon synchrone, la situation peut devenir très complexe. Par exemple, si le taux de précession d'un satellite est égal à la période de révolution de la planète autour du Soleil, le satellite entre dans une résonance dite d'éviction. L'attraction du Soleil est alors maximale toujours au même endroit de l'orbite et ses effets s'accumulent avec le temps, ce qui déstabilise l'orbite. L'ellipse s'allonge au point que la Lune entre en collision avec sa planète ou, au contraire, s'échappe de la sphère de Hill et tombe sous l'emprise gravitationnelle du Soleil.

Les orbites lunaires progrades sont plus vulnérables à ce phénomène que les orbites rétrogrades, l'influence du Soleil et de la précession se combinant dans le premier cas et se compensant en partie dans l'autre. Si les lunes irrégulières étaient autrefois équitablement réparties entre les deux sens, ce mécanisme de résonance pourrait expliquer que la plupart d'entre elles sont aujourd'hui rétrogrades.

Une autre résonance, connue sous le nom de résonance de Kozai, couple l'inclinaison et la forme de l'orbite. Les orbites inclinées deviennent très excentriques (l'ellipse s'allonge), ce qui conduit aussi poten-

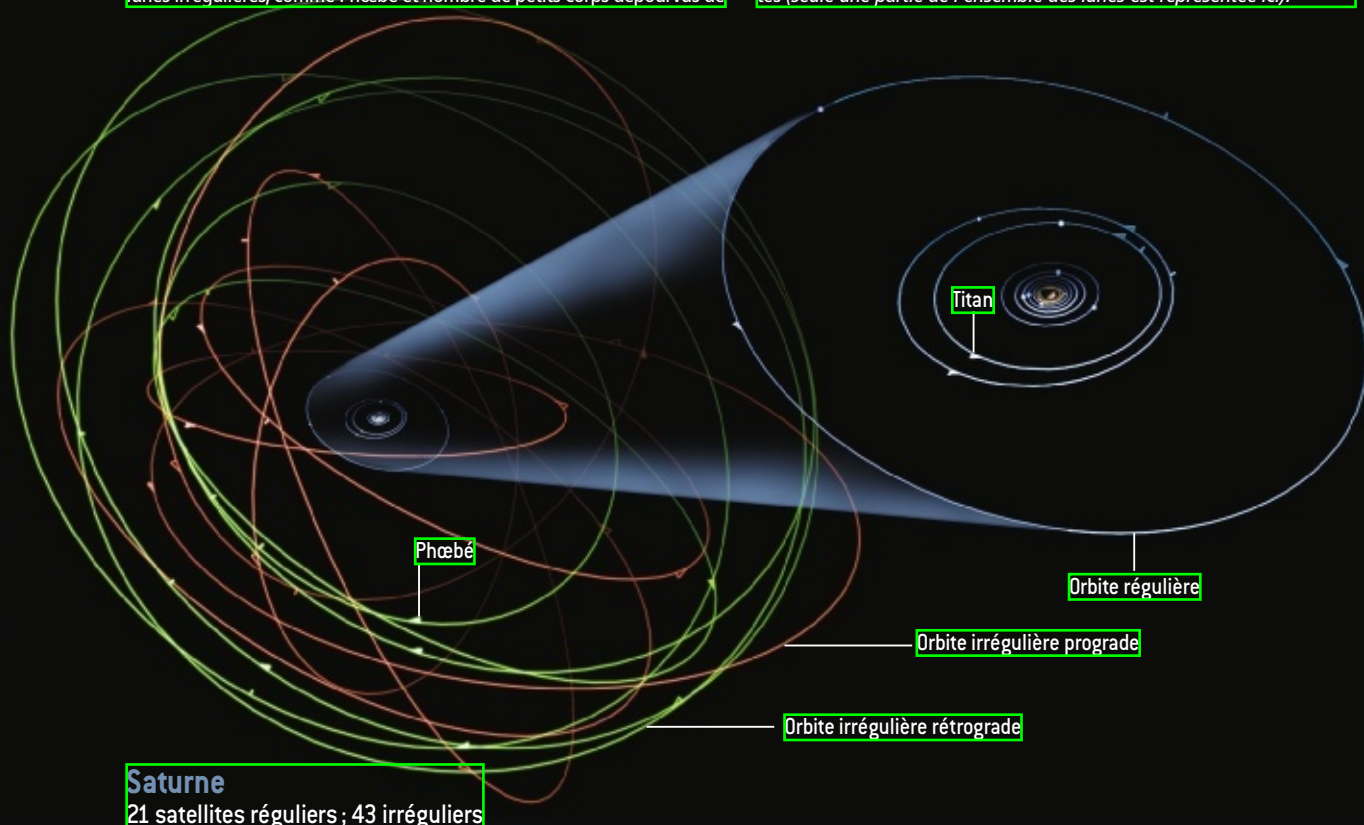


tiellement à l'éjection ou la destruction du satellite. C'est peut-être pourquoi on n'observe pas de lunes dont l'inclinaison s'écarte de plus de 50 degrés par rapport au plan équatorial de la planète.

Pour résumer, les satellites irréguliers actuels semblent être les survivants d'interactions gravitationnelles qui ont détruit nombre de leurs semblables. D'autres caractéristiques orbitales des satellites irréguliers n'ont cependant rien à voir avec les interactions gravitationnelles. Les lunes appartiennent à des groupes distincts, ou familles, dont les membres ont des paramètres orbitaux très proches. Les familles de satellites de Jupiter comptent par exemple jusqu'à 17 membres. Selon l'interprétation la plus simple, les membres d'une famille sont les restes d'une lune plus grande qui a été fragmentée par un impact, ses morceaux continuant à suivre des orbites proches de celle de l'objet

L'étendue du cortège de satellites de Saturne était encore mal connue il y a quelques années. Ses membres se répartissent en deux catégories. Les lunes régulières (*en bleu*), comme Titan et Japet, sont relativement proches de la planète et évoluent quasiment dans son plan équatorial. Les lunes irrégulières, comme Phœbé et nombre de petits corps dépourvus de

nom, sont bien plus éloignées et ont des orbites orientées de diverses façons. Certaines tournent dans le même sens que Saturne sur elle-même (*progrades, en rouge*), d'autres tournent dans le sens inverse (*rétrogrades, en vert*). Des systèmes similaires entourent chacune des planètes géantes (*seule une partie de l'ensemble des lunes est représentée ici*).



initial. De fait, lorsqu'on simule en remontant le temps les orbites des membres d'une famille, celles-ci se fondent en une seule. Ainsi, une fraction importante des satellites observés serait en fait des lunes de seconde génération.

Semblables à des résidus de comètes

David Nesvorný, de l'Institut de recherche du Sud-Ouest à Boulder, dans le Colorado, et ses collègues ont modélisé la destruction des lunes par des collisions. Ils ont montré qu'aujourd'hui, il est rare qu'une lune entre en collision avec une autre (ou avec une comète). C'est pourquoi l'existence de familles suggère une époque ancienne où les populations de satellites irréguliers ou de comètes étaient bien plus importantes que maintenant, et les collisions plus fréquentes.

Au-delà des orbites, les connaissances des astronomes ont progressé sur d'autres aspects des satellites irréguliers. La plupart de ces lunes sont si petites qu'on ne peut pas apprendre grand-chose sur leur composition. Ni leur masse ni leur spectre de lumière réfléchie, ou couleur, ne peuvent être déterminés avec précision. Tommy Grav, du Centre d'astrophysique Smithsonian à Harvard, et des collègues ont cependant découvert que les lunes d'une même famille tendent à avoir la même couleur. Cela suggère une parenté de composition entre les membres d'une famille, et appuie l'hypothèse de la fragmentation d'un corps parent.

L'un des rares satellites irréguliers que les astronomes connaissent en détail est Phœbé, une lune de Saturne observée par la sonde *Cassini* en juin 2004. *Cassini* a obtenu des images de haute résolution montrant une grande densité de cratères à la

surface de Phœbé; la sonde y a aussi détecté par spectroscopie la présence de glaces d'eau et de dioxyde de carbone. Les deux lunes de Neptune observées par la sonde *Voyager 2* en 1989, Néréide et Triton, ont elles aussi des surfaces gelées. Cela indique que ces corps se sont formés relativement loin du Soleil, comme les comètes.

Les satellites irréguliers de Jupiter sont noirs comme de la suie et semblent dépourvus de glace, probablement parce qu'ils sont plus proches du Soleil. Ils ressemblent à des résidus de comètes qui auraient perdu leurs composés volatils au fil du temps.

Les propriétés des satellites irréguliers – en particulier leurs orbites rétrogrades – suggèrent que ces corps ne se sont pas formés *in situ*. Il s'agirait plutôt de matériaux de construction planétaire inutilisés, comme les astéroïdes ou les comètes, qui gravitaient à l'origine autour du Soleil et

ont été d'une façon ou d'une autre capturés par les planètes. Le mécanisme de capture est encore mal compris. Dans les interactions complexes de la gravité du Soleil et des planètes, les astéroïdes et les comètes sont attirés sur d'éphémères orbites autour des planètes géantes. Ils sont alors comme des feuilles dans un tourbillon du vent d'automne : ils entrent dans la danse, font quelques dizaines de tours et sont éjectés de façon imprévisible.

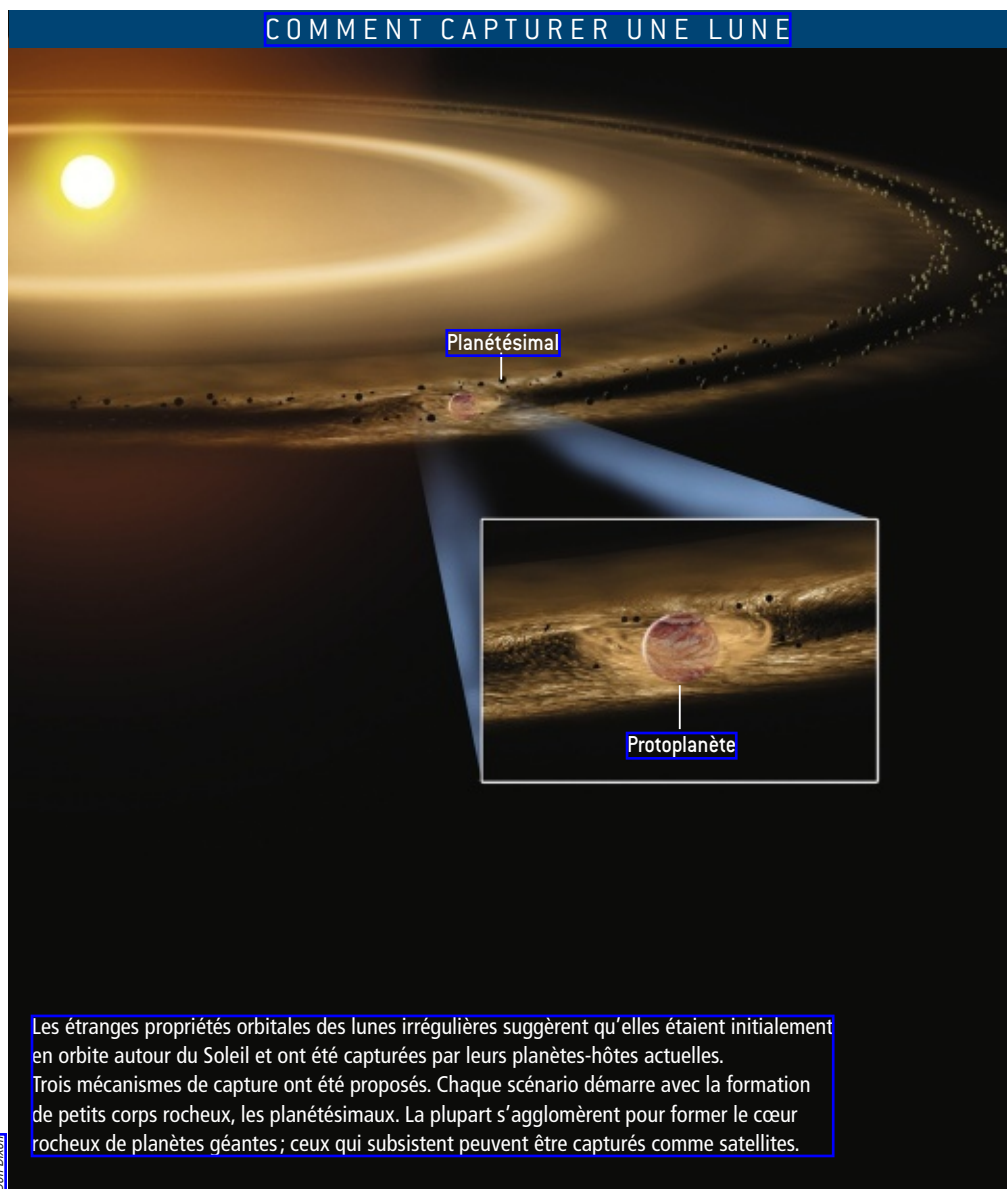
Des corps capturés par aérofreinage ?

La célèbre comète D/Shoemaker-Levy 9 (le D signifie « défunte ») en est un exemple. Après s'être placée sur une orbite temporaire autour de Jupiter au long du XX^e siècle, elle s'est écrasée la géante gazeuse en 1994. Si elle n'avait pas connu cette fin prématurée, elle aurait été éjectée sur une orbite héliocentrique en quelques centaines d'années. On connaît ainsi plusieurs corps qui ont survécu à une capture temporaire par Jupiter et qui sont retournés tourner autour du Soleil.

Mais pour qu'un corps soit définitivement capturé d'une orbite héliocentrique jusqu'à une orbite fixe et stable autour d'une planète, il doit perdre une partie de son énergie initiale, faute de quoi il s'échappera à nouveau. Or il n'existe à l'heure actuelle aucun mécanisme efficace de dissipation d'énergie dans le Système solaire. La capture des satellites a donc dû avoir lieu il y a longtemps, à une époque où le Système solaire avait des propriétés différentes.

Dans les années 1970, les théoriciens ont proposé trois mécanismes possibles de capture, intervenus pendant ou peu après la formation des planètes.

D'après le premier mécanisme, proposé par les Américains James Polack, Joseph Burns et Michael Tauber, les lunes ont perdu de l'énergie par friction en traversant les gigantesques atmosphères qu'avaient alors les géantes gazeuses embryonnaires. Jupiter et Saturne, contrairement à la Terre et aux autres planètes telluriques, sont constituées principalement d'hydrogène et d'hélium. Elles se sont sans doute formées à partir d'un noyau de roche et de glace de plusieurs dizaines de masses terrestres, qui a drainé de grandes quantités de gaz du disque protoplanétaire. Avant de prendre leur forme compacte actuelle, ces planètes ont pu passer par



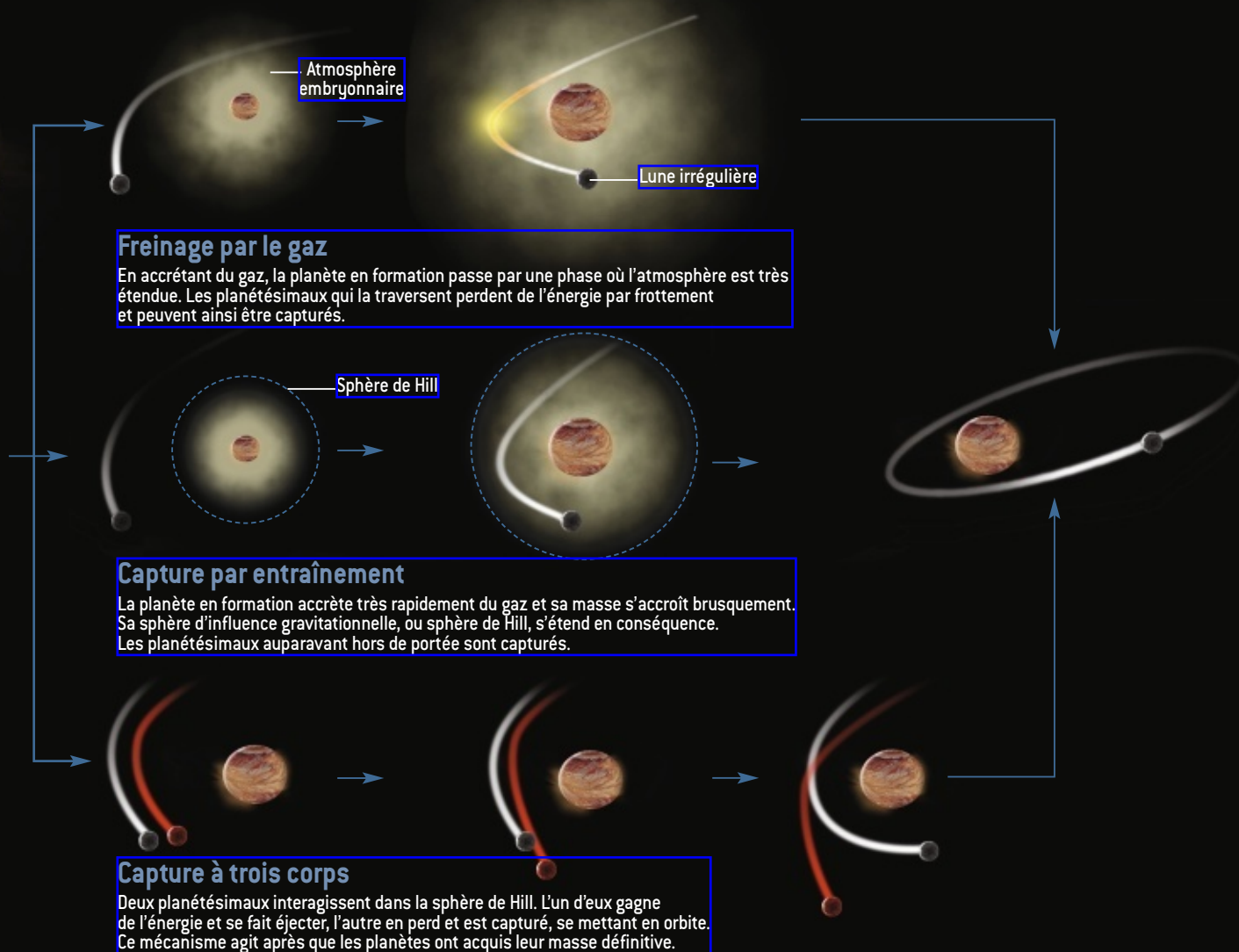
une phase durant laquelle leurs atmosphères étaient des centaines de fois plus étendues qu'aujourd'hui.

Trop grand, trop petit ou juste bien : comme Boucle d'Or, un astéroïde ou une comète de passage aurait eu trois destins possibles. Trop petit, il se serait consumé dans l'atmosphère ; trop grand, il aurait traversé sans entrave ; de la bonne taille, il aurait été ralenti, puis capturé. Cet effet d'« aérofreinage » est aujourd'hui utilisé par de nombreuses sondes planétaires pour se placer en orbite.

Un problème posé par le modèle du freinage atmosphérique est qu'il n'explique pas la présence de satellites irréguliers autour d'Uranus et de Neptune. Ces planètes ne sont pas des géantes

gazeuses, mais plutôt des géantes glacées, dominées par la roche et la glace avec un modeste vernis d'hydrogène et d'hélium. En raison de leur éloignement et de la plus faible densité de matériaux dans les régions externes du disque protoplanétaire, leurs cœurs ont grossi plus lentement et ont atteint la masse critique nécessaire à la captation du gaz alors que la nébuleuse solaire avait déjà été largement dissipée : Neptune et Uranus n'ont jamais eu d'atmosphères étendues. Dès lors, comment pourrait-il y avoir eu freinage par le gaz ?

Le deuxième mécanisme de capture proposé se déroule aussi pendant la croissance planétaire. L'accrétion du gaz sur le cœur rocheux des géantes gazeuses



aurait entraîné un accroissement rapide et spectaculaire de leur masse dans un processus auto-amplifié, d'où une croissance soudaine de la sphère de Hill de chaque planète. Les astéroïdes et autres objets se trouvant dans le voisinage au moment de cette croissance brutale se sont trouvés piégés dans le champ de gravité de la planète. Ce mécanisme de capture a été proposé pour la première fois par Thomas Heppenheimer et Carolyn Porco, à l'Institut de technologie de Californie. Ils l'ont appelé, un peu maladroitement, capture par entraînement (*pull down*).

Cependant, comme le freinage gazeux, ce mécanisme a des difficultés à rendre compte des lunes d'Uranus et Neptune, puisqu'aucune des deux planètes n'est

passée par une phase de croissance brutale. La plupart des modèles suggèrent que ces deux planètes ont grandi progressivement, en accumulant des planétésimaux de la taille d'astéroïdes et de comètes durant des dizaines ou des centaines de millions d'années. Même Jupiter et Saturne auraient dû croître en seulement quelques siècles pour que la capture par entraînement y soit effective ; une durée trop brève pour être plausible.

Un modèle alternatif pour expliquer la formation d'Uranus et Neptune a été proposé par Alan Boss, de l'Institut Carnegie de Washington. Il suggère qu'elles étaient au départ aussi massives que Jupiter et Saturne, mais qu'elles ont été dépouillées de leur enveloppe par le rayonnement

LES AUTEURS



David JEWITT est professeur d'astronomie à l'Université de Hawaï.
Scott SHEPPARD est chercheur à l'Université Carnegie de Washington.
Jan KLEYNIA travaille à l'Université de Hawaï.

d'étoiles massives voisines. Mais la présence des satellites irréguliers est encore plus difficile à expliquer dans le cadre de ce modèle, car une planète qui perd de la masse aurait tendance à perdre des lunes plutôt qu'à en gagner.

Capture à trois corps

Dans les scénarios de freinage gazeux ou de capture par entraînement, les satellites irréguliers ont sans doute été capturés dans les 10 à 20 premiers millions d'années du Système solaire, longtemps avant que la Terre ne prenne sa forme actuelle. Un troisième scénario très différent a été avancé en 1971 par Bepi Colombo et Fred Franklin, alors tous deux au Centre d'astrophysique de Harvard. Selon eux, la collision entre deux corps dans la sphère de Hill d'une planète dissiperait suffisamment d'énergie pour que l'un des deux soit capturé. Cette idée de « capture à trois corps » a reçu assez peu d'attention depuis, peut-être parce que ce type de collision est extrêmement rare aujourd'hui.

Cependant, des travaux récents montrent qu'aucune collision n'est nécessaire. Les trois corps ont juste besoin d'inter-

agir par le biais de la gravitation. L'un d'entre eux peut gagner de l'énergie au détriment des deux autres. Ce processus est l'équivalent à grande échelle de l'effet de fronde gravitationnelle utilisé pour propulser les sondes spatiales vers les planètes lointaines. En 2006, Craig Agnor, de l'Université de Californie à Santa Cruz, et Doug Hamilton, de l'Université du Maryland, ont proposé une nouvelle forme de capture à trois corps, où un couple d'objets liés est séparé par la gravité de la planète, ce qui entraîne l'éjection d'une composante du couple tandis que l'autre est satellisée.

Ce mécanisme est intéressant, car les quatre planètes géantes, sans exception, sont dotées de nombreuses lunes irrégulières. Il fonctionne en effet aussi bien pour les géantes gazeuses que les géantes glacées, sans recours à une enveloppe gazeuse étendue ou une croissance brutale. Il ne nécessite qu'un nombre suffisant de collisions ou de passages dans le voisinage des planètes. La période la plus favorable à ce type d'interaction est la fin de la formation des planètes, après que la sphère de Hill a atteint ses proportions actuelles, mais avant que les débris résiduels de la formation planétaire aient été balayés.

LA CHASSE AUX SATELLITES

Éloignés, minuscules, mal éclairés : les satellites irréguliers sont parmi les corps célestes les plus difficiles à observer. Pour les dénicher, il faut utiliser les meilleurs télescopes de relevé, des instruments qui scrutent de larges bandes du ciel au lieu de se focaliser sur une région limitée. La plupart des découvertes des auteurs ont été réalisées à l'aide du télescope Canada-France-Hawaï (CFHT) du Mauna Kea, à Hawaï. Bien que son miroir de 3,6 mètres soit petit

comparé à ceux des télescopes actuels, il est équipé de l'un des plus grands capteurs numériques, *MegaCam*, dont les 268 millions de pixels couvrent une surface de un degré carré sur la voûte céleste.

Le principal problème est de distinguer les petits corps du Système solaire d'objets situés en arrière-plan comme des galaxies ou des étoiles. Pour cela, on utilise deux méthodes. La première consiste à changer d'angle. On compare trois images de la même zone prises à

différents instants. Entre les prises, la Terre a avancé sur son orbite, ce qui change l'angle de vue. Les objets apparaissent décalés, et ce d'autant plus qu'ils sont proches. En pratique, les étoiles ne bougent pas et seuls les objets du Système solaire semblent décalés.

La seconde méthode est une mesure de vitesse. On prend dix images d'une même zone, on les décale en fonction des vitesses orbitales attendues des lunes que l'on cherche, et on les superpose. Dans l'image-somme, les étoiles d'arrière-plan apparaissent comme des traits, et les satellites irréguliers comme des points lumineux. Cette méthode utilisant plus d'images pour une même région du ciel est plus sensible aux objets peu visibles que la première, mais il faut plus de temps pour réaliser un relevé complet.

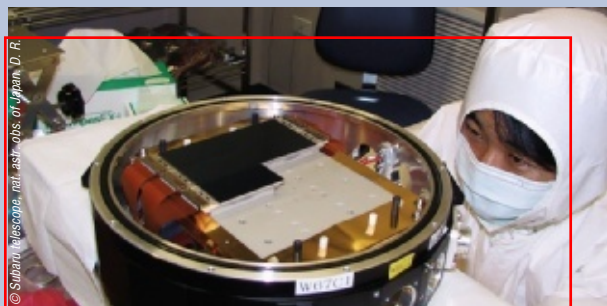
Pour s'assurer que les corps détectés sont bien des lunes et non



David Jewitt, Scott Sheppard et Jan Kleyna

Le satellite de Jupiter S/2003 a été découvert en 2003 sur ces deux images prises à 39 minutes d'intervalle. Les autres objets sont des étoiles d'arrière plan.

des astéroïdes ou des comètes, on les observe plusieurs mois durant pour retracer leurs orbites et vérifier qu'elles tournent bien autour de leurs planètes respectives.



Le détecteur Prime focus Camera du télescope Subaru, à Hawaï.

Capture des satellites et migration des planètes géantes

Comme le soulignent les auteurs de l'article, quel que soit le mécanisme de capture des satellites irréguliers, reste la question de leur origine. Se sont-ils formés près de leur planète ou dans les régions externes du Système solaire ?

En 2007, David Nesvorný, de l'Institut de recherche du Sud-Ouest, à Boulder, David Vokrouhlický, de l'Université Charles, à Prague, et Alessandro Morbidelli, de l'Observatoire de la Côte d'Azur, à Nice, ont proposé, dans le cadre du « modèle de Nice », un scénario de formation des essaims de satellites irréguliers qui penche en faveur de la seconde hypothèse.

Le modèle de Nice a été proposé en 2005 par A. Morbidelli, Harold Levison, de l'Université du Sud-Ouest, à Boulder, Rodney Gomes, de l'Université de Rio de Janeiro, au Brésil, et moi-même. Dans ce cadre, le Système solaire externe, entre 13 et 35 unités astronomiques (la distance de la Terre au Soleil) est resté peuplé de débris pendant près de 700 millions d'années après

la formation des planètes, jusqu'à ce que la forte interaction gravitationnelle entre Jupiter et Saturne induise des résonances qui ont bousculé l'ensemble du Système solaire. Des millions d'astéroïdes et de comètes ont été dispersés, tandis que les planètes principales ont migré vers leurs orbites actuelles, plus stables.

D. Nesvorný et ses collègues ont montré que, pendant la phase chaotique supposée par le modèle de Nice, lorsque les planètes s'approchent fréquemment les unes des autres (on parle de « rencontres proches »), les planétésimaux voisins peuvent être facilement capturés par celles-ci.

Il s'agit d'une variante de la capture à trois corps, où deux planètes se rencontrent et perturbent l'orbite d'un planétésimal proche, de sorte que ce dernier pénètre dans la sphère de Hill d'une des planètes. Lorsque les planètes s'écartent ensuite, quelques-uns des planétésimaux piégés deviennent des satellites permanents.

Les simulations montrent que la distribution des satellites capturés est similaire, tant en nombre qu'en termes de caractéristiques orbitales, à celle observée pour Saturne, Uranus et Neptune.

Dans la majorité des simulations, cependant, Jupiter semble se comporter différemment : la planète ne capture pas autant de satellites qu'attendu, tout simplement parce qu'elle ne subit pas beaucoup de rencontres avec les autres planètes.

Toutefois, dans un certain nombre de simulations, Jupiter passe par des rencontres suffisamment proches et fréquentes avec les autres planètes pour lui permettre de capturer des satellites irréguliers.

Des résultats récents du « groupe du modèle de Nice » suggèrent que ces simulations dont les paramètres conduisent à la capture sont plus proches de la réalité, bien que moins nombreuses.

Une évolution plus brutale de l'orbite de Jupiter semble en effet nécessaire, d'une part, pour que les orbites finales de Jupiter et de Sa-

turne soient les plus proches de celles observées ; d'autre part, pour assurer la stabilité des planètes telluriques durant la migration, et enfin pour satisfaire la distribution observée des astéroïdes entre Mars et Jupiter.

Une telle évolution est caractérisée par des rencontres plus proches et plus fréquentes que dans les autres simulations entre Jupiter et l'une des géantes de glace (Neptune ou Uranus), qui font migrer Jupiter vers son orbite finale en quelques centaines de milliers d'années, au lieu de millions d'années.

Les planètes telluriques sont alors « insensibles » au mouvement des planètes géantes, tandis que le « balayage » des orbites des planètes géantes est trop rapide pour que les résonances aient le temps de déstabiliser les astéroïdes.

Une évolution rapide de l'orbite de Jupiter semble ainsi expliquer la capture de ses satellites irréguliers.

Kleomenis Tsiganis

Université de Thessalonique, Grèce

La capture à trois corps pourrait expliquer pourquoi chaque planète a, à peu près, le même nombre de lunes irrégulières : bien qu'Uranus et Neptune soient moins massives que Jupiter et Saturne, elles sont plus loin du Soleil, et leurs sphères de Hill sont de taille comparable.

Si le scénario d'interaction à trois corps peut expliquer comment les lunes irrégulières ont été capturées, il n'indique pas d'où elles provenaient. Les chercheurs ont avancé deux origines possibles. Les lunes pourraient être des astéroïdes ou des comètes qui se seraient agrégés dans la même région du Système solaire que les planètes qui les ont finalement capturées. L'essentiel de la cohorte aurait alors été intégré à la planète elle-même, ou catapulté hors du Système solaire. Les lunes irrégulières seraient les plus chanceuses : ni englouties, ni condamnées à errer dans l'espace interstellaire.

Une autre possibilité est que les satellites irréguliers proviennent tous des régions extérieures du Système solaire, dans l'actuelle ceinture de Kuiper, au-delà de Neptune. Selon le « modèle de Nice »,

proposé en 2005 (voir l'encadré ci-dessus), des millions d'astéroïdes et de comètes ont été dispersés lors d'une phase chaotique survenue 700 millions d'années après la formation des planètes. Une fraction des petits corps dispersés aurait pu être capturée par les planètes lors des passages à leur proximité.

L'aspect de Phœbé, la lune de Saturne, ainsi qu'un spectre légèrement plus rouge des satellites irréguliers à mesure qu'on s'éloigne du Soleil appuient cette hypothèse, mais ne permettent pas de conclure. Des observations spectroscopiques plus précises sont nécessaires.

Si les lunes irrégulières des différentes planètes avaient des compositions chimiques différentes, cela conforterait l'hypothèse d'une formation locale. Si au contraire elles avaient des compositions chimiques semblables, cela renforcerait l'hypothèse d'une région d'origine commune.

Ainsi, comme des traces sur la chausée après un accident, les satellites irréguliers pourraient nous révéler si le Système solaire est passé par une phase chaotique dans son enfance. ■

✓ BIBLIOGRAPHIE

D. Nesvorný, D. Vokrouhlický et A. Morbidelli, *Capture of irregular satellites during planetary encounters*, *The Astronomical Journal*, vol. 133, p. 1962, 2007.

D. Jewitt et N. Haghighipour, *Irregular satellites of the planets: products of capture in the early Solar system*, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 45, pp. 261-295, 2007.

C. Agnor et D. Hamilton, *Neptune's capture of its moon Triton in a binary-planet gravitational encounter*, *Nature*, vol. 441, pp. 192-194, 2006.

D. Jewitt et S. Sheppard, *Irregular satellites in the context of giant planet formation*, *Space Science Reviews*, vol. 116, n° 1-2, pp. 441-456, janvier 2005.

LES VICTIMES du changement climatique

Alex de Sherbinin, Koko Warner et Charles Ehrhart

Les modifications des régimes de pluies et des rivages côtiers pourraient entraîner des migrations humaines d'une ampleur sans précédent.

© Getty Images / Tom Stoddart

L'ESSENTIEL

✓ Le changement climatique dû au réchauffement global bouleversera les ressources de millions de personnes, incitant nombre d'entre elles à quitter leur pays.

✓ Trois régions du globe qui ont déjà commencé à souffrir de ses effets sont examinées ici : le Mozambique, le delta du Mékong et l'Amérique centrale.

✓ Certaines migrations seront inévitables. Comment gérer au mieux ces flux ? Comment garantir les droits de ces populations ? La communauté internationale doit se poser ces questions dès maintenant.

Depuis toujours, les migrations dues aux changements climatiques ont façonné la civilisation humaine. Ainsi, l'homme serait sorti de son berceau africain à la faveur d'un changement climatique, il y a plus de 100 000 ans. Il y a 3 000 ans, une longue période de sécheresse en Asie centrale et le manque de pâturages ont poussé les armées mongoles jusqu'en Europe, où nombre de soldats se sont établis. Et au XX^e siècle, aux États-Unis, le *Dust Bowl* (le nuage de poussière), une catastrophe écologique due à la sécheresse et aggravée par des politiques agricoles erronées a obligé 3,5 millions de personnes du Midwest à émigrer.

Aujourd'hui, cette histoire séculaire prend un tour nouveau. Nous entrons dans une ère – « l'anthropocène » – marquée par des changements rapides du climat que provoquent les gaz à effet de serre émis par les activités humaines. Les modèles climatiques prévoient notamment une plus grande variabilité des précipitations, une fréquence plus élevée des événements climatiques extrêmes – telles les sécheresses et les inondations –, une hausse du niveau de la mer et une acidification des précipitations. Chacun de ces changements pourrait perturber les écosystèmes qui nous fournissent nos res-

sources naturelles. Et obliger des populations entières à quitter leurs habitations, dans des proportions inégalées jusqu'à aujourd'hui.

Menacés par l'élévation du niveau de la mer, les 38 États insulaires de faible altitude de la planète sont l'objet d'une attention particulière. Selon certains scénarios, nombre d'entre eux pourraient disparaître d'ici la fin de ce siècle. Cependant, le problème auquel sont confrontés les habitants de ces États n'est que le sommet de l'iceberg. Rien qu'en Inde, une élévation de un mètre du niveau de la mer obligerait 40 millions de personnes à migrer. En outre, l'inondation côtière est loin d'être le seul problème lié au climat en Asie du Sud. Des modèles développés par Arthur Green et Andrew Robertson, de l'Université Columbia, suggèrent à la fois un accroissement du total des pluies de mousson et une diminution de leur fréquence – en d'autres termes, des précipitations plus intenses concentrées sur moins de jours. Des décalages de la saisonnalité des crues fluviales (dus à la diminution de la couche neigeuse) pourraient réduire les ressources agricoles de plusieurs centaines de millions d'Asiatiques vivant en zone rurale, ainsi que l'approvisionnement en nourriture d'autant de citoyens.



L'augmentation du nombre de catastrophes liées au climat est un fait. La fréquence des catastrophes naturelles a plus que doublé depuis les années 1980 et, parmi elles, celles liées au climat représentent une proportion croissante. Selon le Bureau pour la coordination des affaires humanitaires des Nations unies et le Centre de veille des déplacements locaux (*Internal Displacement Monitoring Center*), en 2008, les catastrophes liées au climat ont conduit plus de 20 millions d'individus à quitter leur toit – soit plus de quatre fois le nombre de personnes déplacées à la suite d'un conflit local.

Trois cas dans trois continents

Ces déplacements de populations et ces migrations forcées, provoqués par le changement climatique, pourraient donc devenir un problème humanitaire international de premier plan dans les décennies à venir. Dans cet article, nous donnons une idée de ce que l'avenir pourrait nous réserver en examinant les facteurs qui ont commencé à provoquer de tels déplacements dans trois régions du monde. Nous considérerons d'abord le Mozambique, où les populations subissent fortes inondations et sécheresses périodiques. Nous examinerons ensuite

le delta du Mékong. Ici, les inondations rythment la vie depuis longtemps; cependant, ces dernières années, leur ampleur a dépassé tous les précédents historiques. L'élévation du niveau de la mer entraînera en outre des pertes considérables de terres agricoles. Nous terminerons par le Mexique et l'Amérique centrale, où les tempêtes tropicales et les cyclones ont entraîné le déplacement de milliers de personnes, et où la sécheresse menace constamment.

Nous ne prétendons pas prévoir l'ampleur, la direction et la périodicité des migrations à venir. En présentant ces études de cas, nous espérons susciter des analyses plus complètes des zones où des migrations en masse pourraient se produire et encourager le développement de plans régionaux et internationaux pour venir en aide aux populations contraintes de se déplacer.

Les analyses que nous présentons proviennent du programme Changement environnemental et scénarios de migration forcée (EACH-FOR) de la Commission européenne, une étude globale des migrations dues à l'environnement, et d'une étude cartographique conduite par le Consortium pour un réseau international d'information en sciences de la Terre (CIESIN), à l'Institut de la Terre de l'Université Columbia.

UNE FAMILLE avance péniblement dans les rues de Chokwe, au Mozambique. Des inondations de plus en plus fréquentes dans cette région ont poussé de nombreuses familles à déménager.

LES AUTEURS



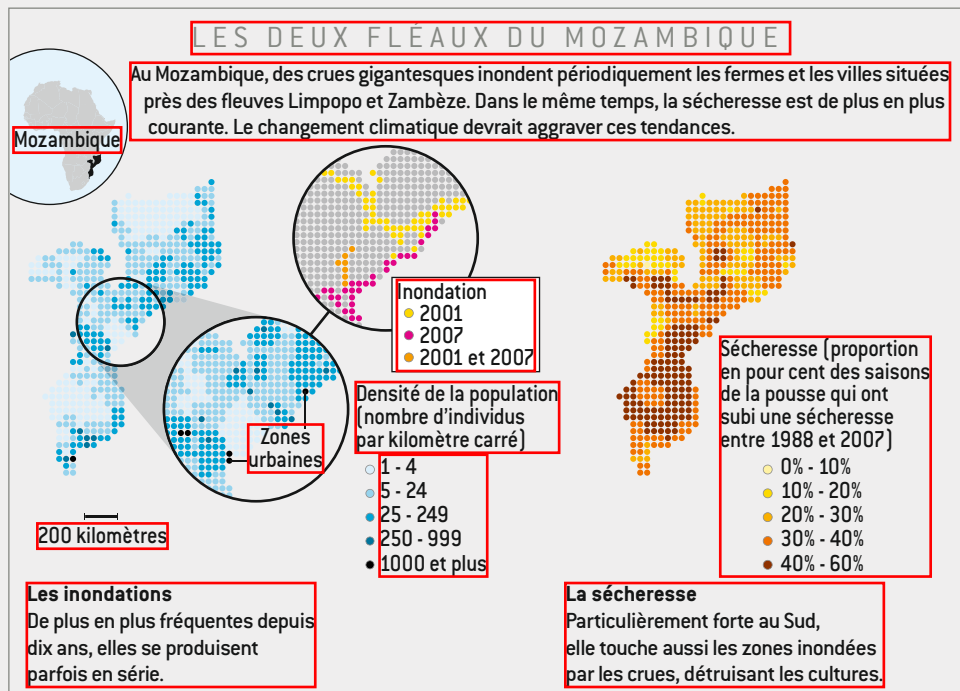
Alex DE SHERBININ, chercheur à l'Institut de la Terre de l'Université Columbia, est directeur adjoint du Centre de données socio-économiques et applications de la NASA. Koko WARNER est chercheur à l'Institut pour l'environnement et la sécurité humaine de l'Université des Nations unies. Charles EHRHART coordonne la réponse au changement climatique au sein de l'organisation non gouvernementale CARE international.

[MOZAMBIQUE]

La double peine

Le Mozambique, un pays de 785 000 kilomètres carrés, s'étend le long de la côte Est de l'Afrique, entre la Tanzanie et l'Afrique du Sud. Il a une longue histoire de migrations dues en partie à une guerre civile de 16 ans qui s'est terminée en 1992 ; au cours de cette guerre, cinq millions d'individus ont dû quitter leur habitation. Durant les quatre années suivantes, plus de 1,7 million de Mozambicains venant du Malawi, du Zimbabwe, du Swaziland, de la Zambie, de l'Afrique du Sud et de la Tanzanie sont retournés dans leur pays.

Aujourd'hui, la guerre civile est terminée, mais le Mozambique subit une nouvelle crise. En 2000, 2001 et 2007, des inondations dans les bassins des fleuves Zambèze et Limpopo ont obligé des centaines de milliers de personnes à migrer. Les inondations de 2007 ont chassé plus de 100 000 individus, dont la moitié a



Sources : CIESIN, Université Columbia (SEIAC), Bradfield Lyon (Hazard Institute), IFPRI, Banque mondiale, CIA, 2009 GROUP, Verminet Flood Observatory, Mozambique Flood Extents, IPCC et IN Data Library

[LE DELTA DU MÉKONG]

L'élévation du niveau de la mer

La partie vietnamienne du delta du Mékong abrite 18 millions d'individus, soit 22 pour cent de la population du Vietnam. Elle représente 40 pour cent de la surface des terres cultivées du pays et plus du quart de son produit intérieur brut. Ses habitants font pousser plus de la moitié du riz du Vietnam, pêchent 60 pour cent de ses poissons et crevettes, et

récoltent 80 pour cent de sa production fruitière.

Tout cela est menacé. Selon une simulation du Consortium pour un réseau international d'information en sciences de la Terre (CIESIN), une élévation du niveau de la mer de un mètre pourrait entraîner le déplacement de plus de sept millions d'habitants du delta, et une éléva-

tion de deux mètres doublerait ce chiffre. À ce niveau, même des quartiers de Ho Chi Minh-Ville (anciennement Saïgon) seraient sous les eaux. Une élévation de deux mètres reste peu probable. Néanmoins, un changement climatique brutal pourrait provoquer une fonte plus rapide que prévue des glaciers du Groenland et de l'Ouest de l'Antarctique. Dans ce cas, une élévation de deux mètres du niveau de la mer se produirait vers 2100.

Les inondations jouent depuis longtemps un rôle important dans l'économie et la culture de cette région. Dans le delta du Mékong, qui s'étend au Nord dans le Cambodge, les gens vivent avec les cycles de crues et dépendent d'eux, mais dans certaines limites : pour eux, des crues d'une hauteur comprise entre 50 centimètres et 3 mètres sont normales et constituent de « bonnes crues » pour les cultures. Plus élevées, elles

ne sont plus gérables et ravagent les plantations.

Depuis quelques dizaines d'années, la fréquence et l'ampleur des crues dépassant quatre mètres ont augmenté. Couplées aux autres risques naturels (cyclones, tsunamis dus à des tremblements de terre) et à la pression exercée sur l'environnement par l'industrialisation rapide du Vietnam et des pays en amont du fleuve, ces inondations placent les ressources naturelles du Vietnam et les personnes qui en dépendent dans une situation précaire. Les populations s'adaptent de différentes façons, parfois en émigrant, de préférence vers les grandes villes, notamment Phnom Penh, la capitale du Cambodge, où l'économie se développe plus vite.

Pour sa part, le gouvernement vietnamien a mis en place un programme intitulé « Vivre avec les inondations » : des organismes gou-

UNE DES 400 000 MAISONS INONDÉES lors des pires crues qui ont frappé le Mékong depuis une quarantaine d'années.



© Getty Images/Photo Dinh Nam

été évacuée dans des centres d'hébergement temporaires. En 2007, après le retrait de ces premières crues, le cyclone Favio a fait à nouveau sortir le Zambèze de son lit. Les personnes touchées ont perdu logement et moyens de subsistance, ainsi que tout accès aux équipements médicaux, aux installations sanitaires et à l'eau potable. Ces catastrophes à répétition ne facilitent pas la reconstruction de ces communautés.

Dans les années qui ont suivi les inondations de 2001, le gouvernement a incité les habitants à s'établir loin des plaines inondables, notamment en proposant un programme « travail contre assistance » : les volontaires fabriquaient des briques et, en échange, le gouvernement promettait de payer les autres matériaux de leur habitation future et de contribuer à sa construction. Avant 2001, les communautés qui

quittaient périodiquement les plaines inondables pour éviter les crues n'avaient jamais envisagé de déménager de façon permanente.

Ironie du sort, le Mozambique peut être simultanément frappé par la sécheresse et par les inondations – comme cela est arrivé en 2007 quand la partie Sud du pays souffrait d'une grande sécheresse alors que le Zambèze, plus au Nord, sortait de son lit. Des modèles climatiques suggèrent que les niveaux de précipitations pourraient augmenter dans le Nord du Mozambique et diminuer dans le Sud. L'espace et l'intensité des précipitations constituent un élément clef du problème. Les climatologues prévoient une variabilité encore plus grande du climat au cours de ce siècle, avec des oscillations entre des épisodes d'intenses sécheresses et d'inondations – et des conséquences de plus en



Kenzo Matheus Alima

UNE JEUNE FEMME recueille un peu d'eau au fond d'un puits presque à sec à Malange au Mozambique, une zone frappée par la sécheresse.

plus imprévisibles sur des pays tels que le Mozambique.

Les personnes qui ont déménagé restent dépendantes de l'aide gouvernementale et internationale, car les régions où elles se sont établies manquent d'infrastructures rendant possible une économie autosuffisante, avec des hôpitaux et des écoles. Les récoltes sont en outre souvent mau-

vais. Sans une assistance humanitaire extérieure, la population pourrait avoir besoin de migrer plus loin, voire au-delà des frontières. Les principales destinations seraient vraisemblablement Maputo, la capitale du Mozambique, et l'Afrique du Sud, à cause des faibles perspectives économiques offertes par les autres villes ou pays voisins.

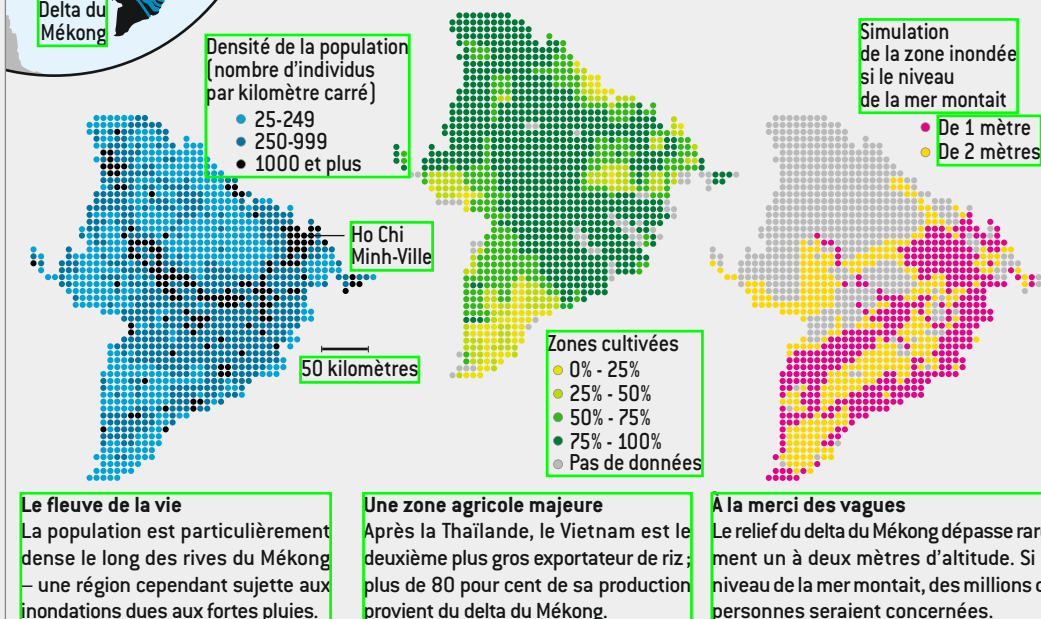
vernementaux encouragent les riziculteurs à se tourner vers l'aquaculture – l'élevage de fruits de mer, tels que les crevettes, et de petits poissons dans des bassins fermés. Le long de la branche principale du Mékong, dans la province de An Giang, ce programme vise également à éloigner la population du fleuve. Près de 20 000 ménages devraient être relogés vers 2020.

Généralement sans terre, ces personnes n'ont nulle part où aller si leurs maisons s'écroulent, et sont trop pauvres pour se déplacer vers des zones urbaines. Toutefois, leur déplacement géographique, même à moins de deux kilomètres de leur ancien logement, comme cela est généralement planifié, risque de leur faire perdre leur moyen de subsistance : ces personnes travaillent pour la plupart au jour le jour en tant que manœuvres grâce aux relations qu'elles entretiennent avec la famille, les amis et les employeurs. Leur nouvelle implantation pourrait briser ce tissu social.



LE DELTA DU MÉKONG EN PÉRIL

Le delta du Mékong produit une grande partie des ressources alimentaires du Vietnam. Les riziculteurs utilisent les crues périodiques pour irriguer leurs champs, mais depuis quelques décennies, de fortes crues font vaciller cet équilibre. La région est aussi menacée par l'élévation du niveau de la mer.



Sources : CIESIN, IHPH, Banque mondiale, CIAI, 2009 GRUMP, SEDAC, N. Hamantuv et al., 2010, Global agricultural lands: croplands, 2000, A. Jarvis et al., 2008, <http://stlmcs.coar.org>

Tempêtes et sécheresse

Le Mexique et l'Amérique centrale comptent presque dix millions d'agriculteurs, dont beaucoup satisfont à peine leurs besoins en cultivant les aliments de base traditionnels (le maïs, les haricots et les courges) en zone de montagne. Comme tous les agriculteurs, ils dépendent des précipitations. Trop peu d'eau, et leurs plantes se dessèchent et meurent ; trop d'eau à la fois, et le sol est raviné, entraînant avec lui les récoltes.

Parfois, la sécheresse et les inondations frappent la même année. En juillet 2001 au Honduras, par exemple, une forte sécheresse a touché 250 000 individus. Quelques mois

plus tard, une tempête tropicale inondait la région.

Déjà, de nombreux agriculteurs se sont déplacés vers le Nord. La majorité des émigrants vers les États-Unis proviennent ainsi de zones rurales pauvres du Mexique et de l'Amérique centrale. La réduction des surfaces cultivables, la déforestation et le chômage sont les principaux facteurs qui poussent à l'émigration – ainsi que l'attrait de salaires plus élevés dans le Nord –, mais des raisons climatiques s'ajoutent à cette détresse. Dans l'État de Tlaxcala, dans la partie centrale du Mexique, Stefan Alscher, du programme EACH-FOR,

a observé que la libéralisation du marché dans les années 1990, associée à une diminution des précipitations, a conduit à une réduction des revenus agricoles, poussant certains agriculteurs à abandonner leur métier.

On prévoit que le changement climatique conduira à une diminution de 10 à 20 pour cent des eaux de ruissellement (apportées par les précipitations). Dans la région centrale du Mexique, Tlaxcala n'est pas l'État le plus menacé. L'irrigation de cette région s'effectue principalement sur les plaines côtières, telles celles de Jalisco et de Sinaloa – deux grands États agricoles qui, ensemble, produisent presque 18 pour cent du produit intérieur brut agricole du pays. Or, selon les données du Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), la quantité d'eau disponible dans ces États pourrait diminuer de 25 à 50 pour cent vers 2080.

La sécheresse n'est pas le seul problème auquel est confrontée la région. Les climatologues prévoient une augmentation de la fréquence des tempêtes tropicales intenses en Amérique centrale et au Mexique, à l'image de celles qui ont touché ces régions

en 1998 et 2007 : en 1998, l'ouragan Mitch a tué plus de 11 000 personnes au Honduras et au Nicaragua et a causé pour plusieurs milliards de dollars de dégâts. En 2007, la tempête tropicale Noel inonda jusqu'à 80 pour cent de l'État de Tabasco, chassant quelque 500 000 personnes. Dans le passé, les déplacements de populations consécutifs à ces tempêtes étaient généralement locaux et ne duraient pas longtemps, mais l'augmentation de leur fréquence pourrait inciter certains à émigrer définitivement.

Les solutions ne sont pas simples. Dans les zones agricoles, les habitants pratiquent déjà depuis longtemps la migration saisonnière. Sachant que la plupart des flux migratoires futurs se dirigeront vraisemblablement vers les États-Unis et le Canada, les responsables politiques de ces pays pourraient envisager d'accorder des visas de travail temporaires à la suite des sécheresses ou inondations. À plus long terme, les responsables de la gestion des régions devront développer des techniques d'irrigation économisant l'eau, ainsi que d'autres moyens pour l'agriculture pluviale (ou non irriguée) et ses acteurs.



UN PLAN D'EAU SAUMÂTRE dans la vallée de Tehuacan, près de Mexico. Utilisées autrefois pour les animaux, ces mares sont devenues les ressources en eau des villageois.

L'IMPORTANCE DES SPÉCIFICITÉS

Les études des programmes EACH-FOR et CIESIN sont remarquables. Le programme EACH-FOR mène une enquête sur les migrations dans 23 régions du monde – effectuée par les experts locaux – et les relie aux données environnementales, issues des revues scientifiques ; le programme CIESIN crée une base informatique des données nationales et internationales pour faciliter leur exploitation. Toutefois, les données restent parcellaires. Pour l'instant, les modèles climatiques sur lesquels ces études s'appuient sont fondés sur des informations satellitaires, associées à quelques mesures de terrain. Le cadre de travail est national dans presque tous les cas, et les conclusions ne prennent pas suffisamment en compte les spécificités locales – pluviométrie, oc-

cupation des sols, cultures, politique agricole, comportement des populations –, pourtant essentielles dans la réflexion sur l'avenir d'un pays.

Ainsi au Mexique, au centre et au Sud, les mouvements de convection font varier la pluviométrie en quelques kilomètres ; toujours au Sud, dans l'État de Tabasco, les conséquences des inondations ont été aggravées par la colonisation des zones à risque. Par ailleurs, le Mexique est un cas à part en Amérique centrale, car la répartition des terres cultivées y est moins inégalitaire : après la révolution de 1910, nombre de grandes propriétés furent collectivisées, mais, en 1992, leur démembrement et leur privatisation ont créé 2,5 millions de petits propriétaires, qui participent peu aux grands mouvements migra-

toires. L'émigration dépend aussi de la situation familiale : on ne part loin qu'en célibataire. Enfin, la politique économique à tenir ne sera sans doute pas la même dans les États du centre et du Sud du Mexique, régions de petit paysan, et dans ceux de Jalisco et de Sinaloa, où des groupes multinationaux exploitent la terre.

Dans le delta du Mékong, il ne faut pas sous-estimer l'inventivité et la réactivité des populations locales. Des stratégies d'adaptation structurelles coûteuses, tel un endiguement massif, sont en cours pour limiter la catastrophe annoncée. De plus, il y existe une culture du risque ; les populations ont appris à vivre avec crues et tempêtes, en construisant des abris en zone surélevée et en mettant en place des systèmes d'alerte.

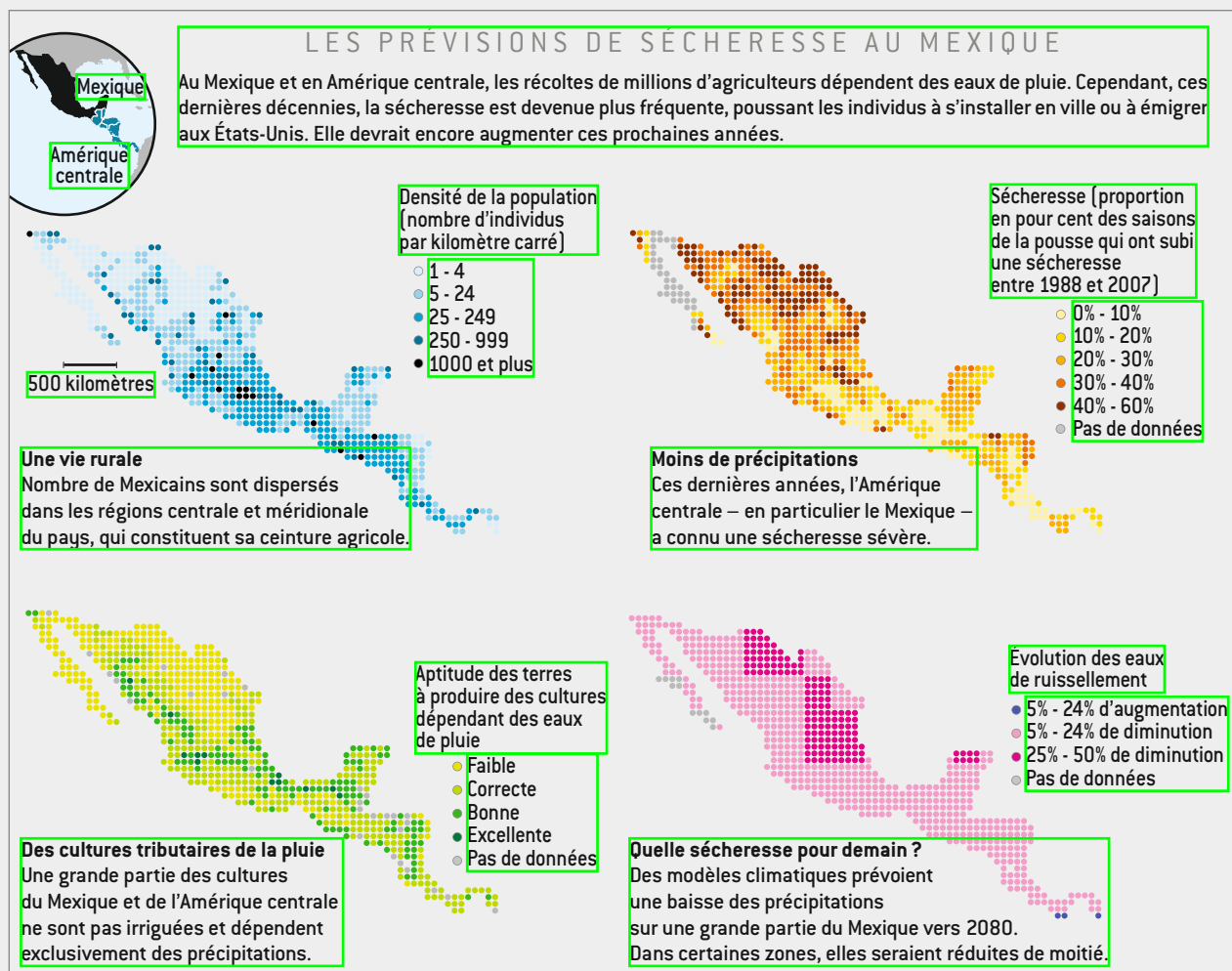
De façon générale, si les pauvres seront bien les plus touchés par le changement climatique, la communauté internationale se doit surtout de sensibiliser les populations concernées grâce à des données précises, afin qu'elles puissent agir et aménager leur territoire en conséquence. Quant aux sociétés dites avancées, elles ne seront pas épargnées par les impacts du changement climatique : rigides, car prisonnières de leurs technologies, et avec des habitants sédentaires et âgés, elles auront des difficultés à s'adapter.

Alain Gioda

Hydrosociences Montpellier, IRD

Gustavo Garza

Université nationale autonome de Mexico



Sources : CIESIN, IIPH, Banque mondiale, CIA, 2009; GHMP, SEDAC, PEGG, D. Nohria et al., 2006; Bradfield, Lyon, Haverth Institute, Univ. Columbia, GHCC, IN Data Library

Le Mozambique, le delta du Mékong et l'Amérique centrale ne sont que trois cas parmi de nombreux autres étudiés par les programmes EACH-FOR et CIESIN. Ces études ne sont pas achevées, mais, déjà, deux conclusions s'imposent.

Aider les pays menacés à faire face

D'une part, l'étude cas par cas est d'autant plus justifiée que les causes de migrations sont multiples et propres à chaque pays ; souvent, les dégâts climatiques sont couplés à des facteurs politiques ou économiques, ou encore à des événements naturels indépendants du changement climatique, telles les éruptions.

D'autre part, les migrations forcées liées au changement climatique pourraient devenir le problème humanitaire le plus important du XXI^e siècle. En conséquence, la communauté internationale doit dès à

présent mettre en place des mesures de protection afin que ces flux migratoires soient ordonnés et pacifiques, que les droits de l'homme soient respectés et que les émigrants prennent en charge leur avenir. Voici les objectifs qu'il nous semble fondamental de poursuivre : réduire les émissions de gaz à effet de serre ; investir dans la gestion du risque de catastrophes (il a été montré qu'une telle mesure réduit la probabilité de migration à grande échelle) ; reconnaître que certaines migrations seront inévitables et développer des stratégies d'adaptation nationales et internationales ; s'engager à s'assurer que les fonds levés pour cette adaptation profiteront bien aux personnes qui en auront le plus besoin ; renforcer les institutions internationales pour protéger les droits des personnes déplacées en raison du changement climatique.

On ne peut se contenter d'agir à l'échelle de son seul pays.

BIBLIOGRAPHIE

S.-K. Min *et al.*, Human contribution to more-intense precipitation extremes, *Nature*, vol. 470, pp. 369-373, 2011 ; P. Pall *et al.*, *ibidem*, pp. 382-385.

K. Warner *et al.*, In search of shelter : mapping the effects of climate change on human migration and displacement, CIESIN, 2009 : www.ciesin.columbia.edu/documents/ClimMigr-rpt-june09.pdf

Études de cas du programme EACH-FOR et rapport final : www.each-for.eu

Centre d'information sur le changement climatique de CARE international : www.careclimatechange.org

Données et cartes des zones côtières de faible altitude : <http://sedac.ciesin.columbia.edu/gpw/lec3.jsp>

Tom Misteli

La vie agitée du génome

Entre deux divisions cellulaires, l'ADN des chromosomes se révèle plus organisé que prévu. L'activité des gènes dépend de leur position et de leurs déplacements dans le noyau : silencieux en périphérie, ils sont actifs au centre.

Il y a dix ans, la publication de la séquence du génome humain a offert au monde un plan de construction de l'être humain. Cependant, de même que la liste des pièces détachées d'une automobile ne nous apprend pas comment fonctionne son moteur, la séquence complète du génome – une liste des « lettres » de l'ADN de tous les chromosomes de la cellule humaine – n'a pas révélé comment le génome commande les activités des cellules au jour le jour, ou permet à un œuf fécondé de se développer en un adulte opérationnel.

Pour mieux comprendre la façon dont le génome orchestre la vie, diverses équipes, dont la mienne, étudient la biologie cellulaire du génome : nous recherchons comment les chromosomes et les gènes qu'ils contiennent sont organisés dans le noyau et comment cette disposition influence leurs activités.

À l'aide des techniques récentes d'imagerie 3D, qui permettent de visualiser le comportement des molécules (gènes, protéines,...) dans une cellule vivante, nous avons découvert un écosystème en effervescence : dans le noyau, les chromosomes interagissent avec leurs voisins, les gènes qu'ils portent se déplacent et les molécules qui régulent l'activité des gènes se rassemblent en centres animés d'une intense activité. Ce sont ces observations que nous présentons ici. Nous verrons qu'elles apportent des précisions sur la façon dont le génome garantit la bonne santé de l'homme, mais aussi sur l'apparition de diverses maladies – notamment des cancers – quand il est endommagé, ouvrant ainsi la voie à de nouvelles méthodes de diagnostic.

Ces récents progrès sont le fruit de découvertes faites dans les années 1980. À cette époque, les biologistes savaient

L'ESSENTIEL

- ✓ Dans le noyau, les chromosomes ne sont pas entremêlés aléatoirement. Chacun occupe un espace qui lui est propre.
- ✓ Selon leur position au sein du noyau, l'activité des gènes varie.
- ✓ L'organisation des chromosomes peut être modifiée lors de la différenciation cellulaire ou en cas de maladie.
- ✓ En cartographiant la position des chromosomes dans différents types cellulaires – sains ou non –, les biologistes espèrent mieux comprendre le fonctionnement des cellules et diagnostiquer plus tôt certaines maladies.



que les chromosomes se condensent pendant la division cellulaire, adoptant une structure en forme de sablier. Ils savaient aussi que les chromosomes présentent une forme plus lâche quand les cellules ne sont pas en période de division. Cela empêchait de les distinguer les uns des autres, même avec les microscopes les plus performants, et l'on pensait que dans les cellules qui n'étaient pas en cours de division, les chromosomes s'entremêlaient comme des spaghettis dans un plat.

Des spaghettis ou des pelotes ?

Cette vision prévalait malgré certains éléments indiquant le contraire. Au début des années 1900, un biologiste allemand, Theodor Boveri, avait émis des objections concernant ce modèle d'organisation chromosomique. Se fondant sur des études qu'il avait menées chez une espèce de ver nématode qui parasite les chevaux, il soutenait que, bien qu'un chromosome puisse changer de taille et de forme durant la vie d'une cellule, chaque chromosome occupe une région distincte, bien définie, du noyau, les « territoires chromosomiques ». Mais les chromosomes étaient difficiles à observer – et les nématodes de Boveri, peu étudiés, ne constituaient pas un modèle expérimental classique –, si bien que son concept de territoires chromosomiques a longtemps été mis à l'écart.

Des preuves expérimentales de leur existence ne sont apparues qu'au début des années 1980, lorsque deux autres Allemands, Thomas et Christoph Cremer, ont développé une méthode de marquage et de visualisation du matériel génétique dans une petite région du noyau : avec un faisceau laser ultraviolet, ils ont irradié une zone étroite du noyau, puis marqué les fragments d'ADN irradiés avec des anticorps qui présentaient une forte affinité pour l'ADN irradié. Ils ont ainsi observé que, lorsque le faisceau laser frappe l'ADN dans une région donnée du noyau, seuls quelques chromosomes sont marqués. Beaucoup plus de chromosomes auraient été atteints si l'ADN avait été aussi entremêlé qu'on le pensait.

Quelques années plus tard, des chercheurs ont mis au point une méthode plus ciblée pour marquer et visualiser les chromosomes entiers en couleurs. Cette approche, appelée « peinture des chromosomes »,

DANS UNE CELLULE EN DIVISION

(en haut), les chromosomes sont dupliqués et compactés. À d'autres moments du cycle cellulaire, ils se présentent sous la forme d'un seul élément de structure plus lâche. Jusqu'à l'avènement récent des techniques de « peinture » des chromosomes, ils étaient difficiles à distinguer les uns des autres dans cet état relâché.

L'AUTEUR



Tom MISTELI est chercheur à l'Institut américain du cancer à Bethesda, dans le Maryland.

consiste à fixer des « étiquettes » fluorescentes sur des séquences de lettres du code génétique des chromosomes individuels. En associant à chaque chromosome un marqueur fluorescent spécifique, il est alors possible de localiser chaque chromosome dans le noyau. Ces études ont montré que les chromosomes sont des entités distinctes, chacun occupant dans le noyau un espace séparé de celui des autres chromosomes (voir l'encadré page ci-contre).

Cette découverte souleva de nombreuses questions, qui constituent désormais le domaine d'étude des biologistes cellulaires du génome. Les chromosomes sont-ils éparpillés de façon aléatoire dans tout le noyau ou y occupent-ils des « places assignées » ? Leur position influence-t-elle sur l'activité des gènes qu'ils comportent ?

LA PÉRIPHÉRIE DU NOYAU CONTRIBUE À MAINTENIR certains gènes silencieux. La région centrale du noyau, quant à elle, favoriserait l'activation rapide ou fréquente des gènes.

Aujourd'hui, nous savons que chaque chromosome a tendance à occuper une zone du noyau. Dans les globules blancs humains, par exemple, le chromosome 18 se serre en général contre la paroi externe du noyau, tandis que le chromosome 19 reste au centre ; le chromosome 7, quant à lui, occupe une zone intermédiaire. Dans cette organisation spatiale sectorisée, chaque chromosome a un ensemble de voisins, généralement les mêmes d'une cellule à l'autre pour un type cellulaire donné. Dans des globules blancs de souris, par exemple, nous avons observé que le chromosome 12 se regroupe souvent avec les chromosomes 14 et 15.

Ces positions ne sont cependant pas immuables : elles varient selon les types cellulaires, comme au cours du développement ou d'une maladie. De surcroît, la position d'un chromosome semble influencer sur l'activité de ses gènes. Par exemple, les cellules du cerveau nommées astrocytes présentent en général deux copies du gène *GFAP* – une active, qui code une protéine, et une silencieuse ; Takumi Takizawa a montré dans mon laboratoire que la copie silencieuse se situe en général à la périphérie du noyau, tandis que la version active occupe le centre du noyau.

De même, dans les globules blancs, les gènes qui codent les immunoglobulines, des anticorps de défense, sont silencieux

à la périphérie du noyau ; ils deviennent actifs lorsque l'organisme est envahi par des agents étrangers. Or quand les globules blancs sont mis en état d'alerte par des cellules étrangères, la région du chromosome portant le gène *IGH*, qui code un composant d'une immunoglobuline, se déplace vers le centre du noyau.

Actifs au centre, silencieux au bord

Ces diverses expériences suggèrent que les gènes situés à la périphérie du noyau sont souvent inactifs. Les bords du noyau présenteraient-ils une propriété favorisant l'état silencieux des gènes ? Un premier signe en faveur de cette hypothèse a été l'observation, faite dans les années 1930, que la périphérie du noyau est tapissée d'hétérochromatine – des régions condensées d'ADN chromosomique. Les chromosomes sont constitués de brins d'ADN organisés en double hélice ; enroulé sur des bobines composées de protéines – les histones –, l'ADN se replie sur lui-même pour former une fibre épaisse nommée chromatine. Les fibres de chromatine s'enroulent elles aussi pour former une structure de plus en plus condensée. L'hétérochromatine est une forme de chromatine à enroulement particulièrement serré – un arrangement qui empêche en général les protéines « lisant » les gènes d'y accéder (les gènes ne peuvent être décodés).

Cette première observation n'a pas révélé si la périphérie favorise l'inactivation des gènes ou si la chromatine compactée est attirée vers cette région pour d'autres raisons. Toutefois, une série d'expériences réalisées par plusieurs équipes en 2008 appuie la première hypothèse : les chercheurs ont observé qu'en attachant à la membrane nucléaire des gènes actifs habituellement localisés dans la région centrale du noyau, on réduit l'activité de ces gènes. La périphérie du noyau contribue donc à maintenir certains gènes silencieux.

La région centrale du noyau, quant à elle, pourrait favoriser l'activation rapide ou fréquente des gènes : elle contient des amas de protéines agglomérées, nommés usines de transcription. Ces « usines » sont des agrégats des composants cellulaires nécessaires pour activer les gènes, tels que les enzymes polymérases (qui transcrivent l'ADN en ARN, lequel est ensuite traduit en une protéine – celle qui est codée par le gène)

Glossaire

✓ Chromatine

Forme sous laquelle se présente l'ADN dans le noyau d'une cellule : enroulée autour de protéines, les histones, la double hélice d'ADN est repliée sur elle-même en une fibre épaisse et compacte.

✓ Hétérochromatine

Forme spéciale de chromatine, à enroulement particulièrement serré, située à la périphérie du noyau.

✓ Usines de transcription

Agrégats de protéines nécessaires à l'activation des gènes et à leur transcription en ARN, localisés dans la région centrale du noyau.

✓ Translocation

Échange de fragments de gènes entre deux chromosomes.

et les facteurs de transcription (des protéines qui se fixent aux régions régulatrices des gènes et déclenchent l'action des polymérase).

Peter Cook, de l'Université d'Oxford, a été le premier à proposer l'existence de ces usines en 1993, après avoir remarqué que le nombre de gènes actifs dans le noyau à un instant donné est bien plus élevé que le nombre de sites où les polymérase lisent les gènes : il avançait que les gènes se rassemblent dans des centres d'activité transcriptionnelle, au sein desquels ils partageraient les polymérase et les facteurs de transcription (*voir l'encadré page 80*). Cette idée n'est pas nouvelle : des centaines de gènes qui codent des ARN des ribosomes, un des maillons de la machinerie traduisant les gènes en

protéines, sont transcrits ensemble dans le nucléole, une sous-structure du noyau suffisamment grande pour être visible au microscope.

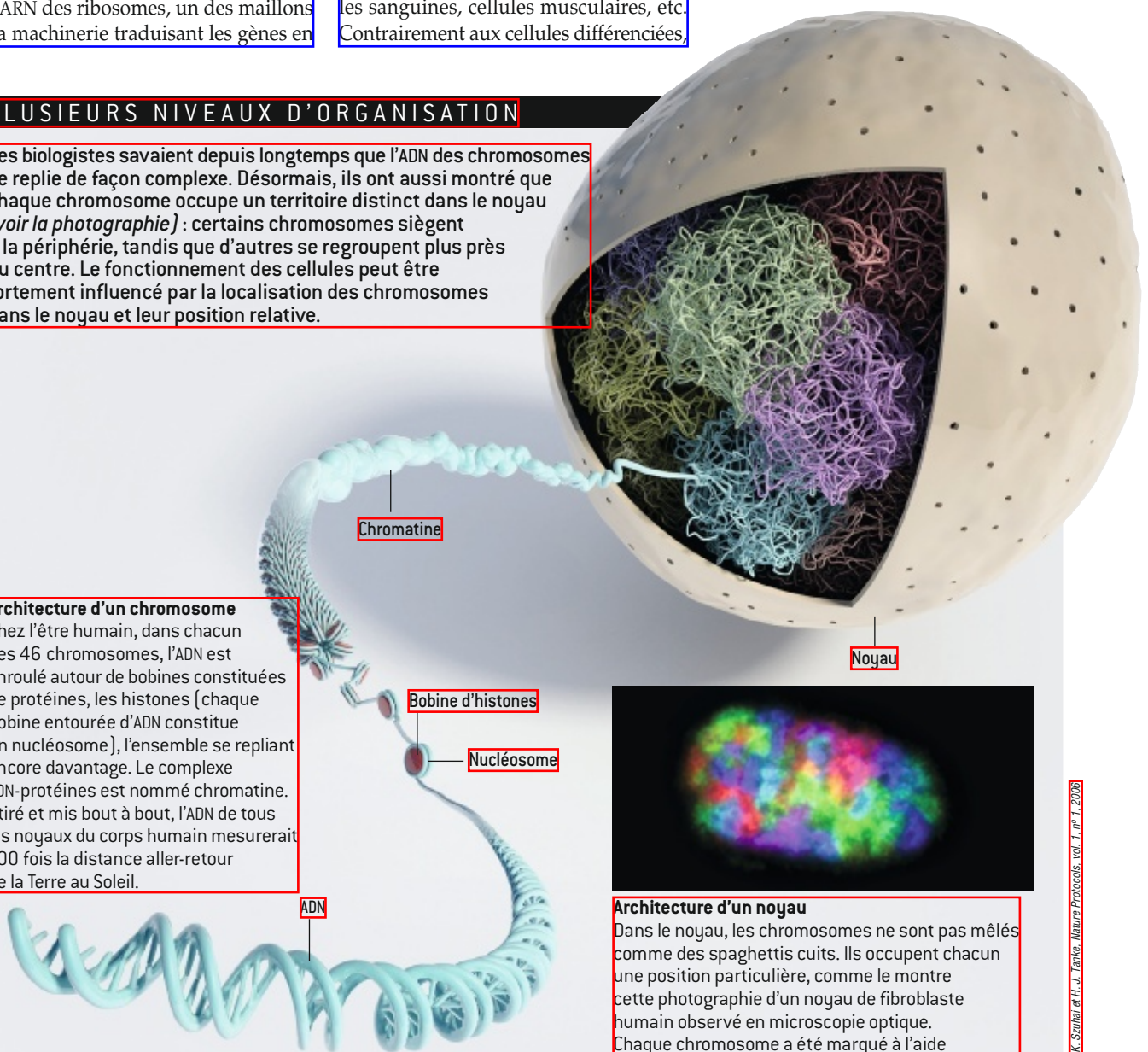
Si les biologistes cellulaires du génome ne connaissent pas encore toutes les règles qui gouvernent l'activité des gènes dans différentes parties du noyau, ils ont cependant montré l'importance, pour le développement embryonnaire et la santé, de la localisation des gènes dans le noyau. Un exemple en est fourni par les études des cellules souches embryonnaires. Ces cellules sont pluripotentes, c'est-à-dire qu'elles ont la capacité de se différencier en n'importe lequel des quelque 220 types cellulaires de l'organisme : neurones, cellules sanguines, cellules musculaires, etc. Contrairement aux cellules différenciées,

PLUSIEURS NIVEAUX D'ORGANISATION

Les biologistes savaient depuis longtemps que l'ADN des chromosomes se replie de façon complexe. Désormais, ils ont aussi montré que chaque chromosome occupe un territoire distinct dans le noyau (*voir la photographie*) : certains chromosomes siègent à la périphérie, tandis que d'autres se regroupent plus près du centre. Le fonctionnement des cellules peut être fortement influencé par la localisation des chromosomes dans le noyau et leur position relative.

Architecture d'un chromosome

Chez l'être humain, dans chacun des 46 chromosomes, l'ADN est enroulé autour de bobines constituées de protéines, les histones (chaque bobine entourée d'ADN constitue un nucléosome), l'ensemble se repliant encore davantage. Le complexe ADN-protéines est nommé chromatine. Étiré et mis bout à bout, l'ADN de tous les noyaux du corps humain mesurerait 100 fois la distance aller-retour de la Terre au Soleil.



Architecture d'un noyau

Dans le noyau, les chromosomes ne sont pas mêlés comme des spaghettis cuits. Ils occupent chacun une position particulière, comme le montre cette photographie d'un noyau de fibroblaste humain observé en microscopie optique. Chaque chromosome a été marqué à l'aide d'une molécule fluorescente spécifique.

Photo : K. Saitoh et H.-J. Tanke. *Nature Protocoles*, vol. 1, n° 1, 2006.

✓ BIBLIOGRAPHIE

I. Misteli et D. L. Spector (sous la direction de), *The Nucleus*, Cold Spring Harbor Laboratory Press, 2010.

E. Lieberman-Aiden *et al.*, Comprehensive mapping of long-range interactions reveals folding principles of the human genome, *Science*, vol. 326, pp. 289-293, 2009.

J.-J. Kupiec, L'ADN entre contrainte et hasard, *Pour la Science*, n° 385, pp. 88-95, 2009.

Ch. Lancôt *et al.*, Dynamic genome architecture in the nuclear space : regulation of gene expression in three dimensions, *Nature Reviews Genetics*, vol. 8, n° 2, pp. 104-115, 2007.

I. Misteli, Beyond the sequence : cellular organization of genome function, *Cell*, vol. 128, n° 4, pp. 787-800, 2007.

les cellules souches embryonnaires ne présentent pas de régions d'hétérochromatine. Elles sont aussi dépourvues de lamines, des protéines qui contribuent à fixer l'ADN inactif à la périphérie du noyau. Dans ces cellules, la plupart des gènes sont peu actifs.

Les choses changent quand les cellules souches embryonnaires reçoivent un signal pour se différencier, par exemple en cellules osseuses ou en neurones. L'architecture de leur noyau se modifie alors considérablement : des lamines apparaissent et se rassemblent pour former sous la membrane du noyau un réseau à mailage serré, la lamina nucléaire. La lamina serait une sorte de support qui maintiendrait la forme du noyau et protégerait les chromosomes de la pression mécanique externe. Mais elle semble aussi intervenir dans la régulation normale des gènes : les portions de chromosomes portant moins de gènes actifs contiennent une protéine de structure particulière qui com-

prime ces régions en hétérochromatine et les lie aux lamines présentes à la périphérie du noyau. Cette séquestration maintient les régions riches en gènes actifs au centre du noyau, près des usines de transcription, où les gènes sont traduits en protéines. Ainsi, l'apparition de lamines au cours du développement embryonnaire permet aux cellules d'inactiver les gènes dont l'activité n'est plus nécessaire, en les repoussant à la périphérie.

La délocalisation des gènes : une cause de maladie ?

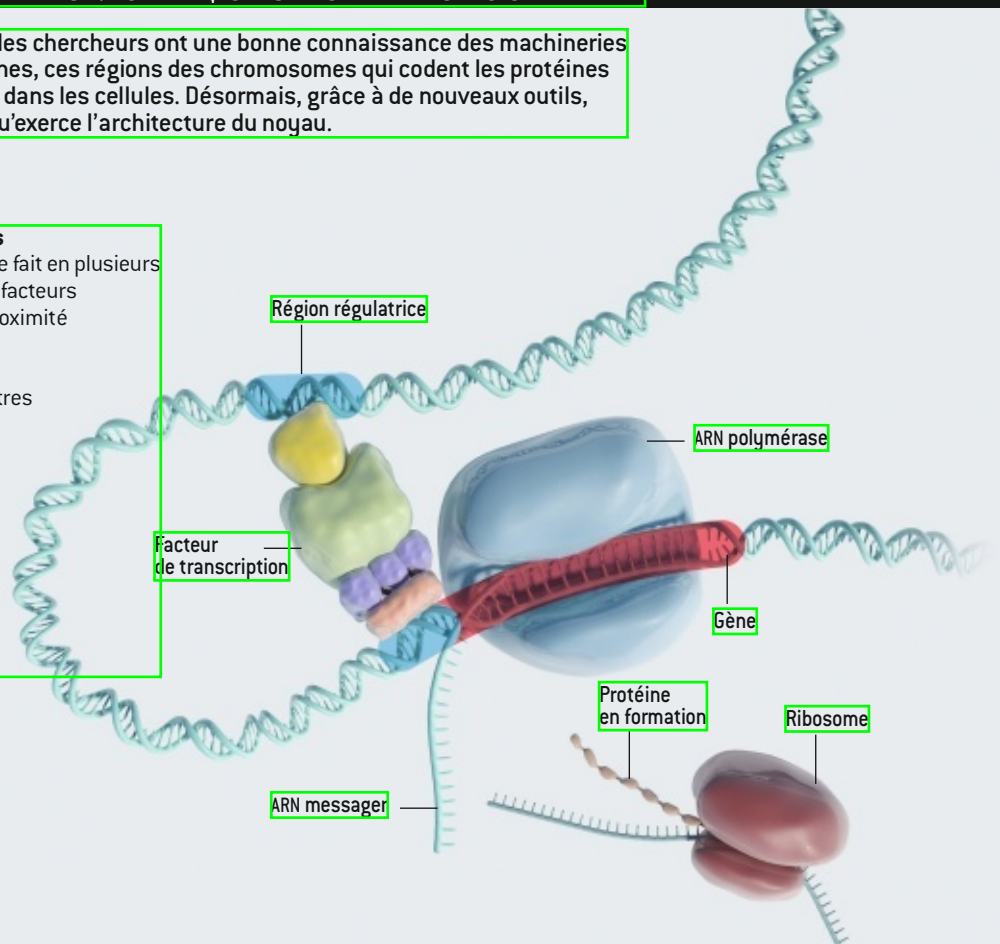
Cette idée est confortée par la diversité des maladies dues à des lamines anormales, les laminopathies. Des mutations dans les lamines entraînent différents troubles chez l'homme, allant de certaines dystrophies musculaires à des troubles neurologiques et au vieillissement prématuré.

L'ACTIVATION DES GÈNES : UNE QUESTION DE GÉOGRAPHIE

Depuis de nombreuses années, les chercheurs ont une bonne connaissance des machineries moléculaires qui activent les gènes, ces régions des chromosomes qui codent les protéines et les molécules d'ARN produites dans les cellules. Désormais, grâce à de nouveaux outils, ils ont aussi accès au contrôle qu'exerce l'architecture du noyau.

Les bases de l'activation des gènes

L'activation ou la lecture d'un gène se fait en plusieurs étapes. Dans un premier temps, des facteurs de transcription se rassemblent à proximité des régions régulatrices du gène. Elles y autorisent alors les enzymes ARN polymérases à transcrire les lettres du code génétique de l'ADN, ou nucléotides, en une molécule d'ARN. Dans le cas de gènes codant des protéines, ces molécules d'ARN, nommées ARN messagers, migrent vers le cytoplasme, où des complexes de protéines et d'ARN, les ribosomes, les traduisent en protéines.



En général, toute mutation sur un même gène conduit à une même maladie; mais dans le cas des lamines, les mutations aboutissent à un vaste spectre de maladies. Comment les lamines défectueuses provoquent-elles autant de troubles distincts? La question n'est pas tranchée. Selon l'une des hypothèses envisagées, les mutations affaibliraient la lamina, la rendant incapable de protéger le noyau des forces mécaniques, ce qui entraînerait une dégradation d'une grande partie du génome dans les cellules vulnérables, voire aboutirait à la mort cellulaire. Selon une autre idée, les lamines défectueuses, incapables d'organiser le génome, placeraient les gènes aux mauvais endroits et perturberaient ainsi leur fonctionnement.

Cette deuxième hypothèse est étayée par des études visant à cartographier la position des chromosomes dans des cellules de patients présentant des troubles liés à des lamines défectueuses: dans l'une de ces études, notamment, où les cellules présen-

tent une mutation des lamines associée à une maladie, les chromosomes 13 et 18 sont délocalisés de la périphérie vers la région centrale du noyau. Toutefois, l'interprétation de ces travaux reste sujette à caution: la relocalisation des chromosomes peut tout aussi bien être une conséquence de la maladie qu'un facteur déclenchant...

Dans certains cancers, la position des chromosomes joue un rôle plus évident. Les cellules malignes contiennent souvent des chromosomes anormaux, qui ont échangé un fragment avec un autre chromosome (voir l'encadré page 83). Dans certains cas, cet échange, nommé translocation chromosomique, provoque un cancer – lorsque le réarrangement chromosomique crée un gène mutant qui favorise une prolifération cellulaire excessive; dans d'autres cas, il n'est pas pathogène.

Plusieurs équipes ont montré que l'identité des chromosomes entre lesquels se produit une translocation favorisant le cancer dépend de leur localisation dans le

noyau: les chromosomes contigus ont tendance à échanger des fragments plus souvent que des chromosomes éloignés. Par exemple, de nombreux patients atteints du lymphome de Burkitt présentent une translocation entre le gène *MYC*, situé sur le chromosome 8, et le gène *IGH*, sur le chromosome 14; dans de rares cas, la translocation se produit entre le gène *MYC* et le gène *IGK*, sur le chromosome 2, et encore plus rarement avec le gène *IGL*, situé sur le chromosome 22. En 2003, dans mon laboratoire, Jeffrey Roix a découvert que ces fréquences de translocation correspondent à la distance moyenne, dans le noyau, entre le gène *MYC* et ses trois partenaires (*IGH*, *IGK* et *IGL*): les translocations les plus rares sont celles qui ont lieu entre les gènes les plus éloignés, ce qui suggère un lien entre la distance qui sépare les gènes et la probabilité de translocation. Depuis, on a trouvé un lien similaire dans plusieurs autres cancers.

Vers un diagnostic précoce ?

Nous avons également montré que lorsqu'un chromosome se rompt, les extrémités endommagées s'éloignent peu de l'endroit qu'elles occupaient lors de la cassure. Les chromosomes regroupés dans le même voisinage présentent ainsi une probabilité plus élevée d'échanger des fragments que des chromosomes éloignés. En outre, les chromosomes étant organisés différemment dans le noyau selon le type cellulaire, certaines translocations constituent des marques spécifiques de cancers qui surviennent dans un tissu et pas dans un autre: des chromosomes voisins dans des cellules rénales, mais éloignés dans d'autres types cellulaires, ont une probabilité supérieure d'être des partenaires de translocation dans les tumeurs rénales que dans des cancers d'autres tissus.

La connaissance de la disposition des chromosomes dans des cellules saines pourrait même constituer un moyen de détecter les cancers: des expériences préliminaires ont montré que la position des gènes dans une cellule peut aider à indiquer si elle est cancéreuse. Dans une étude pilote du cancer du sein, Karen Meaburn, de mon laboratoire, a identifié plusieurs gènes dont les positions différaient dans les cellules tumorales par rapport à celles du tissu mammaire sain.

Le rôle de la position des gènes au sein du noyau

Les gènes situés à la périphérie du noyau sont généralement silencieux, tandis que la région centrale favorise leur activation. Quand un gène occupant une zone silencieuse doit s'exprimer, on pense que la molécule d'ADN qui le porte se déforme en une boucle qui fait saillie vers le centre du noyau (au centre). Lorsque le gène rencontre une usine de transcription, une zone concentrant des facteurs de transcription et des polymérases, il est totalement activé. Parfois, les facteurs de transcription attachés à un gène sur un chromosome participent à l'activation d'un gène présent sur un chromosome voisin (non représenté).

Chromosome réprimé

Gène

Usine de transcription

Lamina

Noyau

Ces gènes se sont révélés être de bons marqueurs pour le cancer du sein : ils nous ont permis de prélever des échantillons de tissu cancéreux avec une grande précision. Dans les cellules malignes, certains gènes changent de position avant même que les cellules se comportent de façon anormale. Nous avons donc des raisons d'espérer que les analyses de la position des gènes constitueront un jour un outil moléculaire puissant pour aider les médecins à diagnostiquer le cancer à des stades précoces.

Pourquoi un gène ou un chromosome se positionne-t-il à tel endroit du noyau ? Comment « sait »-il où il doit aller et com-

ment y accède-t-il quand la cellule qui le contient se différencie ? Répondre à ces questions est tout l'enjeu de la biologie cellulaire du génome.

Plusieurs hypothèses sont envisagées. Selon l'une d'elles, les séquences chromosomiques seraient escortées jusqu'à leur destination par une machinerie cellulaire spécifique : une protéine de liaison à l'ADN, qui reconnaît la séquence d'un gène, se fixerait sur cette séquence, puis, avec l'aide d'une protéine agissant comme un moteur, tirerait cette partie du chromosome vers un site particulier dans le noyau. Personne n'a cependant identifié un tel système à ce jour. Il est également difficile d'imagi-

ner un mécanisme de signalisation capable de communiquer un ensemble de coordonnées géographiques à un segment d'ADN, pour lui commander de se diriger vers le centre du noyau ou de se rendre vers son usine de transcription.

Par conséquent, j'ai proposé que le positionnement dans le noyau relève de l'auto-organisation, un peu comme des élèves de collège forment des bandes de copains en fonction d'intérêts communs et non parce que leurs parents ou leurs professeurs leur ont demandé de se fréquenter. Dans cette hypothèse, la localisation des gènes et des chromosomes à l'intérieur du noyau découlerait de leur activité et ne serait pas déterminée par une quelconque machinerie externe organisatrice. Leur localisation agirait ensuite sur leur activité.

Lorsque la sélection s'en mêle

Les données décrites par Tom Misteli sont très importantes. En biologie moléculaire classique, ce qui se passe à l'échelle moléculaire détermine ce qui se passe à l'échelle de la cellule : l'expression de tel gène détermine telle caractéristique dans la cellule. Ces données montrent que c'est l'inverse qui semble se produire : la structure globale du noyau détermine l'expression des gènes. Cela est conforme à des résultats obtenus dans un domaine de recherche voisin : la spécificité des interactions des protéines est aujourd'hui expliquée par la compartimentation cellulaire et d'autres mécanismes qui présupposent l'existence d'une cellule organisée. Ainsi, la structure globale de la cellule détermine les interactions moléculaires.

T. Misteli explique ces phénomènes comme étant le fruit de l'auto-organisation de la cellule. En d'autres termes, il oppose à la vision réductionniste du déterminisme génétique une vision globale – holiste – à l'échelle de la cellule : la cellule est vue comme un tout qui ne peut être expliqué par ses divers éléments pris séparément. Pourtant, lorsqu'on pousse jusqu'au bout les résultats de T. Misteli, apparaît une autre interprétation qui permettrait de dépasser cette contradiction

entre réductionnisme et holisme, récurrente dans l'histoire de la biologie.

D'après lui, les événements moléculaires aléatoires doivent se conformer à la structure du noyau. Or ce noyau est lui-même un élément d'une cellule et, à ce titre, est soumis à la sélection naturelle : chaque cellule, fruit de l'histoire de l'organisme qui l'a produite, reçoit également des « signaux » de son micro-environnement, lesquels provoquent des modifications chimiques des molécules de la chromatine. Ces modifications, dites épigénétiques, changent les caractéristiques de leurs interactions, stabilisant l'expression probabiliste de certains gènes : elles opèrent une sélection naturelle à l'échelle de la cellule, tout comme l'environnement participe à la sélection naturelle des espèces.

In fine, c'est donc la sélection naturelle à l'échelle de la cellule qui, via les propriétés qu'elle confère au noyau, contraint les événements moléculaires aléatoires. Cette interprétation en termes de sélection naturelle rejoint le modèle du darwinisme cellulaire, que j'ai développé pour expliquer la dynamique de l'expression des gènes tout en tenant compte de l'influence exercée par l'environnement.

Dans ce modèle, comme dans celui de T. Misteli, l'expression des gènes est un phénomène aléatoire, mais soumis cette fois à deux types de contraintes : des contraintes liées à l'histoire évolutive de l'organisme, telles que les structures du génome et du noyau cellulaire acquises au fil des générations, et des contraintes liées au micro-environnement de chaque cellule, telles que les signaux reçus par la cellule, qui modifient la dynamique des interactions moléculaires dans la chromatine. De tels signaux pourraient notamment contraindre la chromatine à se structurer de façon à favoriser telle ou telle séquence d'expression génique.

Cependant, le modèle du darwinisme cellulaire, tout en englobant les données décrites par T. Misteli, permet de dépasser aussi bien le réductionnisme génétique que le holisme de l'auto-organisation. Dans ce cadre, il n'y a pas de niveau causal privilégié entre les molécules, les cellules et l'organisme entier. Le vivant y est conçu comme une interaction dynamique entre toutes les échelles d'organisation, dans laquelle le facteur temps (l'histoire) devient un paramètre essentiel.

Jean-Jacques Kupiec

Centre Cavallès, École normale supérieure, Paris

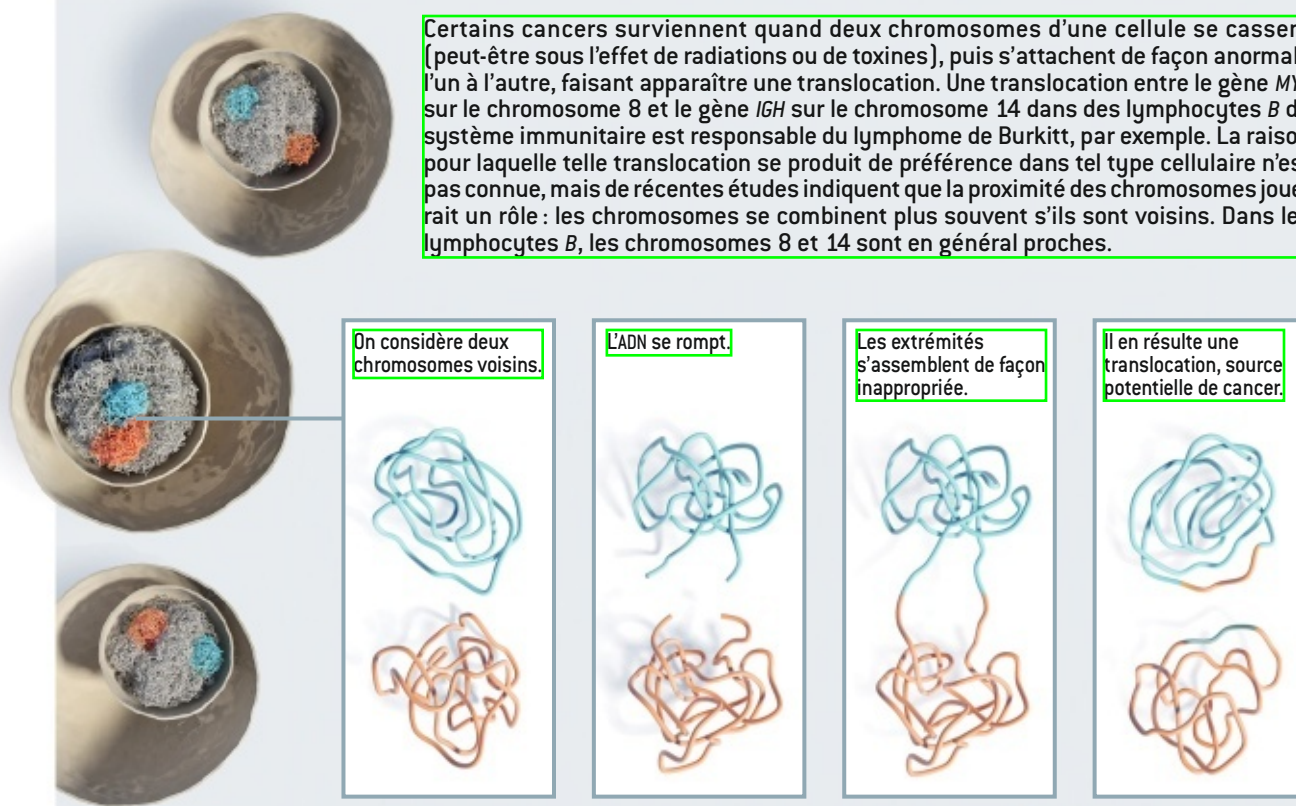
L'auto-organisation du noyau

Comment fonctionnerait une telle auto-organisation ? Considérons le noyau doué d'auto-organisation d'une cellule différenciée, dans laquelle un gène est activé en réponse à un signal, transmis par exemple par une hormone. Avant que le signal atteigne la cellule, le gène est inactif, probablement mis de côté dans une partie de chromatine condensée, peut-être même dans un bloc d'hétérochromatine à la périphérie du noyau. Quand le signal arrive dans le noyau, des complexes de remodelage de la chromatine déplient l'ADN condensé au voisinage du gène, rendant la région plus accessible à la machinerie transcriptionnelle. Le fragment de chromatine relâché forme alors une boucle qui dépasse de la chromatine – ou de l'hétérochromatine si le gène y était confiné. Au gré des mouvements dans le noyau, la boucle errante serait alors entraînée vers de nouvelles zones du noyau et, avec un peu de chance, y rencontrerait une usine transcriptionnelle.

Dans un tel système, le déplacement du gène de la périphérie vers le centre du noyau s'effectue sans l'aide d'une machinerie de transport : il n'est mû que par l'activité du gène lui-même. Ainsi, la position du gène y est auto-déterminée. Ce modèle a une conséquence étonnante : il suggère que bien que la position d'un gène dans le noyau ne soit pas aléatoire, le mode de déplacement qui l'y conduit l'est peut-être.

TRANSLOCATION ET CANCER

Certains cancers surviennent quand deux chromosomes d'une cellule se cassent (peut-être sous l'effet de radiations ou de toxines), puis s'attachent de façon anormale l'un à l'autre, faisant apparaître une translocation. Une translocation entre le gène *MYC* sur le chromosome 8 et le gène *IGH* sur le chromosome 14 dans des lymphocytes B du système immunitaire est responsable du lymphome de Burkitt, par exemple. La raison pour laquelle telle translocation se produit de préférence dans tel type cellulaire n'est pas connue, mais de récentes études indiquent que la proximité des chromosomes jouerait un rôle : les chromosomes se combinent plus souvent s'ils sont voisins. Dans les lymphocytes B, les chromosomes 8 et 14 sont en général proches.



Le modèle d'auto-organisation concorde avec de nombreuses expériences de traçage de gènes. Des boucles de gènes dépassent parfois des chromosomes et se déplacent dans le noyau. Quelques gènes sont même très mobiles : quand des globules blancs sont stimulés par des cytokines (des hormones), les gènes qui codent certaines protéines du système immunitaire (les molécules du complexe majeur d'histocompatibilité de type II) vagabondent loin du chromosome qui les porte, jusqu'à une distance qui atteint parfois le rayon du noyau.

Le même principe pourrait positionner les chromosomes entiers. Même si la plupart des gènes d'un même chromosome effectuent des déplacements infimes, chacun contribue à la détermination de l'endroit du noyau où le chromosome s'enroulera. Ainsi, dans un noyau doué d'auto-organisation, un chromosome contenant surtout des gènes inactifs serait attiré vers les régions les plus inhibitrices, à la périphérie du noyau, tandis qu'un chromosome portant surtout des gènes actifs se dirigerait vers le centre du noyau.

Pour tester cette prédiction, Mark Groudine et ses collègues du Centre de lutte

contre le cancer Fred Hutchinson, à Seattle, ont prélevé des précurseurs de cellules sanguines, puis ont déclenché leur maturation. Ils ont mesuré les activités de plusieurs milliers de gènes à différents stades de la maturation. Simultanément, ils ont surveillé la position des chromosomes portant ces gènes. Ils ont observé que les

Bien que la position d'un gène dans le noyau ne soit pas aléatoire, le mode de déplacement qui l'y conduit l'est peut-être.

chromosomes qui portaient le plus grand nombre de gènes dont l'activité variait au cours de la maturation des cellules étaient aussi ceux qui se déplaçaient le plus.

Ces expériences constituent un bon début, mais elles sont difficiles à réaliser, car il est fastidieux de surveiller simultanément la position de nombreuses régions du génome au microscope. Une nouvelle méthode, dite Hi-C, pourrait bientôt résoudre

ce problème. Développée par Job Dekker, de la Faculté de médecine de l'Université du Massachusetts, cette approche fournit un cliché instantané de l'architecture tridimensionnelle du génome en associant chimiquement toutes les régions chromosomiques qui se touchent dans le noyau. Cette méthode devrait permettre de localiser les chromosomes dans les noyaux de différents tissus au fil du temps et sous diverses conditions ; en comparant ces cartes avec les groupes de gènes actifs et inactifs, on obtiendra alors un aperçu sans précédent de la façon dont l'organisation du noyau influe sur son fonctionnement, et dont la perturbation de cette organisation contribue aux maladies.

Il a fallu près de dix ans d'efforts intenses pour obtenir la première ébauche de séquençage du génome humain. Aujourd'hui, cherchant à dépasser les informations fournies par les seules séquences, les biologistes cellulaires du génome commencent tout juste à entrevoir le comportement du génome dans son habitat naturel. Colossale et complexe, la tâche devrait les occuper bien plus longtemps que le décryptage du génome humain. ■

HISTOIRE DES SCIENCES

Le monde vivant selon al-Djâhiz

Au Moyen Âge, dans l'Empire arabo-islamique, de nombreux savants décrivent le monde vivant. L'un d'eux, al-Djâhiz, érudit de la cour de Bagdad, apporte un regard nouveau fondé sur l'observation et la raison.

Meyssa BEN SAAD et Mehrnaz KATOUZIAN-SAFADI

Nous avons appris que si les rapaces chasseurs demeurent dans leur territoire même 100 ans, leurs becs ne s'allongent pas. Quant au mâle des onagres [ânes] de Ana [ville de l'Euphrate], s'il se trouve dans un autre territoire que le sien, il voit ses sabots s'allonger, au point qu'il devient nécessaire de les tailler chez le vétérinaire.

Al-Djâhiz, *Livre des animaux*, vol. VII, ch. 2079, IX^e siècle

L'auteur de ces lignes est surtout connu pour son œuvre littéraire. Abu Uthmân al-Fukaymî al-Kinani al-Basri, dit Al-Djâhiz – « l'exorbité » – à cause de ses yeux protubérants, est né en 776 à Basra [Bassorah, en Irak], non loin de Bagdad, au cœur de l'Empire arabo-islamique. Dès 827, il a fréquenté la cour de Bagdad, où sa plume acerbe lui a attiré gloires et ennuis. Il excelle dans la satire sociale : dans *Le livre des avarés* (*Kitâb al-Nukhalâ*), par exemple, il dépeint, dans un arabe soigné et plein d'humour, toutes les couches sociales qui l'en-

tourrent – les riches, les pauvres, les voleurs, les savants – avec parfois suffisamment d'indications pour que ces personnes soient identifiables à son époque.

Al-Djâhiz est un *adib*, un « honnête homme » savant et érudit, maître du verbe, de la rhétorique et de la courtoisie, qui allie à son talent des valeurs morales, éthiques et intellectuelles. Il s'est intéressé à tous les sujets abordés à son époque d'effervescence intellectuelle et d'épanouissement culturel : débats religieux et politiques, réflexions sociologiques et philosophiques, discussions scientifiques... Aujourd'hui encore, ses écrits suscitent l'admiration des spécialistes de la langue et de la littérature arabes.

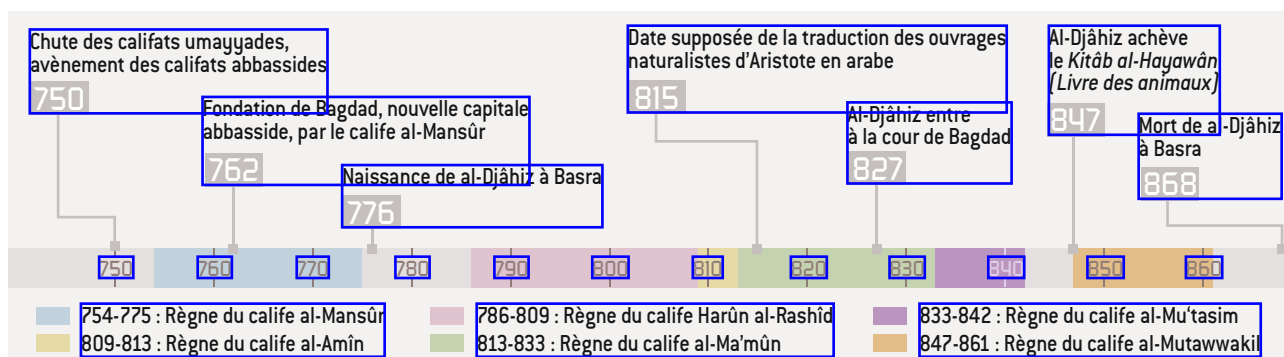
On connaît moins le naturaliste, auteur d'un monumental *Livre des animaux* (*Kitâb al-Hayawân*) qui compte sept volumes de 400 pages chacun. Souvent considérée comme empirique ou anecdotique, la zoologie d'al-Djâhiz est pourtant bien plus qu'une simple compilation de descriptions d'animaux tirées des écrits de ses prédécesseurs. Elle s'impose comme un travail de

recherche pertinent et original fondé sur l'observation. À la lumière de la raison, le savant n'hésite pas à mettre en doute, voire à réfuter, les croyances et les sources anciennes, même si celles-ci proviennent d'un certain Aristote...

Observer et raisonner

Al-Djâhiz a vécu à l'ère abbasside. À cette époque, l'Empire culturel arabo-islamique s'étend de l'Inde à l'Andalousie et, à l'image du calife Al Ma'mûn, divers corps sociaux mènent une vaste entreprise de traduction en arabe des grands auteurs grecs tels Aristote et Galien. Le corpus naturaliste d'Aristote, notamment, a été traduit vers 815. Comme nombre de ses contemporains savants, al-Djâhiz a lu ces traductions qui ont alimenté les recherches en zoologie et en médecine. Ce ne sont cependant pas ses seules sources.

Le monde vivant et ses mystères l'ont toujours intéressé et, très tôt, il a voulu comprendre les phénomènes biologiques et la



place du monde vivant dans la nature ; il a été initié à la zoologie par les travaux de ses maîtres les grammairiens al-Asma'i et Abu 'Ubayda, entre autres, et le théologien al-Nazzâm, qui ont laissé quelques traités sur les animaux (sur les camélins, les ovidés ou les équidés), et les discussions qu'il a eues avec eux. Il doit aussi beaucoup aux discussions avec les médecins de la cour, des poètes nomades et des éleveurs. Vivant plus de 1 000 ans après Aristote, al-Djâhiz considère le « maître de la logique » comme une référence majeure, respectable, mais pas forcément indiscutable. Aussi collecte-t-il d'autres informations, qui lui parviennent d'horizons variés : les Persans, les Indiens, les habitants de la péninsule Arabique. Ces derniers vivent au contact des plantes et des bêtes et il estime que, dans certains cas, leurs affirmations sont plus fiables que celles d'Aristote. Sa classification des araignées, par exemple, est différente de celle d'Aristote. Ou encore, lorsqu'Aristote affirme que les serpents ne supportent pas l'odeur de la rue, une plante médicinale, al-Djâhiz le vérifie lui-même en posant des rameaux de cette plante sur des vipères, et n'observe aucune réaction.

Classer les animaux

Si al-Djâhiz ne prend pas pour argent comptant les écrits d'Aristote, il utilise les mêmes armes que lui pour étudier le monde animal : l'observation et le raisonnement logique. La raison est déjà son guide depuis longtemps dans un autre domaine : la théologie. Dans la société des savants de son époque, al-Djâhiz est un théologien *mutakallim* appartenant à un courant spécifique dit *mu'tazilite*, courant spéculatif rationnel qui privilégie l'usage de la raison et insiste sur la notion du libre arbitre. C'est son maître al-Nazzâm qui l'a initié à cette philosophie, laquelle a donné lieu à de nombreuses discussions sur la vie, le vivant, la notion d'âme, les quatre éléments et nombre de questions religieuses, notamment sur le libre arbitre, la toute-puissance divine, l'unicité de Dieu, etc.

Dans le *Livre des animaux*, al-Djâhiz, en amateur et admirateur de la nature, dépeint la beauté et la diversité de ce qui l'entoure et, à travers elles, celui qui les a créées. Mais



1. UNE PAGE DU LIVRE DES ANIMAUX (*Kitâb al-Hayawân*) d'al-Djâhiz représentant une autruche couvant ses œufs, sur un manuscrit du XIV^e siècle provenant probablement de Syrie. L'autruche a un statut particulier dans la classification d'al-Djâhiz : comme elle ne vole pas, il ne la classe pas parmi les oiseaux, malgré la présence d'ailes, de plumes et d'œufs.

il insiste sur l'importance de l'observation et du raisonnement logique. Il analyse, tient à vérifier lui-même par l'expérience, confronte toutes ses sources et les discute, toujours avec doute et scepticisme, posant les bases d'une méthodologie bibliographique.

Par exemple, al-Djâhiz a observé longuement les fourmis avant de décrire leur vie sociale et leur mode de communication. Il a aussi réalisé lui-même certaines expériences : il a cassé des œufs de serpents pour regarder ce qu'il y avait à l'intérieur, mis des scorpions et des souris dans un récipient en verre pour y étudier leurs confrontations interspécifiques. Il a en outre observé que dans la morsure d'une vipère – un animal très présent dans cette région –, le danger provient non pas de la morsure elle-même, mais de l'injection de venin consécutive, et que le temps après l'empoisonnement compte beaucoup.

Une des grandes préoccupations d'al-Djâhiz a été le classement des insectes, des reptiles, des ruminants (les bovins, les ovins, les camélidés) et des oiseaux d'après les observations. Les poissons et autres ani-

maux marins sont peu représentés dans son ouvrage : comme il ne pouvait pas les observer lui-même, il a recueilli des informations et des témoignages auprès des marins, mais considérait ces sources insuffisantes et pas toujours fiables.

Pour al-Djâhiz, les animaux sont divisés en quatre grandes classes, selon un premier critère issu de l'observation : le mouvement. Ainsi, il distingue les animaux qui marchent, ceux qui volent, ceux qui rampent et, enfin, ceux qui nagent. Puis, au sein de ces grands groupes, il procède à des distinctions selon le mode d'alimentation (carnivores, herbivores ou mixtes) ; selon les critères anatomiques (taille, présence ou absence de certains organes), et selon les critères éco-éthologiques (habitat et comportement).

Les animaux qui rampent sont les serpents et les vers. Ceux qui marchent comptent les carnivores, les herbivores, les hommes et les petits animaux rampants. Ces derniers sont les petits reptiles rampants (lézards et apparentés, gecko, varan, agame, caméléon...), les insectes rampants

LES AUTEURS



Meyssa BEN SAAD, membre associée de l'équipe SPHERE/CHSPAM du CNRS et de l'Université Paris 7, a soutenu en 2010 une thèse d'histoire des sciences sur les sciences de la vie chez al-Djâhiz. Mehrnaz KATOUZIAN-SAFADI est chargée de recherche au CNRS-UMR 7219, au sein du même laboratoire.

À ÉCOUTER

Jeudi 5 mai 2011, les auteurs évoqueront l'œuvre naturaliste d'al-Djâhiz dans la partie « Actualités » de l'émission **La marche des sciences**, sur *France Culture* de 14h à 15h. <http://www.franceculture.com>

(fourmis, araignées, scarabées, etc.) et les petits mammifères rongeurs (musaraigne, rat, souris, taupe...).

Parmi les animaux qui volent, al-Djâhiz inclut les oiseaux et les insectes ailés. Les oiseaux se divisent en trois sous-classes : les carnassiers (eux-mêmes divisés en oiseaux de proie dotés d'organes de défense telles les serres, et les autres, dépourvus de tels organes), les herbivores (nous dirions granivores aujourd'hui, qu'il distingue selon leur taille) et les mixtes, qu'il nomme ainsi, car ils partagent certaines caractéristiques des deux autres groupes (régime alimentaire large ou euryphage, caractéristiques anatomiques et comportementales communes à l'un ou à l'autre, comme le mode de nutrition des petits ou la position du pouce).

Ce n'est pas encore de la taxinomie au sens moderne, mais la démarche de l'auteur est bien classificatoire. Il ne se contente pas de dresser un catalogue des animaux, mais manifeste une réelle volonté de distinguer les divers groupes, les différentes familles d'animaux, de regrouper ce qui se ressemble et séparer ce qui diffère. Pour cela, il a pris soin d'établir les caractères distinctifs de chaque « groupe » ou de chaque « famille ». Il s'est aussi interrogé sur les limites de ces subdivisions et sur la perti-

nence des caractères distinctifs : il a cherché à déterminer quels animaux pouvaient se reproduire entre eux et quels pouvaient être les résultats de ces croisements, tentant ainsi d'intégrer les animaux dans des limites que nous désignons aujourd'hui par « genres », « espèces » et « familles ».

L'influence de l'environnement

Pour classer les animaux, al-Djâhiz s'est aussi intéressé aux relations qu'ils entretiennent dans la chaîne alimentaire, à la compétition dans un même groupe ou entre deux groupes différents, et à leur habitat, voire à leur comportement (il a ainsi étudié l'apprentissage et le conditionnement chez les chiens). Enfin, il a étudié leur environnement, leurs conditions de vie, les conditions climatiques – en un mot, l'influence de l'environnement.

Plusieurs phénomènes observés dans la nature et discutés avec ses collègues et maîtres philosophes et théologiens sont ainsi expliqués par diverses causes : aux causes divines, al-Djâhiz ajoute des causes naturelles – environnementales et climatiques. Par exemple, la transformation de certains animaux par châtement divin peut, dans certains cas, être due à des conditions climatiques ou environnementales. Notamment, le naturaliste montre que des animaux s'adaptent aux changements de territoire et de climat en modifiant leurs caractères anatomiques ou comportementaux. C'est le cas de l'âne de la région d'Ana, dont les sabots s'allongent si on le change de territoire, par exemple, ou de certains oiseaux dont le cycle reproducteur est perturbé suite à des déplacements.

De même, selon les conditions climatiques, la maturation des pigeons dans l'œuf est altérée : à température et rayonnement solaire élevés, l'embryon présente une forte pigmentation et naît de couleur foncée, puis donne un pigeon noir. Dans le cas contraire, il est blanc et, dans des conditions climatiques tempérées, il naît de couleur verte : « Si le pigeon devient complètement blanc [...], celui-ci n'a pas atteint le degré optimal de maturation dans "l'utérus" [de la mère], si celle-ci a lieu dans un pays à rayonnement solaire faible. Si le pigeon devient noir,

La place des « animaux merveilleux »

Les « animaux merveilleux extraordinaires » n'échappent pas à l'étude méthodique d'al-Djâhiz. Pour lui, l'ordre du monde, l'organisation des animaux, leurs relations entre eux et avec leur environnement, leurs propriétés, sont merveilleux en soi. Le « merveilleux ordinaire » rassemble ainsi toutes les qualités des animaux qui suscitent l'étonnement. Par exemple, al-Djâhiz évoque les aspects merveilleux des serpents, dont la force et la façon d'attaquer les proies, mais aussi les yeux, les dents, la ruse et l'intelligence le fascinent. De même, l'organisation des abeilles ou des four-

mis, leurs prouesses techniques que l'homme ne peut réaliser qu'à partir d'outils, relèvent du merveilleux.

Les « animaux merveilleux extraordinaires », en revanche, sont ceux qui peuplent les fables et les légendes. Fidèle à sa méthode, al-Djâhiz n'accepte ou ne rejette l'existence de ces créatures qu'après examen, vérification par l'expérience ou tout simplement en utilisant la raison. Il n'affirme rien avec certitude s'il n'a pas les éléments nécessaires et suffisants pour le prouver. Si sa curiosité et sa volonté d'être le témoin des croyances de son temps l'in-

citent à relever et exposer certains faits et dires au lecteur, rien ne laisse croire qu'il soutient ces faits. Par exemple, lorsqu'il évoque la transformation de la truffe en vipère – un phénomène contraire à la raison, sans aucun fondement –, il conclut par un « Mon Dieu, pardonnez-moi de rapporter de telles sornettes ». De même, s'il rapporte les légendes des anciens sur l'hydre ou le dragon dans un but didactique, il n'affirme pas leur existence, ne l'ayant pas lui-même observée et étant convaincu que ces histoires n'existent que pour alimenter les peurs des hommes.

c'est qu'il a en quelque sorte "brûlé" car il a dépassé le degré normal de maturation. »

Al-Djâhiz évoque aussi le cas d'animaux possédant des caractéristiques communes à deux classes différentes. Sur les anguilles, il émet deux hypothèses : soit ce sont des reptiles marins qui se seraient adaptés au milieu marin au point d'acquérir des caractéristiques de poissons, soit elles sont issues d'une hybridation entre un poisson et un serpent.

En d'autres termes, al-Djâhiz explique qu'il y aurait un déterminisme environnemental chez certains animaux (dont les êtres humains) et propose que des caractères soient acquis et transmis aux descendants. Doit-on y voir pour autant un précurseur du transformisme formulé par le naturaliste Jean-Baptiste de Lamarck à la fin du XVIII^e siècle, selon lequel les êtres vivants se transforment au fil des générations, en partie sous l'effet de leur environnement, ou de la théorie de l'évolution de Darwin ? N'allons pas jusque-là. Il ne s'agit pas d'avoir une lecture anachronique. Certes, le monde décrit par al-Djâhiz est dynamique : il n'y a pas de fixisme dans l'univers jahizien, mais ce n'est pas pour autant un raisonnement lamarckien ou darwinien, car les mécanismes exposés ne sont pas ceux du transformisme de Lamarck ou de l'évolutionnisme de Darwin.

Une œuvre reconnue, puis oubliée

Malgré un travail rigoureux, une œuvre considérable et de nombreux phénomènes biologiques observés, décrits et analysés, al-Djâhiz est peu connu des historiens modernes de la biologie. Dans la période médiévale, son œuvre a été lue, assimilée et commentée. Elle a même influencé nombre d'auteurs de l'époque et des siècles suivants, tels l'écrivain Abu Hayyân al-Tawhîdî (930-1023), qui a écrit un ouvrage contenant un chapitre zoologique, le naturaliste égyptien al-Damirî (1344-1405), auteur d'une compilation encyclopédique des animaux, ou le médecin et philologue arabe Abdellatif al-Baghdadi (1162-1231), qui a écrit un résumé du *Livre des animaux* et est réputé pour avoir étudié la faune de l'Égypte. On retrouve même des

traces des réflexions d'al-Djâhiz sur l'organisation du monde vivant chez le savant historien maghrébin du XIV^e siècle, Ibn Khaldun.

Pourtant, nous n'avons pour l'instant aucune trace de la transmission du texte d'al-Djâhiz au monde latin. Certes, à l'époque médiévale, plusieurs traités zoologiques arabes ou grecs traduits en arabe ont circulé en Europe ; par exemple, Frédéric II, qui a régné sur le Saint Empire romain germanique de 1220 à 1250, a écrit *De l'art de chasser au moyen des oiseaux* vraisemblablement à partir de traités de fauconnerie arabes, de textes d'Aristote et de ses expériences personnelles de chasseur ; le philosophe et théologien Albert Le Grand, quant à lui, a compilé Aristote et les commentaires arabes dans *De animalibus*, en 1270. Mais nous n'avons aucune information sur une quelconque transmission du *Kitâb al-Hayawân* au monde latin ou d'éventuels commentaires de l'ouvrage. Pourquoi cette absence de transmission ? Dans divers lieux de traduction en Europe, tels Salerne et Tolède, les traducteurs suivaient un programme répondant aux questions posées par leur société et leurs mécènes ; l'ouvrage, peut-être classé comme texte littéraire, a pu ne pas être sélectionné.

Historiens et chercheurs n'ont décelé la part de biologie dans l'œuvre d'al-Djâhiz que depuis quelques décennies. Plusieurs raisons expliquent cet « oubli ». D'une part, al-Djâhiz étant réputé pour ses talents de *adib* – homme de lettres –, il a été étudié par des spécialistes de la langue et de la littérature arabes, qui ont valorisé la beauté de sa langue, son esprit brillant et facétieux, ses satires sociales, mais ont délaissé l'œuvre biologique. D'autre part, l'énorme masse de l'ouvrage et son organisation particulière, qui évoque plus un journal ou un cahier de laboratoire qu'une œuvre achevée, découragent les chercheurs.

Enfin, à partir du XIX^e siècle, les œuvres littéraires d'al-Djâhiz ont mieux circulé que son corpus naturaliste. Le *Livre des Avars* a été traduit, mais le *Livre des animaux* n'est toujours pas traduit en intégralité dans une langue européenne, probablement à cause de sa densité et de la difficulté lexicologique dans la dénomination des espèces animales. C'est la tâche à laquelle s'attellent à présent les historiens des sciences.



2. PORTRAIT D'AL-DJÂHIZ sur un timbre poste du Qatar imaginé par le peintre Arturo Ortis (1971). Figure littéraire arabe, al-Djâhiz a traversé presque un siècle, durant lequel il a côtoyé de nombreux vizirs et califes. Il est mort à 92 ans, en 868 ; selon la légende, il a été enseveli sous ses livres après la chute de sa bibliothèque.

BIBLIOGRAPHIE

M. Ben Saad, *La connaissance du monde vivant chez le savant al-Djâhiz : les sciences de la vie et le regard d'al-Djâhiz dans les sciences arabes*, thèse, Université Paris 7, 2010.

M. Ben Saad et M. Katouzian-Safadi, *Les insectes dans la classification des animaux d'al-Djâhiz : entre mythe et raison*, Actes du colloque international Explora Conference « Insects and Texts : spinning webs of wonder », à paraître.

P. Pellegrin, *Aristote, Les génies de la science*, n° 25, 2005.

A. Aarab et al., *La méthodologie scientifique en matière zoologique de Jâhiz dans la rédaction de son œuvre Kitâb al-Hayawân*, *Anaquel Estudios arabes*, vol. 14, pp. 5-19, 2003.

A. Aarab, *Étude analytique et comparative de la zoologie médiévale, cas du Kitâb al-hayawân de Jâhiz [776-868]*, thèse d'État de la Faculté des sciences de Tétouan, 2001.

N. Bel-Hadj Mahmoud, *La psychologie des animaux chez les arabes, notamment à travers le Kitâb al-Hayawân de Djâhiz*, Klincksieck, 1977.

 LOGIQUE & CALCUL

Infini et impossible !

Placer une infinité d'impossibilités dans un seul dessin peut sembler un peu futile. Cela produit pourtant de troublantes images où l'œil est mis à rude épreuve.

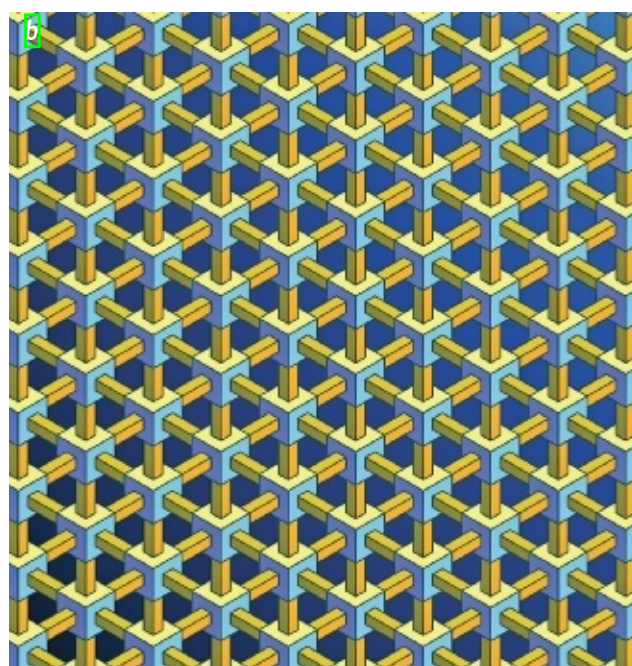
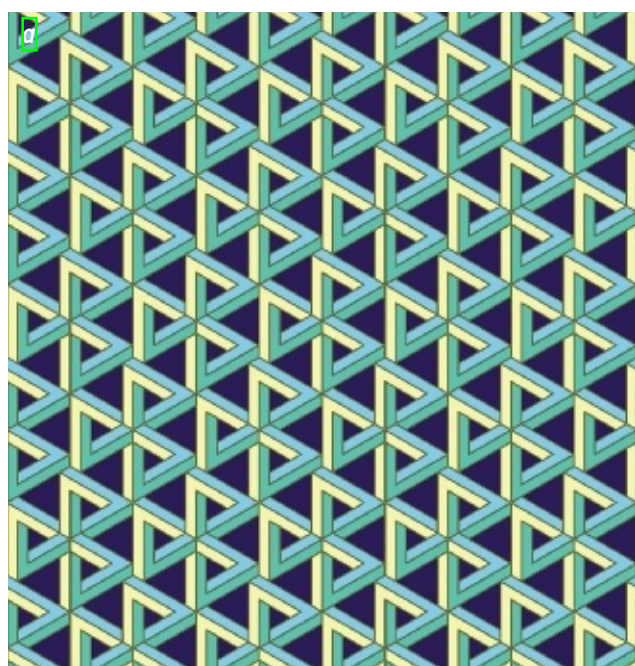
Jean-Paul DELAHAYE

Si l'infini n'existe pas dans le monde physique, ni l'infiniment grand ni l'infiniment petit, alors toute figure infinie est impossible. La représentation des deux rails d'une voie de chemin de fer qui se rejoignent à l'horizon, le flocon de von Koch au tracé découpé à toute échelle seraient des dessins approximatifs de structures mathématiques infinies absentes du monde réel : toute tentative de représentation graphique de l'infini serait illusoire.

Cependant, ni la physique ni la cosmologie n'ont tranché définitivement la question de l'existence réelle de l'infini ; cette question pourrait d'ailleurs être hors du champ de la science. Si l'on fait l'hypothèse que l'infini est une réalité physique, par exemple parce que l'espace n'est pas borné ni refermé sur lui-même (au contraire de la surface d'une sphère), alors le dessin de deux rails qui se rejoignent à l'infini est la représentation de quelque chose de possible.

Dans notre ignorance actuelle de ce qu'est la réalité matérielle ultime et de ce qu'il en est de l'infini physique, la représentation des structures mathématiques infinies n'est pas absurde. Du coup, on peut s'amuser à concevoir dans l'abstrait des objets qui, en plus de leur propriété d'être infinis, seront impossibles à cause de leur structure même.

C'est là un jeu un peu gratuit, un divertissement mathématique, mais récemment, plusieurs contributions ont agrémenté cet



art de l'infiniment impossible. C'est le sujet de cette rubrique.

Une première méthode pour créer ces figures « infiniment impossibles » consiste à partir d'une figure impossible finie, par exemple la tripoutre de Penrose (trois poutres non coplanaires et qui semblent cependant se rejoindre en formant un triangle impossible), et à en remplir l'espace de la feuille périodiquement en liant les composants pour conférer une unité apparente au dessin.

Une figure impossible répétée indéfiniment

Selon la représentation précise de la tripoutre utilisée, on obtient divers pavages infinis impossibles dont l'ingénieur et artiste anversois Jos Leys a réalisé de jolies versions (voir la figure 1).

Chacune de ces images est troublante, et cela, plus encore que l'image impossible qui sert de composante élémentaire à sa construction. Ainsi, en regardant la figure 1b, on a d'abord le sentiment d'être face à un réseau illimité tridimensionnel, analogue par exemple à un réseau de cubes évidés placés les uns contre les autres et

remplissant les trois dimensions de l'espace. Toutefois, cette première impression évolue en une autre, un peu désagréable cette fois, d'incohérence générale et grave de toute l'image. L'incohérence se manifeste dans chaque zone du pseudo-espace que l'image prétend représenter. Nous comprenons, à mesure que nous examinons le dessin, que celui-ci est partout fallacieux et infiniment contradictoire.

Une autre création infiniment impossible de J. Leys est un peu plus simple. Elle a été obtenue en appliquant une translation selon une seule direction à un schéma d'escalier paradoxal. Cet escalier a été conçu de façon que, mis bout à bout, deux exemplaires s'associent parfaitement. Le résultat est un escalier infini, qui, si on l'empruntait dans le sens de la descente, conduirait toujours plus haut (voir la figure 5) ! On trouvera une collection d'images de cette catégorie réalisées par J. Leys sur son site : http://www.josleys.com/show_gallery.php?galid=232

Depuis longtemps, on a noté que la tripoutre de Penrose ou l'escalier fou ne sont impossibles qu'à la condition que l'œil interprète les droites apparentes comme

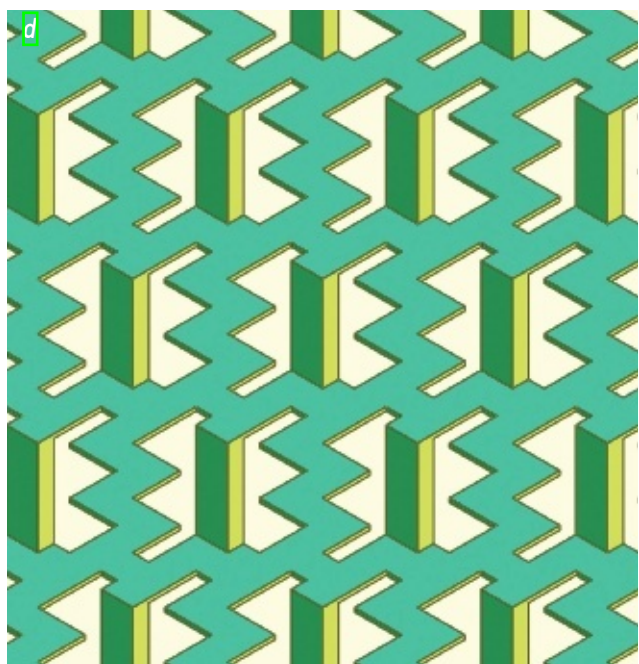
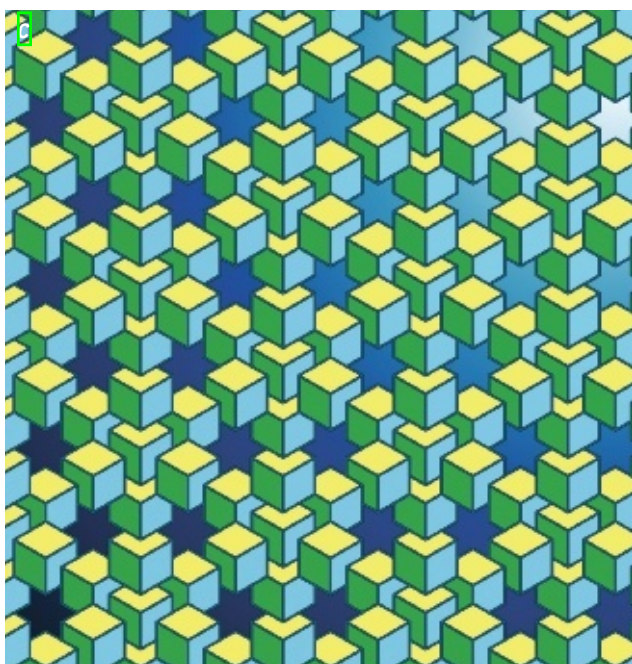
des droites réelles et les positionnements relatifs des composants de la façon la plus simple.

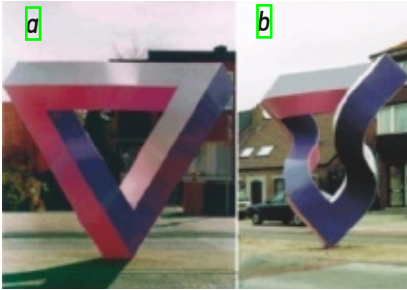
De nombreuses pages Internet proposent de remarquables dispositifs de tromperies visuelles réalisant l'impossible géométrique. Les constructions sont parfois fabriquées et parfois présentées sous la forme de modèles informatiques. Voir : <http://www.cs.technion.ac.il/~gershon/EscherForReal/>.

Mouvement perpétuel à la Escher

Il existe même de petits films dont le plus extraordinaire est la réalisation de la célèbre gravure de l'artiste néerlandais Maurits Escher *La chute d'eau*, dont la mise en fonctionnement produit un mouvement perpétuel que l'on serait tenté de croire réel – voir : <http://im-possible.info/english/anim/youtube-real-waterfall.html>

1. LES INFINIS IMPOSSIBLES DE JOS LEYS. Obtenus en pavant le plan par un motif impossible répété dans deux directions, ces dessins infinis impossibles créent l'étrange impression d'un espace tridimensionnel et pourtant sans véritable profondeur.





2. DESSINS PARADOXAUX DEVENUS RÉALITÉ. En se plaçant au bon endroit de cette place du village d'Ophoven près de Maastricht, on observe l'impossible tripoutre de Penrose (a). Pour comprendre l'illusion, il suffit de changer l'angle de vision en se déplaçant : on découvre que les segments du triangle impossible sont en réalité courbés (b). Une autre astuce a été mise en œuvre par des artistes australiens à Perth (c).

Deux artistes ont utilisé ces jeux géométriques avec l'absurde pour des sculptures monumentales qu'ils ont su vendre et installer sur des places publiques. L'une, due au Belge Matheau Haemakers, se trouve dans le village d'Ophoven en Belgique, non loin de Maastricht, et utilise la méthode de la torsion : les barres de la tripoutre de Penrose ne sont pas rectilignes, contrairement à ce que croit notre œil quand la perspective produit l'illusion.

L'autre réalisation monumentale de la tripoutre se trouve en Australie, dans la ville de Perth. C'est une œuvre créée en 1999 par Brian MacKay et Ahmad Abas, qui ont utilisé cette fois la méthode de la cassure : sous un certain angle, notre œil croit que sont liés des éléments de la construction qui ne le sont pas, et, de ce fait, observe l'image d'une sculpture qu'il juge impossible.

L'infini impossible est-il possible ?

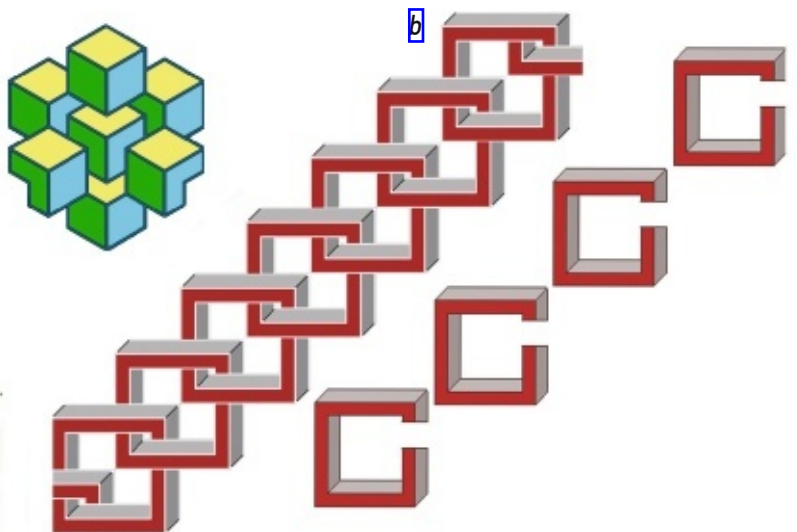
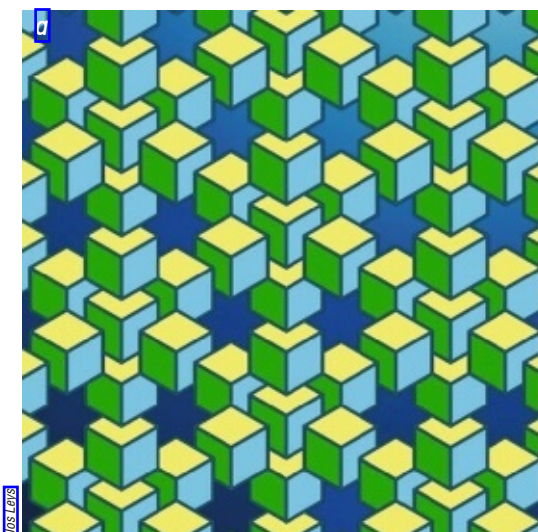
On peut se demander ce qu'il en est pour les schémas infinis proposés par J. Leys : pouvons-nous concevoir des objets tridimensionnels qui occuperaient tout l'espace « pour de vrai » et qui, vus d'un certain

point, produiraient l'image impossible infinie dessinée ?

Je ne connais pas la réponse pour chacun d'eux, mais pour certains, il est assez facile de concevoir des formes qui rendent possible l'infini géométrique paradoxal.

Prenons par exemple la figure 1c. Elle est composée de la répétition à l'infini de paquets de sept cubes : six cubes entourant un cube central. Ces sept cubes seuls n'ont rien d'impossible et ce n'est que le positionnement relatif des divers paquets de sept cubes qui produit l'apparente absurdité. Pour que cette juxtaposition des paquets devienne possible, il suffit juste d'imaginer que les deux cubes du Sud-Est et du Sud-Ouest de chaque paquet de sept cubes sont en fait des L, c'est-à-dire des cubes découpés comme indiqué sur la figure 3a.

Un autre exemple de figure impossible infinie rendue possible est obtenu en considérant une chaîne illimitée d'anneaux carrés disposés en ligne (voir la figure 3b). La réalisation dans l'espace de cette chaîne infinie paradoxale s'obtient par le découpage d'un segment de chaque anneau juste au bon endroit pour que la barre placée en arrière crée l'illusion de passer devant.



3. L'INFINI IMPOSSIBLE RENDU POSSIBLE. Pour un « œil qui réfléchit », la figure impossible infinie 1c (page 3) devient possible. En découpant deux cubes de chaque paquet de sept cubes comme le dessin l'indique (a), on obtient des structures qu'on peut réellement disposer en colonnes

infinies, ces colonnes infinies pouvant être mises côte à côte. On obtient alors un « papier peint » qui produit exactement l'image de Jos Leys (et qui rend fou !). Une autre figure infinie d'anneaux emboîtés est rendue possible par la technique classique du découpage (b).

Une animation de cette idée (cette fois en perspective conique et non plus en perspective cavalière) a été réalisée par Francesco De Comité, de l'Université de Lille, et se trouve sur la page : <http://www.flickr.com/photos/fdecomite/sets/72157626054113902/>.

Des fractales impossibles

Une figure peut être infinie parce qu'elle s'étend (potentiellement) sans limites du fait de sa structure répétitive, ou, en termes savants, du fait de son invariance par translation selon une ou deux directions. Cependant, à côté de cet infiniment grand auquel la géométrie nous a accoutumés depuis plus de deux millénaires, un autre infini géométrique a été mis en évidence, celui des fractales.

Le terme créé en 1974 par Benoît Mandelbrot (1924-2010) désigne de manière générale toute figure ou objet infiniment découpé ou fractionné. Ces constructions possèdent souvent une symétrie interne : on retrouve en elles-mêmes leur forme globale en plus petit, à la façon de poupées russes : en termes savants, elles présentent une invariance par homothétie.

Rappelons que leur première apparition s'est produite il y a maintenant plus d'un siècle, quand les mathématiciens cherchaient à élucider la structure fine du continu, c'est-à-dire de la droite géométrique. Cantor a découvert autour de 1870 ce que l'on dénomme aujourd'hui l'ensemble triadique de Cantor ou poussiti re de Cantor : partant d'un segment, on en retire le tiers médian, ce qui donne deux segments, dont on retire le tiers médian, ce qui en donne quatre segments, etc.

Les courbes de Peano (1890), puis le flocon de von Koch (1905) rendent visibles des singularités topologiques que l'on pensait impossibles : des courbes passant par chaque point d'un carré plein, des courbes sans tangentes, des courbes de longueur infinie délimitant une aire bornée, etc.

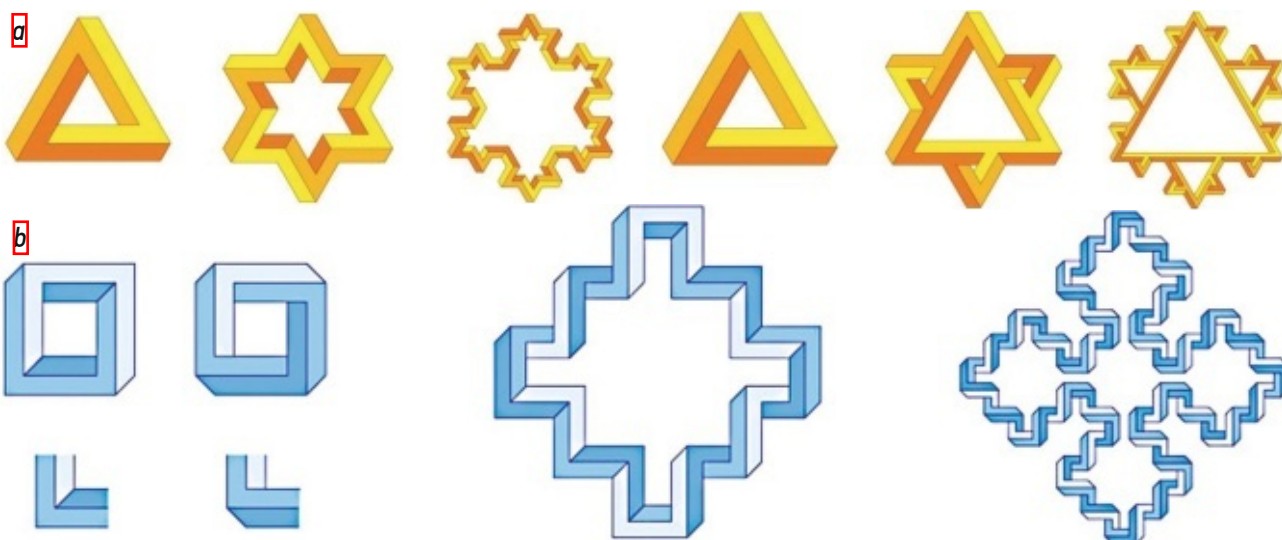
En géométrie classique, on assimile l'espace physique à l'ensemble des couples de nombres réels (pour le plan) ou à l'ensemble des triplets de nombres réels (pour l'espace). C'est bien commode et cette conception nous a permis de comprendre des notions comme la continuité, la vitesse, l'accélération, la connexité, etc.

Cependant, la mécanique quantique et l'impossibilité pratique de descendre

L'AUTEUR

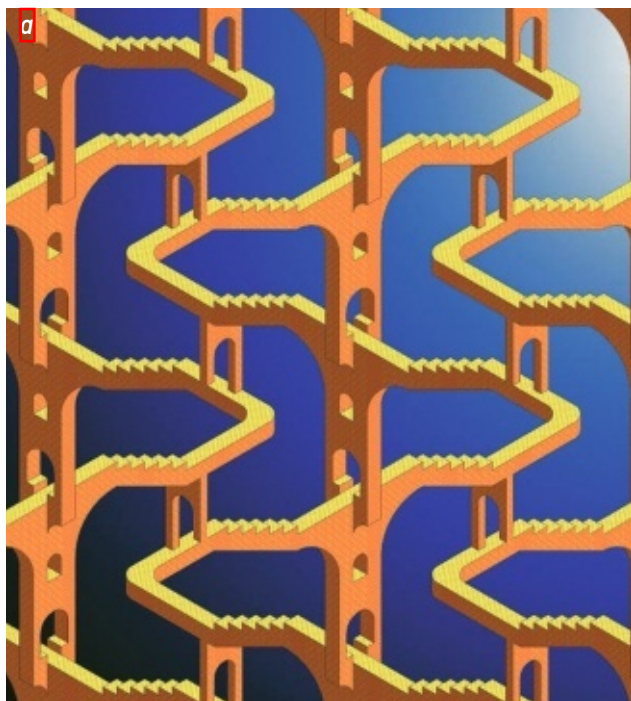


Jean-Paul DELAHAYE est professeur à l'Université de Lille et chercheur au Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille (LIFL).



4. LA LIMITE DE L'IMPOSSIBLE. En combinant un schéma de figure impossible avec l'algorithme de construction du flocon de von Koch, le spécialiste d'informatique graphique Cameron Browne a obtenu une suite infinie (a) de figures impossibles (du moins au premier abord) conver-

geant vers le flocon de von Koch. Or dans l'espace euclidien des mathématiciens, ce flocon est une figure possible, sans recourir à aucune astuce. Un second exemple de suite de figures impossibles dont la limite est possible est obtenu en partant d'un carré (b).



5. POUR MONTER, IL SUFFIT DE DESCENDRE. Ces impossibles infinis de Jos Leys sont construits en partant d'un motif d'escalier paradoxal à la Escher qui s'accrole à lui-même. On obtient ainsi un dessin périodique



d'escalier ascendant... qui descend. L'escalier infini aurait dû figurer sur les armoiries du surintendant Fouquet : *Quo non ascendet* ? Croyant monter dans l'estime de Louis XIV, Fouquet en est descendu.

très loin dans l'infiniment petit font douter de la validité de ce modèle de l'espace fondé sur les nombres réels : il se pourrait que les objets infiniment découpés de la géométrie fractale soient des illusions théoriques du seul fait de leur finesse sans limite. Nous ne prendrons pas en compte cette objection et nous admettrons que le modèle classique de l'espace est conforme à celui du monde physique réel et que les fractales sont physiquement possibles.

L'impossibilité disparaît à la limite

N'existe-t-il pas alors des objets infiniment impossibles de taille bornée ? L'infinie impossibilité de leur structure ne serait plus, comme dans le cas des images de J. Leys, due à leur étendue illimitée (dont la feuille de papier ne rend d'ailleurs qu'imparfaitement l'image), mais se trouverait dans la finesse sans limites de leur organisation paradoxale.

Cameron Browne, de l'*Imperial College* de Londres, a répondu positivement à la question en proposant plusieurs images réalisées à l'aide de programmes informatiques. Il combine dans les images produites le découpage infini des fractales et des objets invariants par homothétie avec l'impossibilité des figures du type triangle de Penrose.

La figure 4 montre les étapes de construction d'un flocon de von Koch, l'un à l'intérieur totalement vide, l'autre avec des barres de supports internes. Le schéma utilisé par C. Browne est tel que chaque étape de construction est une figure impossible. Les figures limites de ces séries seraient donc des figures fractales cumulant les impossibilités introduites étape par étape.

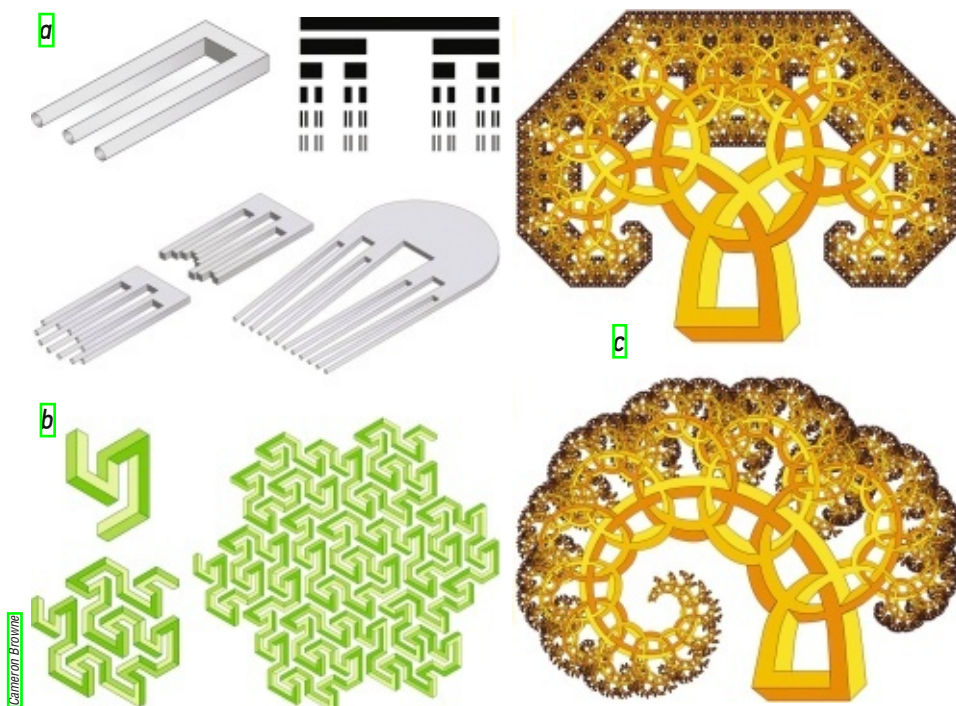
Phénomène amusant : la limite du dessin n'est rien d'autre que le flocon lui-même (ou sa variante avec des tracés internes) : nous avons donc une série d'images impossibles dont la limite est possible. Le cumul d'une infinité d'impossibilités fait dispa-

raître l'absurdité, qui est comme avalée par le passage à la limite !

L'une des figures impossibles les plus populaires est la fourche à deux et trois bouts, ou diapason absurde. C. Browne en a conçu plusieurs versions infinies en utilisant l'idée de la poussière de Cantor (voir la figure 6a).

Fourche impossible à la Cantor

Cette fois, l'impossibilité présente à chaque étape de la construction se retrouve dans la figure limite qui n'est pas dessinée, mais que nous imaginons sans mal. En effet, à mesure qu'on s'éloigne de la partie pleine (*en haut*), la section de l'objet représenté devient de plus en plus évidée : on en retire le tiers médian, puis on retire le tiers médian des deux parties restantes, etc. Pourtant, à l'extrémité basse de la pièce (*en bas*), celle-ci est pleine. Nous en tirons la leçon qu'en passant à la limite, l'impossibilité d'une figure fractale peut persister.



6. CAMERON BROWNE combine l'ensemble triadique de Cantor (*a*, en haut à droite) et le diapason impossible (*a*, en haut à gauche), puis utilise une courbe de Peano (*b*), pour obtenir des images impossibles (*c*). Les deux figures *c* sont impossibles à toute échelle.

Les figures 6b sont construites à partir de courbes de Peano : en associant un procédé classique pour créer des figures impossibles à l'idée des courbes de Peano, C. Browne produit des images impossibles dont à nouveau les limites sont possibles.

Pour les figures 6c, en revanche, l'impossibilité persiste dans la figure limite. Les deux figures sont cette fois de vraies fractales : elles possèdent des dimensions non entières. Comme le précise leur auteur C. Browne, ces dessins sont des exemples de figures impossibles à toute échelle. Contrairement à une tripoutre de Penrose dont chaque partie est possible (sans avoir à utiliser d'astuce), ici en s'approchant même de très près de la partie supérieure de ces formes, l'impossibilité géométrique persiste : elle est présente quel que soit le niveau de grossissement.

L'analyse des figures impossibles classiques montre toujours qu'en découpant la figure en un ensemble fini de zones, on obtient que chaque zone représente un

objet possible. Dans le cas des figures impossibles du type de celles proposées par J. Leys, il faut (si l'on ne trouve pas d'astuce comme celle de la figure 3) une infinité de zones. Chacune cependant a une aire supérieure à une constante valable pour tout le dessin. Pour les deux derniers dessins de C. Browne, un tel découpage en « zones possibles » doit se faire en une infinité de zones dont le diamètre tend vers 0 quand on s'approche de la frontière supérieure, qui a une dimension fractale supérieure à 1. C'est remarquable et cela conduit à une nouvelle question : peut-on faire pire et concevoir des images où l'accumulation des impossibilités se ferait sur une partie bidimensionnelle du plan ?

Nous invitons les lecteurs à nous envoyer d'autres constructions impossibles infinies. Nous publierons les plus intéressantes dans les prochaines rubriques. Une suggestion : l'éponge de Menger combinée avec le cube impossible donnerait certainement une belle structure paradoxale.

✓ SUR LE WEB

Impossible figures in the real world :
<http://im-possible.info/english/articles/real/index.html>

C. Browne, Impossible fractals, 2007 :
<http://eprints.qut.edu.au/15013/1/15013.pdf>

J. Leys, Impossible geometry :
http://www.josleys.com/show_gallery.php?galid=232

ART & SCIENCE

William Kentridge et la négation du temps

Un artiste et un scientifique s'associent pour se confronter à la synchronisation, à la simultanéité et à la disparition du temps dans un trou noir.

Leurs réflexions sont illustrées par divers moyens d'expression.

Loïc MANGIN

Le 9 juin 2012 débutera la XIII^e édition de la *documenta*, une importante exposition d'art qui se tient tous les cinq ans, à Cassel, en Allemagne, et dure 100 jours. En 2012, on commémorera également le centenaire de la mort du mathématicien français Henri Poincaré (1854-1912). Quel est le lien entre ces deux événements ? Le temps. En effet, à la *documenta* sera présentée une installation nommée *La Négation du temps*, fruit de la collaboration entre l'artiste sud-africain William Kentridge et le physicien américain Peter Galison, de l'Université Harvard, aux États-Unis. Le résultat des premières réflexions, le « prologue », est présenté au Laboratoire, un espace dédié aux rencontres entre art et sciences, à Paris.

Les protagonistes se sont intéressés à la notion de temps. Comment le définir ? Comment le matérialiser ? Comment s'en affranchir ? Que signifie l'idée de simultanéité ? Pour explorer ces questions, différents moyens d'expression ont été sollicités : machines, dessin, peinture, musique, films, danse, chant... L'objectif n'est pas tant une illustration physique des concepts en jeu qu'une exploration des liens qu'entretiennent ces diverses disciplines artistiques face à ces questions sur le temps. Par exemple, avec le cinéma, on peut inverser le temps, on peut superposer plusieurs plans (acteurs, ombres de machines, notes scientifiques...). Les recherches s'articulent autour de trois axes : le temps de Newton, le temps de Einstein et ce qu'il advient du temps aux abords d'un trou noir.

Le temps de Newton, qui a cours jusqu'à la fin du XIX^e siècle, est absolu. Dès lors, comment s'assurer qu'il est identique pour

tous ? Le Bureau des longitudes, fondé par l'abbé Grégoire en 1795, est chargé de ce problème. À cette époque, la simultanéité est notamment incarnée par un réseau d'horloges reliées par des tuyaux où circule de l'air comprimé : une horloge dite mère transmet, via des pulsations pneumatiques, le temps à des horloges filles. Prêtés par le musée des Arts et Métiers, à Paris, deux exemplaires sont visibles à l'exposition (voir la figure a). Poincaré, membre du Bureau des longitudes, étudia la simultanéité et utilisait pour ce faire le télégraphe électrique.

Ce système rendit obsolète le télégraphe optique, une autre méthode de transmis-

**Les trous noirs
détruisent-ils
irréremédiablement
tout ce qui y tombe ?**

sion d'informations, notamment sur le temps, également représentée. La méthode consiste en des dispositifs articulés (dont la position code le message à transmettre selon le principe du sémaphore), installés en hauteur. Le plus connu est le télégraphe de Chappe (voir la figure b), dont les tours éponymes étaient distantes d'environ 25 kilomètres. En 1794, un message fut transmis entre Paris et Lille en six heures. Son concurrent, le télégraphe Bétancourt-Breguet, est aussi présent grâce à une maquette.

Le deuxième axe de l'exposition correspond au temps relatif de Einstein : on dispose chacun de son propre temps, aucun n'est absolu. L'une des pistes suivies pour rendre

compte de ces résultats de la théorie de la relativité est celle de la musique. Ainsi, le compositeur sud-africain Philip Miller, qui s'inspire notamment de Berlioz, illustrera le paradoxe des jumeaux de Langevin, chacun vieillissant à un rythme différent selon sa vitesse : deux mélodies au départ confondues s'éloigneront peu à peu l'une de l'autre.

Les trous noirs, le troisième axe de l'exposition, constituent un site de conflit pour le temps. Il s'agit cette fois d'illustrer un débat qui agite la communauté des astrophysiciens : les trous noirs détruisent-ils irrémédiablement tout ce qui y tombe ? Selon certains – Stephen Hawking fut de ceux-là – c'est bien le cas : on ne peut récupérer aucune information d'un trou noir. D'autres, par exemple Leonard Susskind, à Stanford, pensent que l'information reste à l'horizon du trou noir, la frontière marquant le point de non-retour. En d'autres termes, le temps et l'espace ne seraient pas détruits. Les trous noirs sont évoqués par une procession de danseurs en ombre chinoise (voir la figure c) qui se dirige vers un tel corps dense, et par les cônes de dispositifs mécaniques (voir la figure d).

Le dialogue entre artistes et scientifiques se poursuit. L'instantané qui est ici proposé illustre sa fécondité. C'était déjà le cas à l'époque de Einstein : l'année où était publiée la théorie de la relativité correspond à celle de la naissance du cubisme qui, riche des travaux de Poincaré, se faisait fort de représenter la simultanéité !

La négation du temps - Prologue, au Laboratoire (4, rue Bouloi, 75001 Paris) jusqu'au 26 juin 2011.



© M. H. 2011

IDÉES DE PHYSIQUE

Des électrons en boîte pour donner des couleurs

On peut moduler la couleur de certaines substances en jouant sur la taille des structures qui confinent les électrons.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Les sensibilisateurs pour les sels d'argent que l'on utilisait dans les pellicules pour la photographie en couleurs appartiennent à la vaste famille de colorants de synthèse nommés cyanines. Qu'est-ce qui détermine la couleur de ces molécules organiques linéaires ? Leur simple longueur ! Comment cela se fait-il ? Comme on le verra, la réponse se trouve dans la physique quantique...

Si un objet nous apparaît coloré lorsqu'il est éclairé par de la lumière blanche, c'est qu'il absorbe une partie de cette lumière. La couleur résultante est alors la complémentaire de celle absorbée. Ainsi, les carottes sont orange parce que la molécule de carotène absorbe la lumière bleue, les feuilles vertes parce que la chlorophylle absorbe le rouge.

La couleur absorbée par ces molécules dépend de leurs niveaux d'énergie : l'absorption d'un grain de lumière, un photon, qui fait passer la molécule d'un état d'énergie à un autre, n'est possible que si la fréquence ν de la lumière (qui détermine sa couleur) est égale à la différence d'énergie ΔE entre les niveaux divisée par la constante de Planck (on a $h\nu = \Delta E$, où $h = 6,63 \times 10^{-34}$ joule-seconde).

En général, il n'est pas aisé de déterminer l'échelle des énergies moléculaires, qui fait intervenir le détail des structures atomiques et des liaisons chimiques. Le plus souvent, on ne sait donc pas prévoir sous quelles couleurs les molécules apparaîtront. Mais certaines ont une structure suffisamment simple pour que l'on puisse estimer les valeurs des niveaux d'énergie.

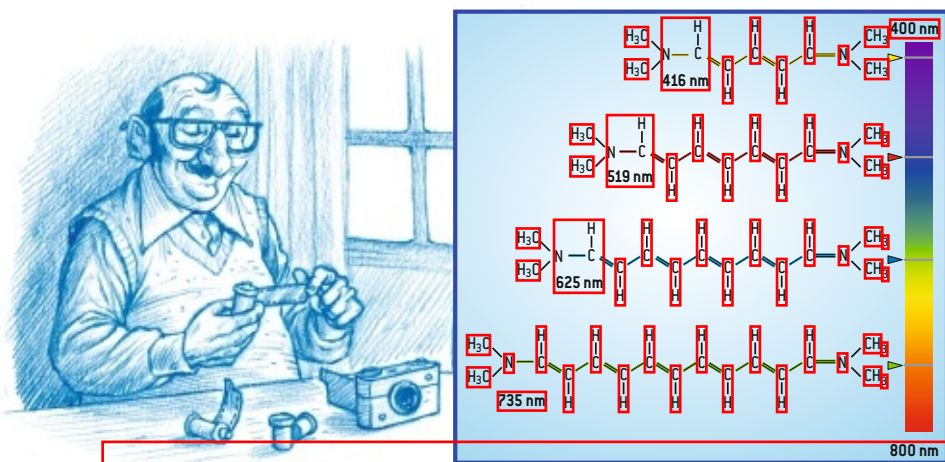
C'est le cas des cyanines, molécules organiques qui ont pour colonne vertébrale une chaîne linéaire d'atomes de carbone liés à des atomes d'hydrogène. Dans ces molécules, chaque électron qui participe à une liaison carbone-carbone n'est pas localisé entre les deux atomes de carbone, mais se répartit, en moyenne, tout le long de la chaîne.

Des ondes le long de la molécule

Autrement dit, la molécule se comporte vis-à-vis de ces électrons comme un segment de fil conducteur. La longueur d'une liaison carbone-carbone étant de l'ordre de 0,139 nanomètre dans ces molécules, une cyanine constituée de neuf atomes de carbone (soit dix liaisons, compte tenu des deux atomes d'azote terminaux) mesure 1,4 nanomètre de long.

Quelle est l'échelle des énergies de ces électrons qui sont délocalisés ? Elle dépend de la longueur L de la molécule et l'explication fait appel à la mécanique quantique. Depuis le début du XX^e siècle, on sait que tout corpuscule se comporte aussi comme une onde, dont la longueur d'onde est égale au quotient de la constante de Planck par la quantité de mouvement. On en déduit que l'énergie d'un électron, en l'occurrence son énergie cinétique, est inversement proportionnelle au carré de sa longueur d'onde.

Quelles sont les longueurs d'onde possibles dans un fil conducteur ? Pour répondre à la question, utilisons l'analogie avec une corde vibrante de longueur L , fixée à ses deux extrémités. Ces dernières devant être des nœuds de l'onde, les seuls



1. LES CYANINES sont des colorants organiques répandus. Par exemple, on les utilise dans les pellicules pour la photographie argentique en couleurs. La longueur d'une telle molécule détermine la longueur d'onde lumineuse qu'elle absorbe, c'est-à-dire la couleur absorbée (*bande grisée sur le spectre*). La couleur de la substance vue en lumière blanche sera donc complémentaire. Ainsi, celle qui absorbe dans le violet, à 416 nanomètres de longueur d'onde, apparaîtra jaune.

modes de vibration possibles correspondent à des longueurs d'onde égales à $2L/n$, où n est un entier.

Un fil quantique moléculaire

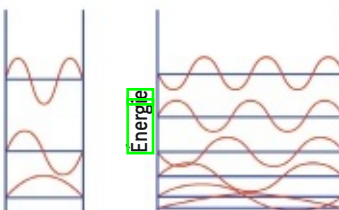
Ainsi, pour un fil conducteur, plus il est court, plus la longueur d'onde de l'électron est petite et plus son énergie est élevée : elle croît comme $1/L^2$. L'échelle est telle que le n -ième niveau électronique a une énergie proportionnelle à n^2 . Ainsi, dans la cyanine à neuf atomes de carbone, tous facteurs pris en compte, l'énergie du niveau électronique fondamental est de l'ordre de 0,195 électronvolt (soit $3,1 \times 10^{-20}$ joule), celle du deuxième niveau est égale à 0,78 électronvolt, celle du cinquième à 4,9 électronvolts, etc.

Une complication supplémentaire est due au principe d'exclusion de Pauli, qui interdit qu'un niveau soit occupé par plus de deux électrons. Il s'ensuit qu'avec N électrons, l'énergie la plus basse s'obtient quand les $N/2$ niveaux les plus bas sont remplis. Les niveaux supérieurs étant vides, l'absorption la moins exigeante en énergie correspond au saut d'un électron du niveau occupé le plus haut jusqu'au niveau libre le plus bas.

Pour la cyanine à neuf atomes de carbone et dix électrons mobiles, cela représente une transition du niveau $n = 5$ au niveau $n = 6$, séparés de 2,15 électronvolts, écart d'énergie qui correspond à une longueur d'onde de 575 nanomètres. Cette molécule absorbe ainsi dans le rouge, d'où une coloration bleue. Avec 11 atomes de carbone, l'absorption a lieu vers 700 nanomètres de longueur d'onde, dans le rouge profond, et la couleur est alors verte.

Jusqu'à il y a une dizaine d'années, seule la chimie nous donnait de tels exemples d'une couleur modulée par une dimension. Mais grâce à l'essor des nanotechnologies, on conçoit aujourd'hui des matériaux où les électrons sont confinés dans des structures tridimensionnelles. Les plus simples sont les nanosphères.

Dans ces édifices de taille nanométrique, les électrons mobiles sont confinés dans de petites billes de matériau conducteur.



2. DES NANOSPHERES de sélénure de cadmium de quelques nanomètres de diamètre sont utilisées comme marqueurs fluorescents, par exemple par les biologistes. Dans une telle sphère, l'onde (en rouge sur le schéma) associée à un électron mobile est contrainte, ce qui produit des niveaux d'énergie discrets. L'écart entre niveaux, qui détermine la couleur de fluorescence, dépend notamment de la taille de la nanosphère. Le choix de cette taille permet alors d'obtenir la couleur de fluorescence désirée.

Selon les mêmes principes que ceux à l'œuvre dans les molécules de cyanines, seule la taille des sphères détermine la couleur de ces objets : plus le rayon est petit, plus l'onde associée à l'électron a une longueur d'onde petite et plus l'énergie cinétique correspondante est élevée. Les différences d'énergie augmentent aussi ; dans le domaine visible, les couleurs passent ainsi du rouge au bleu.

Boîtes quantiques pour électrons

C'est notamment le cas des nanosphères de sélénure de cadmium (Cd Se). Ces particules sont utilisées comme marqueurs fluorescents : après absorption d'un photon, elles réémettent de la lumière d'une couleur bien définie. Des nanosphères de cinq nanomètres de diamètre ont ainsi une fluorescence de couleur bleue, tandis que celles mesurant 20 nanomètres sont rouges. En pratique, les nanosphères sont enrobées d'une coque isolante qui les protège de leur environnement. On peut donc les utiliser dans des liquides ainsi que comme marqueurs au sein de cellules vivantes.

LES AUTEURS



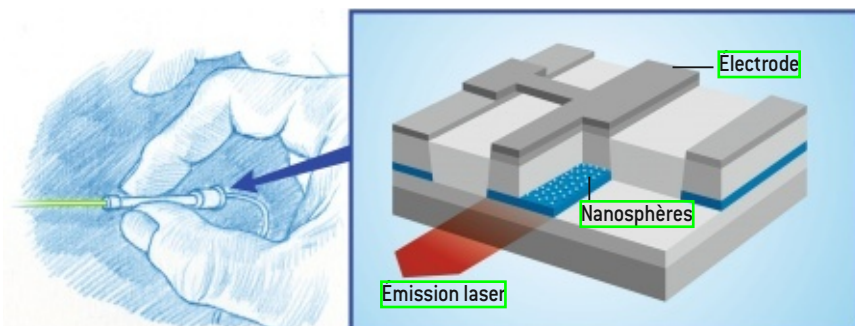
Jean-Michel COURTUY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Leur blog : <http://blog.idphys.fr>

BIBLIOGRAPHIE

L. Zuppiroli et M.-N. Bussac, *Traité des couleurs*, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2001.

R. Rossetti *et al.*, Quantum size effects in the redox potentials, resonance Raman spectra, and electronic spectra of CdS crystallites in aqueous solution, *J. Chem. Phys.*, vol. 79, pp. 1086-1088, 1983.

H. Kuhn, A quantum-mechanical theory of light absorption of organic dyes and similar compounds, *J. Chem. Phys.*, vol. 17, pp. 1198-1212, 1949.



3. DES LASERS peuvent être réalisés avec des « boîtes quantiques » telles que les nanosphères de sélénure de cadmium. Intégrées en nombre dans un dispositif électrique adéquat (à droite) qui excite leurs électrons, elles donnent lieu à une émission laser dans l'infrarouge. Par un procédé d'optique non linéaire qui double la fréquence, on obtient un laser vert.

Ces atomes artificiels géants permettent aussi de réaliser des lasers. Dans les lasers habituels à semi-conducteurs, la couleur de la lumière émise est déterminée par la différence d'énergie entre le haut de la bande d'énergies « de valence » du semi-conducteur (qui est entièrement remplie par les électrons) et le bas de la bande d'énergies « de conduction » (qui est vide). Pour obtenir des

lasers de longueurs d'onde différentes, il fallait jouer sur cette différence d'énergie, c'est-à-dire rechercher le matériau adéquat.

Désormais, on met plutôt les électrons en boîte en réalisant des « hétérostructures ». Ce sont des structures de taille nanométrique qui prennent la forme d'un fil, d'un plan ou d'un volume de forme appropriée, réalisées dans un matériau différent de celui du substrat environnant. Les électrons mobiles qui y sont présents ne peuvent pas aller dans le substrat si ce dernier est isolant. Ils sont donc confinés, de sorte que l'échelle de leurs énergies dépend non seulement du matériau constitutif, mais aussi de la taille de ces « boîtes quantiques ». Excitées par un courant électrique, ces dernières peuvent jouer le rôle de milieu actif dans un laser ou dans un amplificateur de lumière. De tels dispositifs arrivent sur le marché.

CONFÉRENCES

Cycle de conférences « Des forêts et des Hommes »

Lundi 2 mai - 18h : Est-il bon pour la santé de vivre en forêt équatoriale ? A. Froment

Lundi 16 mai - 18h : Nouveaux regards sur les Pygmées aujourd'hui en Afrique centrale. B. Soengaz et M. Robillard

Lundi 23 mai - 18h : Forêts du Brésil : cueillette, extractivisme, biodiversité. L. Empereire

FILMS

Cycle de films « Les chemins de l'eau »

Lundi 9 mai - 18h

Le fleuve aux grandes eaux - Anim., 1993, 24', F. Back

Guarani, main basse sur l'eau - Docu., 2008, 52', R. Lugones

Samedi 14 mai - 15h30

Centipède - Expérim., 2010, 10', M. Grecu

Strade d'Acqua - Docu., 2009, 115', A. Contento

Auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution
36 rue Geoffroy Saint-Hilaire, Paris 5°
Métro : Gare d'Austerlitz - Jussieu

BAR DES SCIENCES

Mercredi 25 mai - 19h30

Le lien entre la forêt et les hommes

Café/Restaurant de La Baleine
47 rue Cuvier, Paris 5° - Métro : Jussieu

La sélection **POUR LA SCIENCE**

Des livres scientifiques à la pointe de l'actualité



Le plus grand des hasards Surprises quantiques

Jean-François Dars et Anne Papillault

Comment pensent et à quoi rêvent les physiciens quantiques ? Soixante-cinq d'entre eux, couverts d'honneurs ou abordant leur thèse, racontent leurs hésitations, leurs angoisses, leurs efforts, leurs fatigues, leurs fureurs, leurs espoirs... Un témoignage précieux sur une science intrigante, accompagné de superbes photographies de ces chercheurs de l'extrême.

978-2-7011-5605-7 • 224 p. • 20,00 €



Les déchiffreurs Voyage en mathématiques

Jean-François Dars, Annick Lesne et Anne Papillault

Qui sont les mathématiciens ? Comment travaillent-ils ? Qu'est ce que l'intuition ? Autant de réponses que de questions dans cet ouvrage, où une cinquantaine de chercheurs, professeurs mondialement reconnus, médailles Fields ou jeunes thésards, proposent leur vision des mathématiques. Une plongée dans l'intimité de la création mathématique.

978-2-7011-4737-6 • 208 p. • 20,00 €



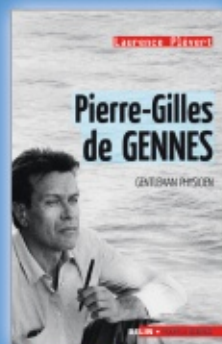
C. Ray et J.-C. Poizat

978-2-7011-4552-5 • 160 p. • 23,50 €



G. Pietryk

978-2-7011-3972-2 • 304 p. • 27,50 €



L. Plévert

978-2-7011-5228-8 • 368 p. • 23,00 €



B. Valeur

978-2-7011-4751-2 • 160 p. • 23,90 €



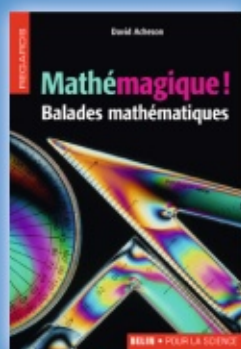
J.-P. Delahaye

978-2-8424-1825-0 • 224 p. • 24,00 €



J.-P. Delahaye

978-2-8424-5090-8 • 192 p. • 24,00 €



D. Acheson

978-2-7011-4285-2 • 176 p. • 18,50 €



N. Gauvrit

978-2-7011-4622-5 • 240 p. • 25,00 €

Feuilletez les premières pages de notre sélection de livres en exclusivité et commandez en ligne sur notre site

www.pourlascience.fr

Des livres à offrir ou à s'offrir à découvrir et à commander sur www.pourlascience.fr



À contre-idées • Didier Nordon

Trouver du comique dans une idée sérieuse (et inversement), du local dans une idée générale (et inversement), de l'absurde dans une idée sensée (et inversement), de l'esprit littéraire au sein des sciences (et inversement). Au fil de ses billets d'humeur, Didier Nordon s'ingénie à bousculer les idées reçues et tout ce qui semble évident et... qui ne l'est pas. Un livre décapant, pour jouer avec les mots... et les idées.

224 pages • 19 euros • 075110

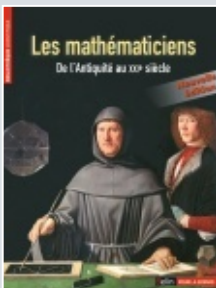


Au nom de l'infini • Jean-Michel Kantor, Loren Graham

Peut-on parler de mathématiques, de religion, de politique dans un même ouvrage ? Oui, et c'est le défi qu'ont relevé le mathématicien Jean-Michel Kantor et l'historien des sciences Loren Graham, du MIT.

Ce livre touchera même ceux que les mathématiques laissent indifférents, voire effraient. Les auteurs éclairent les liens étroits entre la vie – avec ses plaisirs et ses drames – et l'œuvre de ces hommes et ces femmes qui ont marqué le XX^e siècle par leur créativité en mathématiques.

288 pages • 24 euros • 075107



Les mathématiciens • Collectif

Autant artistes que scientifiques, les mathématiciens sont en proie à leurs passions, leurs interrogations, leurs doutes, leurs tourments, leurs angoisses, et la hantise de la beauté. « Nul ne peut être mathématicien s'il n'a une âme de poète », disait Sophie Kowalevskaja. Les mathématiciens doivent faire preuve de rigueur et de ténacité, mais surtout d'inventivité. Maudissant chaque jour leur impuissance à faire reculer les frontières du savoir, ils s'émerveillent pourtant, regardant derrière eux, de l'ampleur du chemin parcouru.

280 pages • 24 euros • 075109



La physique buissonnière • Jean-Michel Courty, Édouard Kierlik

La nature est pleine de surprises pour qui veut bien s'aventurer hors des sentiers battus. Passionnés de physique et curieux de sciences, les auteurs vous invitent à une promenade sur ces chemins de traverse. Avec eux, laissez-vous surprendre par un phénomène que vous avez déjà côtoyé sans même le remarquer. Suivez-les pour découvrir et comprendre cette physique du quotidien.

160 pages • 22 euros • 075105

SCIENCE & GASTRONOMIE

Brandade de morue

*Le salage du cabillaud prépare la réalisation de la brandade.
Le meilleur procédé enchaîne injection de saumure et salage à sec.*

Hervé THIS



Comment saler la morue ? Naguère, le procédé s'imposait afin de conserver un poisson pêché loin des zones de consommation, mais aujourd'hui ? Il nous intéresse dans la mesure où il permet de réaliser un mets délicieux : la brandade.

La question du salage de la morue n'est pas seulement de nature technique ou gustative, mais aussi économique : les différentes méthodes de salage – trempage dans une saumure, injection de cette dernière dans le tissu musculaire, salage au sel sec... – n'ont pas les mêmes résultats en termes de quantité d'eau extraite et de qualité du tissu musculaire après réhydratation.

Les études, nombreuses, ont montré par exemple qu'une augmentation lente de la concentration en sel semble réduire le racornissement des muscles et la perte d'eau. Par ailleurs, le collagène, qui forme le tissu conjonctif (lequel gaine les fibres musculaires et les solidarise en faisceaux), se dissout partiellement dans les solutions salines neutres et gonfle. Enfin, le sel augmente l'activité enzymatique des tissus (enzymes responsables de la dégradation des composés structuraux, après que la rigidité cadavérique a été atteinte), puis la réduit aux valeurs constatées dans les muscles frais.

Le salage à sec est le procédé qui a le plus d'effets sur la contraction des fibres et l'effet microstructural a été étudié par Kristine Thorarinsdottir et ses collègues, de Reykjavik et de Lund.

L'effet des différentes méthodes de salage sur la teneur en sel des chairs n'est pas difficile à déterminer. Avec le salage à sec, on atteint 27 pour cent de sel en poids dans les filets salés de morue. La quantité

d'eau y diminue de 82 à 59 pour cent : cette perte est attribuée à l'extraction de l'eau qui est initialement liée aux protéines contractiles. Examinons le phénomène. La solubilité des protéines dans l'eau augmente à faible concentration en sel (*salting in*), car le sel apporte des ions, qui se lient aux groupes électriquement chargés de la surface des protéines, favorisant leur solvata-tion. En revanche, à plus forte concentration en sel, l'eau est captée de façon privilégiée par les ions du sel, de sorte que les protéines précipitent (*salting out*).

Lors de la réhydratation, les flux de sels et d'eau sont inverses. La teneur moyenne en eau en vient à dépasser celle du muscle frais, tandis que le tissu musculaire réhydraté reste plus salé que le muscle avant salage. Surtout, la microstructure des tissus musculaires est notablement modifiée. Le salage contracte les fibres, mais augmente les espaces intercellulaires. Lors de la réhydratation, les fibres regonflent et reprennent leur volume initial, mais l'espace intercellulaire reste notable.

L'injection de saumure seule augmente le diamètre des fibres, en raison d'une interaction des ions du sel et des protéines myofibrillaires. Simultanément, les espaces intercellulaires se réduisent.

Lors du saumurage, les cellules musculaires se contractent, parce que, à forte concentration en sel, les protéines perdent leur eau d'hydratation. Puis, après saumurage, les muscles rétrécissent, et leur microstructure ressemble à celle que l'on obtient pour des filets injectés et saumurés. Au total, on récupère des filets plus lourds après injection et saumurage qu'après saumurage seul. Le salage à sec

déforme encore les tissus, faisant apparaître des séparations plus grandes encore entre cellules.

Les études de microscopie ont précisé ces mécanismes, mais elles ont surtout montré que, après la réhydratation, le tissu conjonctif est difficilement visible, ce qui indique qu'il a été dégradé. Ce tissu conjonctif, en effet, est composé de fibrilles, elles-mêmes faites de triplets de protéines entortillées : l'ajout de sel favorise la séparation des brins et la désorganisation des tissus, donc la séparation des fibres musculaires.

La conséquence pour la brandade de morue ? D'une part, le salage, qui sépare les fibres musculaires, prépare leur « dispersion culinaire » dans la très grande quantité d'huile qui est ajoutée. D'autre part, la dégradation du tissu conjonctif libère des protéines qui contribuent à la stabilité du plat, où l'huile et l'eau se mêlent en une émulsion. Quel est le meilleur traitement du poisson ? Celui qui enchaîne injection et salage à sec, puisque c'est celui qui déshydrate le moins les filets et aussi celui qui dissocie le mieux le tissu collagénique.

Finalement, le procédé culinaire est parfaitement « adapté » à l'ingrédient ; nous en concluons, comme Pangloss, que le nez a été créé pour porter les lunettes.



Hervé THIS dirige le groupe INRA de gastronomie moléculaire au Laboratoire de chimie d'AgroParisTech. Il est aussi directeur scientifique de la Fondation Science & Culture Alimentaire (Acad. des sciences).

Retrouvez les articles de Hervé This sur www.pourlascience.fr

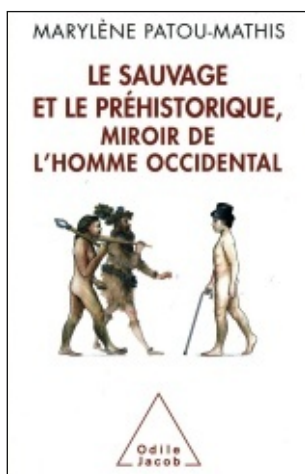
→ PRÉHISTOIRE

Le sauvage et le préhistorique, miroir de l'homme occidental

Marylène Patou-Mathis

Odile Jacob, 2011
(400 pages, 24,90 euros).

L'homme occidental s'est toujours senti entouré de peuples qui ne lui ressemblaient pas, difficiles à comprendre et parfois inquiétants, mais aussi faciles à considérer comme inférieurs. Avec les grands voyages d'exploration de la Renaissance, les « sauvages » deviennent omniprésents, dans les nouvelles terres que découvrent les explorateurs. Dès lors s'établissent des relations complexes et ambiguës avec ces humains à première vue si différents. Au XVIII^e siècle, l'idée du « bon sauvage », demeuré proche de la nature et non encore perverti par la civilisation, séduit bien des philosophes, alors même que l'esclavage et la traite des Noirs sont à leur apogée. Au siècle suivant, les débuts de la science anthropologique se font principalement dans une optique ouvertement « raciale », si ce n'est raciste, que l'essor des empires coloniaux ne



fait qu'accentuer. On ne réduit plus les sauvages en esclavage, mais on se doit de les civiliser.

C'est alors que l'homme occidental découvre avec une certaine stupeur que les sauvages ne sont pas seulement les habitants de contrées lointaines : ils ont aussi peuplé l'Europe, avant l'histoire écrite. La réalité de l'homme préhistorique ne s'impose pas sans mal, car, dans un contexte évolutionniste, elle implique que les propres prédécesseurs des Européens aient eux aussi vécu dans la sauvagerie. Une fois cette dure réalité admise, les sauvages d'aujourd'hui serviront à interpréter les hommes de la Préhistoire et *vice versa*. Les mentalités changent, certes, notamment avec la fin des colonies, mais est-ce pour autant que les rapports entre l'homme occidental et ses semblables d'autres cultures ont perdu toute ambiguïté ? Il serait naïf de le croire.

Marylène Patou-Mathis explore ces questions délicates avec le recul qui sied à l'historienne. Elle s'appuie sur une documentation considérable pour examiner aussi bien les attitudes « savantes » face à la question du « sauvage » et de l'homme préhistorique que les réactions plus populaires, depuis les « zoos humains » du XIX^e siècle jusqu'aux « romans préhistoriques » en passant par les musées ethnographiques devenus graduellement des galeries d'art. Son livre a le grand mérite de ne pas prétendre juger les attitudes du passé à l'aune de nos conceptions actuelles. Les faits sont exposés dans toute leur complexité, et le lecteur peut ainsi replacer dans leur contexte historique bien des questions qui se posent encore de nos jours dès qu'il s'agit de nos rapports avec l'Autre.

→ Eric Buffetaut

Laboratoire de géologie de l'ENS

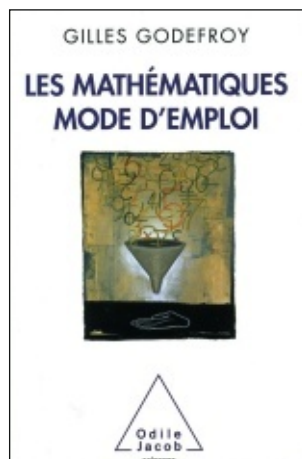
→ MATHÉMATIQUES

Les mathématiques mode d'emploi

Gilles Godefroy

Odile Jacob, sciences 2011
(240 pages, 24,90 euros).

Cet ouvrage fait partager des idées plus que des techniques mathématiques. Ainsi, si la symétrie y est un thème récurrent, l'auteur souligne que les dissymétries plus nombreuses sont tout aussi intéres-



santes. L'un des mérites de l'auteur est d'insister sur le fait qu'il n'existe pas de frontière entre mathématiques pures et mathématiques appliquées. L'exemple de la théorie des nombres et de la cryptographie est classique, mais éclairant à cet égard. Toutefois, son propos est aussi d'expliquer les difficultés conceptuelles, voire philosophiques, qui ont jalonné le développement de la recherche mathématique. Les grandes idées de Cantor et de Gödel font l'objet de développements intéressants : il peut y avoir confusion entre le vrai et le démontrable. Ainsi, le profane serait peut-être surpris d'apprendre qu'il existe des mathématiciens qui savent

un résultat faux, mais demeurent avec leurs pairs impuissants à trouver l'erreur, car il n'existe pour cela aucune méthode générale. Sans trop insister, Gilles Godefroy parle de l'outil ordinateur avec lequel les mathématiciens explorent désormais l'univers des très grands nombres. Il nous explique le caractère incontournable de cet outil dans la résolution numérique des problèmes techniques.

L'un des intérêts de ce « mode d'emploi » est aussi de nous faire ressentir que, malgré la complexité et la richesse immenses des mathématiques d'aujourd'hui, il est des terrains – la génomique ou le traitement de masses importantes de données – où les théories adéquates manquent encore. C'est pourquoi j'ai particulièrement apprécié le dernier chapitre intitulé « Ceci n'est pas une conclusion », qui s'achève par ces mots : *Rien n'est fini. Nous n'en sommes qu'au début des mathématiques.*

→ Gérard Tronel

Mathématicien, Université Paris 6

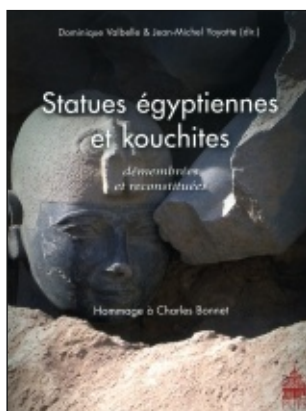
→ ARCHÉOLOGIE

Statues égyptiennes et kouchites

D. Valbelle et J.-M. Yototte (dir.)

PUPS, 2011
(200 pages, 32 euros).

Comme l'écrit Rita Freed dans l'introduction de ce livre, les découvertes majeures ne proviennent pas toujours de fouilles spectaculaires ! La conservatrice du Département d'art égyptien du *Museum of Fine Arts* de Boston a pu le vérifier dans son propre musée à partir de l'examen attentif de débris classés « inutiles » ou « sans intérêt »,



qui attendaient dans ses réserves depuis 100 ans...

Irisés, étudiés de près, ces fragments ont permis de compléter des statues comme la belle tête en calcite de Képhren ou le cobra dressé du Gebel Barkal. Toujours en Nubie, d'autres fragments de statues royales brisées au cours d'expéditions guerrières avaient pour leur part été pieusement rassemblés dans une cachette.

On peut aujourd'hui leur rendre leur apparence première et reconstituer leurs histoires mouvementées. Celles de ces effigies de particuliers, emportées de la Moyenne-Égypte jusqu'au lointain Soudan pour y être ensevelies, sans doute en tant qu'objets de prestige, dans les tumuli des potentats locaux, ne le sont pas moins. On les retrouve aujourd'hui brisées et dispersées par les chercheurs de trésors modernes.

L'histoire peut aussi s'écrire en chambre, comme celle de la statue de Neshor, rapportée d'Italie par Bonaparte, intégrée aux collections du Louvre depuis Louis XVIII. Le personnage, agenouillé, présente une triade divine. Acéphale dans les dessins de Kircher, au XVII^e siècle, on le retrouve complet quelque 100 ans plus tard sur une autre gravure. Quel chemin parcouru pour cette œuvre venue d'Égypte dès l'Antiquité, bri-

sée, restaurée à plusieurs reprises, chacune de ses restaurations reflétant le goût d'une époque ! Il est plus rare d'appréhender une restauration antique, comme pour cette autre statue du Louvre, un buste d'Amon somme toute assez fade, mais qui prend soudain de l'intérêt, quand on se rend compte, à partir de ses caractéristiques techniques, qu'il a sans doute été façonné pour restaurer un groupe statuaire mis à mal pendant la période amarnienne (celle d'Akhénaton).

Le livre s'achève sur le gigantesque puzzle que constitue le temple funéraire d'Amenhotep III, s'ouvrant, sur la rive gauche de Louqsor, par les célèbres colosses de Memnon. On reconstitue patiemment la structure et le décor sculpté de cet immense espace. Fruit d'un colloque savant, cet ouvrage se lit en fait comme une passionnante enquête policière...

→ Nadine Guilhou

Égyptologue,
Université de Montpellier II

→ COSMOLOGIE

L'univers en rebond

Martin Bojowald

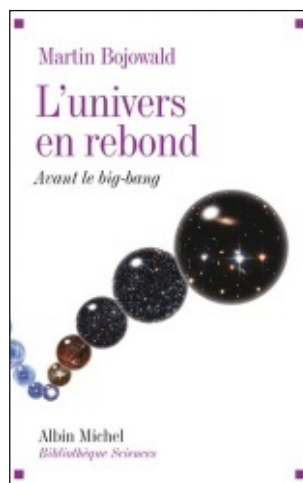
Albin Michel, 2011
(320 pages, 29 euros).

L'idée que notre Univers est né d'une conflagration générale est ancienne. Elle se rattache aux conceptions cycliques du monde. Au XX^e siècle, on la retrouve dès les débuts de la cosmologie relativiste. En se plaçant dans le cadre de la relativité générale d'Albert Einstein, certains chercheurs imaginèrent en effet que l'Univers, avant de se dilater, s'était contracté jusqu'à former un point, et avait rebondi

sur lui-même. Le problème est que ce scénario reposait sur une extrapolation de la relativité générale à des états de très forte densité de la matière. Or, dans ces situations, cette théorie de la gravitation devrait prendre en compte les effets quantiques de la matière, ceux décrits par la mécanique quantique. Mais pour cela, il faudrait que les chercheurs disposent d'une théorie quantique de la gravitation. À leur grand regret, elle n'existe pas encore.

Une des pistes de recherche est la « gravitation quantique à boucles ». Dans ce livre, l'auteur présente son développement et montre comment elle permet d'apporter une certaine légitimité à cette idée d'Univers rebondissant. Comme la théorie des cordes, sa grande rivale, la gravitation quantique à boucles ne fait pas de prédictions qui pourront être corroborées dans un avenir proche. Honnête, l'auteur le reconnaît. Mais il souligne, à juste titre, que cela n'empêche pas de continuer à développer ces deux théories, qu'il faut pour l'instant juger sur leur cohérence mathématique.

Dans la gravitation quantique à boucles, il n'y a pas que la matière à être composée d'entités discrètes (les atomes). L'espace aussi



Brèves

CAÏN, ABEL, ÔTZI

L'héritage néolithique,
Jean Guilaine,
Gallimard, 2011
(284 pages, 26 euros).



Le système néolithique, c'est-à-dire la sédenta-

risation, l'agriculture, l'élevage, la poterie... et l'exploitation des plus faibles par les élites, nous y sommes toujours ! L'auteur de ce livre, l'un de nos plus grands archéologues, explique cette évidence cruelle, mais riche d'enseignements.



CHOISIR UNE PSYCHOTHÉRAPIE EFFICACE

Jean Cottraux

Odile Jacob, 2011
(350 pages, 22,90 euros).

L'auteur nous livre un tour d'horizon du paysage formé par les 230 formes de psychothérapies existantes. Dans cette masse, il définit six grandes familles, qu'il caractérise en prenant comme critère l'efficacité. Psychiatre, il est aujourd'hui le directeur scientifique de l'Institut francophone de formation et de recherche en thérapie cognitive et comportementale (TCC), un courant de psychothérapie qu'il considère comme le principal aujourd'hui.

POUR UNE AGRICULTURE MONDIALE PRODUCTIVE ET DURABLE

Michel Petit

Quæ, 2011 (112 pages, 13 euros).

Dans cet essai concis, l'ancien directeur du Département « Agriculture et développement rural » de la Banque mondiale fait un point raisonné sur les tendances mondiales en agriculture et les débats qui les accompagnent. Idéal pour saisir quels conflits d'intérêts essentiels structurent l'activité vitale qu'est l'agriculture.



Brèves

CURIOSITÉS GÉOLOGIQUES
DE LA GUADELOUPE

Pierrick Graviou *et al.*
BRGM Éditions / PLB Éditions, 2011
(100 pages, 19 euros).

Le volcan de la Soufrière est le site géologique de la Guadeloupe le plus connu, mais l'île en compte beaucoup d'autres, vestiges de mouvements tectoniques complexes. Fruit des recherches du BRGM, ce petit guide bien illustré en présente 18 de façon didactique en expliquant leur formation et en donnant quelques conseils pour leur visite.

LES PREMIÈRES CITÉS
ET LA NAISSANCE
DE L'ÉCRITURE

Pascal Vernus
(sous la présidence de)
Actes Sud, 2011 (208 pages, 24 euros).

L'écriture a-t-elle été inventée pour faciliter la gestion des biens dans les premières cités ? Ce n'est sans doute pas aussi simple, montre cet ouvrage collectif, issu d'un colloque tenu en 2009. De la Mésopotamie à l'Amérique du Sud en passant par l'Égypte, la vallée de l'Indus, le monde égéen et la Chine, archéologues, historiens et linguistes examinent cette question à la lumière des dernières découvertes archéologiques.

BIOLOGIE DE L'ÉVOLUTION
ET MÉDECINE

Christian Frelin
et Bernard Swynghedauw

Lavoisier, 2011
(178 pages, 39 euros).

Comprendre les maladies, les épidémies, les données génétiques, le vieillissement, à travers la biologie de l'évolution : c'est ce que propose cet ouvrage. Destiné aux étudiants et enseignants en médecine, il offre un aperçu d'une démarche médicale récente : la médecine évolutionniste.

est discontinu. La théorie doit son nom au fait que certaines propriétés de ces « atomes » d'espace peuvent être décrites mathématiquement comme des boucles. Concernant la cosmologie, cette approche fait disparaître la « singularité » lors de la contraction maximale de l'Univers. Plus exactement, elle prédit que la force gravitationnelle devient répulsive peu avant le moment où la singularité serait autrement apparue. Ce qui engendre le rebond de l'Univers.

S'il en est ainsi, il est possible que le rebond ne détruise pas toutes traces de l'avant Big Bang. Il serait même envisageable que des indices de cette « préhistoire » de l'Univers soient un jour observables. Pour l'instant, tout cela reste très spéculatif, mais le livre de M. Bojowald, qui a joué un rôle clef dans ces recherches, reflète bien une tendance actuelle des cosmologistes à essayer de penser « au-delà » du Big Bang. D'où son intérêt.

→ Thomas Lepeltier
Historien des sciences,
Université d'Oxford

→ ARCHÉOLOGIE

Le Liban,
de la Préhistoire
à l'Antiquité

Guillaume Gernez
et Ingrid Périssé-Valéro
Errance, 2011
(246 pages, 25 euros).

Ravi par mes visites au Pays du cèdre, j'ai découvert avec intérêt ce petit guide rappelant l'importance historique et culturelle du Liban.

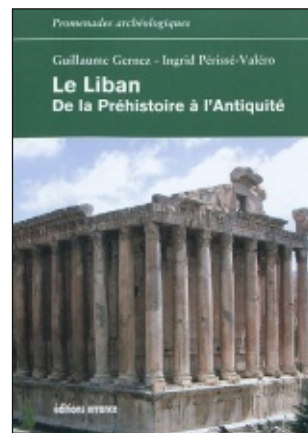
Ses auteurs retracent l'histoire de l'occupation humaine du Liban, en cherchant à redonner une cohérence aux vestiges archéologiques libanais, omni-

sents, mais dispersés et enchevêtrés. Cette tâche, ils l'accomplissent en nous conviant à une « promenade archéologique » agrémentée de commentaires aussi didactiques que pertinents sur le plan scientifique. On comprend pourquoi : Guillaume Gernez, de l'Université Panthéon-Sorbonne, est un ancien pensionnaire à l'Institut français du Proche-Orient à Beyrouth, tandis qu'Ingrid Périssé-Valéro est chercheuse associée à la Maison de l'Orient et de la Méditerranée à Lyon.

Toutefois, les auteurs sont avant tout amoureux du Liban, et prennent manifestement un grand plaisir à nous entraîner sur des chemins improbables à la découverte de ces vestiges qu'ils savent si bien faire parler.

Une riche iconographie complète un texte découpé par grandes périodes successives : il débute par les premières traces de sédentarisation humaine, explore la période phénicienne depuis l'âge de bronze (vers 2000 avant notre ère), jusqu'à l'âge du fer récent, en passant par la période perse (-550 à -330), les époques grecque et romaine (-300). Lieu de passage et de brassage culturel, le Liban a toujours été l'enjeu de conquêtes à cause de sa façade maritime et de la fertilité de ses plaines et de ses montagnes. C'est là qu'est née la civilisation phénicienne, qui contrôla, à son apogée, le commerce méditerranéen. Nourrie des apports de ses puissants voisins, Égypte, Perse, Grèce et Empire romain, la Phénicie compta nombre de prestigieuses cités, telles Tyr, Sidon, Beyrouth ou Baalbek.

Témoins de l'histoire, les sites décrits se trouvent en général



sur les ruines d'implantations plus anciennes. Il n'est donc pas toujours aisé pour le profane de s'y retrouver, puisque les nombreuses périodes de l'histoire libanaise ont empilé des strates parfois difficiles à démêler. De plus, dans le Liban d'aujourd'hui, reconstruit après une guerre civile dévastatrice, le bétonnage urbain, la densification de l'habitat, le développement des infrastructures et l'extension de l'agriculture ont marqué de leur empreinte des lieux condamnés à la proximité avec la modernité, quand ils ne les ont pas détruits irrémédiablement.

Pour mieux saisir l'importance et la beauté de ces vestiges, il faut écouter ce témoignage sur un passé d'une richesse exceptionnelle et se laisser guider dans les méandres complexes du temps. Les auteurs de cet efficace petit ouvrage le font à merveille, sans omettre de gratifier le lecteur d'une bibliographie éclectique et du recensement des musées à ne manquer sous aucun prétexte.

→ Bernard Schmitt
CERNh, Lorient

Retrouvez l'intégralité de votre magazine
et plus d'informations sur :
www.pourlascience.fr