

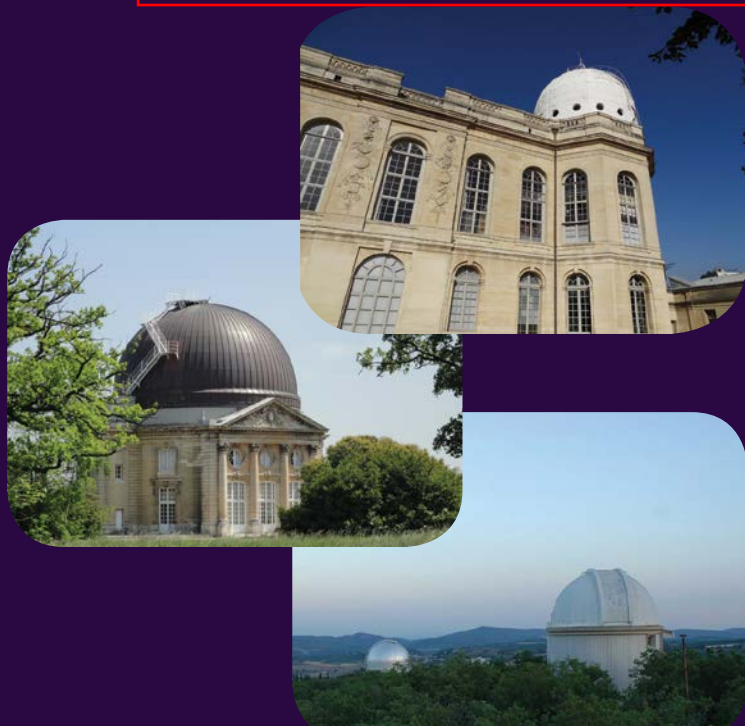
BEL: 7,2 € - CAN: 10,95 \$ CAD - DOM/S: 7,3 € - REUT on/A: 9,3 € - ESP: 7,2 € - GR: 7,2 € - ITA: 7,2 € - LUX: 7,2 € - MAR: 50 MAD - TOM: 980 XPF - PORT: CONTI: 7,2 € - CH: 12 CHF - TUN/S: 8,6 TND

OBSERVATOIRE DE PARIS

DIPLÔME D'UNIVERSITÉ

EN PRÉSENTIEL ET À DISTANCE

“EXPLORER ET COMPRENDRE L'UNIVERS”



Objectifs

L'Observatoire de Paris propose la préparation d'un diplôme d'Université permettant d'acquérir un panorama des connaissances actuelles et des recherches en cours en astronomie et en astrophysique auprès d'astronomes professionnels.

Publics concernés

Ces cours s'adressent à toutes les personnes passionnées d'astronomie et de niveau baccalauréat scientifique ou équivalent.

Les étudiants inscrits à l'université dans le cadre du LMD peuvent valider en ECTS sous réserve d'accord avec leur responsable pédagogique.

Contenu

Cette formation, de niveau L1, peut être suivie en présentiel et à distance sous forme de cours le mardi soir de 17h à 20h à l'Observatoire de Paris ou de cours filmés en différé.

Un stage pratique de traitement de données a lieu en mars à l'Observatoire de Meudon (en option et sous conditions ; nombre de places limité).

Un stage facultatif de 4 nuits d'observation a lieu l'été à l'Observatoire de Haute-Provence (en option et sous conditions ; nombre de places limité).

Les sujets abordés sont les suivants :

- ▶ Mécanique céleste et astrométrie
- ▶ Histoire de l'astronomie
- ▶ Ondes et instruments
- ▶ Le soleil
- ▶ Planétologie comparée
- ▶ Traitement de données
- ▶ Étoiles et milieu interstellaire
- ▶ Galaxies
- ▶ Cosmologie



Inscriptions

Dossiers à déposer avant le 8 septembre sur le site d'inscription en ligne : https://ufe.obspm.fr/candidatures_ufe

Renseignements

<http://ufe.obspm.fr/Diplomes-d-Universite/DU-en-presentiel>
contact.duecu@obspm.fr
Téléphone : 01.45.07.78.87

www.pourlascience.fr
170 bis boulevard du Montparnasse - 75014 Paris
Tél. 01 55 42 84 00

Groupe POUR LA SCIENCE
Directrice des rédactions: Cécile Lestienne

POUR LA SCIENCE
Rédacteur en chef: Maurice Mashaal
Rédactrice en chef adjointe: Marie-Neige Cordonnier
Rédacteurs: François Savatier, Sean Bailly
DOSSIER POUR LA SCIENCE
Rédacteur en chef adjoint: Loïc Mangin
Développement numérique: Philippe Ribeau-Gésippe
Directrice artistique: Céline Lapert
Maquette: Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy
Révisseuse: Anne-Rozenn Jouble
Marketing & diffusion: Laurence Hay et Arthur Peys, assisté de William Armand
Direction financière et direction du personnel: Marc Laumet
Fabrication: Marianne Sigogne et Olivier Lacam
Directrice de la publication et Gérante: Sylvie Marcé
Anciens directeurs de la rédaction: Françoise Pétry et Philippe Boulanger
Conseiller scientifique: Hervé This
Ont également participé à ce numéro: Maud Bruguère, Eric Buffetaut, Damir Buskulic, Silvana Condemi, Cindy Morris, Christophe Pichon, Alexander Sobolev, Daniel Tacquet

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

PUBLICITÉ France
Directeur de la Publicité: Jean-François Guillotin
(jf.guillotin@pourlascience.fr)
Tél. 01 55 42 84 28

ABONNEMENTS
Abonnement en ligne: <http://boutique.pourlascience.fr>
Courriel: pourlascience@abopress.fr
Tél.: 03 67 07 98 17
Adresse postale: Service des abonnements - Pour la Science, 19 rue de l'Industrie, BP 90053, 67402 Illkirch Cedex

Tarifs d'abonnement 1 an (12 numéros)
France métropolitaine: 59 euros - Europe: 71 euros
Reste du monde: 85,25 euros

DIFFUSION
Contact kiosques: À Juste Titres; Benjamin Boutonnet
Tél. 04 88 15 12 41
Information/modification de service/réassort: www.direct-editeurs.fr

SCIENTIFIC AMERICAN
Editor in chief: Mariette DiChristina
President: Dean Sanderson
Executive Vice President: Michael Florek
Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue « Pour la Science », dans la revue « Scientific American », dans les livres édités par « Pour la Science » doivent être adressés par écrit à « Pour la Science S.A.R.L. », 162 rue du Faubourg Saint-Denis, 75010 Paris.
© Pour la Science S.A.R.L. Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial « Scientific American » sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à « Pour la Science S.A.R.L. ». En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie (20 rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).

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



Certifié PEFC
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.
pefc-france.org



**MAURICE
MASHAAL**
Rédacteur
en chef

INVITATION AU VOYAGE

Voici venir l'été, une période propice aux voyages. Pour la Science vous en propose ce mois-ci au moins quatre. La destination du premier d'entre eux est Saturne, ou plus exactement le système saturnien: la planète géante, ses magnifiques anneaux et ses non moins extraordinaires lunes Encelade et Titan, pour ne citer qu'elles. Ce voyage est motivé par la fin prochaine de la mission spatiale *Cassini-Huygens* — un périple bien réel qui, en treize années, aura livré une abondante moisson d'images spectaculaires et de découvertes de premier ordre. Nous vous présentons les unes comme les autres, avec les éclairages de l'astrophysicien Francis Rocard, l'un des principaux acteurs de cette odyssée saturnienne (voir pages 25 à 39).

Les autres voyages sont plutôt temporels. L'un d'eux vous emmènera plusieurs dizaines de millions d'années en arrière, à l'ère des dinosaures, pour voir ces animaux en couleurs réalistes. Car, depuis peu, les paléontologues parviennent à reconstituer les coloris et les motifs qu'arboraient certaines espèces, grâce à des fossiles ayant conservé une partie de leurs pigments (voir pages 58 à 66).

À l'antipode des échelles de temps géologiques et des reptiles plus ou moins géants, un troisième voyage vous entraînera dans le monde de l'ultrabref et des molécules, là où les durées se comptent en milliardièmes de seconde, autrement dit en femtosecondes. Vous y apprendrez comment les chercheurs réalisent, à l'aide de rayons X, des successions d'images qui révèlent les transformations moléculaires dans des processus tels que la photosynthèse (voir pages 50 à 56).

Et un quatrième voyage, enfin, vous propulsera au XVII^e siècle, celui de Kepler, Descartes, Galilée, Pascal et d'autres pionniers de la science moderne, pour montrer que, contrairement aux idées reçues, la plupart de ces « Modernes » ne reniaient pas du tout l'héritage des Anciens (voir pages 74 à 79). Bel été et bon(s) voyage(s)! ■

S

SOMMAIRE

N° 477 /
Juillet 2017



POUR LA
SCIENCE.FR

LETTRE D'INFORMATION

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

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



Inscrivez vous
www.pourlascience.fr

ACTUALITÉS

P. 6

ECHOS DES LABOS

- *Homo sapiens* vieillit d'au moins 100 000 ans
- Accord de Paris: l'impact du retrait américain
- Des laves plus chaudes que prévu
- Impression 3D d'ovaires
- Le pôle sud de Jupiter dévoilé par *Juno*
- La coccinelle, reine de l'origami
- Cellules fœtales à la rescousse
- Anticiper les éruptions solaires

P. 18

LES LIVRES DU MOIS

P. 20

AGENDA

P. 22

HOMO SAPIENS INFORMATICS

La bonne stratégie pour apprendre
Gilles Dowek

P. 24

CABINET DE CURIOSITÉS SOCIOLOGIQUES

Ce qui nous intéresse chez les politiques
Gérald Bronner



En couverture:

© NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute

Les portraits des contributeurs sont de Seb Jarnot

GRANDS FORMATS



P. 40

NEUROSCIENCES

UN FLAIR QUI A DU CHIEN

Barbara Ferry

Détecter à l'odeur drogue, billets, armes, mines, explosifs, insectes nuisibles, stress et cancer... C'est ce que font couramment aujourd'hui des chiens au flair exceptionnel et spécialement entraînés.



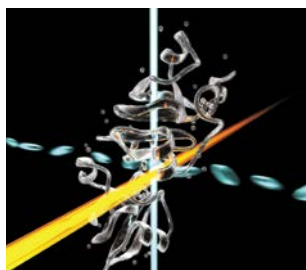
P. 58

PALEONTOLOGIE

LES VRAIES COULEURS DES DINOSAURES

Jakob Vinther

Vert reptile, les dinosaures? Pas seulement: rouge, noir, chatoyant, blanc, fauve... Les pigments fossiles nous révèlent une palette bien plus diverse qu'on ne le pensait.



P. 50

CHIMIE

DU CINÉMA MOLÉCULAIRE AVEC DES RAYONS X

Petra Fromme et John Spence

La photosynthèse décompose des molécules d'eau en quelques millièmes de milliardième de seconde. Suivre des processus moléculaires aussi rapides n'est aujourd'hui plus une utopie, grâce à une méthode cristallographique révolutionnaire.



P. 68

BIOPHYSIQUE

DES DRONES POUR TRAQUER LES MICROBES

David Schmale et Shane Ross

Fusariose des épis, rouille noire du blé et autres maladies des céréales ravagent les cultures de céréales dans le monde entier. La cause: des microorganismes qui, transportés par les vents, parcourent des milliers de kilomètres.



P.74

HISTOIRE DES SCIENCES

PAS SI MODERNES...

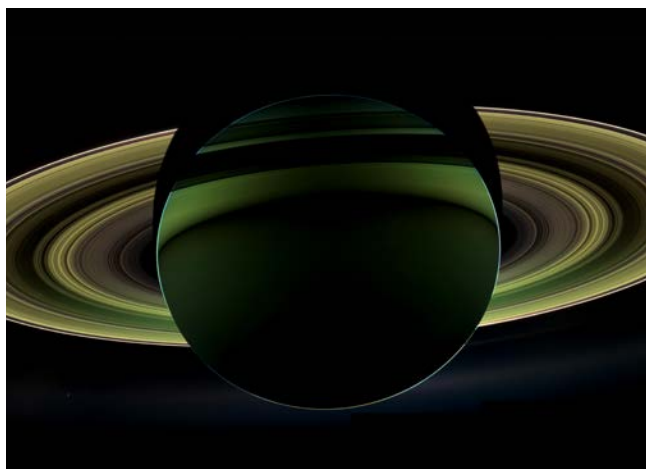
Pascal Duris

Y a-t-il eu une révolution scientifique au XVII^e siècle? Hormis Descartes et ses partisans, aucun savant de l'époque ne percevait son œuvre comme telle, bien au contraire. L'émancipation des Modernes vis-à-vis du poids des Anciens s'est faite au prix d'une longue bataille.

P.25

ASTRONOMIE

SATURNE: LES PLUS BELLES DÉCOUVERTES DE CASSINI



P.26

SATURNE SOUS L'ŒIL DE CASSINI

Sean Bailly

Les magnifiques et spectaculaires photographies prises par la sonde *Cassini* ont bouleversé nos connaissances sur le « seigneur des anneaux » et son système.

P.36

« CASSINI-HUYGENS LÈGUE UN HÉRITAGE EXCEPTIONNEL »

Entretien avec Francis Rocard

Par ses surprenantes découvertes, la mission *Cassini-Huygens* marquera durablement l'exploration du Système solaire. Un formidable succès que commente l'un de ses acteurs.

RENDEZ-VOUS

P.80

LOGIQUE & CALCUL

LE TOUT EST-IL PLUS QUE LA SOMME DE SES PARTIES?

Jean-Paul Delahaye

Mettre à l'épreuve une vieille maxime un peu trop vague est un excellent stimulant mathématique: selon le sens qu'on donne aux mots, le mathématicien trouve que le tout est plus que la somme de ses parties... ou l'inverse!

P.86

ART & SCIENCE

Le palais sous les dunes

Loïc Mangin

P.88

IDÉES DE PHYSIQUE

Les radiographies prennent des couleurs

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

P.92

CHRONIQUES DE L'ÉVOLUTION



Sur les bords du Nil, espèces de crocodiles!

Hervé le Guyader

P.96

SCIENCE & GASTRONOMIE

L'art de souffler les pommes de terre

Hervé This

P.98

À PICORER

A

CTUALITÉS

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

HOMO SAPIENS VIEILLIT D'AU MOINS 100 000 ANS



Ci-contre, le crâne déformé d'*H. sapiens* (pointé du doigt par Jean-Jacques Hublin) au moment de sa découverte à Jebel Irhoud, au Maroc. En haut, la reconstitution du crâne de la forme précoce d'*H. sapiens* qui a vécu sur ce site il y a quelque 300 000 ans. Ci-dessus, deux des outils trouvés sur place.



Des fossiles d'*Homo sapiens* découverts au Maroc confirment l'origine africaine de notre lignée et révèlent qu'elle est plus ancienne qu'on ne le pensait.

Jusqu'ici, dans le registre fossile, les tout premiers *Homo sapiens* – Omo 1 et Omo 2 – étaient éthiopiens et vieux de 200 000 ans. Désormais, le titre revient aux fossiles mis au jour par l'équipe internationale dirigée par Jean-Jacques Hublin, de l'Institut Max-Planck d'anthropologie évolutionniste, à Leipzig. Après datation, ils font remonter les débuts de notre espèce à plus de 300 000 ans.

Ces fossiles et toute une série d'autres anciennement découverts au même endroit, mais mal datés, proviennent du site

marocain de Jebel Irhoud, à une centaine de kilomètres à l'ouest de Marrakech. Dès 1961, les exploitants d'une mine de barytine y avaient exhumé un crâne humain presque complet, auquel s'ajoutèrent plus tard des fragments d'une boîte crânienne et une mandibule d'enfant. Ce matériel était associé à des restes de faune et à des outils de pierre débités par la méthode dite Levallois.

À l'époque, les découvreurs des fossiles avaient estimé que leur âge ne pouvait excéder 40 000 ans, et, étant donné que les préhistoriens croyaient alors à la présence de Néandertaliens en Afrique du

Nord, ils les ont attribués à cette espèce sœur de la nôtre.

Depuis, notre vision de l'évolution du genre *Homo* a beaucoup changé, et on a établi l'origine exclusivement européenne des Néandertaliens et leur confinement à l'Eurasie. Dès lors, il fallait réévaluer les fossiles de Jebel Irhoud, projet que Jean-Jacques Hublin a lancé en convainquant son collègue Abdelouahed Ben-Nacer, de l'Institut national des sciences de l'archéologie et du patrimoine du Maroc, de relancer l'étude du site.

Entamées en 2004, de nouvelles fouilles dans la petite zone du site laissée de côté dans les années 1960 ont livré de nombreux restes osseux d'animaux (gazelle, léopard, zèbres, bovidés, lions...). Ces os n'avaient pas été mâchouillés par des carnivores et leur association à des outils de pierre

obtenus par la méthode Levallois (pointes, éclats retouchés...) suggère que des humains les avaient apportés là. Les chercheurs ont aussi découvert une boîte crânienne humaine déformée par les mouvements de terrain et accompagnée de plusieurs restes de la face, une mandibule quasi complète d'adulte, plusieurs éléments postcrâniens et toute une série de dents.

Ces restes humains et ceux trouvés dans les années 1960 représentent au moins cinq individus: trois adultes, un adolescent et un enfant. Ils proviennent d'une strate contenant des outils dont la datation par thermoluminescence donne un âge de 315 000 ans à 34 000 ans près. Une autre technique confirme ce résultat. Ce sont donc les plus anciens fossiles d'*H. sapiens* connus à ce jour.

Outre leur caractère *sapiens*, l'examen de ces restes révèle plusieurs traits archaïques. Les plus évidents sont une forme de l'encéphale assez différente de celle des *H. sapiens* récents et, pour l'un des crânes, des arcades sourcilières proéminentes. Plus gracile que celle d'un Néandertalien, la face des humains de Jebel Irhoud est aussi assez courte.

Pour confirmer l'appartenance des fossiles à l'espèce *H. sapiens*, l'équipe de Jean-Jacques Hublin a réalisé une analyse morphométrique en 3D, une technique statistique qui permet, après avoir mesuré de nombreux traits, de représenter les diverses formes anatomiques par des points dans un espace abstrait. Il en ressort que les hominidés de Jebel Irhoud se placent au milieu du nuage de points correspondant aux *H. sapiens*.

Les chercheurs constatent aussi que les fossiles de Jebel Irhoud peuvent être rapprochés de ceux d'Omo 1 et 2 (195 000 ans, Éthiopie) et de celui, controversé, de Florisbad (259 000 ans, Afrique du Sud). Par ailleurs, on retrouve certains des traits des fossiles de Jebel Irhoud en plusieurs endroits d'Afrique et à plusieurs dates, ce qui suggère une évolution en mosaïque d'*H. sapiens*, c'est-à-dire que ses traits auraient évolué à des vitesses différentes suivant les lieux. Un phénomène peut-être lié à l'épisode climatique qui, il y a environ 330 000 ans, a entraîné une très forte réduction du Sahara et donc rendu possible la circulation entre l'Afrique du Nord et le reste du continent. ■

FRANÇOIS SAVATIER

J.-J. Hublin *et al.*, *Nature*, vol. 546, pp. 289-292, 2017 ;
D. Richter *et al.*, *ibidem*, pp. 293-296

Accord de Paris : l'impact du retrait américain

Les États-Unis se retirent de l'accord de Paris sur le climat. Quelles en seront les conséquences ? La réponse de Valérie Masson-Delmotte, paléoclimatologue qui copréside depuis 2015 le groupe de travail n° 1 (principes physiques du changement climatique) du Giec, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.



Propos recueillis par FRANÇOIS SAVATIER

VALÉRIE MASSON-DELMOTTE
Laboratoire des sciences
du climat et de
l'environnement, CEA,
Gif-sur-Yvette

À moyen terme, quel pourrait être l'impact du retrait américain sur les émissions de gaz à effet de serre ?

Valérie Masson-Delmotte : Rappelons que les États-Unis représentent 25 % des émissions cumulées historiques de CO₂, et aujourd'hui 15 % des émissions mondiales. Malgré la décision du président américain, ce qui compte, ce sont les actions menées aux États-Unis pour réduire les émissions en jouant sur les normes ou l'efficacité énergétique de différents secteurs. Depuis l'élection de Donald Trump, la nouvelle administration américaine a annulé certaines décisions mises en place précédemment qui visaient à mettre les États-Unis en phase avec leur engagement pour l'horizon 2025 (- 26 à - 28 % par rapport à 2005 dans l'accord de Paris).

Un groupe de réflexion américain a évalué que, du fait de ces décisions puis de leur annulation, les émissions américaines devraient continuer à diminuer jusqu'en 2020 (suite aux actions réalisées jusqu'à ce jour), mais stagneront après 2020. Mais ces conclusions doivent être revues en prenant en compte les milliers d'acteurs américains (neuf États, des centaines de villes et d'universités, des milliers d'entreprises) qui veulent mettre en œuvre l'engagement américain à l'horizon 2025. Ils représentent plus de 120 millions de citoyens des États-Unis.

Et à long terme ?

V. M.-D. : À long terme, c'est la question de l'innovation, en vue des technologies efficaces de demain, qui est cruciale. Le projet de budget de la Maison Blanche prévoit de fortes coupes dans de nombreux secteurs de la R&D de l'Agence pour la protection de l'environnement (EPA) du Département de l'énergie. Cela n'incite pas à l'optimisme...

Quelles conséquences potentielles sur l'attitude des autres pays pourrait avoir le retrait des États-Unis ?

V. M.-D. : Il est difficile à ce stade de l'évaluer, mais la plupart des signataires de l'accord de Paris, y compris les grands pays émergents, ont annoncé la poursuite ou le renforcement de leur ambition. La Chine pourrait avoir atteint son INDC, c'est-à-dire sa contribution décidée à l'échelle nationale, près de dix ans avant la date prévue de 2030. L'Inde, dont les émissions augmentent actuellement de 7 % par an en moyenne, vient de décider de développer les énergies renouvelables plutôt que le charbon. C'est encourageant.

Et quelle sera l'incidence sur le climat ?

V. M.-D. : À court terme, il est délicat de le prévoir. L'ensemble des études réalisées à partir des INDC de l'accord de Paris (en supposant une intensification de l'effort après 2030) suggère un bénéfice d'au moins 1 °C par rapport au « laisser-faire », ce qui est très important.

Quels risques la Maison Blanche fait-elle courir aux recherches américaines ?

V. M.-D. : Le projet de budget de la Maison Blanche est tragique pour plusieurs domaines de recherche, comme à l'EPA, à la Nasa, à la Noaa et à la NSF, puisqu'il prévoit des coupes sombres allant jusqu'à 40 % pour les sciences du climat et de l'environnement. Le désarroi de nos confrères américains s'est traduit dans l'importance de la Marche pour les sciences dans un pays où il est rarissime que les chercheurs manifestent. Tout va dépendre du vote du budget par le Congrès. Mes collègues sont extrêmement préoccupés, car tout est en jeu : leur emploi, les ressources essentielles pour travailler (moyens d'observations, de calcul) et leur attractivité pour les meilleurs étudiants du monde. Les décisions américaines pourraient remettre en cause la capacité à surveiller l'état du climat global et le partage mondial des jeux essentiels de données, tels les résultats des modèles de climat, qui permettent de comparer ces derniers. ■

GÉOSCIENCES

DES LAVES PLUS CHAUDES QUE PRÉVU

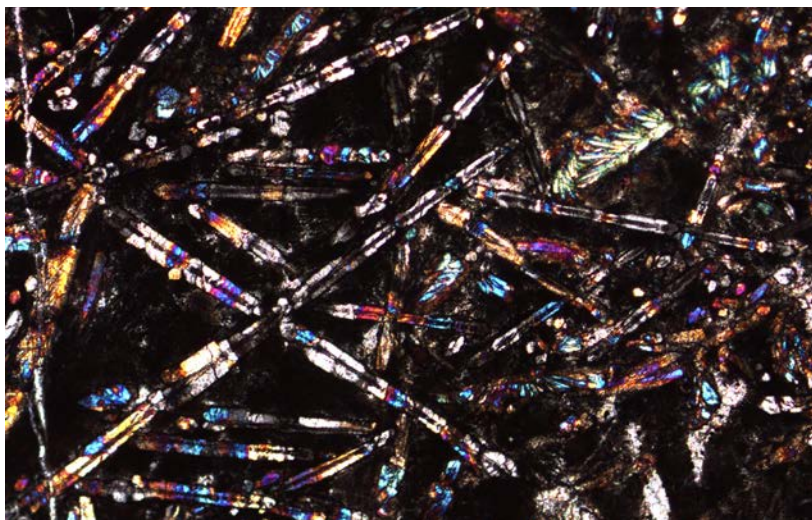
Depuis sa formation, la Terre s'est refroidie. Des géophysiciens ont pourtant découvert des roches de lave relativement récentes qui témoignent d'une température très élevée.

Quand la Terre était plus jeune, les éruptions déversant des millions de kilomètres cubes de lave et submergeant des régions entières étaient assez nombreuses. Ces épanchements de lave étaient dus à des panaches des remontées de roche du manteau terrestre – très chauds. Or, au cours du temps, avec le refroidissement de la Terre, ces épisodes se sont raréfiés. L'absence, dans les formations géologiques récentes, de certaines roches, les komatiites, est un témoin de cette baisse de température, car elles ne se forment qu'à partir de panaches atteignant au moins 1700 °C. Aujourd'hui, les éruptions basaltiques, qui prennent leur source dans le manteau supérieur, présentent des températures de l'ordre de 1300 °C. Les géophysiciens pensaient donc que les conditions pour former des komatiites n'étaient plus réunies depuis la fin de l'Archéen, il y a 2,4 milliards d'années. Or Jarek Trela, à Virginia Tech, aux États-Unis, et ses collègues, dont des chercheurs du laboratoire ISTerre à Grenoble, ont découvert de telles roches dans des laves âgées de moins de 90 millions d'années, à Tortugal, au Costa Rica.

Les komatiites sont des roches volcaniques qui contiennent des olivines spinifex, minéraux dont la forme évoque des épines. Elles tirent leur nom de la rivière Komati, en Afrique du Sud, où elles ont été caractérisées dans les années 1960. Ces roches sont typiques de l'Archéen et il est donc très étonnant d'en trouver des plus récentes. Ce qui soulève la question du modèle thermique de la Terre.

Lors de la formation de la planète, l'accrétion de débris a libéré de grandes quantités d'énergie qui ont entreteenu des océans de magma en surface et une température élevée à l'intérieur du globe. Depuis, la planète dissipe progressivement cette énergie dans l'espace. Sa température interne diminue donc, malgré la chaleur produite par la radioactivité naturelle et par la cristallisation du noyau.

Les roches volcaniques de Tortugal proviendraient d'un panache qui se déplace d'est en ouest (et qui correspond aujourd'hui au point chaud de l'archipel des îles Galápagos). Les chercheurs du laboratoire ISTerre ont



Cet échantillon de komatiite observé au microscope sous lumière polarisée met en évidence la forme caractéristique des olivines spinifex.

500 °C

AU DÉBUT DE L'ARCHÉEN, IL Y A 3,8 À 2,8 MILLIARDS D'ANNÉES, LA TEMPÉRATURE MOYENNE DU MANTEAU TERRESTRE AURAIT ÉTÉ SUPÉRIEURE D'ENVIRON 500 °C À CELLE D'AUJOURD'HUI.

analysé les teneurs en magnésium et en aluminium des komatiites jeunes trouvées au Costa Rica, teneurs qui constituent des indicateurs de la température et de la pression lors de la formation de ces roches. Elles se révèlent comparables à celles des komatiites de l'Archéen.

Ainsi, une température supérieure de plusieurs centaines de degrés à la moyenne règne par endroits dans le manteau. Comment l'expliquer? Il est difficile de penser qu'une région localisée du manteau ait pu conserver une température élevée, étant donné les mouvements de convection et la rapidité de la diffusion thermique.

Une explication possible serait que le panache prenne sa source à la frontière entre le noyau et le manteau, où la température pourrait excéder d'au moins 500 °C la température moyenne du manteau. D'après certains modèles numériques, la température de ces régions n'a peut-être pas beaucoup changé depuis l'Archéen. Si cette hypothèse se confirme, les jeunes komatiites découvertes seraient un témoin unique des conditions régnant à près de 2800 kilomètres de profondeur. ■

SEAN BAILLY

J. Trela et al., *Nature Geoscience*, vol. 10, pp. 451-456, 2017

DES PLANÈTES
EN FORME DE TORE

Simon Lock, de l'université Harvard, et Sarah Stewart, de l'université de Californie à Davis, ont imaginé un nouveau type d'objet planétaire. Si deux corps, de la taille de planètes et en rotation rapide se percutaient, ils formeraient une grande quantité de roche vaporisée conservant le mouvement de rotation initial. La planète résultante serait alors entourée d'un énorme nuage torique de débris. Les chercheurs ont nommé synestia un tel objet exotique.

DES CRATÈRES
SOUS L'ARCTIQUE

Dès de 100 cratères de diamètre compris entre 300 et 1 000 mètres ont été répertoriés sur le fond de la mer de Barents. Karin Andreassen, de l'université arctique de Norvège, explique comment ils sont nés. Le méthane remontant de réservoirs profonds s'est retrouvé bloqué sous la calotte de la dernière période glaciaire. Il s'est accumulé sous forme de glace d'hydrates. Puis, avec le retrait de la calotte il y a environ 12 000 ans, le gaz s'est subitement libéré et a formé les cratères, qui continuent de libérer du méthane.

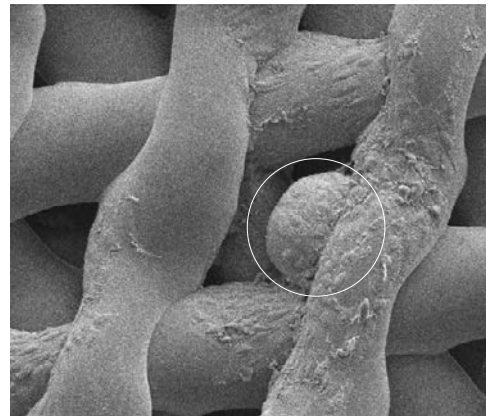
LE WIFI ESPION

En utilisant les émissions radio de votre wifi, un espion pourrait « voir » chez vous. Mais cette technique est difficile à mettre en œuvre du fait des réflexions des ondes sur les murs et autres objets. Il fallait modifier la gamme d'émission du wifi pour l'exploiter. Philipp Holl et Friedemann Reinhard, de l'université technique de Munich, ont trouvé le moyen d'utiliser le signal wifi habituel, dont le front d'onde est capté et traité comme un hologramme. Ils discernent alors l'environnement de la borne wifi. Les chercheurs envisagent déjà des applications industrielles. Les espions ont d'autres solutions, plus efficaces...

IMPRESSION 3D
D'OVAIRES

De nombreuses femmes subissent des traitements anticancéreux agressifs, qui se traduisent parfois par la destruction des cellules germinales. Cela conduit à une ménopause précoce, à la stérilité, et, pour les plus jeunes, à l'absence de puberté. C'est dans ce contexte que Monica Laronda, de l'université Northwestern à Chicago, et ses collègues ont mis au point l'impression 3D d'ovaires de synthèse qui, une fois ensemencés par des follicules ovariens (des ovules dans leur environnement cellulaire) et implantés chez des souris stérilisées, ont restauré l'ensemble des fonctions de ces organes.

Le tissu ovarien synthétique mis au point consiste en un réseau régulier de fibres de gélatine, qui offre des pores de taille et de géométrie optimisées pour la survie et la maturation des follicules. Non seulement les follicules ajoutés à cet organe artificiel sont correctement maintenus et se développent sans se déformer, malgré l'augmentation considérable de leur taille lors de la maturation, mais, de plus, en quelques jours, les chercheurs ont constaté *in vivo* chez la souris une revascularisation correcte de l'ovaire imprimé, permettant



Un follicule (cercle) observé au microscope six jours après avoir été implanté dans la matrice de l'ovaire artificiel.

tout particulièrement les échanges hormonaux entre les follicules et le reste de l'organisme.

Sans intervention médicamenteuse ou chirurgicale ultérieure, les souris ont pu ensuite produire des ovulations correctes, suivies par des gestations, naissances et lactations des souris, ce qui atteste de la pleine fonctionnalité des ovaires de synthèse. La transposition aux humains de ces travaux très prometteurs se heurte encore à des difficultés. Notamment, les ovaires sont plus grands et les follicules matures doivent migrer sur des distances plus grandes. ■

MARTIN TIANO

M. M. Laronda et al., *Nature Communications*, vol. 8, article n° 15261, 2017

MIEUX GÉNÉRER
DES NOMBRES ALÉATOIRES

Les techniques modernes de cryptographie utilisent des clés de chiffrement, de longues séquences de 0 et de 1. Si une clé n'est pas parfaitement aléatoire, un espion pourrait exploiter cette faiblesse pour accéder aux données chiffrées. Les équipes de Nicolas Brunner et Hugo Zbinden, de l'université de Genève, ont développé un système qui permet à l'utilisateur de contrôler en permanence la fiabilité des nombres aléatoires produits.

Pour engendrer des nombres aléatoires, une idée est d'utiliser des processus quantiques qui sont par essence aléatoires. Par exemple, certains dispositifs commercialisés envoient sur un miroir semi-réfléchissant des photons qui, au hasard, sans qu'on puisse prévoir le résultat, le traversent ou sont réfléchis. Il est cependant impossible de tester ces systèmes

a posteriori pour s'assurer que les nombres produits sont bien aléatoires. Or il peut être important de vérifier si l'appareil fonctionne mal en raison d'un défaut technique ou de l'usure.

Les chercheurs ont conçu un dispositif dans lequel on mesure l'état d'un système quantique. La mesure peut prendre les valeurs 0 ou 1, mais peut aussi produire un résultat indéterminé. L'occurrence de ces derniers cas ne peut être anticipée et est donc un phénomène quantique parfaitement aléatoire. En analysant la distribution des cas indéterminés, il est possible de vérifier en temps réel que le dispositif produit bien des nombres au hasard. ■

S. B.

J. Bohr Brask et al., *Physical Review Applied*, vol. 7, article 054018, 2017

EN IMAGE

LA SONDE JUNO DÉVOILE LE PÔLE SUD DE JUPITER

Le 4 juillet 2016, la sonde *Juno* s'est mise en orbite autour de Jupiter. Grâce à sa caméra couleur, *JunoCam*, elle nous renvoie des images impressionnantes de la plus grande planète du Système solaire. Dans les régions polaires, la structure en bandes si caractéristique de Jupiter laisse la place à une région aux couleurs plus sombres, comportant des éléments ovales plus clairs. Ceux-ci ont été identifiés comme étant des cyclones qui dépassent parfois 1 000 kilomètres de diamètre. En outre, ces tempêtes sont parfois très proches les unes des autres. Les cyclones polaires de Jupiter soulèvent bien des questions. Comment se forment-ils ? Sont-ils stables ou transitoires ? *Juno* apportera peut-être des réponses dans les années à venir.

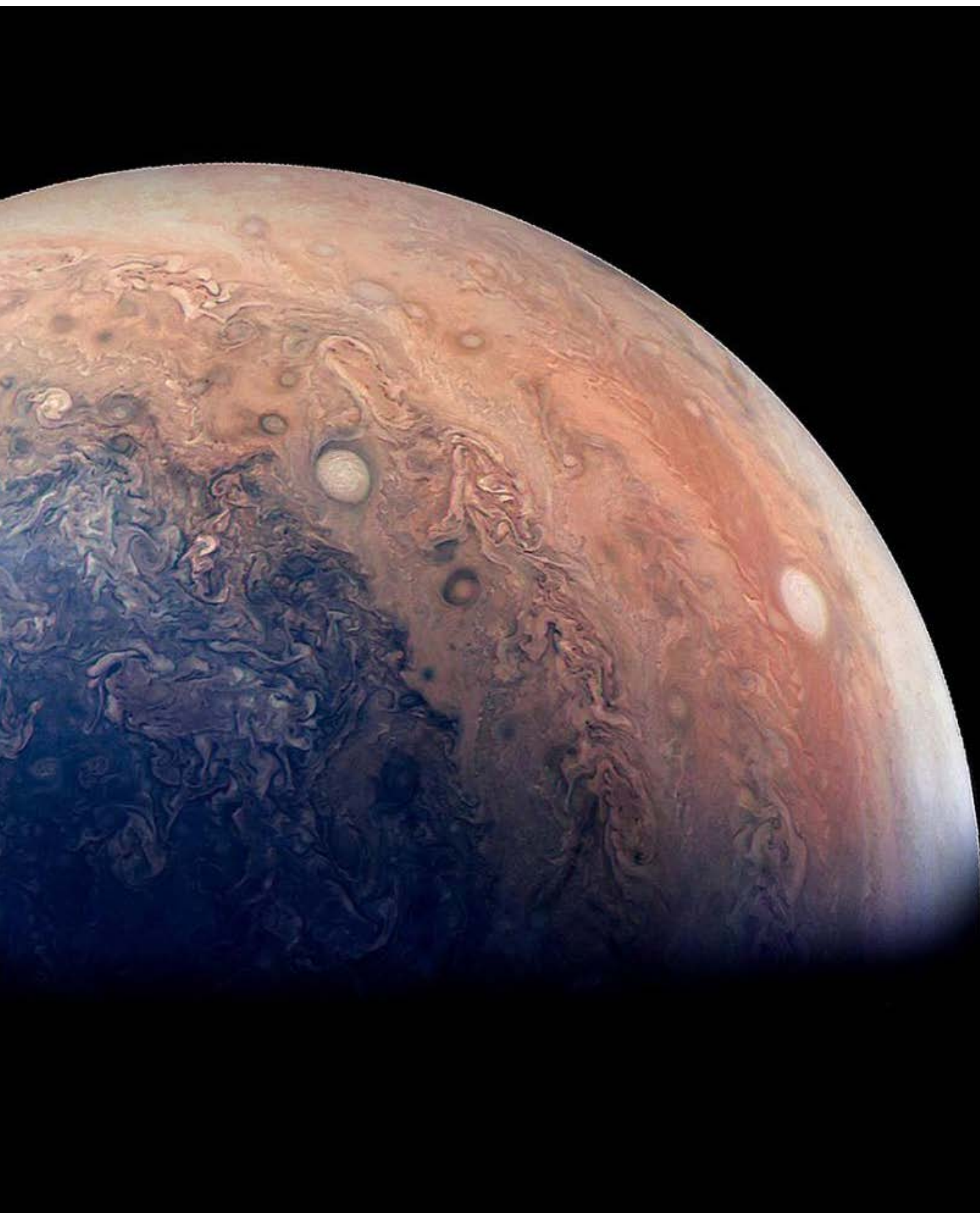
Grâce aux instruments de la sonde, les chercheurs ont aussi pu étudier l'atmosphère dans sa profondeur ou encore le champ magnétique de la planète. Celui-ci dépasse en intensité tous ceux des autres planètes du Système solaire. Les données de *Juno* montrent qu'il est même 1,5 fois plus intense qu'estimé auparavant. Selon les chercheurs, cela signifie que le champ magnétique se formerait plus près de la surface qu'on ne le supposait. Par ailleurs, les aurores sur Jupiter se produiraient par un mécanisme très différent de celui à l'œuvre sur Terre : les particules chargées viendraient de la planète et non de l'espace.

Ce mois-ci, le 11 juillet, la sonde survolera l'énigmatique et fameuse Grande Tache rouge, gigantesque anticyclone qui s'étend sur plus de 10 000 kilomètres (*non visible sur la photo ci-contre*). Les instruments sonderont l'intérieur de cette tempête géante afin de mieux en comprendre la dynamique. ■

S. B.

S. J. Bolton *et al.*, *Science*, vol. 356, pp. 821-825, 2017
J. E. P. Connerney *et al.*, *ibidem*, pp. 826-832





© NASA/JPL-Caltech/SwRI/MSSS/Gabriel Fiset

BIOLOGIE ANIMALE

CHENILLES SANS MICROBIOTE

L'intestin de nombreux animaux est habité par une vaste population de microorganismes, le microbiote intestinal. Ce dernier semble indispensable, car son absence entraîne des maladies chez l'hôte. Il joue notamment un rôle dans la décomposition de certains aliments. Or on signale des cas de plus en plus nombreux d'espèces vivant très bien sans microbiote. Une étude de Tobin Hammer, de l'université du Colorado, et de ses collègues portant sur 124 espèces de chenilles américaines l'illustre.

Ces biologistes ont analysé la matière fécale des insectes pour y répertorier des traces d'ADN caractéristique des microorganismes d'un microbiote. Les concentrations mesurées étant très faibles, cela suggérerait l'absence de microbiote. Pour le confirmer, les chercheurs ont donné des antibiotiques aux chenilles afin de tuer tout microbiote potentiel et de voir si la santé des insectes était affectée. Cela n'a pas été le cas.

Dès lors, comment les chenilles font-elles pour assimiler la nourriture alors que tant d'autres espèces sont dépendantes de leur microbiote ? Matan Shelomi, de l'institut Max-Planck d'écologie chimique, à Iéna, en



Cette chenille de papillon monarque (*Danaus plexippus*) serait dépourvue de microbiote.

Allemagne, a montré que les phasmes sont capables de décomposer la pectine – une fibre végétale – sans l'aide de microorganismes, et ce grâce à des gènes présents dans leur ADN. Ces insectes auraient acquis ces derniers à partir de bactéries, au cours de leur histoire évolutive.

Combien d'espèces seraient dans cette situation ? Les chercheurs n'en sont qu'au début de ce recensement, mais il existe des indices suggérant que certains vertébrés (oiseaux, poissons) sont eux aussi concernés. ■

S. B.

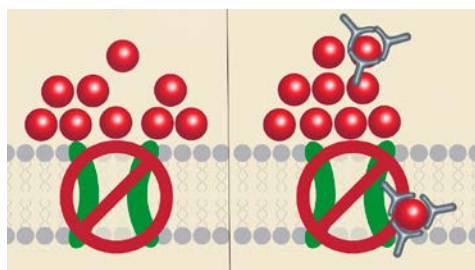
T. J. Hammer et al., prépublication bioRxiv, 30 avril 2017
<http://biorxiv.org/content/early/2017/04/30/132522>

BIOCHIMIE

TRANSPORT DU FER RESTAURÉ

Le fer étant indispensable à l'organisme, le dysfonctionnement de protéines qui transportent cet élément à travers les membranes cellulaires provoque des maladies telles que des anémies congénitales ou des hémochromatoses. Anthony Grillo, de l'université de l'Illinois, et ses collègues ont montré que l'hinokitiol, une molécule extraite d'huiles essentielles de certains conifères, restaure le transport du fer à travers les membranes cellulaires.

Les ions ferreux (Fe^{2+}) et ferriques (Fe^{3+}) présents dans les organismes sont des espèces hydrophiles, contrairement aux membranes cellulaires, qui sont hydrophobes (car formées surtout de lipides). En l'absence de protéines transmembranaires adaptées, ils ne peuvent ainsi pas traverser les membranes. Cependant, certaines molécules, comme l'hinokitiol, sont susceptibles



Si les protéines transmembranaires (en vert) sont déficientes, le fer (en rouge) ne traverse pas la membrane (en gris). Mais il en est capable s'il est associé à l'hinokitiol (à droite).

de se lier à ces ions et de former un complexe plus lipophile, capable de traverser.

Les chercheurs ont testé *in vivo* l'action de l'hinokitiol sur des souris modèles. Ils ont constaté que cette molécule a rétabli l'absorption de fer par voie intestinale et la formation d'hémoglobine. ■

M. T.

A. S. Grillo et al., *Science*, vol. 356, pp. 608-616, 2017

L'ANTIMATIÈRE DE LA VOIE LACTÉE

Les régions centrales de la Galaxie émettent un fort rayonnement gamma produit par l'annihilation de matière et d'antimatière. Mais d'où vient cette dernière ? Grâce à de nouvelles données, Roland Crocker, de l'université australienne de Canberra, et ses collègues proposent un scénario : la fusion de paires de naines blanches produit une supernova avec la formation de titane 44, qui se désintègre en scandium 44 puis en calcium 44 avec émission d'un positron, l'antiparticule de l'électron.

T. REX : PLUMES OU ÉCAILLES ?

Depuis que l'on sait que des dinosaures avaient des plumes, la mode s'est répandue d'en affubler aussi *Tyrannosaurus rex*. Toutefois, Scott Persons, de l'université de l'Alberta, et des collègues ont voulu en avoir le cœur net en étudiant les morceaux de peau fossilisée attribués à *T. rex*. N'ayant pas trouvé la moindre trace de plume, ils concluent que *T. rex* était couvert d'écailles, sauf peut-être sur le dos, puisqu'aucun morceau dorsal de peau de tyrannosaure n'est connu dans le registre fossile.

ÉTENDRE DE 5 % LES ZONES PROTÉGÉES

La biodiversité est souvent évaluée par le seul nombre d'espèces. Pour Laura Pollock, de l'université de Grenoble, et ses collègues, il faut aussi prendre en compte l'histoire évolutive et la fonction écologique des animaux. Avec ces trois critères, les chercheurs ont estimé que seules 26 % des espèces d'oiseaux et de mammifères sont présentes dans des zones protégées. Et qu'une augmentation de 5 % de la superficie de ces espaces dans certaines régions, telles que les Andes, Madagascar et l'Asie du Sud-Est, permettrait de multiplier par trois le nombre d'espèces protégées.

VIN ET CERVEAU

À dose modérée, le vin pourrait ralentir le déclin cognitif lié à l'âge ou aux maladies neurodégénératives. Comment ce breuvage protège-t-il les neurones ? Pour le comprendre, l'équipe de Victoria Moreno-Arribas, de l'Institut de recherche en sciences de l'alimentation, à Madrid, s'est intéressée aux métabolites produits par la digestion du vin et capables de passer de la circulation sanguine au cerveau.

Les chercheurs les ont mélangés à des cultures de cellules humaines soumises à des stress chimiques, qui reproduisent les conditions d'une inflammation cérébrale. De telles inflammations surviendraient lors du vieillissement ou des maladies neurodégénératives, déclenchant des cascades de réactions qui accélèrent la mort neuronale. Les métabolites ont bloqué ces réactions à différents niveaux, ce qui a amélioré la survie des neurones. ■

GUILLAUME JACQUEMONT

Frontiers in Nutrition, vol. 4, article 3, 2017

PALÉOANTHROPOLOGIE

UN HOBBIT SUD-AFRICAIN ?

En 2015, l'équipe de Lee Berger, de l'université du Witwatersrand en Afrique du Sud, découvrait ce qui ressemble à un cimetière d'hominines à petits cerveaux. Comme cette extraordinaire concentration de fossiles d'*Homo naledi*, espèce jusque-là inconnue, se trouvait dans une grotte, il n'était pas possible de la dater rapidement. Mais, estimant d'après ses caractéristiques que cet humain était très ancien, ses découvreurs ont aussitôt conjecturé que l'habitude des hommes d'enterrer leurs morts est venue très tôt.

La datation, désormais faite, donne un âge de seulement 300 000 ans. C'est peu pour une espèce d'apparence aussi archaïque, mais ses découvreurs continuent d'attribuer à *H. naledi* de l'importance au sein du genre *Homo*, et donc à donner une place éminente à l'Afrique australe dans l'évolution humaine; leurs confrères, partisans de l'Afrique de l'Est, voient plutôt dans *H. naledi* une sorte d'impasse évolutive comparable au petit Homme de Florès, en Indonésie... ■

E.S.

P. Dirks et al., eLife, en ligne le 9 mai 2017

LA COCCINELLE, REINE DE L'ORIGAMI



La coccinelle peut rapidement plier ou déplier ses ailes afin de voler et échapper à un prédateur. Le mécanisme de repliement des ailes pourrait inspirer les industriels.

Les coccinelles sont des insectes très mobiles, alternant rapidement entre la marche et le vol. Pour ce faire, elles doivent pouvoir déployer, ou rétracter, en un temps très court leurs longues ailes membraneuses cachées sous les élytres. Lors de précédentes études, des chercheurs avaient suggéré que les mouvements de l'abdomen contribuaient à replier les ailes, mais sans pouvoir expliquer comment le pliage complexe des ailes était réalisé. En effet, le processus est difficile à observer, car les coccinelles replient leurs ailes après la fermeture des élytres, qui sont opaques. Une équipe japonaise menée par Kazuya Saito, de l'université de Tokyo, a créé des élytres transparents qu'elle a substitués sur le dos d'un insecte. À l'aide de caméras ultrarapides, ces chercheurs ont confirmé le rôle du mouvement de l'abdomen. Par une combinaison de mouvements de l'aile et de pression de l'abdomen sur les élytres, dont la courbure est adaptée à la forme des nervures de l'aile, cette dernière se replie une première fois longitudinalement, puis plusieurs fois dans l'autre direction.

En outre, des questions se posaient sur la capacité des ailes à être tantôt souples pour qu'elles se rangent sous les élytres, tantôt rigides pour voler. Par microtomographie, les chercheurs ont étudié de près la structure tridimensionnelle de l'aile. Kazuya Saito et ses collègues ont constaté que les nervures alaires présentent un profil courbé similaire à celui des mètres à ruban rétractable. Cette courbure crée de la rigidité lorsque l'aile est déployée pour voler. Mais, aplatie, l'aile devient souple et peut se plier. Ces résultats inspireront peut-être les techniques spatiales de déploiement de panneaux solaires, ou des applications à des objets plus quotidiens tels que les parapluies. ■

S.B.

K. Saito et al., PNAS, vol. 114(22), pp. 5624-5628, 2017

MÉDECINE

CELLULES FOÉTALES À LA RESCOUSSE

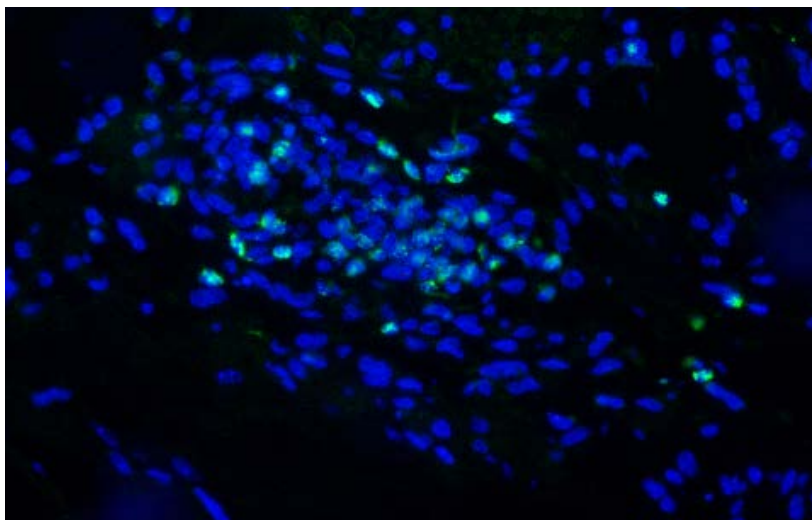
Une souris qui a eu des petits conserve dans son corps des cellules fœtales. Lorsqu'elle se blesse, ces cellules s'activent et aident la cicatrisation. On sait maintenant comment.

Soigner des femmes avec les cellules de leurs enfants? Non, il ne s'agit pas de les prélever et de les injecter à leur mère, mais de réveiller les cellules fœtales qui, durant la grossesse, passent dans son corps et se nichent dans sa moelle osseuse. Depuis une vingtaine d'années, on sait que les femmes qui ont été enceintes gardent de telles cellules pendant plus de cinquante ans et probablement toute leur vie. Lors d'une blessure cutanée, ces cellules s'activent et viennent en renfort de celles habituellement mobilisées. L'équipe de Sélim Aractingi, de la faculté de médecine Paris-Descartes et du centre de recherche Saint-Antoine (Inserm UMRS 938), à Paris, a mis en évidence le signal qui les réveille.

Plusieurs types de cellules coopèrent dans la réparation d'une plaie cutanée: des cellules immunitaires sont vite recrutées et arrivent dans la plaie; des fibroblastes, les cellules qui sécrètent les composants de la matrice extracellulaire, tel le collagène, se multiplient. Enfin, les cellules souches cutanées de la zone lésée, issues de la couche la plus profonde de l'épiderme, s'activent et migrent pour recouvrir la région mise à nu; et dans le même temps, de nouveaux capillaires sanguins se forment, irriguant le tissu en régénération, condition indispensable à tous ces phénomènes.

C'est dans la production de capillaires sanguins – l'angiogenèse – que les cellules de la moelle osseuse interviennent. Ce tissu contient un réservoir de cellules progénitrices endothéliales. Il s'agit de cellules souches, c'est-à-dire non spécialisées, entrées dans une première étape de différenciation en cellules endothéliales, qui tapissent la paroi interne des vaisseaux sanguins. Lors d'une blessure cutanée, elles sont recrutées dans la région lésée, où certaines contribuent à l'angiogenèse tandis que d'autres sécrètent une molécule (un facteur de croissance) qui recrute d'autres cellules de la moelle osseuse.

L'équipe de Sélim Aractingi a étudié en détail ce qui se produit chez des souris enceintes ou *post-partum*. Afin de repérer les cellules fœtales, les chercheurs ont accouplé des femelles avec des mâles modifiés génétiquement pour produire une protéine fluorescente. Ils ont ensuite analysé l'expression des gènes de ces cellules



Chez une souris enceinte, des cellules fœtales (en vert) viennent en renfort pour soigner une plaie cutanée (en bleu, les autres cellules en action dans la région lésée).

6 000

CELLULES FOÉTALES ENVIRON SONT RECRUTÉES APRÈS INJECTION DE LA PROTÉINE CCL2 DANS LES PLAIES DES SOURIS MÈRES, CE QUI SUFFIT À LES SOIGNER. PAR COMPARAISON, CHEZ L'HUMAIN, UNE THÉRAPIE CELLULAIRE CUTANÉE NÉCESSITE L'INJECTION DE MILLIONS DE CELLULES SOUCHES ISSUES DE LA PEAU DU PATIENT.

issues de souris femelles enceintes qui avaient subi ou non une blessure cutanée.

La pêche s'est révélée fructueuse. Les cellules fœtales des souris blessées étaient très enrichies en un récepteur de la membrane cellulaire nommé Ccr2. Les chercheurs ont aussi explicité son rôle: très vite après une blessure, les cellules endothéliales et les macrophages (des cellules immunitaires) sur place sécrètent une protéine nommée Ccl2, qui n'est autre que le principal ligand du récepteur. Cette protéine déclenche une voie de signalisation qui recrute les cellules fœtales exprimant Ccr2 jusqu'à la plaie, où elles se différencient et assemblent de nouveaux vaisseaux sanguins.

De plus, il suffit d'injecter de faibles doses de Ccl2 dans les plaies des souris, même longtemps après les naissances, pour que les cellules fœtales de la moelle osseuse y soient recrutées. «Injecter Ccl2 permet d'accroître la population de cellules fœtales mobilisée par la plaie», explique Sélim Aractingi, qui espère que cette approche aidera à soigner non seulement les plaies cutanées chroniques, mais aussi d'autres organes. Reste à savoir si ces résultats seront transposables aux femmes... ■

MARIE-NEIGE CORDONNIER

M. Castela et al., *Nature Communications*, 18 mai 2017

L'AUDITION DES PREMIÈRES BALEINES

Les baleines à fanons sont sensibles aux infrasons tandis que les baleines à dents utilisent des ultrasons pour l'écholocation. Étant donné ces caractéristiques si distinctes, quelles étaient celles de leurs ancêtres communs, les protocètes ? Mickaël Mourlam et Maeva Orlia, de l'Institut des sciences de l'évolution de Montpellier, ont reconstitué en 3D la cochlée des premières baleines. Et concluent que ces animaux n'étaient sensibles ni aux ultrasons, ni aux infrasons. Ces spécialisations seraient apparues plus tard.

PLUS DE PLUIES EXTRÊMES AU SAHEL

Si le Sahel a connu de fortes sécheresses dans les années 1970 et 1980, les précipitations y ont augmenté depuis, mais sous la forme de pluies extrêmes. Les modèles suggèrent que le réchauffement climatique s'accompagne d'une intensification du cycle de l'eau. Mais la température ayant peu augmenté au Sahel, comment expliquer ces pluies ? Françoise Guichard, du CNRM, et ses collègues mettent en cause l'importante hausse des températures au Sahara voisin.

DJ-1 RÉPARE L'ADN ENDOMMAGÉ

Les glyoxals, des dérivés toxiques du glucose, peuvent se lier à la guanine, l'une des quatre bases de l'ADN. Dès lors, au lieu de s'apparier avec une cytosine, la guanine endommagée s'associe à une thymine, une adénine ou une autre guanine. D'où une mutation dans la séquence d'ADN, qui peut être à l'origine d'un cancer. Gilbert Richarme, de l'Institut Jacques-Monod, à Paris, et son équipe ont montré qu'un antiparkinsonien, la molécule DJ-1, répare la guanine endommagée en dégradant le glyoxal fixé sur elle.

LAVAU RÉVÈLE L'ART CELTIQUE

L'art celtique plaît par son mystérieux symbolisme. Il apparaît brusquement au début du second âge du Fer sous la forme de ce que les historiens de l'art nomment le « premier style celtique ». Auparavant, les cours princières du premier âge du Fer importaient ou faisaient imiter des biens étrusques ou grecs, de sorte que le premier style semble avoir surgi de nulle part. Est-ce vraiment le cas ? En étudiant le contenu d'une tombe de la fin du premier âge du Fer découverte à Lavau, en Champagne, une équipe du Centre de recherche et de restauration des musées de France (C2RMF) a trouvé deux détails prouvant que non.

Fouillée en 2015, cette tombe du milieu du ^{ve} siècle avant notre ère est typique des tombes princières champenoises : sa chambre funéraire de 14 mètres carrés contenait un défunt masculin richement habillé, couché sur son char et accompagné d'un abondant mobilier de luxe. Par radiographie, tomographie et autres méthodes méticuleuses, les chercheurs du C2RMF ont révélé de nombreux aspects du mobilier funéraire. Toutefois, ce sont deux détails peu visibles qui les ont intéressés le plus : en radiographiant la masse de terre prélevée dans la tombe là où se trouvait la ceinture du défunt, ils ont découvert un fin entrelacs de fils d'argent formant une frise continue



Le parement d'or (intact) de cette agrafe de fer (oxydée) porte un décor dont le motif est typiquement celtique.

de motifs celtiques ; par ailleurs, après avoir dégagé l'ornementation en or d'une agrafe de fer, ils ont aussi découvert un décor à motifs celtiques. De tels détails peuvent sembler anodins ; mais en réalité, ils relèvent du premier style celtique. Les études réalisées au C2RMF sur des objets qui semblaient perdus dans la tombe nous montrent ainsi que l'art celtique était déjà discrètement présent au premier âge du Fer, peu avant de s'épanouir au second. Les Celtes étaient déjà eux-mêmes avant que leur art ne devienne celtique, pourrait-on dire... ■

P. S.

http://bit.ly/PLS477_Lavau

EXTINCTIONS EXPLIQUÉES

Il y a 200 millions d'années, à la fin du Trias, 60 % des espèces disparaissaient. Les géologues soupçonnent des éruptions massives basaltiques d'être à l'origine de cette grande extinction, mais les preuves manquaient. Autour de Urs Schaltegger, une équipe de l'université de Genève propose une solution à cette énigme. Elle s'est concentrée sur la Province magmatique de l'Atlantique central, une grande région volcanique datant des débuts de l'ouverture de l'Atlantique. En étudiant ses vestiges, présents du sud de l'Europe à l'Afrique et de l'Amérique du Nord à celle du Sud, ils ont décelé les traces de gigantesques remontées magmatiques le long de fissures verticales profondes (dykes). De quand datent-elles ? Pour le savoir, les géologues ont daté par l'horloge radiométrique uranium-plomb des grains microscopiques de zircon, qui



La colline de Foum Zguid, au Maroc, est un vestige des gigantesques remontées magmatiques de la fin du Trias.

constituent des capsules temporelles tant ce minéral est stable. Verdict : les remontées basaltiques repérées précèdent de peu l'extinction de masse ; cette dernière serait donc due aux grandes éruptions qu'elles ont déclenchées. ■

P. S.

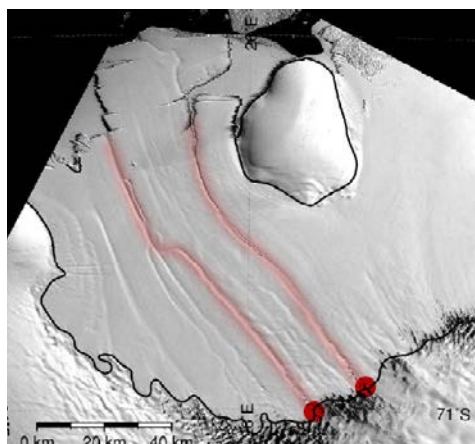
J. Davies et al., *Nature Communications*, en ligne le 31 mai 2017

GLACIOLOGIE

DES ESKERS EN ANTARCTIQUE

Parce que la pression de la glace diminue juste avant qu'elles ne débouchent du glacier, les rivières sous-glaciaires ralentissent et déposent les sédiments qu'elles charrient. Résultat, une fois le glacier retiré, les portions en aval de ses tunnels tout juste disparus sont moulées en sédiments sous la forme de longues buttes hémicylindriques. Ces structures – les eskers – n'avaient été observées à ce jour qu'en aval de glaciers de montagne ou dans les anciens paysages glaciaires. Une équipe conjointe de l'université libre de Bruxelles et de l'Académie bavaroise des sciences vient d'en découvrir sous un glacier antarctique, dans une zone où la pression de la glace diminue aussi parce que les masses de glace atteignant la mer commencent à flotter, formant ce que l'on nomme la plateforme du Roi Baudouin.

Les chercheurs ont examiné au radar certains des sillons sous-jacents à cette plateforme et ils ont montré qu'ils sont prolongés à terre par des chenaux remplis de sédiments qui gênent le passage de l'eau de fonte du glacier. Ils interprètent ces structures comme des eskers actifs, c'est-à-dire de longs bouchons sédimentaires, dont la présence dans les tunnels sous-glaciaires presse le flux d'eau le long des



Les sillons (en rouge) de la plateforme du Roi Baudouin ont guidé les chercheurs jusqu'aux eskers actifs.

parois et augmente ainsi leur fonte, ce qui élargit les chenaux et, par là, entraîne davantage de dépôts sédimentaires... En Scandinavie, les eskers qui marquent les paysages formés par la dernière déglaciation mesurent plusieurs kilomètres de long et 10 à 20 mètres de haut et de large. L'un de ceux que les chercheurs ont mis en évidence en amont de la plateforme du Roi Baudouin mesure pour sa part 300 mètres de large pour 250 mètres de haut et 2 kilomètres de long... ■

P.S.

R. Drews et al., *Nature Communications*, en ligne le 9 mai 2017

NEUROSCIENCES

DES BIENFAITS DU CANNABIS

Les effets du cannabis dépendent-ils de l'âge? L'équipe d'Andreas Zimmer, de l'université de Bonn, a étudié l'impact de faibles doses de tétrahydrocannabinol (THC), la substance active du cannabis, sur les performances cognitives de souris jeunes et adultes.

Les chercheurs ont comparé le temps mis par des souris à trouver un abri dans un labyrinthe plein d'eau. Les souris adultes réussissaient le test plus lentement que les jeunes. Cependant, des souris adultes traitées avec du THC amélioreraient leur temps au point de rivaliser avec les jeunes. En revanche, le THC diminue les performances cognitives des jeunes souris, comme on l'observe aussi chez les jeunes humains.

Chez les souris âgées traitées au THC, les chercheurs ont noté que les neurones de l'hippocampe, une zone cruciale de l'apprentissage,



Le THC contenu dans les plantes de cannabis aurait un effet bénéfique sur les performances des souris âgées.

avaient plus d'épines dendritiques, zones de contact avec d'autres neurones.

Le THC serait-il un remède anti-âge pour l'humain? Pas sûr. Les chercheurs ont jusqu'à présent peu étudié les effets du cannabis chez les personnes âgées, s'étant surtout focalisés sur son impact chez les jeunes. ■

S.B.

A. Bilkei-Gorzo et al., *Nature Medicine*, en ligne 8 mai 2017

EN BREF

SESAME, UN PROJET POUR LA PAIX

Le 16 mai dernier, Chypre, l'Égypte, l'Iran, Israël, la Jordanie, le Pakistan, l'Autorité palestinienne et la Turquie ont inauguré le synchrotron Sésame installé en Jordanie. Ce centre a pour vocation de favoriser la recherche et la coopération scientifique au Moyen-Orient. Depuis son lancement en 1999 sous l'égide de l'Unesco, ce projet a démontré qu'il est possible de monter de grands chantiers scientifiques malgré les défis financiers et géopolitiques de la région. Le synchrotron, de troisième génération, est constitué d'un accélérateur d'électrons fournissant une source de rayons X à 2,5 gigaelectronvolts. Physique des matériaux, médecine, archéologie, etc., les applications sont diverses. Des centaines de chercheurs des universités et centres de recherche du Moyen-Orient auront accès à ces installations d'ici à la fin de l'année.

CLAIRE VOISIN, PRIX SHAW 2017



La mathématicienne, spécialiste de la conjecture de Hodge et lauréate de la médaille d'or du CNRS en 2016, vient d'être récompensée du prix Shaw pour l'ensemble de ses contributions essentielles en géométrie algébrique. Elle le partage avec János Kollár, de l'université Princeton. Chaque année, ce prix est décerné à des scientifiques dans les domaines de l'astronomie, des mathématiques et des sciences biologiques et médicales. Il a été créé en 2004 par le magnat des médias hongkongais Run Run Shaw.

VOTE EXTRÊME ET ENFANCE

Lou Safra et ses collègues, à l'Inserm et à l'ENS de Paris, ont montré que plus on a grandi dans un milieu pauvre, plus on a tendance à voter pour des personnes à l'apparence autoritaire. Les chercheurs ont ainsi demandé à des volontaires leur impression face à des visages de personnalités politiques fictives modélisés par ordinateur et calibrés pour exprimer plus ou moins de dominance et inspirer plus ou moins confiance. Par rapport aux individus ayant connu des jours meilleurs, les personnes ayant grandi dans la pauvreté, quels que soient leur éducation et leur niveau de vie actuel, choisissaient plus souvent les visages dominants et qui inspiraient peu confiance. Une raison de plus de lutter contre les inégalités et d'assurer de bonnes conditions de vie aux enfants. ■

BÉNÉDICTE SALTHUN-LASSALLE

L. Safra et al., *Evolution and Human Behavior*, mai 2017

ET DE TROIS POUR LIGO!

La collaboration *Ligo-Virgo* a annoncé une nouvelle détection d'ondes gravitationnelles, enregistrées le 4 janvier 2017. Comme pour les deux premiers signaux captés fin 2015, la fusion de deux trous noirs massifs (respectivement 31,2 et 19,4 masses solaires) en est à l'origine.

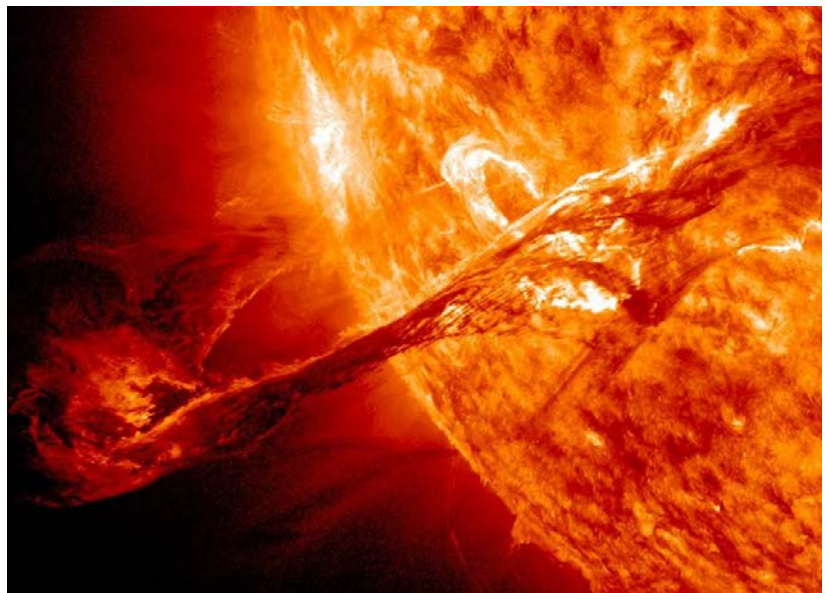
La gamme de masses des deux astres est compatible avec ce qu'on attend pour des trous noirs primordiaux formés dans les premiers moments de l'Univers. Ces objets ont un intérêt cosmologique, car ils pourraient contribuer de façon significative à la matière noire qui représente un quart du contenu du cosmos.

Les interféromètres de *Ligo* devraient continuer à enregistrer des données jusqu'à la fin de l'été. Les installations seront alors arrêtées pour procéder à des améliorations afin d'augmenter la sensibilité des détecteurs. Par ailleurs, l'interféromètre *Virgo*, situé près de Pise, en Italie, commencera bientôt à collecter des données. ■

S. B.

B. P. Abbott et al., *Phys. Rev. Lett.*, vol. 118, article 221101, 2017

ANTICIPER LES ÉRUPTIONS SOLAIRES



Lors d'une éruption solaire, des particules de haute énergie sont émises. Celles qui atteignent la Terre peuvent mettre en danger la vie des astronautes, d'où l'intérêt de prévoir de tels événements.

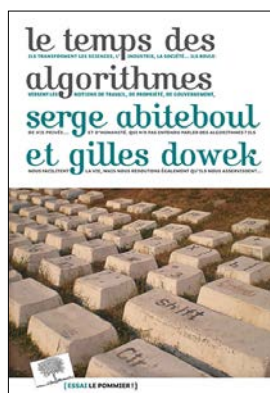
Les éruptions du Soleil sont l'un des phénomènes les plus violents du Système solaire. Elles se produisent lors de la reconfiguration brutale du champ magnétique de l'étoile, qui propulse de grandes quantités de particules à haute énergie et de matière sous forme de plasma. En arrivant dans le voisinage de la Terre, ces projections peuvent perturber les dispositifs électroniques, les satellites, voire menacer la vie des astronautes sur la *Station spatiale internationale*. Il est cependant difficile d'anticiper ces phénomènes : actuellement, la fiabilité des prévisions ne dépasse pas 40%. Étienne Pariat, du Lesia (observatoire de Paris et CNRS), et ses collègues ont proposé une nouvelle méthode qui améliore ces prévisions.

Les chercheurs ont étudié plusieurs simulations tridimensionnelles qui reproduisent la formation de tubes de flux magnétique à la surface du Soleil et qui conduisent, ou non, à une éruption. Ils ont examiné différentes grandeurs mesurées dans chaque scénario afin de déterminer lesquelles pourraient servir d'indicateur du risque d'éruption. Ni l'énergie magnétique ni l'hélicité magnétique globale, qui caractérise le niveau d'entortillement du champ magnétique, ne se sont révélés pertinents. En revanche, le suivi de certaines composantes de cette hélicité serait utile pour prévoir une éruption. L'évolution au cours du temps de leur amplitude est très différente selon qu'une éruption est en préparation ou non. Avec ces grandeurs mesurables en observant le Soleil, il est possible de définir un critère qui, s'il atteint un certain seuil, signale le risque d'une éruption solaire.

Il reste à tester ces résultats théoriques. Cela pourrait être réalisé dans le cadre du projet européen Flarecast, un système automatique de prévision des éruptions solaires qui sera opérationnel d'ici à la fin de l'année 2017. ■

S. B.

E. Pariat et al., *Astronomy and Astrophysics*, vol. 601, A125, 2017



PSYCHOLOGIE

LA MÉMOIRE SANS SOUVENIR
Antoine Lejeune et Michel Delage

Odile Jacob, 2017
336 pages, 25,90 euros

La première chose qui surprend dans ce livre, c'est son titre, puisque mémoire et souvenir sont souvent considérés comme des quasi-synonymes. Pourtant, il n'en est rien. Le souvenir est une expérience consciente quand d'autres formes de mémoire sont implicites, inconscientes : des savoir-faire, des habitudes, des traces oubliées des premières expériences de vie, notamment, sont stockées dans notre cerveau et influencent secrètement nos réactions.

Coécrit par un neurologue et un psychiatre, cet ouvrage évoque tour à tour ces différentes formes de mémoire à partir de sources diverses. L'étude des animaux, des jeunes enfants ou des victimes de lésions cérébrales, de même que les recherches fondées sur les nouvelles techniques d'imagerie cérébrale, sont de ce point de vue riches d'enseignement. Le concept de mémoire implicite n'est pas nouveau, mais ce qui est intéressant ici, c'est la synthèse réalisée entre les écoles. Les thèses de la psychologie cognitive et des neurosciences côtoient ainsi celles de la psychanalyse.

Cette ouverture audacieuse jette une lumière nouvelle sur certaines théories. À travers la notion de « mémoire heureuse », par exemple, les auteurs développent l'idée que nos premières expériences positives (berceuses, jeux avec la mère...) contribuent à forger une attitude globale ouverte et confiante envers la vie, même si nous n'en avons aucun souvenir conscient. La mémoire implicite stockerait alors « la forme de l'expérience » [un sentiment de joie, de contentement] plutôt que son contenu, de la même façon que nous pouvons nous souvenir de la forme d'un flacon, sans avoir gardé en mémoire ce qu'il contenait.

L'intérêt de ce livre est donc double : il fournit un large panorama des connaissances actuelles sur la mémoire et il lance de multiples pistes de réflexion, qui ne manqueront pas d'inspirer public, thérapeutes et chercheurs.

FRANCIS EUSTACHE /
EPHE/UNIVERSITÉ DE CAEN

MATHÉMATIQUES

INSOLUBLE MAIS VRAI !
David Louapre

Flammarion, 2017
192 pages, 18 euros

La recherche est une montagne dont le sommet est inaccessible et dont les chercheurs parcourent les pentes ardues. Ainsi, la quête est infinie et quand un itinéraire débouche sur un obstacle, la certitude de la vérité (en attendant la prochaine pierre d'achoppement) qui est derrière constitue un défi attrayant. L'ouvrage de David Louapre, un recueil de questions pour le moment sans réponse est une indéniable réussite : nous y comprenons les problèmes non résolus grâce aux excellentes analogies de l'auteur qui expliquent le paysage de recherche actuellement visible et la brume entourant la voie.

Et quelle diversité de sujets ! Pourquoi dormons-nous ? D'où vient la langue basque ? Que s'est-il passé avant le Big Bang ?... Ces questions sont naturelles, d'autres plus délicates : pourquoi n'existe-t-il pas d'éléments superlourds au-delà de la masse atomique 118, le dernier élément fugace synthétisé à grand renfort d'énergie ? Parce que, semblerait-il, la vitesse des électrons les plus près du noyau dépasserait la vitesse de la lumière. Ce qui repose la question du seuil représenté par la vitesse de la lumière.

Beaucoup d'interrogations portent sur les mystères des nombres, qui justifient pleinement le titre. Certaines propriétés sont infiniment probables selon l'examen de tous les exemples où elles s'appliquent, mais ne sont pas démontrées (voir la constante de Khintchine). Plus étonnant, certaines propriétés sont établies sans que l'on puisse expliciter aucun cas d'application.

Vous pourrez aussi lire le livre avec un moteur de recherche à portée de main afin d'admirer quelle accumulation de connaissances a fait surgir le phénix de l'interrogation. Existe-t-il un plus puissant moteur pour susciter des vocations ? Nous voyons ici qu'en science le non-utilitarisme, plus que jamais, reste payant !

PHILIPPE BOULANGER

INFORMATIQUE

LE TEMPS DES ALGORITHMES Serge Abiteboul et Gilles Dowek

Le Pommier, 2017
192 pages, 17 euros

Décrire une révolution en cours: tel est le défi relevé dans ce livre, dont les auteurs évaluent les effets que les ordinateurs et les algorithmes ont sur la société et sur la pensée. Nuancé, il montre ce que nous leur devons, mais ne cache pas non plus les dangers.

À part quelques pages d'explications un peu techniques au début, le livre s'appuie sur les expériences quotidiennes que, compétent ou non, chacun de nous vit avec les algorithmes. Les auteurs pointent un problème, notent un effet des algorithmes et font confiance au lecteur pour y réfléchir à sa façon. Par exemple, à propos des rapports entre intelligence artificielle et intelligence humaine, ils écrivent: «Il n'y a pas de différence entre paraître intelligent et être intelligent.» Je ne souscris pas à cette sentence, car je ne me résous pas à ce que l'intelligence ne soit qu'une apparence. Mais je ne vois pas comment la réfuter, car je n'ai aucun moyen d'appréhender la réalité intérieure d'une tête autre que la mienne. Cette difficulté ne peut que m'inciter à réfléchir.

Une autre réflexion naît du rapprochement de deux passages. Page 45, on lit que les «modèles algorithmiques nous placent donc dans une situation paradoxale: parce qu'ils permettent d'étudier des phénomènes plus complexes que les théories classiques, ils représentent une extension du domaine de la science. Mais, du fait de la difficulté à expliquer leurs résultats et à comparer leurs prévisions aux observations, ils représentent un possible affaiblissement de la scientificité.» Pages 161-162, on lit qu'après que l'informatique a essentiellement été un outil de calcul, la pensée informatique s'est diffusée en biologie, et «l'informatique a servi à décrire et simuler, par exemple, le fonctionnement de la cellule. Ce schéma se retrouve dans de nombreuses autres disciplines: en statistique, en physique et dans les sciences humaines. Le langage informatique est devenu une *lingua franca*, qui unit les sciences.» Au lecteur, stimulé par la dissonance entre ces passages, de préciser le contenu nouveau que l'expansion des algorithmes donne aux mots «science» et «scientificité»...

DIDIER NORDON / ESSAYISTE

ANTHROPOLOGIE

« PLUS D'UNE LANGUE », OBSTACLE OU RESSOURCE ? Christian Baudelot et al.

L'Anthropologie pour tous, 2017
72 pages, gratuit

L'Anthropologie pour tous est une association qui, sur le modèle de La Main à la pâte dans les sciences de la matière, a pour objectif d'initier les élèves, enseignants et parents à la pratique des sciences humaines. Sur la base de rencontres avec les chercheurs, d'exercices pratiques, etc., elle promeut des innovations pédagogiques à la recherche des moyens de vivre ensemble à l'aide de nos différences. Or, afin d'informer sur la durée, l'association lance une collection de petits livres numériques librement téléchargeables sur son site internet.

Dans ce premier numéro, les pratiques linguistiques au lycée Le Corbusier d'Aubervilliers, un établissement accueillant une très grande diversité ethnique et linguistique, sont analysées. Les deux bilinguismes les plus fréquents y sont le franco-chinois et le franco-arabe. Sur les 1 064 élèves que compte l'établissement, 594 ont répondu à un questionnaire, qui nous apprend que 24 % parlent seulement le français à la maison, tandis que 48 % y pratiquent une autre langue. L'enquête a montré que la pluralité des langues parlées par les élèves constitue un appel d'air qui motive travaux et rencontres. Ainsi, certains lycéens ont entrepris l'apprentissage solitaire de langues aussi difficiles que le coréen ou le japonais. D'autres déclarent parler trois langues, voire plus... Pas forcément de façon correcte, mais l'envie est là!

Deux textes remarquables de Bernard Sergent et Barbara Cassin enrichissent le livre: le premier présente les langues indoeuropéennes et la seconde réfléchit à la culture que véhicule la langue. Au final, un petit livre optimiste, dont on aimerait qu'il débouche sur des avancées pédagogiques fondées sur les langues.

ROMAIN PIGEAUD / CHERCHEUR ASSOCIÉ
À L'UNITÉ MIXTE CREA-H DU CNRS,
UNIVERSITÉ RENNES-1

ET AUSSI



LE CERVEAU, LA MACHINE ET L'HUMAIN Pierre-Marie Lledo

Odile Jacob, 2017, 270 pages, 23,90 euros

Les vingt dernières années ont énormément enrichi notre compréhension du cerveau. Nous serions même sur le point d'en décrypter le fonctionnement à l'échelle nanométrique. Ces progrès résultent d'une approche mécaniste; d'autres proviennent de l'étude des processus flous qui font émerger les niveaux successifs d'organisation du cerveau. Évoquant tout cela, l'auteur construit une image d'ensemble de la façon dont l'esprit se loge dans le cerveau. Alors, oui, vous pouvez diriger votre esprit sur ce bon texte pour comprendre la machine biologique qui vous anime.

2050 : QUELLES ÉNERGIES POUR NOS ENFANTS ? Pierre Papon

Le Pommier, 2017, 224 pages, 20 euros

L'auteur propose des scénarios de l'évolution économique future de notre civilisation afin d'étudier les différentes demandes en énergie qui y seront associées. Par le raisonnement et par la mise en scène des conséquences de ces évolutions possibles, il identifie les verrous à faire jouer afin de favoriser partout sur la planète les transitions souhaitables. Au passage, il pose de nombreuses questions – sur l'avenir de l'énergie solaire, de l'énergie nucléaire... – et apporte beaucoup d'éléments de réponse. Bref, une façon efficace d'explorer les modalités de ce que pourrait être la fameuse « transition énergétique ».

REGARDS CROISÉS : QUAND LES SCIENCES ARCHÉOLOGIQUES RENCONTRENT L'INNOVATION Marie Balasse et Philippe Dillmann (dir.)

Archives Contemporaines, 2017
178 pages, 29,50 euros

L'étude des techniques du passé nous informe sur le présent. Par exemple, l'amendement des sols au fumier a été pratiqué au Néolithique, ce qui interroge sur l'usage souvent excessif des techniques agronomiques d'aujourd'hui. Dans un autre registre, les objets archéologiques nous renseignent sur le comportement à très long terme de nombre de matériaux. Un ouvrage collectif aux exemples éclairants.

GENÈVE (SUISSE)

JUSQU'AU 26 AOÛT 2018
Musée d'histoire des sciences
www.museum-geneve.ch

Images de science



Au fil de leurs travaux, les scientifiques produisent de nombreuses images. Mais qu'est-ce qui caractérise les images scientifiques? Quelle est leur place en recherche? Comment sont-elles produites et diffusées? Telles sont les questions qui motivent cette exposition, où sont bien sûr présentées de nombreuses images, dont certaines, historiques ou récentes, ont marqué le progrès de la science. L'un des espaces est consacré à la fabrication de

l'image – dessin, gravure, photographie, imagerie par traitement d'un signal. On y voit notamment des instruments conçus pour faciliter la réalisation de dessins ou pour voir ce que l'œil nu ne peut saisir – chambre claire, chambre noire, loupes et microscopes divers, caméra thermique, etc. (le visiteur peut en essayer certains). S'y ajoutent des documents de quelques savants genevois renommés, et, dans le parc du musée, 20 images choisies par 10 scientifiques. ■

CHAMBÉRY

JUSQU'AU 2 SEPTEMBRE 2017
Galerie Eurêka, Carré Curial
www.chambery.fr

L'homme est-il un grand singe?



Les éthologues répondent généralement oui à cette question. Mimiques, habileté physique, réflexes, mémoire...: le visiteur pourra, notamment à l'aide de dispositifs interactifs et plutôt ludiques, comparer leurs performances à celles de leurs cousins dans l'arbre de l'évolution et... juger par eux-mêmes. ■

VILLENEUVE-D'ASCQ

JUSQU'AU 3 SEPTEMBRE 2017
Forum départemental des sciences
www.forumdepartementaldessciences.fr

Patate!



Tout sur ce tubercule qui a conquis le monde (ainsi que les restaurants en manque d'imagination légumière) et dont il existe plus de 5000 variétés: la plante, sa culture, la récolte des pommes de terre, leur transformation, leurs utilisations culinaires et qualités nutritives, jusqu'aux liens spirituels qu'entretiennent avec le tubercule certaines peuplades animistes d'Amérique du Sud. ■

EN VRAC

Samedi 1^{er} juillet - 22 h 35
Sur la chaîne Arte
www.arte.tv

ÉPAVES ET POLLUTION

Quelque 6 300 épaves datant de la Seconde Guerre mondiale reposent sur les fonds marins et rouillent inexorablement. On estime que leurs réservoirs contiennent jusqu'à 15 millions de tonnes de pétrole. Une bombe à retardement? Pour mémoire, 37 000 tonnes de pétrole se sont répandues lors de la catastrophe de l'Exxon Valdez, en 1989...

Samedi 29 juillet - 23 h 25
Sur la chaîne Arte
www.arte.tv

EXTRATERRESTRES : LA GUERRE DES MONDES AURA-T-ELLE LIEU ?

Si la vie existe ailleurs et si elle prend des formes intelligentes, pas sûr que ce soit une bonne nouvelle pour nous autres Terriens. Tel est l'angle original de ce documentaire où des chercheurs livrent leurs réflexions sur les conséquences d'une éventuelle rencontre avec des extraterrestres.

Jusqu'au 27 août
Palais de la Découverte Paris
www.palais-decouverte.fr

FAITES VOS JEUX !

Qu'est-ce que le hasard? Vaste question! Les visiteurs de cette exposition y trouveront quelques éléments de réponse, à travers quelques calculs (simples) de probabilités, des jeux (de hasard!), une planche de Galton, le chaos d'une bille de flipper...

Jusqu'au 27 novembre
Musée de l'homme - Paris
www.museedelhomme.fr

INDONÉSIE, LES FERMILIERS DU MIEL

À travers des objets, des reconstitutions et des dispositifs multimédias, un voyage dans la forêt de Bornéo à la rencontre des collecteurs de miel produit par la plus grande des abeilles mellifères, *Apis dorsata*.

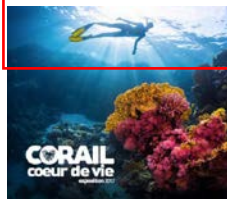
PARIS

JUSQU'AU 30 SEPTEMBRE 2017

Aquarium de Paris

www.aquariumdeparis.com

Corail : cœur de vie



Mous ou durs, vivant en mer

chaude ou froide, fluorescents ou non, 450 coraux répartis dans 15 bassins sont présentés. Des représentants d'un

monde féérique qui occupe moins de 0,2 % de la surface des océans. Un monde menacé, qu'il importe de protéger pour son rôle biologique, environnemental, économique... ■

NANTES

JUSQU'AU 31 AOÛT 2017

Ligne 1 du tramway

www.labodessavoirs.fr

La Tram' du temps



Entre les stations Gare maritime et Gare

SNCF, à raison de 1 million d'années tous les 5 mètres, les ères géologiques se succèdent sur 2,7 km. Explosion du Cambrien

à Gare maritime, extinction de l'Ordovicien-Silurien à Chantiers navals, etc.: à chaque station, des installations représentent une époque avec sa faune et sa flore, accompagnées du récit qu'en fait un voyageur imaginaire. ■

SORTIES DE TERRAIN

Samedi 1^{er} juillet
Barcelonnnette (04)
Tél. 04 92 61 57 37

EXPLOR'NATURE

À l'occasion de l'entrée de Barcelonnnette dans le Parc national du Mercantour, cette commune organise trois jours d'inventaires de la biodiversité. Le grand public peut y participer le 1^{er} juillet (sur inscription), avec des sorties en compagnie de spécialistes. Et à cela s'ajoutent diverses animations au cours de ces trois jours.

Les dimanches d'été
Sentheim (68)
www.geologie-alsace.fr
Tél. 06 47 29 16 20

VALLÉE DE LA DOLLER

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

25 juillet et 29 août
Bourbach-le-Haut (68)
www.geologie-alsace.fr
Tél. 06 47 29 16 20

CIMES DU ROSSBERG, FORÊT DES VOLCANS

Une journée de randonnée géologique, pour bons marcheurs, sur les traces de volcans de plus de 300 millions d'années, avec de beaux points de vue sur les Vosges et la plaine d'Alsace.

Jeudi 27 juillet à 20 h
Olargues (34)
www.cebenna.org
Tél. 04 67 97 88 00

CHAUVE QUI PEUT !

Projection d'un film documentaire puis balade au détecteur à la découverte de pipistrelles, rhinolophes et autres chauves-souris.

Mardi 11 juillet
Rosnay (36)
www.parc-naturel-brenne.fr
Tél. 02 54 28 12 13

CRICQUETS, SAUTERELLES ET CIE

Parmi les nombreuses sorties proposées par le parc de la Brenne, celle-ci fera découvrir, lors d'une après-midi, les orthoptères du site des Communaux, réputé pour ses orchidées.

PARIS

JUSQU'AU 3 SEPTEMBRE 2017

Aquarium tropical, Palais de la Porte Dorée

www.aquarium-tropical.fr

Aventures océanographiques



Les visiteurs pourront découvrir ici 25 maquettes et 15 aqua-relles de vaisseaux océanographiques français, tels que L'Atalante, le Pourquoi pas?, L'Atalante, le Marion Dufresne (ci-dessus), Tara ou le futuriste Polar Pod du projet de Jean-Louis Étienne – des navires ou des sous-marins qui jalonnent la longue histoire des explorations maritimes menées par des aventuriers ou des scientifiques. L'exposition aborde plusieurs aspects de ce thème: l'aspect historique, de la découverte de nouvelles terres jusqu'à l'océanographie scientifique d'aujourd'hui; l'aspect technologique, avec une mise en lumière de l'évolution technique des navires; et l'aspect humain, à travers des témoignages de marins, de scientifiques ou d'aventuriers qui ont embarqué sur ces vaisseaux et participé à l'exploration des mers. ■

PARIS

JUSQU'AU 27 AOÛT 2017

Palais de la Découverte

www.palais-decouverte.fr

Viral

Sous-titrée «Du microbe au fou rire, tout

s'attrape», cette exposition porte sur les phénomènes de contagion, que celle-ci soit biologique, sociale ou émotionnelle. Les maladies infectieuses et leurs agents, les épidémies, en occupent évidemment une bonne partie. Plus original, le visiteur est aussi confronté, parfois au moyen de dispositifs interactifs, à la contagion du rire, du bâillement, des rumeurs, de certaines vidéos, des réactions à un événement financier... ■

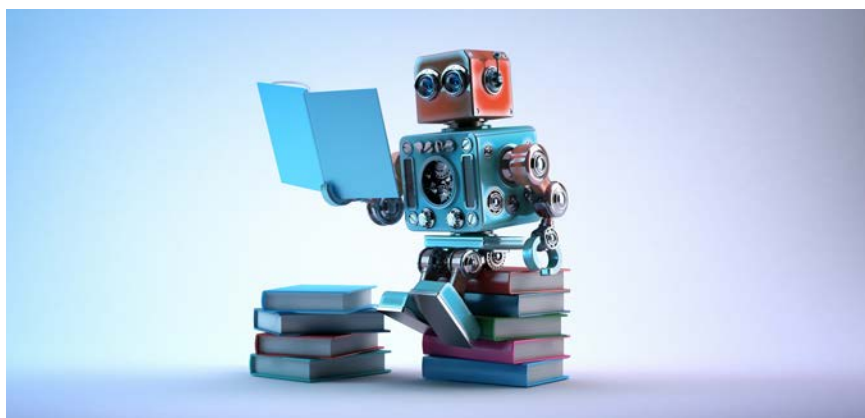




LA CHRONIQUE DE
GILLES DOWEK
chercheur à l'Inria et membre du conseil scientifique
de la Société informatique de France

LA BONNE STRATÉGIE POUR APPRENDRE

Apprendre par induction ou de ses erreurs, quelle est la meilleure approche ? Les algorithmes d'apprentissage automatique apportent une réponse originale.



Les algorithmes d'apprentissage automatique sont des procédés qui permettent aux ordinateurs d'acquérir des connaissances et, comme toujours, il est éclairant de comparer les procédés utilisés par les ordinateurs avec ceux que nous, humains, utilisons dans ce même but.

Les algorithmes d'apprentissage automatique se classent en deux grandes familles, selon qu'ils apprennent tout seul ou d'une personne. Par exemple, en analysant des données qui décrivent des souris et des éléphants, un algorithme peut classer ces animaux en deux ensembles, les petits et les grands, sans que personne n'ait besoin de lui indiquer quelle description correspond à quel animal. De même, personne ne nous a jamais appris à distinguer un vélo d'une voiture. Nous avons, de nous-mêmes, appris à classer les véhicules en différentes catégories.

Les algorithmes d'apprentissage qui impliquent l'intervention d'une personne, nommée l'entraîneur, se divisent, à leur tour, en deux catégories: ceux dits

supervisés et ceux qui fonctionnent par renforcement, selon que cette personne intervient tôt ou tard dans le processus.

Par exemple, pour apprendre à reconnaître les lettres de l'alphabet, un algorithme d'apprentissage supervisé utilise de nombreuses images, préalablement étiquetées, c'est-à-dire pour lesquelles l'entraîneur a indiqué quelle image correspond à

**Apprentissage
par induction ou
par renforcement ?**

quelle lettre. À une image nouvelle, l'algorithme associe alors l'étiquette correspondant aux images les plus similaires.

En revanche, dans un algorithme d'apprentissage par renforcement, l'entraîneur intervient plus tard. Il laisse dans un premier temps l'algorithme attribuer

aléatoirement une lettre aux images. Mettons que l'algorithme analphabète associe la lettre «j» aux images de «a». Mais si, par hasard, il leur attribue la lettre «a», l'entraîneur lui indiquera qu'il s'agit de la bonne réponse. L'algorithme associera alors, par la suite, cette lettre aux images similaires.

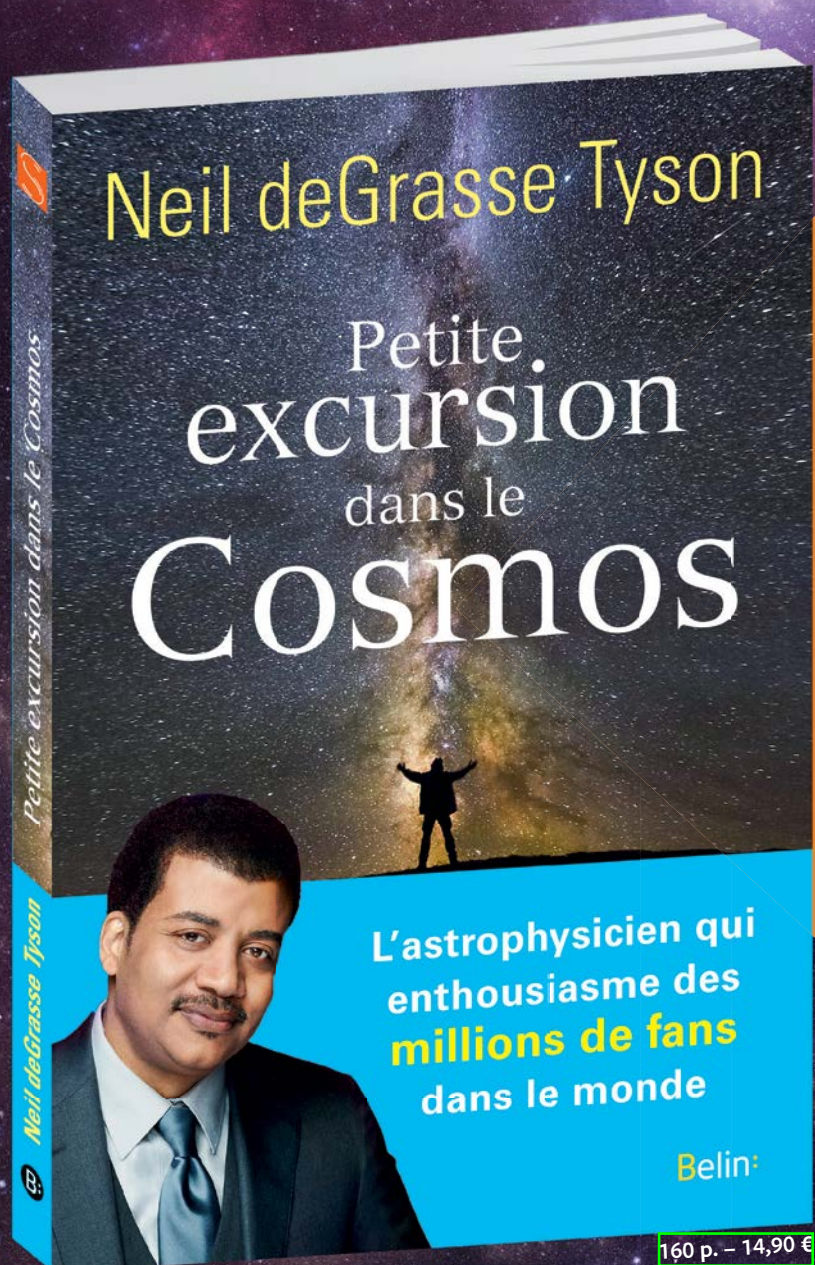
La distinction entre ces techniques rappelle la différence entre les méthodes pédagogiques où l'enseignant émet des connaissances en direction des apprenants et celles où il les laisse agir, n'intervenant que pour corriger leurs erreurs. Cette différence fait aussi écho aux deux façons dont les scientifiques construisaient des théories.

Selon le philosophe anglais Francis Bacon, les observations et les expériences nous donnent accès aux faits. Et la théorie en découle par un processus de généralisation: l'induction. Pour Bacon, la construction de théories est donc un processus d'apprentissage supervisé. Trois siècles plus tard, Karl Popper a proposé un autre scénario: les scientifiques construisent, au gré de leur imagination, les théories les plus diverses, avant d'éliminer celles qui sont réfutées par les observations et les expériences. La construction de théories apparaîtrait comme un processus d'apprentissage par renforcement.

Les récentes expériences menées en apprentissage automatique permettent-elles de trancher cette controverse séculaire entre Bacon et Popper? Oui: elles nous apprennent que les deux méthodes sont utiles, dans différentes situations. Ainsi, l'apprentissage supervisé donne de très bons résultats pour la reconnaissance de formes. Mais quand un robot découvre son environnement, l'apprentissage par renforcement se révèle meilleur.

Et, loin de s'opposer, ces méthodes peuvent être utilisées conjointement: les récents succès au jeu de go sont le fruit d'une habile combinaison entre des méthodes d'apprentissage supervisé – par l'analyse de nombreuses parties – et par renforcement – en laissant l'ordinateur progresser en jouant contre lui-même. ■

Explorez les mystères de l'univers avec la star de l'astrophysique !



Quelle est l'histoire de l'univers?
Quelles sont les lois physiques
et les forces qui gouvernent
la matière? Qu'y a-t-il entre les
galaxies? Et entre les planètes?
Que sait-on sur la mystérieuse
matière noire et l'étrange énergie
sombre? Et d'où viennent les
éléments qui nous constituent tous?

Avec la verve, l'humour et l'esprit
qui le caractérisent, Neil deGrasse
Tyson, en digne héritier de Carl
Sagan, rend accessible à tous
les principes les plus compliqués
de l'astrophysique. Une invitation
irrésistible à lever la tête pour
admirer l'immensité de l'univers.

Dans la collection
SCIENCE
À PLUMES

160 p. - 14,90 €

Belin:
ÉDITEUR

belin-editeur.com • [f /EditionsBelin](https://www.facebook.com/EditionsBelin) • [@editions_belin](https://twitter.com/editions_belin)



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

CE QUI NOUS INTÉRESSE CHEZ LES POLITIQUES

La principale curiosité que suscite l'arrivée au pouvoir de nouveaux personnages ne porte pas sur leur parcours ou programme politique, mais sur... leur vie privée !



Copie d'écran d'une recherche, sur Google, d'images d'Edouard Philippe. Les mots-clés proposés sont intéressants...

Le 15 mai 2017, après une campagne électorale intense, les Français allaient enfin connaître le nom de leur Premier ministre. Après un certain suspense et nombre de spéculations, Alexis Kohler, le nouveau secrétaire général de l'Élysée, s'avancé sur le perron et annonça que l'heureux élu était Edouard Philippe. Ce n'était pas vraiment une surprise, nombre de commentateurs ayant anticipé cette annonce.

Edouard Philippe n'était pas un inconnu, mais pas non plus une «star» de la politique. Aussi, comme beaucoup de mes concitoyens, j'ai utilisé le moteur de recherches Google pour tenter d'en savoir plus sur lui. Or lorsque vous composez une demande, Google vous suggère des termes associés qui correspondent aux recherches les plus fréquentes des internautes (fonctionnalité Google Suggest). Vous pouvez ainsi avoir une idée de ce qui intéresse les individus à propos d'un mot ou d'une personnalité. Ce qui m'a frappé, c'est que les quatre demandes associées au nom d'Edouard Philippe étaient ce jour-là (et dans l'ordre): «vie privée», «femme», «twitter» et «marié».

Difficile de trouver meilleur symptôme de la «peopolisation» du monde politique. Et d trompons-nous, ce phénomène n'est pas une forme d'américanisation de notre société: par exemple, l'historien des médias Robert Zaretsky, de l'université de Houston, a plusieurs fois rappelé qu'avant l'affaire Bill Clinton-Monica Lewinsky, personne ne s'était intéressé aux infidélités

Jadis, personne n'avait la possibilité de s'intéresser à la vie privée des personnages politiques

conjugales de Franklin Roosevelt ou de Dwight Eisenhower. Même la vie privée de John Kennedy n'a jamais fait scandale.

Il est sans doute plus juste de dire que personne n'avait la possibilité de s'intéresser à cet aspect de la vie des personnages politiques, car ce type d'information n'était tout simplement pas disponible. Sur le marché, il n'y avait pas

d'offre – ce qui ne signifie pas qu'il n'y avait pas de demande.

Pour pousser un peu plus loin mon investigation, j'ai soumis l'ensemble des 22 membres du nouveau gouvernement français au même traitement: que cherchaient les internautes à leur propos? Allaient-ils s'intéresser par exemple à leur parcours politique ou à leur programme d'action? Oui, un peu... mais pas vraiment.

Les questions relevant de la politique (cherchant par exemple un lien avec tel parti ou avec tel personnage) ne représentaient que 21 % des demandes. Sans réelle surprise, la vie privée des ministres venait en tête, avec 38 % des recherches; 16 % des demandes concernaient le fait de savoir si ces ministres avaient un compte Twitter ou Facebook, ou encore s'il était possible de les contacter; 13 % des requêtes posaient des questions sans doute suspicieuses concernant l'appartenance à certaines entreprises ou à la franc-maçonnerie. Plus anecdotique: 12 % des questions portaient sur le salaire, la taille ou l'âge des individus.

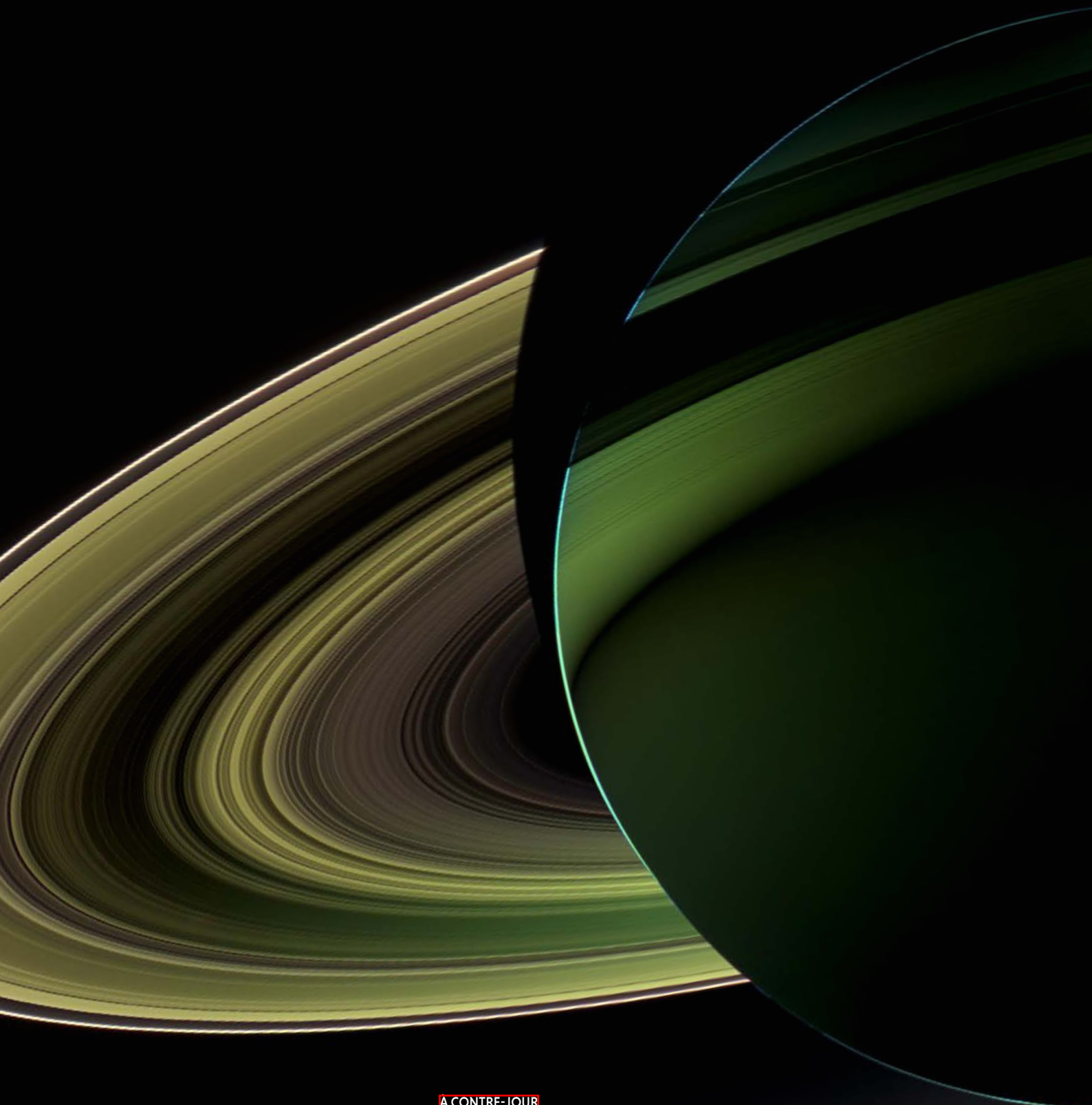
En reproduisant cette recherche pour les candidats aux dernières élections présidentielles, on retrouve la même obsession pour la vie privée des politiques, avec une petite curiosité supplémentaire pour l'apparence qu'ils avaient lorsqu'ils étaient plus jeunes.

Naguère, le type de curiosité que nous avons pour tel ou tel sujet demeurait relativement invisible, car il ne laissait pas de traces sociales. Au fond, nous pouvions aussi bien défendre l'idée que, en moyenne, les individus s'intéressent aux aspects les plus spectaculaires et médiocres des choses ou, au contraire, qu'on leur prête des compulsions qui ne sont pas à la hauteur de leurs vraies aspirations. Dans tous les cas, ces spéculations étaient difficiles à tester rationnellement. Mais avec Internet, le périmètre des traces sociales disponibles à l'interprétation a considérablement augmenté. Mirons-nous dans ce miroir avec précaution, ce que nous pouvons y voir n'est pas toujours flatteur. ■

Saturne

Les plus belles découvertes de Cassini

Après avoir passé treize années en orbite autour de Saturne, la sonde *Cassini* achèvera bientôt sa mission : en septembre, elle plongera dans l'atmosphère de la planète aux anneaux et disparaîtra. Cette conclusion est l'occasion de revenir sur une mission exceptionnelle qui nous a offert des images et des découvertes scientifiques aussi spectaculaires qu'inattendues.



A CONTRE-JOUR

Pris dans l'ombre de la planète à 800 000 kilomètres de distance par la caméra grand angle de la sonde *Cassini*, ce cliché montre Saturne et ses anneaux rétroéclairés par le Soleil.

Crédit pour toutes les images : NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute, sauf mention contraire.



Saturne sous l'œil de Cassini

LES MAGNIFIQUES ET SPECTACULAIRES
PHOTOGRAPHIES PRISES PAR LA SONDE CASSINI/
ONT BOULEVERSÉ NOS CONNAISSANCES SUR
LE « SEIGNEUR DES ANNEAUX » ET SON SYSTÈME.

L'AUTEUR



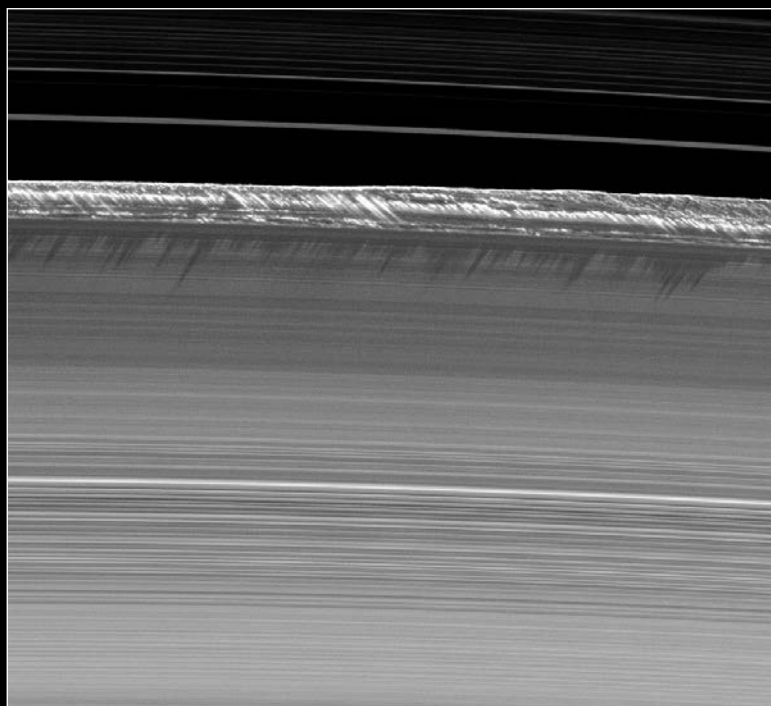
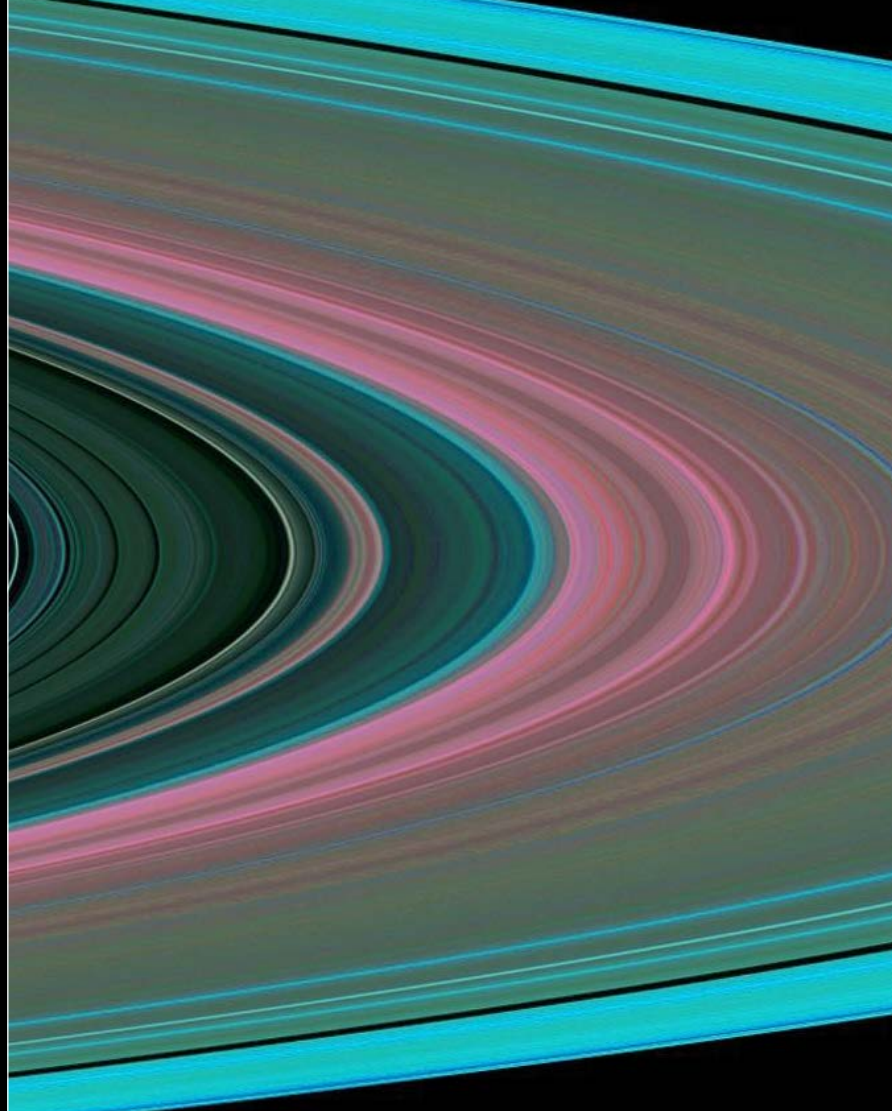
SEAN BAILLY
Journaliste à *Pour la Science*

Dans le froid d'une nuit à scruter le ciel étoilé, le moment qui marque tout astronome amateur en herbe est sa rencontre avec Saturne. La beauté et le mystère de la planète aux anneaux ne laissent personne indifférent.

400 ANS D'OBSERVATIONS

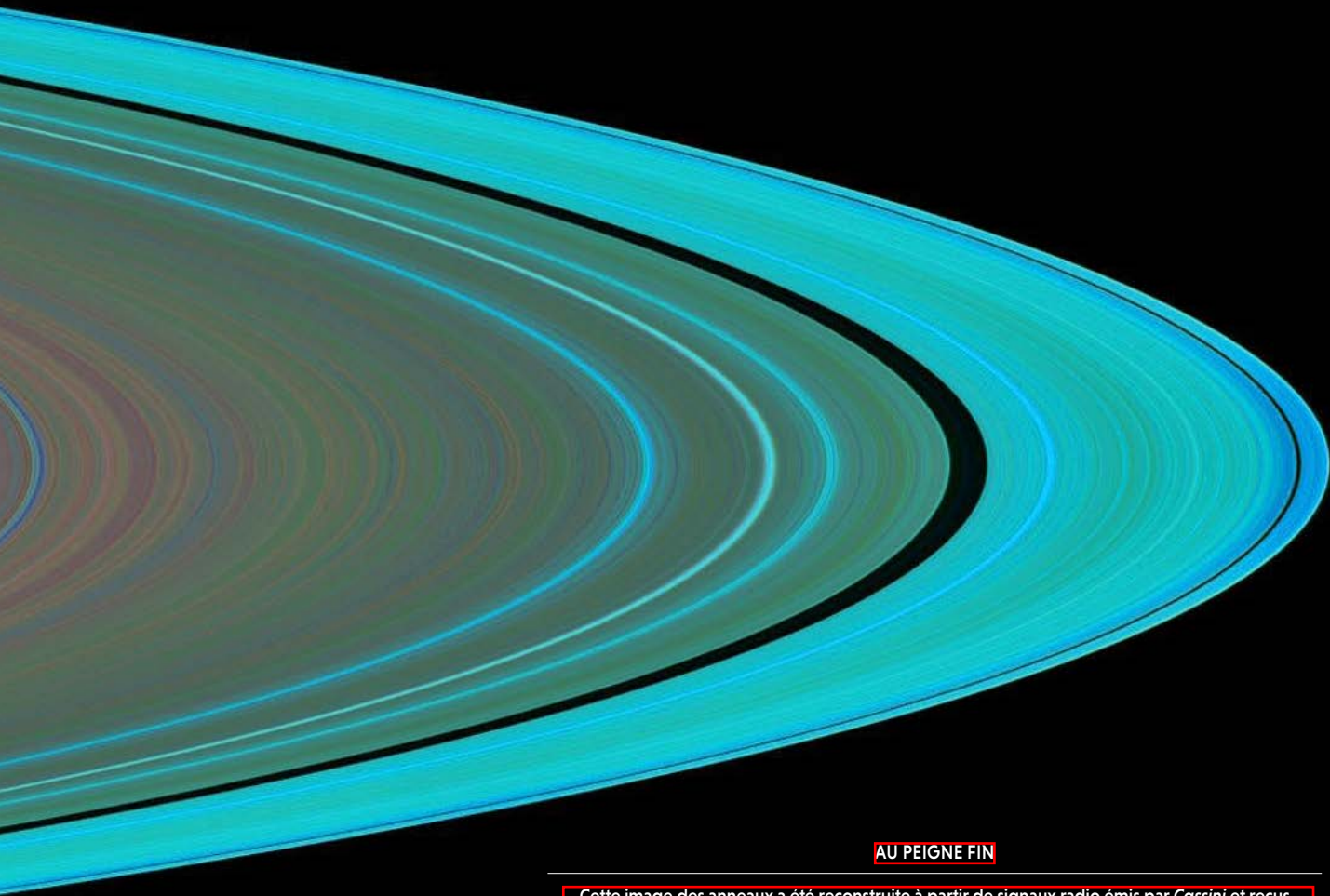
Les Anciens connaissaient déjà l'existence de Saturne, mais il revient à Galilée, en 1610, d'avoir observé pour la première fois les anneaux de la planète, grâce à sa lunette. Celle-ci n'était cependant pas assez puissante pour que le savant italien comprenne la nature de ces « oreilles ». La réponse vint quarante-six ans plus tard avec le Hollandais Christian Huygens. Mieux équipé que Galilée, il découvrit le satellite Titan et posa l'hypothèse que Saturne est entourée d'un anneau solide. En 1675, l'astronome d'origine italienne Jean-Dominique Cassini compléta cette description en montrant la présence de plusieurs anneaux séparés par des vides, dont le plus important porte aujourd'hui son nom. Deux siècles plus tard, l'Écossais James Clerk Maxwell affirmait que les anneaux n'étaient pas solides, mais composés d'une multitude de petites particules. Ce que des observations spectroscopiques ont confirmé à la fin du XIX^e siècle.

Pour étudier Saturne de plus près, les agences spatiales européenne et américaine ont montée une mission conjointe, *Cassini-Huygens*. Arrivée en 2004, la sonde *Cassini*, bardée d'instruments, a exploré et photographié l'un des joyaux du Système solaire. Voici un aperçu de sa moisson, qui s'achève bientôt. ■



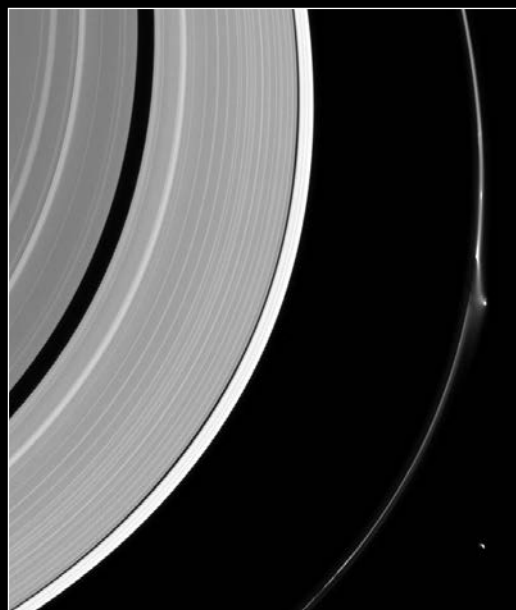
DES ANNEAUX EN RELIEF

Pendant les mois qui précèdent et suivent l'équinoxe saturnien (qui survient tous les quinze ans terrestres environ), la lumière rasante du Soleil illumine des structures qui débordent du plan des anneaux et qui projettent donc des ombres.



AU PEIGNE FIN

Cette image des anneaux a été reconstruite à partir de signaux radio émis par *Cassini* et reçus sur Terre lors d'une orbite spéciale où le disque de Saturne s'est interposé exactement sur la ligne *Cassini*-Terre. Dans la zone en fausse couleur rouge, les particules mesurent plus de 5 centimètres de diamètre, contrairement aux régions bleues et vertes où on trouve de petites particules.



BERGERS ET PERTURBATIONS

Les satellites dits bergers délimitent les bords des anneaux grâce à leurs effets gravitationnels. Pandora (en bas, à droite) est le satellite berger de la partie externe de l'anneau fin F (Prométhée, non visible ici, est le berger de la partie interne de l'anneau). Il ne serait pas responsable du « jet » observé ici, lequel serait dû à un petit objet, difficile à détecter, présent dans l'anneau.

L'HÉLICE DE BLÉRIOT

Les structures en forme d'hélice abondent dans les anneaux principaux. Celle-ci, nommée en l'honneur du pionnier français de l'aviation Louis Blériot, est la plus grande de toutes. Prédites en 2000, ces structures sont dues à la présence de corps d'une centaine de mètres de diamètre. *Cassini* a confirmé leur existence dès son arrivée au voisinage de Saturne, en 2004.



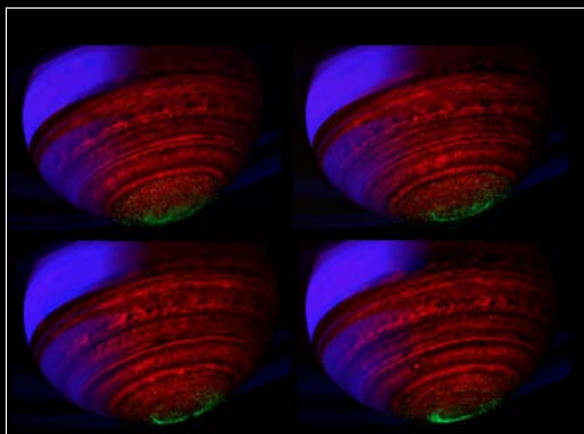
LA TEMPÊTE SE MORD LA QUEUE

Les « Grandes taches blanches », par analogie avec la Grande tache rouge de Jupiter, sont des tempêtes saisonnières assez rares sur Saturne. Entre 2010 et 2011, *Cassini* a observé une tempête très forte dans l'hémisphère Nord. Les nuages, emportés vers l'est par les vents, ont fait un tour complet de la planète.

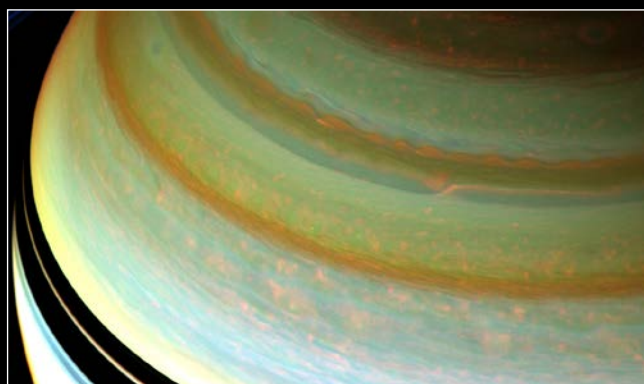


AUROSORES AU PÔLE SUD

L'arrivée dans la magnétosphère de Saturne d'un vent solaire, émis lors d'une éruption de l'étoile, déclenche des aurores polaires, à l'exemple de celle photographiée ici (en vert) au pôle sud.



© NASA/JPL/ASI/Université de l'Arizona/Université de Leicester

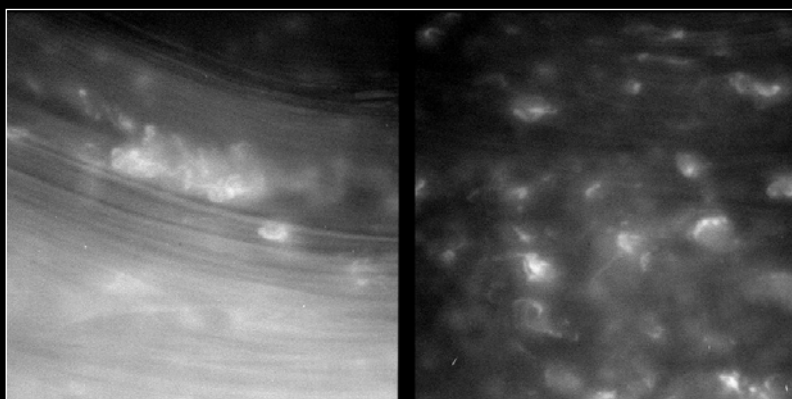


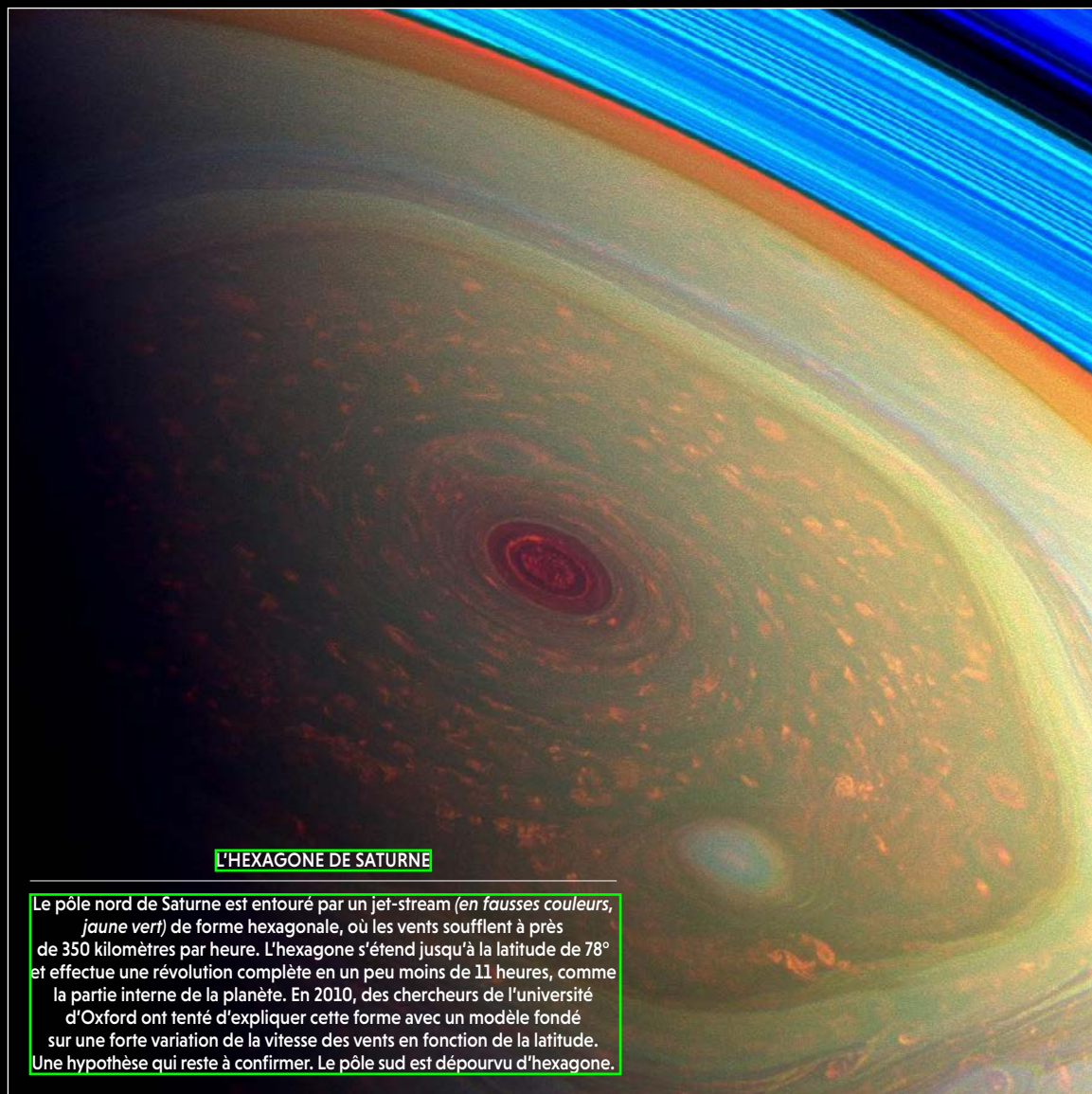
LES VENTS ATMOSPHÉRIQUES

L'atmosphère de Saturne est composée à 75 % d'hydrogène et à 25 % d'hélium, avec des traces d'autres composés tels que l'eau ou le méthane. Elle est striée de bandes parallèles à l'équateur (en orange), indicatrices de vents violents pouvant atteindre 1 800 kilomètres par heure.

LES NUAGES DE PRÈS

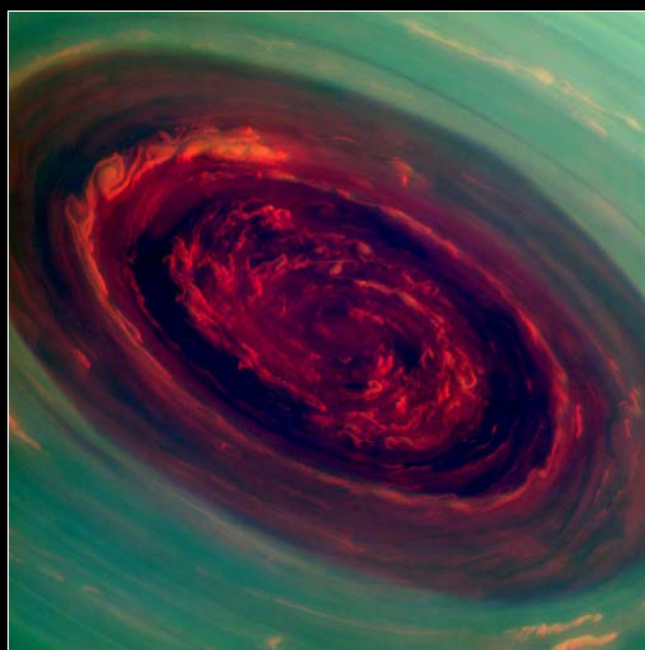
Avant de terminer sa mission, *Cassini* a modifié sa trajectoire pour passer entre Saturne et ses anneaux, un survol à moins de 3 000 kilomètres des nuages.





L'HEXAGONE DE SATURNE

Le pôle nord de Saturne est entouré par un jet-stream (*en fausses couleurs, jaune vert*) de forme hexagonale, où les vents soufflent à près de 350 kilomètres par heure. L'hexagone s'étend jusqu'à la latitude de 78° et effectue une révolution complète en un peu moins de 11 heures, comme la partie interne de la planète. En 2010, des chercheurs de l'université d'Oxford ont tenté d'expliquer cette forme avec un modèle fondé sur une forte variation de la vitesse des vents en fonction de la latitude. Une hypothèse qui reste à confirmer. Le pôle sud est dépourvu d'hexagone.



PLONGÉE AU CŒUR DU CYCLONE

Exactement au-dessus du pôle nord (au cœur de l'hexagone), un cyclone gigantesque mesurerait environ 2 000 kilomètres de diamètre et les vents y souffleraient à près de 540 kilomètres par heure.

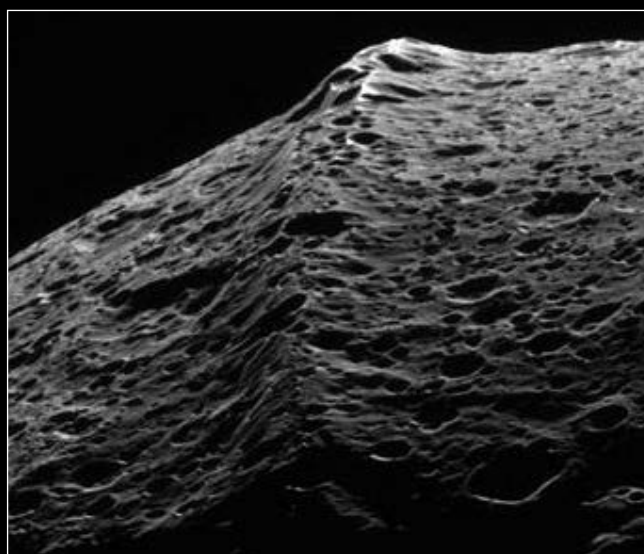
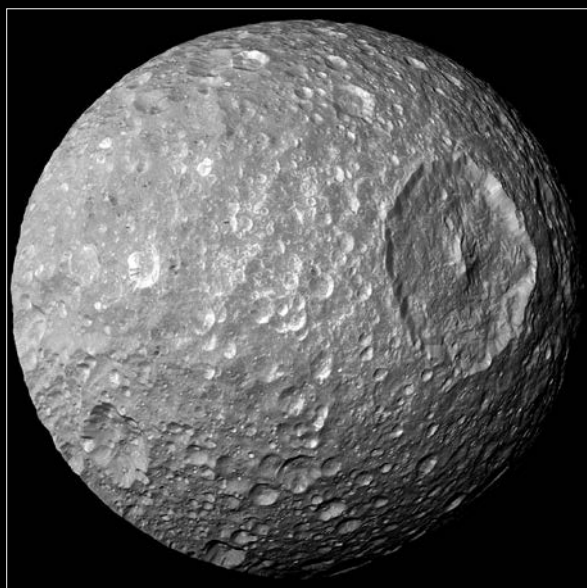


TROIS LUNES

Sur ce cliché pris par *Cassini*, on voit simultanément trois satellites: Téthys, Encelade et Mimas (de haut en bas). Trois parmi les 62 lunes de Saturne ayant une orbite confirmée, dont seulement 13 ont un diamètre dépassant 50 kilomètres. Des perturbations observées dans les anneaux suggèrent l'existence, en plus, d'au moins 150 lunes mineures.

L'ÉTOILE NOIRE DE STAR WARS?

Un cratère de 130 kilomètres de largeur pour une lune, Mimas, de près de 400 kilomètres de diamètre. Une cicatrice laissée par l'impact d'une météorite dont la violence a failli détruire cette lune qui présente des fractures jusque sur sa face opposée.

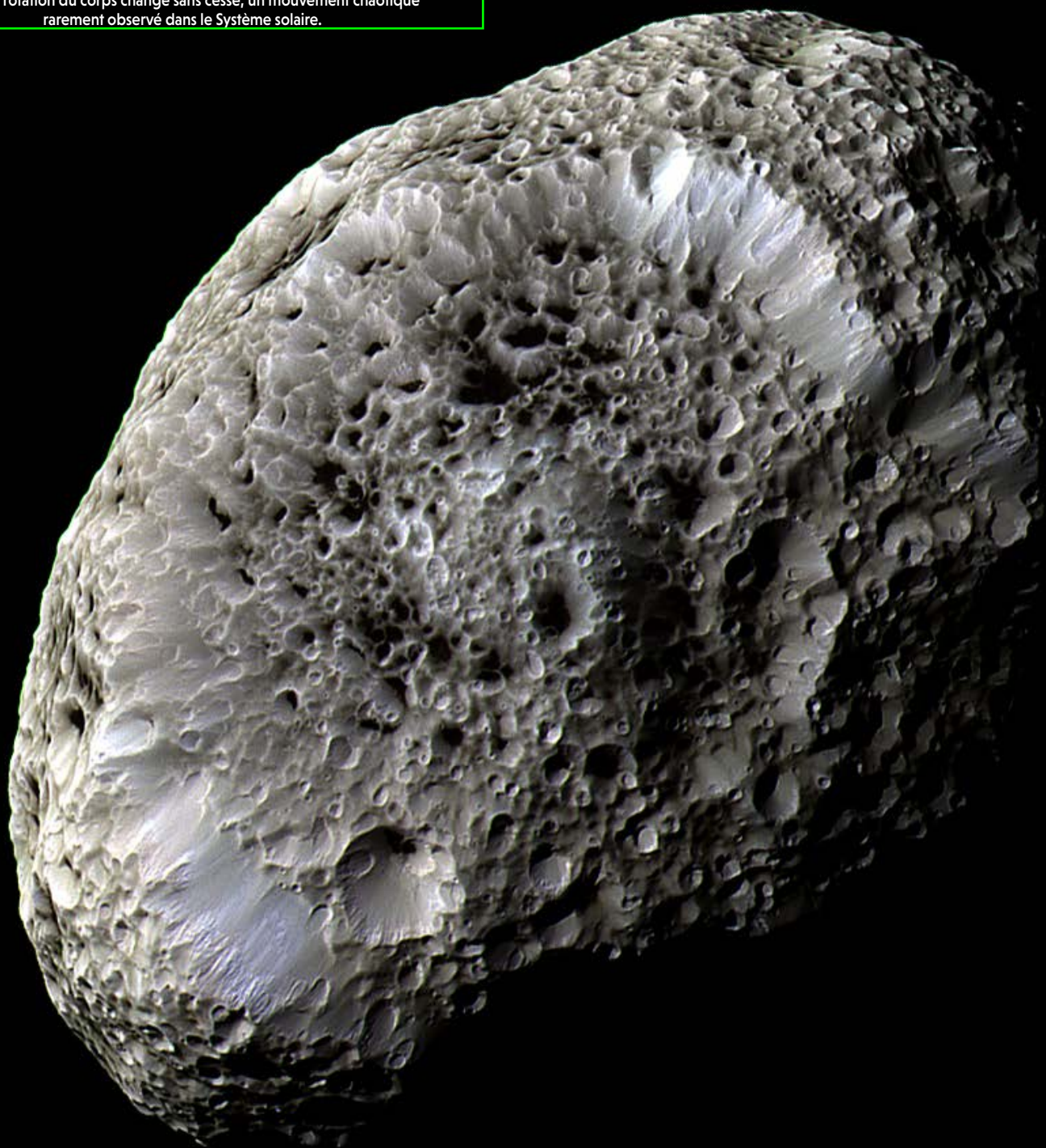


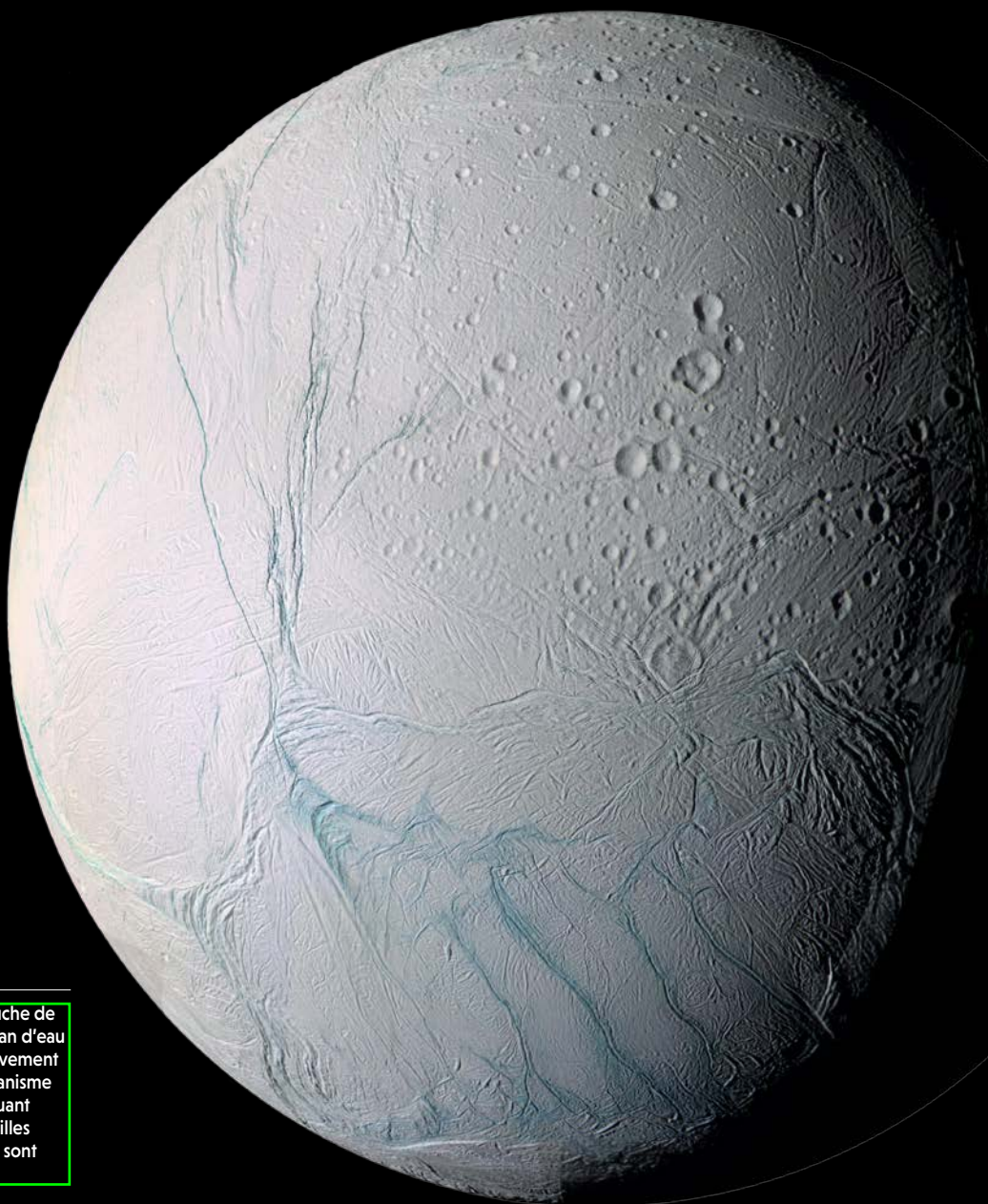
UN IMPRESSIONNANT BOURRELET

Le satellite Japet, la troisième lune de Saturne par sa taille, présente une crête équatoriale qui s'élève jusqu'à 13 kilomètres et s'étire sur 1300 kilomètres. Elle serait ancienne (car recouverte de nombreux cratères d'impact) ; elle se serait formée à la suite d'une contraction de la lune, lors de son refroidissement.

UN MONDE CHAOTIQUE

Hypérion est l'un des plus grands corps (370 kilomètres dans sa plus grande dimension) de forme irrégulière du Système solaire. Il correspond probablement à un fragment d'un corps plus grand détruit lors d'un impact. Composée principalement de glace d'eau, cette lune saturnienne est couverte de poussière de couleur sombre qui lui donne une teinte légèrement rouge. Sur cette photographie, la couleur artificiellement réduite fait ressortir les structures et les différences de texture de la surface. L'axe de rotation du corps change sans cesse, un mouvement chaotique rarement observé dans le Système solaire.



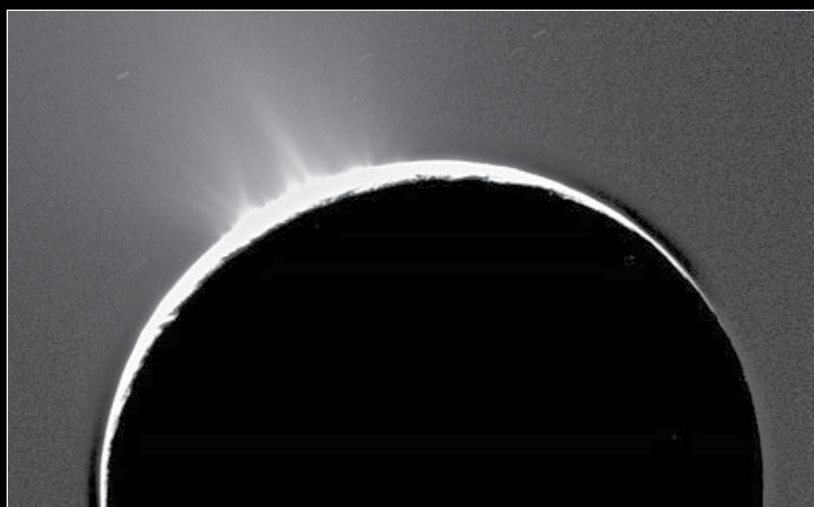


ENCELADE, UN MONDE DE GLACE

La surface d'Encelade est recouverte d'une couche de glace épaisse de plusieurs kilomètres sur un océan d'eau liquide et un cœur rocheux. Si la glace est relativement lisse et propre, c'est probablement qu'un volcanisme aqueux la renouvelle de façon régulière. Quant aux « rayures de tigre », de spectaculaires failles du pôle sud, profondes de 500 mètres, elles sont le signe d'une activité tectonique.

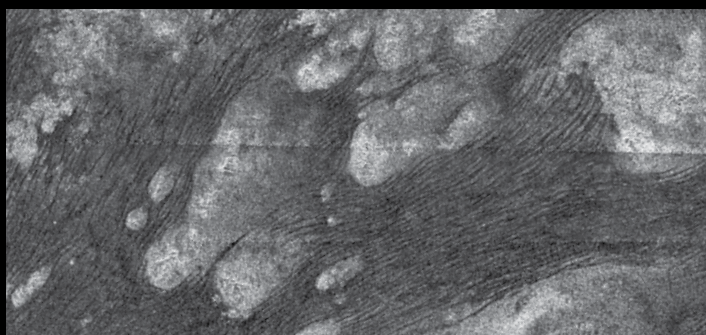
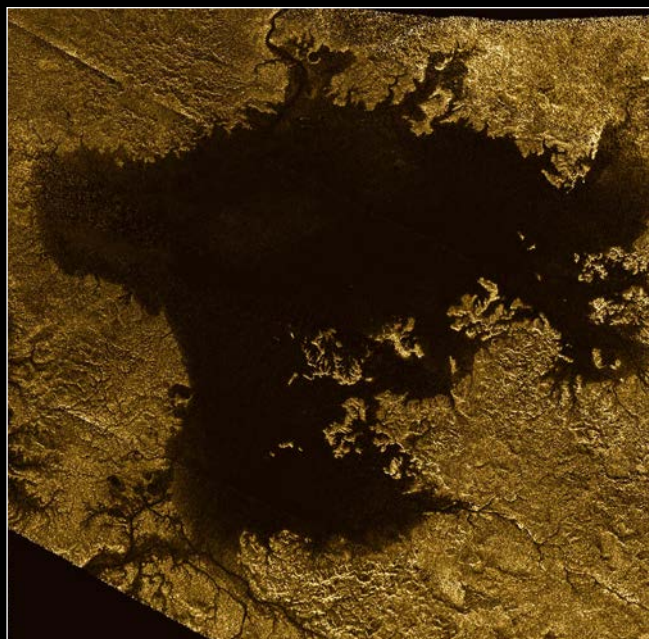
DES GEYSERS GIGANTESQUES

Au pôle sud d'Encelade, la sonde *Cassini* a observé des jets de vapeur et de particules de glace d'eau qui s'étendent sur plusieurs centaines de kilomètres.



UNE ÎLE MYSTÉRIEUSE DANS UN LAC DE TITAN

Grâce aux conditions de pression et de température régnant à la surface de Titan, le méthane et l'éthane existent à l'état liquide. On observe ainsi des rivières et des mers d'hydrocarbures, comme Ligeia Mare, large de 500 kilomètres. Entre 2013 et 2014, *Cassini* y a détecté l'apparition et la disparition d'une tache brillante, surnommée « île magique ». Selon des études récentes, il s'agissait probablement de bulles à la surface du lac se formant lors du dégazage d'azote dissous dans les hydrocarbures.

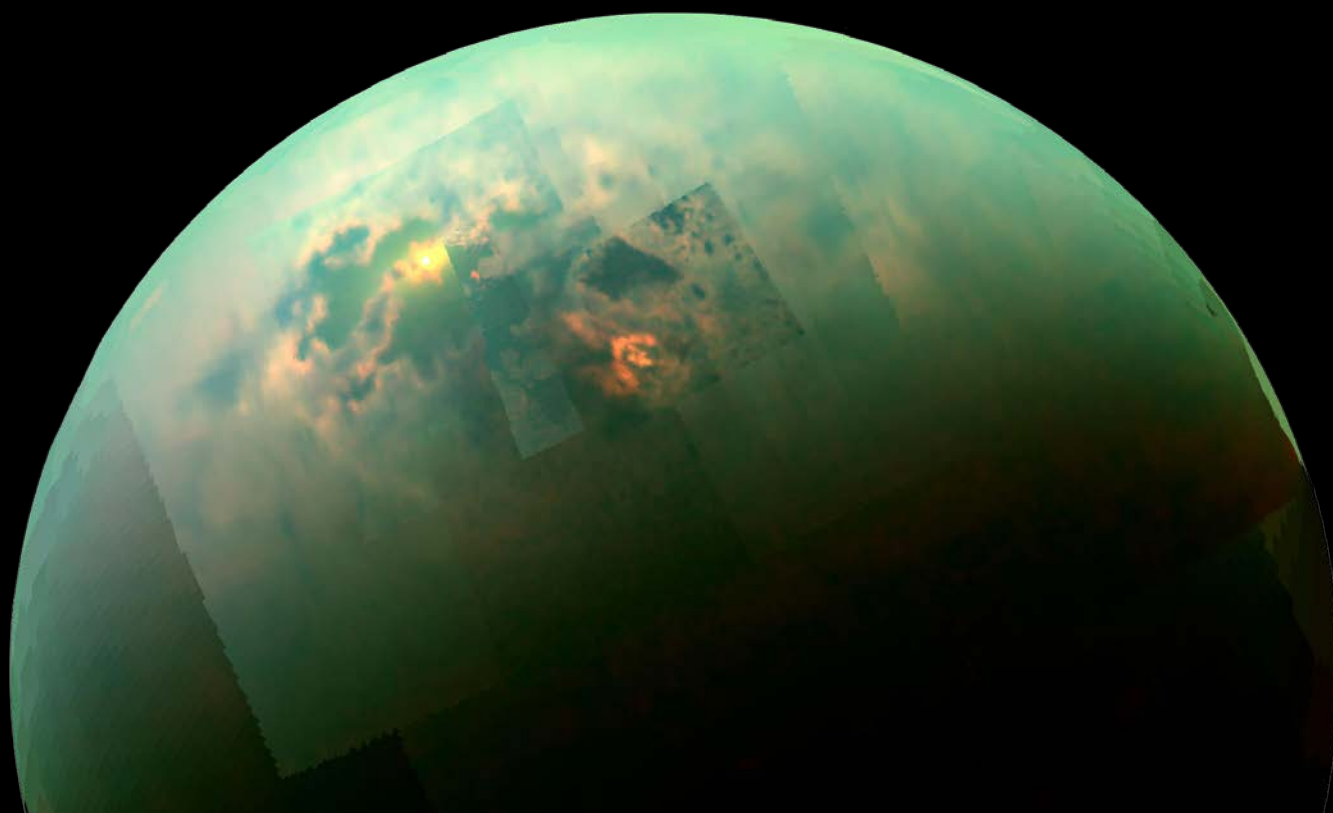


UN CHAMP DE DUNES SUR TITAN

Les stries noires correspondent à des dunes de sable poussées par le vent qui s'insinuent entre les montagnes. Le sable serait constitué de poussière de silice ou de matière carbonée. L'étude des dunes révèle de nombreuses informations sur la topographie, le climat et les vents de Titan.

SOLEIL ET PLUIE SUR TITAN

Sur cette image composite de Titan, la tache lumineuse jaune (à gauche) correspond à la réflexion de la lumière du Soleil sur la plus grande mer d'hydrocarbures de Titan, Kraken Mare. Plus à l'est (en orange), des nuages d'hydrocarbures forment des précipitations qui remplissent une autre mer, Ligeia Mare.





ENTRETIEN AVEC FRANCIS ROCARD

Astrophysicien, Francis Rocard est responsable des programmes d'exploration du Système solaire au Centre national d'études spatiales (Cnes). À ce titre, il a suivi la réalisation de projets tels *Cassini-Huygens* ou *Rosetta*. Depuis 1998,

il coordonne la mise en œuvre du programme d'exploration de Mars à travers les missions *Mars Express* et *Exomars*. Depuis 2004, il coordonne aussi les activités françaises dans le projet *Bepi-Colombo* d'exploration de Mercure.

«Cassini-Huygens lègue un héritage exceptionnel»

PAR SES SURPRENANTES DÉCOUVERTES, LA MISSION CASSINI-HUYGENS MARQUERA DURABLEMENT L'EXPLORATION DU SYSTÈME SOLAIRE. UN FORMIDABLE SUCCÈS QUE COMMENTE L'UN DE SES ACTEURS.

UNE MISSION EN QUELQUES DATES

15 octobre 1997
Décollage de *Cassini-Huygens* de la base américaine de Cap Canaveral à bord d'une fusée Titan IV

1^{er} juillet 2004
Insertion en orbite autour de Saturne

14 janvier 2005
Huygens se pose sur Titan

2008-2010
Première extension de la mission

2010-2017
Seconde extension

Septembre 2017
Fin de la mission, *Cassini* plonge dans l'atmosphère de Saturne

Dans le contexte de l'exploration du Système solaire, comment est née la mission Cassini-Huygens?

Francis Rocard: L'exploration des planètes a suivi une stratégie qui consistait d'abord à faire des survols. Les sondes *Pioneer 11*, *Voyager 1* et *Voyager 2* sont ainsi passées près de Saturne entre 1979 et 1981, prenant notamment des photos de la planète et de ses lunes. Pour réaliser une étude plus détaillée, il fallait mettre une sonde en orbite. Au début des années 1980, la mission *Galileo* étant bien avancée, avec Jupiter pour objectif, les Américains et les Européens ont alors commencé à réfléchir à un projet équivalent pour Saturne. Rapidement, les premiers se sont orientés sur l'étude d'une sonde, qui sera *Cassini*, et les seconds se sont attelés à la conception d'un atterrisseur pour Titan, *Huygens*. Du point de vue de la collaboration entre les agences spatiales américaine et européenne, la mission commune *Cassini-Huygens* a été exemplaire. Une idée géniale a été de décider que sur *Huygens*, un tiers des collaborateurs seraient américains et que, de la même façon, sur *Cassini*, un tiers des membres de l'équipe seraient européens.

Dans l'ensemble, tout s'est plutôt bien passé. Mais, sur ce genre de projets très complexes, il y a toujours quelques péripéties qui

émaillent l'élaboration de la mission. Par exemple, elle a été plusieurs fois menacée d'annulation, faute de crédits suffisants. Cela a obligé les Américains à revoir la conception de *Cassini* afin de réduire les coûts.

Quel a été le déroulement de la mission?

F. R.: La mission a décollé en 1997. Sept ans se sont écoulés avant que la sonde n'arrive à destination et se mette en orbite autour de Saturne. La mission était initialement programmée pour durer quatre ans. Cependant, en 2008, la Nasa a décidé de la prolonger de deux ans, car les réserves de propergols étaient encore élevées. Mais, rapidement, au vu des découvertes et des observations réalisées par la sonde, les Américains ont dégagé un budget de 60 millions de dollars par an pour de multiples extensions, ce qui a prolongé la mission jusqu'en septembre 2017. L'idée était d'observer Saturne pendant deux saisons presque complètes. Une saison y dure environ 7,5 ans. Notamment, nous avons ainsi pu voir l'hexagone du pôle nord de Saturne changer de couleur. Initialement, quand *Cassini* est arrivée, la région du pôle nord et le complexe de vents qui l'entourent (voir la photographie ci-dessous) étaient plongés dans l'obscurité. Mais avec le changement de saison, la lumière du Soleil a éclairé



⊠ cette région. Des réactions photochimiques ont formé des aérosols, les tholins, dans cette région qui, de bleue, est devenue rougeâtre.

Revenons au début de la mission. Quel a été l'apport de Huygens ?

F. R. : La première grande opération a été la séparation de *Cassini* et de *Huygens*. Ce dernier s'est posé sur Titan le 14 janvier 2005. Le module a récolté de nombreuses informations au cours de la descente : vitesse des vents, température, contenu en particules de l'atmosphère, photographies du sol. Les résultats ne paraissent pas spectaculaires, mais ils sont essentiels. De nombreuses incertitudes entachaient les modèles de l'atmosphère que l'on savait épaisse de 1200 kilomètres, surtout composée d'azote et de méthane gazeux avec une brume de particules solides en suspension. Les données de *Huygens* ont précisé les modèles et ont aidé à comprendre tous les processus observés sur Titan. Un détail qui surprend souvent est que la prise de données de *Huygens* n'a duré qu'un peu plus de deux heures. En effet, l'appareil ne pouvait transmettre ses informations que par l'intermédiaire de *Cassini* qui devait être dans le champ de vision de l'atterrisseur.

Lors de ses nombreux survols de Titan, *Cassini* a aussi contribué à mieux comprendre les phénomènes qui se produisent sur cette lune, notamment le cycle du méthane et de

l'éthane qui peuvent être liquides aux pressions et températures ($-180\text{ }^{\circ}\text{C}$ environ) qui règnent à la surface. Ils forment des rivières et des lacs alimentés de façon saisonnière par des précipitations.

D'après les mesures de *Huygens*, d'autres molécules carbonées, plus lourdes, sont présentes à la surface. Malheureusement, les instruments de l'atterrisseur étaient insuffisants pour effectuer une analyse exhaustive et les molécules les plus complexes présentes nous ont probablement échappé.

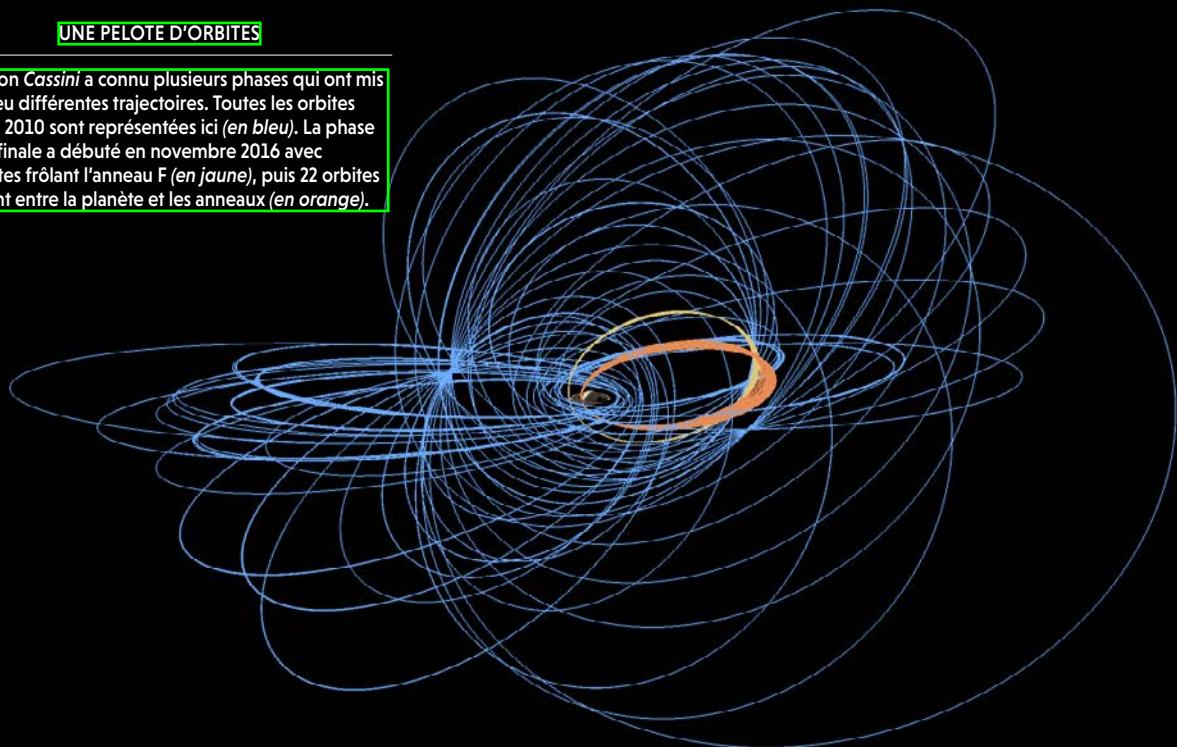
En outre, Titan cachait aussi de l'eau liquide. Des observations nous ont permis d'inférer de façon indirecte que sous la surface, très profondément, se cache un océan d'eau liquide. Ce monde a encore beaucoup de choses à nous révéler.

Et Titan n'est pas le seul monde à héberger un océan d'eau liquide...

F. R. : Tout à fait. Et c'était l'une des plus grandes surprises de la mission *Cassini*. Lors du survol d'Encelade, une lune couverte de glace, nous avons réalisé une photographie en contre-jour (une procédure ordinaire) et nous avons vu des jets extraordinaires : des geysers de particules d'eau et de glace, émis uniquement depuis la région du pôle sud. La présence de grandes quantités d'ions sodium et potassium dans ces jets suggérait que de l'eau liquide était présente sous la glace et en contact direct avec un noyau

UNE PELOTE D'ORBITES

La mission *Cassini* a connu plusieurs phases qui ont mis en jeu différentes trajectoires. Toutes les orbites depuis 2010 sont représentées ici (en bleu). La phase finale a débuté en novembre 2016 avec 20 orbites frôlant l'anneau F (en jaune), puis 22 orbites passant entre la planète et les anneaux (en orange).



rocheux dont elle dissolvait les minéraux. Par la suite, d'autres indices, tels les modèles expliquant les mouvements de libration (des oscillations) d'Encelade, ont confirmé l'existence d'un océan global sous la croûte.

Quelles en sont les conséquences sur la place de l'eau liquide dans le Système solaire et la présence éventuelle de vie ailleurs ?

F. R. : Les mondes du Système solaire qui présentent de l'eau liquide sont bien plus nombreux que nous ne l'avions anticipé. Mars a eu de l'eau en abondance à sa surface ; Titan, Encelade, Europe (une lune de Jupiter) et d'autres ont des océans souterrains. Ceux-ci ne

aussi des lunes et de leurs interactions, des spécialistes tels que Sébastien Charnoz, de l'Institut de physique du globe, à Paris, ont pu élaborer des modèles pour expliquer leur formation et leur évolution. Ils ont notamment pu expliquer comment les débris s'agglutinent et forment de nouvelles lunes à partir d'une certaine distance, où les forces de marées deviennent assez faibles. Nous avons aujourd'hui une compréhension très poussée de la dynamique de ces anneaux. Reste une énigme, celle de leur âge.

La sonde Cassini pourra-t-elle fournir des éléments de réponse à cette énigme ?

F. R. : Depuis avril 2017, *Cassini* est entrée dans l'ultime phase de sa mission, surnommée le « grand final ». En modifiant sa trajectoire, la sonde passera 22 fois entre la planète et l'anneau D, le plus proche de la planète. Certains survols s'effectueront dans l'anneau D et d'autres très près de la partie supérieure de l'atmosphère de la planète. C'est assez risqué, mais nous pourrions observer de très près certains détails des anneaux et de la planète. Une partie de ces données devraient nous permettre de trancher sur l'âge des anneaux.

Nous espérons aussi cartographier le champ gravitationnel de la planète afin d'en déduire si Saturne héberge en son cœur un noyau rocheux d'environ dix masses terrestres, comme l'envisage le scénario classique décrivant la formation de la géante gazeuse, ou non.

Les geysers d'Encelade ont été l'une des grandes surprises de la mission Cassini

gèlent pas grâce à l'énergie fournie par les importantes forces de marées dues à la planète géante gazeuse voisine. À l'inverse, l'océan de Charon, le compagnon de Pluton, a probablement gelé faute d'un apport suffisant d'énergie.

La lune Encelade est particulièrement intéressante dans le contexte de l'exobiologie. Le contact de l'eau liquide avec la roche fournit les ions indispensables à une forme de vie telle que nous la connaissons. Par ailleurs, la découverte récente de sources hydrothermales est encore un élément favorable. Mais alors comment aller chercher des preuves directes de cette vie, si elle existe ? L'analyse plus fine des composés rejetés dans les geysers nous donnerait peut-être des indices. En revanche, forer la croûte de glace sur plusieurs kilomètres semble, techniquement, illusoire.

Quelle est pour vous la découverte la plus marquante de la mission Cassini-Huygens ?

F. R. : Les jets d'Encelade constituent une découverte bien sûr extraordinaire. À mon avis, l'apport le plus important de *Cassini* concerne les anneaux. Grâce à la quantité et à la qualité des observations de ceux-ci, mais

En septembre, Cassini plongera dans Saturne. Pourquoi détruire ainsi la sonde ?

F. R. : Lors de ce plongeon, nous espérons récolter des informations jusqu'à la destruction de la sonde ou la perte du signal. Par ailleurs, la décision de faire s'abîmer la sonde dans la planète est liée à un souci de non-contamination. La sonde, qui n'a pas été stérilisée, pourrait encore transporter des bactéries terrestres. Si elle s'écrasait sur Titan ou Encelade, nous apporterions ces microorganismes sur ces mondes. Ce problème de contamination se présente pour chaque mission d'exploration, notamment sur Mars.

C'est aussi une façon de laisser la place à d'autres projets. La mission *Cassini-Huygens* lègue un héritage exceptionnel de découvertes, mais aussi de questions ouvertes. Les chercheurs réfléchissent déjà à de nouvelles idées pour explorer plus en détail Titan et Encelade, mais pas uniquement. La sonde *Juice* partira explorer les lunes de Jupiter à partir de 2022. Certains parlent d'aller rendre visite à Neptune (et sa lune Triton). Des missions qui auront, je l'espère, autant de réussite que *Cassini-Huygens*. ■

Propos recueillis par Sean Bailly

BIBLIOGRAPHIE

F. Postberg et al.,
Sous l'océan d'Encelade,
Pour la Science, n° 471,
janvier 2017.

F. Chiavassa et F. Rocard,
Quelle est la véritable
histoire du Système
solaire ?, Le Pommier, 2015.

R. Lorenz et Ch. Sotin,
La lune qui se prenait
pour une planète,
Pour la Science, n° 393,
juillet 2010.

L'ESSENTIEL

> Depuis une dizaine d'années, l'étude de l'olfaction chez le chien a révélé les secrets de son odorat.

> Flux d'air optimisé dans sa cavité nasale, grande surface d'échange avec l'air, analyse combinatoire des odeurs, plusieurs facteurs contribuent à ses performances étonnantes.

> Dans le domaine judiciaire comme en médecine, des chiens dressés détectent des odeurs que nous ne décelons pas, comme celle des billets de banque ou des cancers.

> Les applications sont multiples et encore peu mises en œuvre.

L'AUTEURE



BARBARA FERRY
chercheuse CNRS en
neuroscience fondamentale
au Centre de recherches en
neurosciences de Lyon (CRNL).

Un flair qui a du chien

DÉTECTER À L'ODEUR DROGUE, BILLETS, ARMES, MINES, EXPLOSIFS, INSECTES NUISIBLES, STRESS ET CANCER... C'EST CE QUE FONT COURAMMENT AUJOURD'HUI DES CHIENS AU FLAIR EXCEPTIONNEL ET SPÉCIALEMENT ENTRAÎNÉS.

Hormis peut-être Rantanplan, le chien est un animal macrosmate : son environnement olfactif est aussi précis et détaillé que l'environnement visuel d'un oiseau de proie. Depuis longtemps, l'homme utilise l'odorat de son compagnon pour pister du gibier ou retrouver des personnes disparues. Mais ces dernières années, les domaines où ses extraordinaires capacités olfactives et sa vivacité ont été mises à profit se sont multipliés. Découverte de drogue, d'armes ou d'explosifs, détection de nuisibles animaux ou végétaux, identification de personnes souffrant d'anxiété ou d'hypoglycémie, voire atteintes de cancer à un stade précoce... les performances de l'odorat canin sont d'une variété étonnante. Et montrent que, même si tous les jours de nouvelles technologies remplacent les anciennes, l'homme peut se rassurer : l'acuité olfactive de son meilleur ami ne sera pas égalée de sitôt !

Premier animal à avoir été domestiqué, le chien, qui descend du loup, s'est intégré dans

notre quotidien depuis fort longtemps. La découverte récente d'un crâne de canidé dans les grottes de l'Altai, dans le sud de la Sibérie, prouve en effet que le processus de domestication des loups, favorisé par un habitat majoritairement sédentaire, a commencé il y a 33 000 ans. En élevant des louveteaux et sélectionnant les plus dociles, l'homme a trouvé chez le loup un compagnon de vie idéal.

ULTRASENSIBLE AUX ODEURS

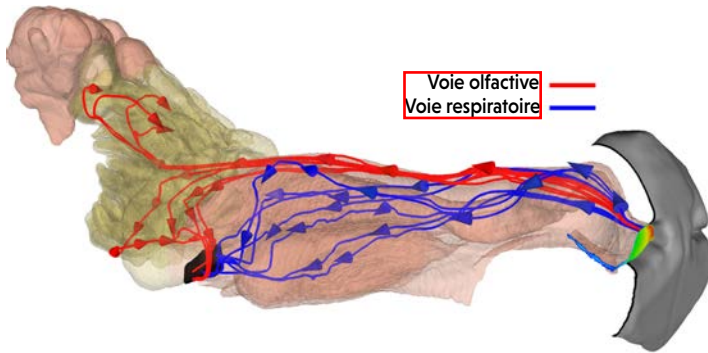
La très grande acuité olfactive de l'animal s'est révélée un atout pour aider son nouveau maître à chasser et à garder son territoire contre un peu de nourriture. Cette relation de commensalisme a conditionné des changements physiques (génétiques) et comportementaux qui ont transformé le loup en chien. Mais avec l'apparition des machines pour le travail, de l'élevage et des armes, le rôle du chien a évolué. Si l'homme l'utilise toujours comme pisteur au cours de la chasse, il s'est peu à peu aperçu que les remarquables compétences olfactives de son commensal lui permettaient d'identifier la présence de molécules



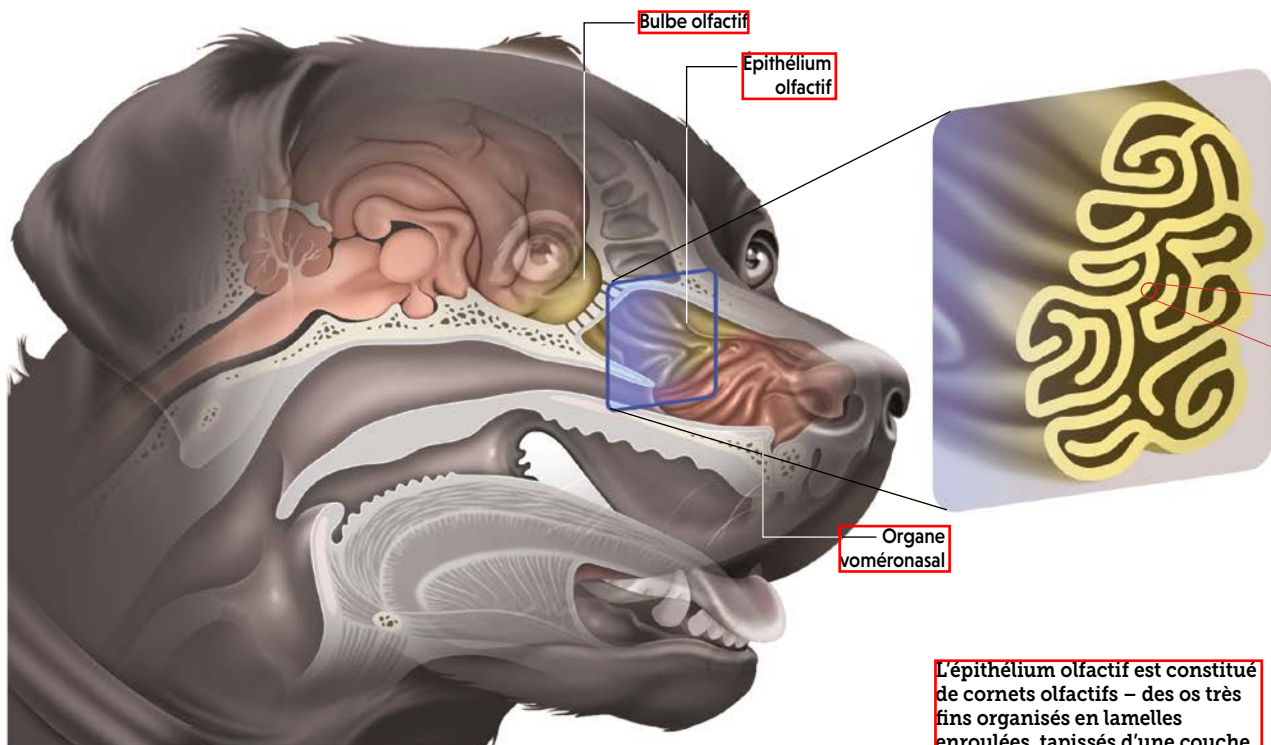
UNE ANATOMIE SOPHISTIQUEE

Le chien doit son odorat à un appareil olfactif particulièrement développé. La zone sensorielle du museau est située dans la partie supérieure et au fond de la cavité nasale (ci-dessous). Elle est constituée de fines lamelles osseuses enroulées sur elles-mêmes et recouvertes d'un épithélium, ce qui permet d'avoir une surface d'échange maximale entre la zone de traitement sensoriel et les molécules odorantes présentes dans l'air inspiré. Des travaux d'imagerie par résonance magnétique

ont aussi montré que le flux d'air qui atteint l'épithélium olfactif ne se mélange pas à l'air utilisé pour respirer, ce qui facilite le traitement des odeurs. Dans cette zone, des neurones dits sensoriels ou olfactifs captent les molécules odorantes à l'aide de récepteurs spécifiques et transmettent au cerveau les informations sensorielles ainsi reçues, par l'intermédiaire d'une analyse combinatoire d'une grande précision réalisée dans le bulbe olfactif (en bas à droite).

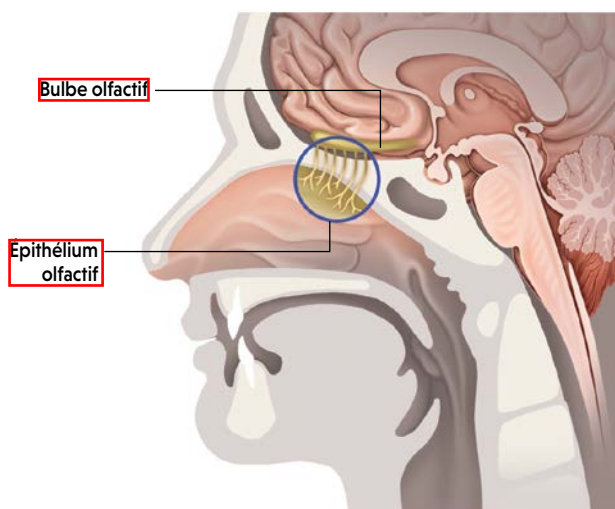


Lors de l'inspiration, la truffe se contracte, ce qui envoie l'air vers le haut. Une membrane sépare alors le flux en deux, et 12 % de l'air inspiré est envoyé dans la zone sensorielle (en rouge). Le reste atteint les poumons via le pharynx (en bleu). Lors de l'expiration, le flux d'air est envoyé sur les côtés des narines, ce qui l'empêche de se mélanger à l'air inspiré. Les molécules olfactives se concentrent ainsi dans le seul flux entrant.



Plusieurs structures sont impliquées dans le traitement des odeurs chez le chien. Le bulbe olfactif est la région du cerveau où arrivent les informations en provenance directe de la zone sensorielle de la cavité nasale, l'épithélium olfactif. Le bulbe du chien est trois fois plus grand que celui de l'homme, même si le cerveau canin est dix fois plus petit. L'organe voméronasal, quant à lui, est spécialisé dans la détection des phéromones, ces messagers chimiques qui jouent un rôle dans l'attraction sexuelle notamment...

L'épithélium olfactif est constitué de cornets olfactifs – des os très fins organisés en lamelles enroulées, tapissés d'une couche de cellules (un épithélium) à la surface de laquelle sont situées quelque 250 millions de cellules réceptrices spécialisées dans la capture des molécules olfactives, contre 5 millions chez l'homme. Grâce aux lamelles enroulées, la surface réceptrice peut atteindre 200 cm² contre 2 à 3 cm² chez l'homme.

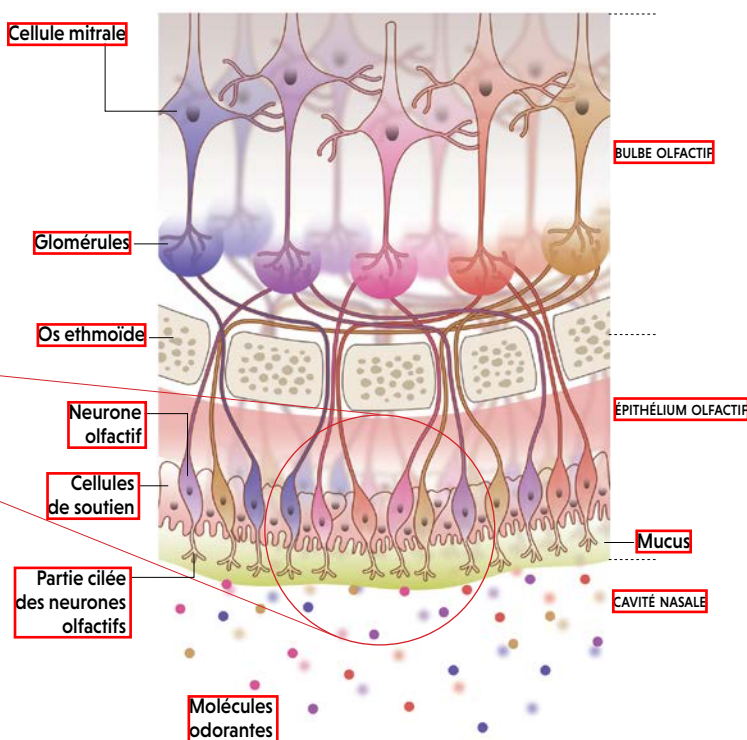


Chez l'humain, la zone sensorielle de la cavité nasale est plus petite et non enroulée. Son bulbe olfactif n'occupe que 0,01 % du cerveau, contre 0,31 % chez le chien. L'animal est capable de discriminer 500 000 odeurs, alors que l'homme est limité à 10 000. Néanmoins ce dernier est plus sensible à certaines molécules odorantes comme l'acide valérique, utilisé dans la synthèse d'arômes et d'adoucissants, sans doute en partie grâce à ses capacités cognitives.

odorantes en très petite quantité et non décelables par le nez humain.

La détection et la discrimination des odeurs sont un processus indispensable à la survie (identification de source de nourriture, de la présence de la mère, de prédateurs) et à la reproduction (identification d'un partenaire sexuel et de sa disponibilité reproductive) de nombreuses espèces animales et l'on comprend aisément pourquoi ce système, parfois très complexe, spécialisé dans la détection et l'identification des molécules odorantes en suspension dans l'air, a été préservé au cours de l'évolution, notamment chez les mammifères.

Si l'étude du sens de l'olfaction a longtemps été négligée par rapport à celle de la vue et de l'ouïe, elle connaît un regain d'intérêt depuis un peu plus d'une quinzaine d'années. Bénéficiant de nouvelles technologies développées en recherche fondamentale, l'étude de l'olfaction a permis de comprendre les mécanismes par lesquels les odeurs sont transmises au cerveau après avoir été captées et transduites par le système sensoriel périphérique – le nez. Ainsi, dès 2007, en étudiant la dynamique des fluides à l'intérieur de la cavité nasale du chien, l'équipe de Gary Settles, de l'université de Pennsylvanie, aux États-Unis, a montré que sa structure anatomique particulière est organisée de telle manière qu'elle optimise l'efficacité du transport des odeurs et que le nez du chien fonctionne totalement différemment du nôtre (voir l'encadré ci-contre).



À la surface de l'épithélium olfactif, des neurones sensoriels captent les molécules odorantes qui pénètrent dans le mucus à l'aide de récepteurs situés sur les cils qu'ils présentent à leur extrémité. Chaque neurone exprime un seul type de récepteur. À leur autre extrémité, les axones de chaque cellule réceptrice forment un faisceau de 10 à 100 axones, lequel traverse l'os ethmoïde, situé à la base du crâne. Les faisceaux convergent dans le bulbe olfactif vers d'autres neurones, les cellules mitrales, formant des sortes de bourgeons, les glomérules. Chaque glomérule reçoit les terminaisons de plusieurs milliers de neurones sensoriels qui portent tous le même type de récepteur olfactif. Les axones des cellules mitrales assurent les connexions entre le bulbe olfactif et les régions du cerveau qui traitent l'information sensorielle – dont le système limbique.

UN MUSEAU OPTIMISÉ

Lorsque nous inspirons, l'air que nous sentons et que nous respirons fait partie d'un seul et même flux. Alors que chez le chien, la présence d'une membrane à l'intérieur du museau permet de séparer le flux d'air entrant en deux : l'un est envoyé dans les poumons et permet la respiration, tandis que l'autre sert à sentir. Et cela d'autant mieux que les muscles de sa truffe se contractent de manière à orienter le flux d'air vers le haut et à l'envoyer ainsi préférentiellement dans la zone sensorielle olfactive. Ensuite, au cours de l'expiration, le flux d'air ressort sur les côtés des narines comme l'ont montré les travaux d'imagerie en résonance magnétique menés par l'équipe de Gary Settles en 2009. Cette dynamique particulière de l'air inspiré et expiré potentialise le traitement des odeurs.

Afin de maximiser la détection de celles-ci, le chien « flaire » : par une série d'inhalations et d'expirations rapides (environ six fois par seconde), il crée une turbulence interne qui accroît le transport des molécules odorantes jusqu'aux récepteurs situés dans la zone sensorielle olfactive. Les chiens de chasse en particulier maintiennent ainsi sur leur muqueuse olfactive un flux interne constant chargé de

molécules odorantes, même en phase d'expiration ou en pleine course. De plus, et contrairement à nous, chaque narine fonctionne de manière indépendante, ce qui fournit au chien une meilleure précision sur la provenance de certaines odeurs.

Comme les fanons d'une baleine trient le krill, l'organisation de la muqueuse olfactive, enroulée sur elle-même, offre une grande surface d'échange où les molécules odorantes inspirées sont triées selon leur composition chimique grâce à des récepteurs olfactifs. Ces derniers sont des protéines membranaires situées sur la surface des cils prolongeant les neurones sensoriels de la muqueuse qui baignent dans du mucus. Comme chez tous les mammifères, ces récepteurs captent et fixent les molécules en fonction d'un certain nombre de propriétés (poids moléculaire, densité électronique, polarisabilité, organisation tridimensionnelle...). Chaque neurone sensoriel exprime un seul type de récepteur.

DES COMBINAISONS D'ACTIVATION DES NEURONES

À leur autre extrémité, les neurones sensoriels assemblent leurs axones en faisceaux qui convergent dans le bulbe olfactif, où d'autres neurones prennent le relais et transmettent l'information sensorielle reçue aux centres primaires et secondaires (dont le système limbique) du cerveau qui vont les traiter (*voir l'encadré pages 42 et 43*).

En 1999, l'équipe de Linda Buck (qui a reçu le prix Nobel de médecine en 2004 pour ses travaux sur les récepteurs olfactifs des mammifères) a montré, grâce à l'imagerie calcique – une technique qui permet de suivre l'activation de larges populations de neurones en temps réel –, qu'un récepteur olfactif de la muqueuse répond à plusieurs molécules odorantes de structures chimiques différentes et que, à l'inverse, plusieurs récepteurs olfactifs

répondent à la même molécule olfactive. Le codage de l'odeur résulte donc d'une activation combinatoire d'un ensemble de récepteurs. Chaque odeur est ainsi représentée, à l'entrée du bulbe olfactif, par une carte d'activité fonctionnelle qui lui est propre. Ce système combinatoire permet, malgré un nombre limité de récepteurs (environ 1 200 chez le chien, 400 chez l'humain) de discriminer des milliers de molécules odorantes naturelles ou non (plus de 500 000 chez le chien, environ 10 000 chez l'humain).

APPRENDRE À « MARQUER » UNE ODEUR

Ce flair exceptionnel fait du chien un merveilleux « outil de détection », extrêmement performant dans de nombreux domaines allant de la sécurité publique aux besoins de santé, à condition d'avoir suivi un dressage approprié.

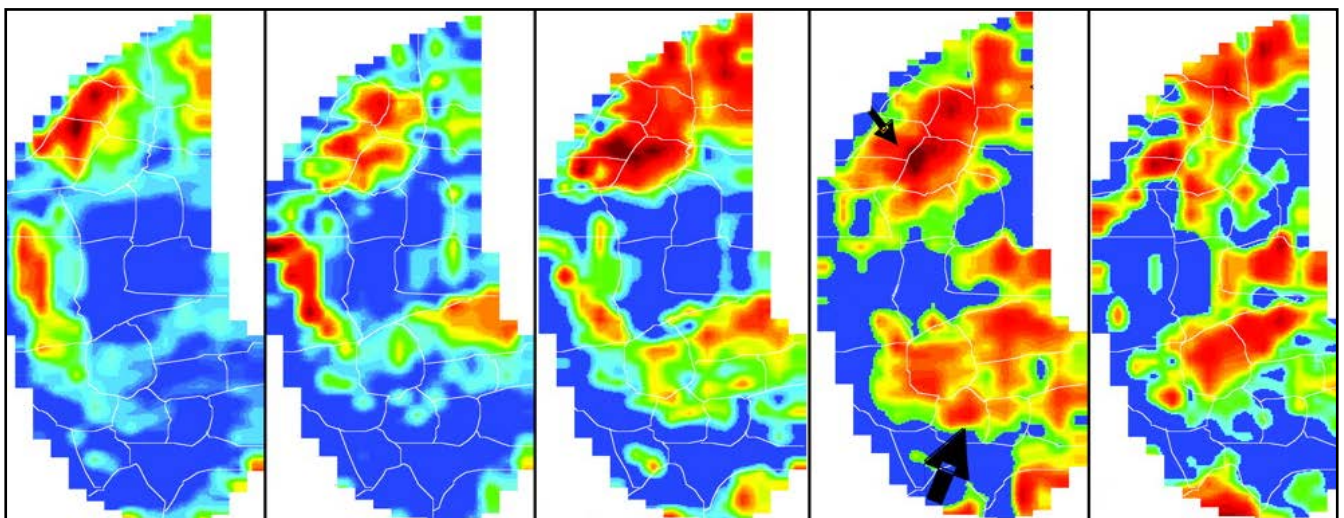
Au début de sa formation, quelle que soit sa spécialité, le chien doit apprendre à mémoriser l'odeur cible qu'il devra détecter par la suite. Son dresseur le motive en utilisant son instinct de chasse et son goût pour les récompenses: il donne au chien un jouet ou une friandise à chaque fois qu'il détecte l'odeur cible. Rapidement, le chien montre un réel plaisir à effectuer la tâche. Mais, surtout, il intègre très vite les règles du jeu: pour obtenir la récompense, il doit « marquer » l'odeur cible, c'est-à-dire montrer une réponse comportementale conditionnée qu'on lui a apprise: s'asseoir devant la prise, aboyer, retourner chercher son maître...

La finesse du dressage est capitale pour que l'animal ne commette pas d'erreur de reconnaissance, ou très peu, au cours de son travail

LE GOÛT D'UNE CUILLERÉE DE SUCRE

L'odorat et le goût vont de pair. Un chien distingue le goût laissé par une cuillerée de sucre dans 4 millions de litres d'eau, soit le volume de deux piscines olympiques, aussi clairement que nous distinguons le goût laissé par cette même cuillerée dans notre café...

Dans le bulbe olfactif de souris (*ci-dessous*), des régions différentes (glomérules) s'activent selon la molécule sentie (*ici des aldéhydes différents comportant de 4 à 8 atomes de carbone, de gauche à droite*). Chaque carte d'activation bulbaire est propre à une molécule olfactive.



Avec 1200 récepteurs olfactifs, un chien distingue plus de 500 000 molécules odorantes

de détection. Ainsi, au cours de la formation, le dresseur récompense son chien lorsque celui-ci ne détecte pas l'odeur cible dans un scénario où elle est effectivement absente ou remplacée par un leurre. En apprenant qu'il sera récompensé s'il ne fait pas d'erreur, le chien comprend qu'il n'a aucun intérêt à en commettre. Dès lors, il préfère toujours ne pas « marquer » l'odeur plutôt que de se tromper.

En fonction de la spécialité pour laquelle on dresse le chien, la procédure d'entraînement se complexifie de manière à augmenter sa sensibilité olfactive. Par exemple, s'il s'agit d'en faire un détecteur de mines ou d'explosifs, le dresseur veillera à cacher le support contenant les odeurs à détecter afin de le rendre de moins en moins accessible. Cette formation dure en moyenne trois mois et demi; celle préparant un chien à identifier des odeurs humaines, deux ans.

À LA RECHERCHE DES EXPLOSIFS

Qu'ils soient de la police, de la gendarmerie, de la sécurité civile ou privée, les chiens sont devenus d'incircornables, précieux et talentueux auxiliaires des forces de secours et de sécurité, assurant plusieurs types de mission comme la détection de matière – stupéfiants, billets de banque, armes, explosifs, munitions, produits accélérateurs d'incendie... –, la recherche de personnes – malfaiteurs, victimes, disparus (sous les décombres, sous la neige après une avalanche) –, ainsi que l'identification des odeurs humaines dans le cadre d'une enquête policière (odorologie). Ces disciplines font toutes appel aux qualités de pistage que les chiens de chasse ou de berger ont développées au cours de l'histoire pour suivre un gibier ou garder un troupeau. À ce jour, en France, la gendarmerie et la police comptent plus de mille chiens qui évoluent dans les différentes équipes cynophiles opérationnelles.

L'ÉNIGME DE LA TRUFFE

Le chien se lèche souvent la truffe, qui est toujours humide. Pourquoi ?

Les odeurs phéromonales, émises lors d'un état physiologique particulier, sont captées par le mucus qui recouvre le nez du chien. Par léchage, ces molécules sont transmises à l'organe voméronasal, situé dans le palais à l'entrée de la cavité buccale du chien (voir l'encadré page 42). Ce système de traitement des odeurs fonctionne indépendamment du système de traitement olfactif principal, car les phéromones sont des marqueurs bien particuliers...

Pour la détection de matière, qu'il s'agisse d'explosifs ou de billets de banque, on utilise en général des chiens de petit format comme les fox-terriers et les jack-russell, vifs, mais également des chiens de plus grande taille comme les bergers allemands ou malinois. Ces quinze dernières années, la lutte contre le terrorisme étant devenue un enjeu sociétal majeur, l'identification rapide et efficace des colis piégés est indispensable dans les lieux publics très fréquentés comme les aéroports, les gares, les frontières ou encore les zones aéroportuaires. Grâce à ses caractéristiques morphologiques, le chien se meut rapidement dans les lieux très fréquentés tout comme dans les zones accidentées et est ainsi capable de localiser des sources d'explosifs et de toutes sortes de matériaux dangereux, même dans des zones confinées ou difficiles d'accès. En plein milieu de la foule, il détecte d'autant plus efficacement les odeurs d'explosifs, d'armes à feux ou encore de fumigènes transportés par des personnes en mouvement qu'il est capable de repérer les odeurs cibles même si le suspect s'est déjà éloigné de plusieurs mètres. Il a ainsi un très grand périmètre d'action... Sans éveiller les soupçons, ni affoler les badauds. Au contraire même: des études menées aux États-Unis montrent que sa présence tranquillise la population. En France, l'utilisation du chien détecteur d'explosifs en condition de rassemblement populaire a fait son apparition en 2016.

L'ODEUR DE L'ARGENT SALE

L'argent sale issu de braquages, de trafic de drogue ou du blanchiment échappe de même difficilement aux chiens spécialement formés à détecter l'odeur de l'encre à billets. De faux billets (mais produits avec le papier et l'encre des vrais billets) sont spécialement fabriqués pour leur formation et fournis par la Banque de France. Ces billets sont alors déchiquetés et comprimés sous forme de briques avant d'être utilisés dans le dressage des chiens.

Depuis qu'une étude, menée en 2002 par Marie Lafitte et ses collègues du laboratoire d'expertise Toxlab, à Paris, a montré que 90% des billets de banque impliqués dans le trafic de drogue sont imprégnés de molécules odorantes issues de ces drogues, les chiens formés pour la détection des stupéfiants le sont aussi pour celle des billets de banque. Dès lors, ils sont capables de trouver les caches de drogue, mais aussi celles des billets associés au trafic, même si les trafiquants les ont manipulés avec précaution.

Par ailleurs, les personnes malhonnêtes tentées par l'évasion fiscale ont intérêt à se méfier: les chiens détecteurs de billets sillonnent maintenant les aéroports afin de détecter l'odeur des billets que les fraudeurs cachent dans leurs valises. En Italie, par exemple, on

estime que 272 milliards d'euros échappent chaque année au fisc. En 2016, grâce au travail des chiens détecteurs de billets, 130 millions de ces euros ont été récupérés dans les aéroports.

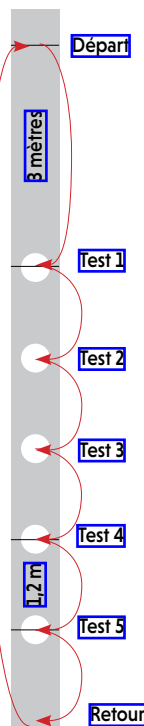
Sous plusieurs mètres de neige

Même ceux qui n'ont jamais vu *Belle et Sébastien* savent que les chiens sont particulièrement doués pour retrouver des personnes égarées. Ils peuvent suivre à la trace un individu dont ils connaissent l'odeur (pistage), mais aussi retrouver toute personne vivante dans un périmètre donné (questage) même si l'on ne dispose pas de son identité olfactive, si on les a entraînés à distinguer l'odeur corporelle humaine parmi les autres.

C'est évidemment le cas des chiens chargés de retrouver des survivants sous des décombres ou dans une avalanche. Dans ce dernier cas, les chiens sont aussi formés à reconnaître l'odeur particulière du « corps humain qui remonte à la surface du manteau neigeux ». Au point de savoir repérer les victimes ensevelies sous une couche de neige de plusieurs mètres ! Ce type de spécialisation requiert également une excellente condition physique. En effet, au cours de leur entraînement, ces secouristes à quatre pattes doivent apprendre à grimper à une échelle, marcher sur une planche en équilibre instable, se glisser dans des boyaux sombres, franchir des zones de feu... Ils doivent aussi se familiariser à l'hélicoptère ainsi qu'aux bruits des bulldozers et des marteaux-piqueurs. Les bergers belges malinois constituent la majorité des troupes, car ils réussissent particulièrement bien toutes ces épreuves.

Si, dans les spécialités précitées, le chien doit se référer à un type d'odeur pour effectuer son travail de détection, de nombreuses études montrent qu'il est capable d'effectuer des tâches beaucoup plus difficiles fondées sur la comparaison de différentes odeurs de même type, en particulier les odeurs humaines, afin d'identifier celle qu'on lui demande de retrouver. Un véritable exploit tant l'odeur humaine est complexe.

En effet, notre odeur corporelle est constituée d'un mélange de multiples éléments. Tout d'abord une composante acquise génétiquement, laquelle détermine la composition du mélange de molécules chimiques (hydrocarbures, alcools, acides carboxyliques, cétones, aldéhydes) que sécrètent les cellules épithéliales de l'épiderme ainsi que les glandes sudoripares et sébacées. À cette composante héritée s'ajoute celle liée à l'activité des microorganismes qui colonisent la surface de notre peau : ces bactéries fractionnent les acides gras à longue chaîne que produisent les glandes sudoripares en acides gras à structure courte, volatils et odorants.



Pour apprendre à détecter une odeur humaine particulière parmi d'autres, les chiens suivent un entraînement en salle de travail. Sur une ligne sont espacés des bocaux contenant chacun une odeur humaine. Après avoir senti et mémorisé, au point de départ, l'odeur cible à reconnaître, l'animal est libre de parcourir librement la ligne, le long de laquelle il flaire chaque échantillon. Lorsqu'il repère l'odeur cible, le chien se couche devant le bocal correspondant : il « marque » l'échantillon. Le principe de formation est le même pour les chiens dressés à rechercher des personnes disparues lors d'une avalanche, mais celle-ci est plus simple, car il leur « suffit » d'apprendre à détecter l'odeur du corps humain sous la neige. Un entraînement physique complète le dressage, afin que les chiens ne soient pas déstabilisés par les conditions du terrain et de l'opération.

En 2016, les chiens ont détecté 130 millions d'euros dans les aéroports italiens



Ce premier mélange constitue ce que les chercheurs appellent l'«odeur primaire», qui reste constante dans le temps. Chaque humain a ainsi une odeur corporelle qui lui est propre, caractérisée par une combinaison spécifique de tous ces éléments. Sur ce complexe primaire se greffe une «odeur secondaire» qui dépend du régime alimentaire ou d'un état émotionnel particulier tel que la dépression ou le stress. Et une odeur «tertiaire» constituée des molécules odorantes «extérieures», apportées par les cosmétiques, les savons et les parfums que nous appliquons sur la peau.

Lors de la recherche de personnes, la piste est constituée des odeurs qu'a laissées un individu (effluves corporels spécifiques, arômes artificiels de vêtements, chaussures, cosmétiques, etc.) et des modifications du terrain dues à son passage (végétaux ou insectes écrasés). Le travail du chien consiste alors à comparer l'odeur de l'individu qu'on lui a demandé de mémoriser (appelée odeur de référence, que le chien a par exemple extraite d'un vêtement qu'on lui a présenté) à toutes celles présentes sur les lieux. La grande difficulté consiste pour l'animal à identifier et discriminer l'odeur de référence parmi toutes les odeurs qui l'entourent et qui proviennent non seulement de l'individu recherché, mais aussi des autres personnes ayant traversé les lieux. Alors seulement, il pourra suivre sa piste. Il y

parvient d'autant mieux qu'il est capable de reconnaître le niveau de fraîcheur de l'odeur pour s'orienter dans la direction prise par l'individu recherché.

Si les bergers allemands ou malinois sont généralement choisis pour le pistage, depuis 2003, la gendarmerie fait appel aux chiens de race Saint-Hubert qui, outre leurs qualités olfactives très prononcées, montrent une grande capacité à retrouver des pistes «froides», c'est-à-dire empruntées au moins une heure avant par la personne recherchée, voire plus anciennes encore. Peut-être parce que lorsqu'ils suivent une piste au sol, leurs oreilles tombantes maintiennent le flux odorant à l'avant, vers la truffe. Au cours d'une enquête, un chien Saint-Hubert a ainsi identifié un chemin emprunté... Quatorze jours avant la disparition d'un individu!

SUR LA SCÈNE D'UN CRIME

Mais le plus haut degré de sensibilité lors de l'identification des odeurs humaines est celui demandé dans le cadre d'une enquête policière. L'objectif de l'odorologie, pratiquée en France depuis 2003 par la police technique et scientifique d'Écully (PTS), est d'identifier des auteurs ou victimes d'infractions criminelles qui ont pu laisser leur trace odorante sur la scène de crime ou sur un objet, au même titre que leur ADN ou leur empreinte papillaire.

FUMIGÈNES AU STADE

En mars dernier, en pleine phase de formation, lors de l'entrée du chien et de son maître dans le stade pour une séance d'entraînement, l'un des chiens de la brigade de détection de fumigènes « marque » un endroit devant lequel le maître a fait passer son chien par hasard. Après une recherche rapide du lieu, il s'est avéré qu'un stock avait été caché là en prévision d'un match.

DE LA PILOSELLE À LA PUNAISE DE LIT

Des chiens sont formés à la détection de toutes sortes de nuisibles, végétaux ou animaux. Ainsi, grâce aux performances olfactives de deux chiens spécialement dressés, la piloselle, une plante invasive nuisible importée d'Europe, est actuellement en passe d'être éradiquée du parc national Kosciuszko, en Australie. En mars 2016, les deux chiens de la brigade australienne de détection des plantes nuisibles ont sillonné le parc à la recherche de la piloselle. Accompagnés de leurs maîtres, les deux chiens ont localisé des centaines de plants nuisibles avant de les détruire – ils avaient en effet été entraînés à détecter les plantes et à les déterrer...

Originaire de la Méditerranée, la cochenille de la vigne a été importée d'Israël dans la vallée de Coachella, entre Los Angeles et San Diego, à cause de cépages introduits illégalement. Cette variété nuisible de cochenille est maintenant responsable de la diffusion de la maladie de l'enroulement de la vigne. Une superficie de 100 000 hectares de vigne serait touchée. Grâce à des

chiens détecteurs de la phéromone de ces nuisibles, il sera peut-être bientôt possible de les éradiquer des cultures. En effet, en 2007, Michael Honig, président de l'association vinicole écologique de Californie, a commencé à travailler avec l'Institut américain des chiens d'assistance pour mettre au point un programme d'éradication de la cochenille de la vigne. Les chiens de race golden retriever ont été formés à la détection et à l'identification des phéromones émises par la cochenille femelle avant la ponte. Grâce à eux, des dizaines d'hectares de vigne ont été préservés depuis le début du programme, sans aucune utilisation de pesticide. Les résultats ont été si convaincants qu'en 2016, l'Institut américain des chiens d'assistance a proposé d'étendre son programme à la détection précoce du phylloxera, une sorte de puceron qui ravage les vignes.

Celle des punaises de lit s'est développée au début des années 2000 en Floride. Grâce à une formation à l'identification de l'odeur des œufs, des excréments et de la punaise elle-même, les chiens sont capables d'identifier leur présence derrière les murs, plinthes, lits, meubles et sous les tapis, avec plus de 95 % de réussite. Très répandue aux États-Unis, cette méthode est arrivée en France en 2010. Depuis, de nombreuses sociétés privées ont vu le jour et proposent aux particuliers les services de leurs chiens de détection.



✓ Cette technique est fondée sur trois faits. D'abord, comme l'énonce le principe de Locard (Traité de criminalistique, 1940), « nul ne peut agir avec l'intensité que suppose l'action criminelle sans laisser des traces multiples de son passage », comme les odeurs. De plus, comme les caractéristiques physicochimiques de l'odeur humaine persistent dans le temps, on doit pouvoir les retrouver. Enfin, l'odeur humaine est unique : en effet, les chiens sont même capables de différencier les odeurs de deux « vrais » jumeaux (homozygotes) vivant dans le même foyer et partageant le même régime alimentaire, comme l'a montré une étude tchèque en 2011.

Contrairement aux chiens détecteurs de matières ou de personnes, dont la tâche est d'identifier un seul type d'odeur, les chiens spécialisés en odorologie doivent apprendre à comparer de nouvelles odeurs qui leur sont présentées chaque jour. Cet exercice est d'abord pratiqué uniquement dans une salle de travail : dans un premier temps, les chiens doivent mémoriser l'odeur qui a été prélevée sur le lieu de l'infraction (odeur de référence) par les agents de la police technique et la comparer à cinq odeurs de personnes d'âge, d'ethnie et de sexe similaires disposées dans des bocaux sur une ligne (voir la figure page 46), parmi lesquelles on a placé au hasard l'odeur du suspect appréhendé dans le cadre de cette infraction (odeur cible). Si le chien identifie l'odeur de référence et l'odeur cible comme appartenant au même individu, il « marque » l'odeur cible en s'asseyant devant le bocal qui la contient.

En 2016, notre équipe a montré, en collaboration avec la PTS, qu'après une formation rigoureuse de deux ans, les chiens de la PTS sont capables d'identifier deux odeurs correspondantes dans 85 % des cas. Et ce sans jamais commettre d'erreur : soit ils trouvent les deux odeurs correspondantes, soit ils ne « marquent » aucune odeur cible. Entre 2003 et 2016, grâce à ces performances, l'odorologie a été utilisée dans 522 procédures de la police technique et scientifique à l'échelle nationale et a permis de résoudre 162 affaires judiciaires.

TRAQUER LE CANCER À UN STADE PRÉCOCE

Les chiens sont non seulement capables de distinguer des odeurs humaines, mais aussi de repérer chez un individu la signature olfactive de certaines pathologies comme le cancer, l'hypoglycémie ou l'état de stress. Les chercheurs ont compris à la fois que le cancer avait une odeur et que les chiens pouvaient le détecter depuis qu'en 1989, Hywell Williams et Andres Pembroke, de l'hôpital King's College, au Royaume-Uni, ont publié le cas d'une patiente de 44 ans décidée à consulter un dermatologue

Les chiens ont identifié la présence de marqueurs cancéreux chez 98 % des 902 patients étudiés

après avoir remarqué que son chien passait de longs moments à renifler une lésion pigmentée sur sa cheville. Après biopsie de la lésion, l'expertise a montré la présence d'un mélanome. Le dépistage d'un cancer de la peau chez un autre patient dans des circonstances similaires a encouragé la mise au point de la technique et la recherche sur l'odeur du cancer.

En effet le métabolisme des cellules cancéreuses, différent de celui des cellules saines, se traduit par l'apparition de molécules spécifiques qui se retrouvent dans les urines. Malheureusement, ces molécules, appelées biomarqueurs, ne sont toujours pas précisément identifiées à l'heure actuelle, mais comme ce sont des composés organiques volatils, elles présentent des caractéristiques olfactives susceptibles d'être détectables grâce à l'odorat canin. La technique s'est révélée étonnamment efficace pour de nombreux cancers, comme ceux de la vessie, de la prostate, du sein, de l'ovaire, du poumon, le mélanome et les carcinomes ORL. Ainsi en 2015, dans une étude menée au centre clinique et de recherche Humanitas, à Milan, sur la détection du cancer de la prostate, les chiens ont été capables d'identifier correctement la présence de marqueurs cancéreux chez 98 % des 902 patients étudiés.

Plus récemment encore, en janvier 2017, l'équipe de Mauricio Salcedo, de l'hôpital oncologique de Mexico, a montré que des chiens de race Beagle pouvaient être entraînés à détecter la présence d'un cancer de l'utérus chez certaines patientes grâce à l'identification des marqueurs olfactifs caractéristiques de la tumeur présents dans des prélèvements.

Les résultats sont si encourageants que la détection, dans les urines des patients, de ces mystérieux marqueurs odorants volatils spécifiques des cancers par des chiens spécialement dressés pourrait bientôt rendre possible la mise en évidence de la composition chimique de ces biomarqueurs.

Évidemment, il est difficile d'imaginer que tous les services d'oncologie auront les moyens de monter leur propre unité cynophile de détection de marqueurs tumoraux. L'idée est cependant d'ores et déjà en développement grâce au projet Kdog initié par Isabelle Fromantin, à l'institut Curie, pour détecter le cancer du sein. Avec l'espoir de faire ainsi d'une pierre deux coups : un diagnostic à bas coût et une prise en charge plus précoce, augmentant le pronostic de vie.

LES MOLECULES DE L'HALEINE

D'autres applications médicales des chiens de détection sont envisagées. Au moyen d'un dressage simple, le chien d'un patient souffrant d'hypoglycémie est capable de donner l'alerte lorsqu'il détecte, dans l'haleine de son maître durant la nuit, l'émission de corps cétoniques issus de la dégradation des graisses – signe que le patient, en manque de sucre, puise dans ses réserves. En mars 2015, Solène Grivolat et Arnaud Bertrand ont créé l'association Acadia, qui propose aux familles d'enfants diabétiques des chiens d'assistance capables de détecter les hyperglycémies ou hypoglycémies de l'enfant. Cette association, primée lors du concours Jeunes Talents Rhône-Alpes en 2015, espère à long terme devenir le premier réseau d'éducation canine spécialisé dans le diabète en France.

Aux États-Unis, une autre initiative a montré que des chiens pouvaient détecter et prévenir les crises d'angoisse d'enfants autistes. En 2013, l'école spécialisée Calais, à Whippany, dans le New Jersey, a engagé un chien nommé Cali, formé à détecter l'odeur du cortisol, une molécule sécrétée par les glandes surrénales et présente dans l'haleine des enfants en cas de stress. L'accueil de Cali au sein de l'école ainsi que le nombre d'enfants stressés pris en charge grâce à lui ont encouragé l'établissement à prendre, en 2015, les services d'un second chien nommé Cléo.

Tous les jours, les deux compères accueillent les enfants de l'école, et les sentent à distance au moment où ils entrent dans l'établissement. Lorsqu'ils détectent l'odeur du cortisol, ils le signalent immédiatement à leurs maîtres (chaque chien a un maître spécialisé en thérapie animale), qui prennent l'enfant en charge afin de le rassurer et de calmer sa crise d'angoisse.

Avant l'arrivée de Cali et Cléo, les enseignants devaient chaque jour affronter de nombreuses crises qui duraient parfois de deux à trois heures. Depuis, le rythme est passé à deux ou trois crises de un quart d'heure environ par semaine. En septembre 2015, l'école Calais a remporté le prix de la meilleure pratique dans la thérapie assistée par l'animal. Une nouvelle preuve, s'il en fallait, que nos ancêtres ont eu une riche idée en domestiquant le loup. ■

BIBLIOGRAPHIE

S. Marchal et al., **Rigorous training of dogs leads to high accuracy in human scent matching-to-sample performance**, *Plos One*, doi : 10.1371/journal.pone.0146963, 2016.

G. Taverna et al., **Sniffing out prostate cancer : A new clinical opportunity**, *Cent. European J. Urol.*, vol. 68, pp. 308-310, 2015.

B. A. Craven et al., **The fluid dynamics of canine olfaction : Unique nasal airflow patterns as an explanation of macrosmia**, *J. R. Soc. Interface*, vol. 7, pp. 933-943, 2010.

L'ESSENTIEL

> Grâce à des impulsions laser de rayons X qui ne durent que quelques millièmes de seconde, on obtient depuis peu des séquences d'images montrant comment les protéines changent de structure lors de leur activité biologique.

> La technique qui le permet, nommée SFX pour *Serial Femtosecond Crystallography*,

est une cristallographie à rayons X portant sur des cristaux microscopiques.

> Les films obtenus visualisent des réactions biochimiques avec des détails inédits. Ils révèlent par exemple pourquoi des médicaments n'atteignent parfois pas les protéines ciblées, ou comment la photosynthèse dissocie les molécules d'eau.

LES AUTEURS



PETRA FROMME
professeure à la faculté de sciences moléculaires de l'université d'État de l'Arizona (États-Unis)



JOHN C. H. SPENCE
professeur de physique à l'université d'État de l'Arizona

Du cinéma moléculaire avec des rayons X

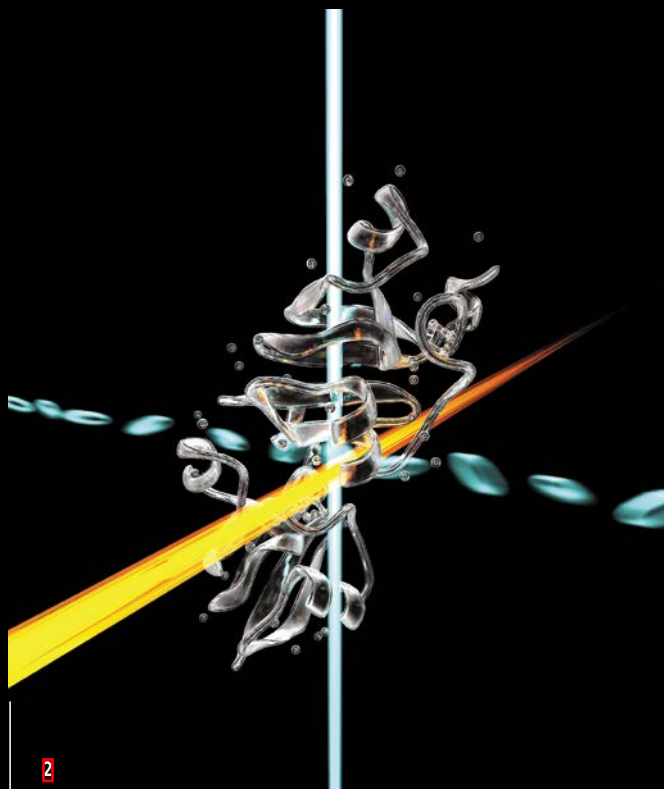
LA PHOTOSYNTHESE DÉCOMPOSE DES MOLÉCULES D'EAU EN QUELQUES MILLIÈMES DE MILLIARDIÈME DE SECONDE. SUIVRE DES PROCESSUS MOLÉCULAIRES AUSSI RAPIDES N'EST AUJOURD'HUI PLUS UNE UTOPIE, GRÂCE À UNE MÉTHODE CRISTALLOGRAPHIQUE RÉVOLUTIONNAIRE.

Dans les profondeurs des contreforts de Palo Alto, en Californie, des scientifiques affairés couraient en tous sens dans leur laboratoire souterrain, mettant la dernière main aux préparatifs d'une série d'explosions microscopiques. Leur plan : faire éclater de minuscules cristaux de protéines qui pourraient lever le voile sur l'un des secrets les mieux gardés de la nature, à savoir comment la photosynthèse des végétaux transforme la lumière en énergie chimique. Leur espoir : franchir un pas vers une énergie propre et inépuisable.

C'était en décembre 2009. Une équipe de chercheurs et d'étudiants du Laboratoire de l'accélérateur américain Slac travaillait sans relâche depuis plusieurs jours pour préparer cette expérience auprès du LCLS (*Linac Coherent Light Source*), le laser à rayons X le plus puissant au monde (pour engendrer son

faisceau de rayons X, ce dispositif accélère des électrons à des vitesses approchant celle de la lumière, puis leur fait suivre une trajectoire ondulée). L'un des groupes ajustait avec fébrilité des injecteurs destinés à propulser de microscopiques cristaux de protéines de façon à ce qu'ils traversent le faisceau de rayons X. Un autre chargeait un injecteur avec des cristaux fraîchement formés d'un complexe protéique nommé photosystème I, un acteur clé de la photosynthèse.

À l'extrémité du tunnel de l'accélérateur, long de 3 kilomètres, les microcristaux entamaient enfin leur trajet vers l'intense lumière laser. Mais juste avant que chacun d'entre eux n'éclate, on allait en faire un cliché à l'aide d'une nouvelle technique. Or aujourd'hui, cette méthode promet de transformer notre compréhension de la biologie aux plus petites échelles : on parvient à assembler plusieurs images successives de ce type (prises avec une résolution >

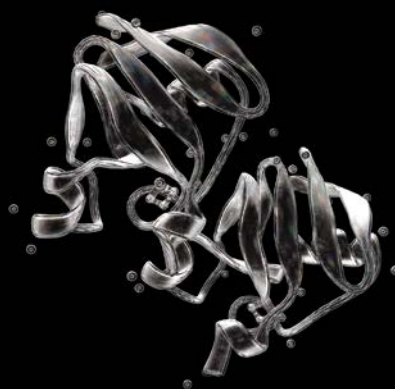
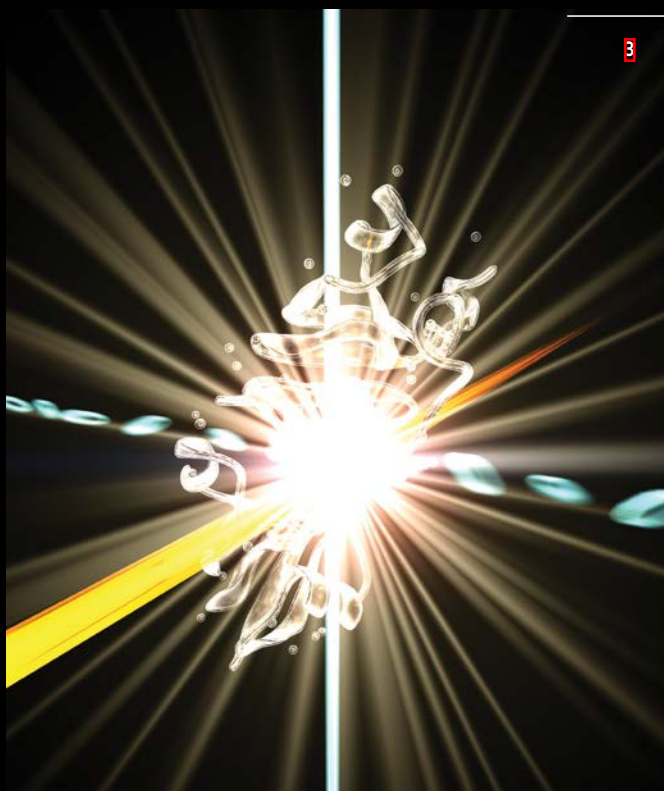


1

2

3

4



Vue d'artiste d'une « prise de vue » ultrarapide, à l'aide d'une très brève impulsion de rayons X (en jaune), d'une protéine (1) participant à une réaction (2). Les rayons X sont diffusés (3) et détectés pendant que la protéine subit des transformations (4).

temporelle de quelques femtosecondes, c'est-à-dire quelques millièmes de milliardième de seconde) pour en faire un film.

Le physicien américain Richard Feynman a dit un jour: « Tout ce que fait le vivant peut se comprendre en termes d'agitation et de tortillements d'atomes. » Mais jamais auparavant nous n'avions été en mesure de voir directement les déplacements des atomes et des molécules au sein de systèmes biologiques à une telle vitesse. Notre méthode, nommée SFX (*Serial Femtosecond Crystallography*, « cristallographie sérielle femtoseconde »), permet d'examiner les danses moléculaires effrénées qui déterminent comment les médicaments agissent sur les cellules pathologiques ou comment des réactions moléculaires convertissent de l'énergie lumineuse en énergie chimique.

D'ores et déjà, des équipes de recherche du monde entier ont utilisé la cristallographie SFX, par exemple pour révéler les détails fins de la régulation de la pression artérielle par un médicament expérimental, ce qui ouvre la voie à de meilleurs remèdes contre l'hypertension. La SFX a également servi à déterminer la structure de l'enzyme qui détruit les globules rouges dans la maladie du sommeil (trypanosomiase), une affection mortelle due à des parasites unicellulaires. Et elle a permis d'observer pour la première fois les étapes initiales de la photosynthèse où l'eau est décomposée en hydrogène et oxygène.

Revenons à 2009 et à nos expériences sur des cristaux de protéines dans le laboratoire souterrain. L'enjeu était de taille. De nombreux scientifiques étaient d'avis que la SFX ne fonctionnerait jamais et avaient rejeté nos demandes de financement. Mais de beaux clichés de rayons X diffractés par les cristaux ont commencé à émerger sur les écrans d'ordinateur. Nous ne sommes pas près d'oublier les applaudissements qui ont fusé dans la pièce tandis qu'apparaissaient sous nos yeux les preuves qu'un nouveau domaine de la science des rayons X était né.

FILMER DES RÉACTIONS CHIMIQUES

Avant l'avènement de la SFX, les scientifiques avaient fait d'extraordinaires progrès dans la détection de transformations de certaines structures chimiques, mais ils ne pouvaient pas vraiment observer les structures biologiques les plus délicates et complexes en action.

Dans les années 1980, par exemple, le chimiste égyptien Ahmed Zewail (Prix Nobel en 1999) avait conçu un moyen d'observer le déplacement des atomes au cours de réactions chimiques à l'aide d'impulsions ultrabrèves de lumière laser visible. Mais la longueur d'onde de cette lumière est trop grande pour

distinguer les plus petits détails de la structure des protéines. Plus récemment, avec les progrès spectaculaires de la microscopie, on a pu obtenir des images de protéines et de virus avec une résolution quasi atomique. Mais ces techniques ne sont pas assez rapides pour enregistrer des réactions chimiques telles que la photosynthèse.

Nous avons opté pour des rayons X, qui offrent une rapidité et une résolution suffisantes pour enregistrer sur le vif des réactions biochimiques. Il était essentiel pour nos travaux de développer une technique qui permettrait aux rayons X de former des images des molécules juste à l'instant où ils allaient les détruire.

Il nous fallait prendre de vitesse les dégâts causés par les rayons X et enregistrer une image en quelques femtosecondes seulement

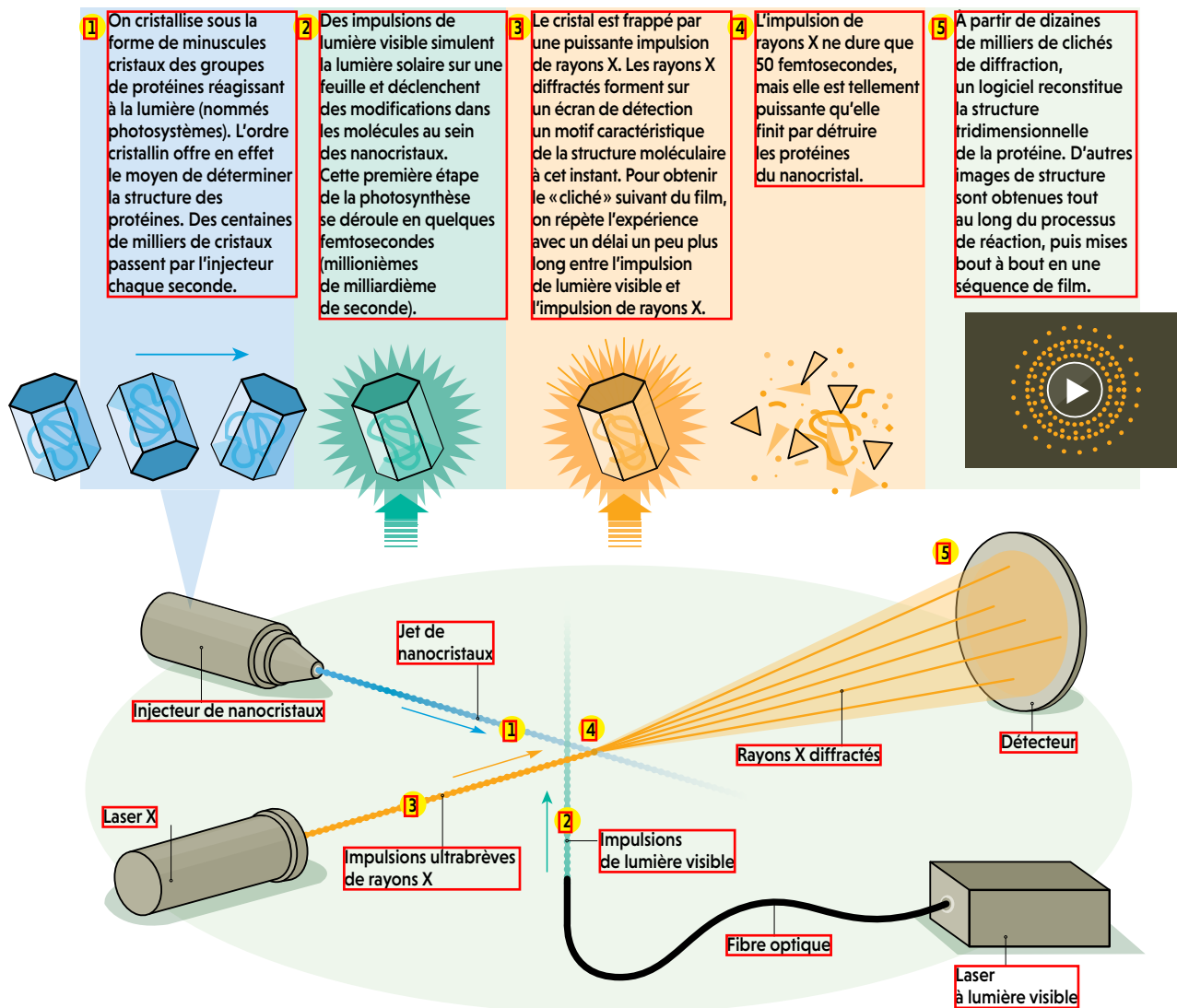
Selon la méthode classique, afin de cartographier la position des atomes dans une protéine ou une autre molécule, les spécialistes font minutieusement croître de gros cristaux formés des molécules en question. Puis ils envoient des rayons X sur le cristal et enregistrent le motif de diffraction formé sur un écran par les rayons X qu'a diffusés l'échantillon. En effet, dans un cristal, les molécules (et leurs atomes) sont disposées selon un ordre périodique bien déterminé; les rayons X diffusent alors d'une façon particulière, qui permet aux scientifiques de remonter à la position et à l'identité des atomes.

Cette méthode est appelée radiocristallographie. La technique SFX utilise le même principe pour sonder la structure atomique, mais elle le fait beaucoup plus vite. Cependant, les rayons X détruisent les molécules. On pensait

FILMER À L'ÉCHELLE DES MOLÉCULES

C'est grâce à la photosynthèse, qui convertit la lumière solaire en énergie chimique, que la vie sur Terre est possible. La compréhension précise de ce processus est l'un des grands défis de la biochimie. Un nouveau type de film moléculaire a fourni aux scientifiques certains détails inédits des réactions mises en œuvre. Les chercheurs utilisent de la lumière visible pour simuler la lumière solaire éclairant une

feuille et inciter les protéines en jeu, préalablement cristallisées, à déclencher la photosynthèse. Puis ils sondent les modifications de ces protéines à l'aide d'impulsions très brèves d'un puissant laser à rayons X. Ils enregistrent ainsi des images de ces protéines dans les fractions de seconde avant leur destruction. Ces images sont réalisées en cinq étapes (présentées ci-dessous) et combinées en un film.



généralement qu'avec un laser X, qui concentre des rayons X très énergétiques en un puissant faisceau, les choses seraient encore pires.

La forte lumière du laser à elle seule peut percer un trou dans de l'acier. Il était donc légitime de penser qu'une fragile biomolécule n'aurait pas la moindre chance de résister. Il nous fallait prendre de vitesse les dégâts causés par les rayons X et enregistrer une image en quelques femtosecondes seulement. Pour

donner une idée des ordres de grandeur en jeu, la différence entre une femtoseconde et une seconde équivaut à la différence entre une seconde et 32 millions d'années...

La clé de la technique SFX se situe dans cet infime intervalle de temps qui sépare l'instant où la molécule est frappée par l'impulsion X et celui où les électrons sont arrachés à ses atomes par l'énergie des rayons X. Déshabillées de leurs électrons, les sous-structures

moléculaires, positivement chargées, se repoussent mutuellement, et les molécules finissent par se disloquer.

Comment fonctionne la technique, en gros? Tout d'abord, nous nous arrangeons pour que les molécules interagissent de façon à former un minuscule cristal. Puis nous dirigeons sur le microcristal une impulsion laser X puissante et ultrabrève, juste assez longue pour que certains des rayons X soient diffractés par le cristal avant que l'énergie du faisceau ne déchiquette les molécules. Enfin, un détecteur capte les rayons X diffractés, et le motif formé révèle le type et la position des atomes dans la molécule. En enregistrant de nombreuses figures de diffraction d'un flux de cristaux, diversement orientés, qui traversent le faisceau X l'un après l'autre à haute cadence, on peut reconstituer la structure tridimensionnelle de la molécule. Enfin, on peut réaliser des images correspondant à différents instants au cours d'une réaction et mettre les images dans l'ordre, comme les photogrammes d'un film.

UNE DÉMONSTRATION DE PRINCIPE DES 2006

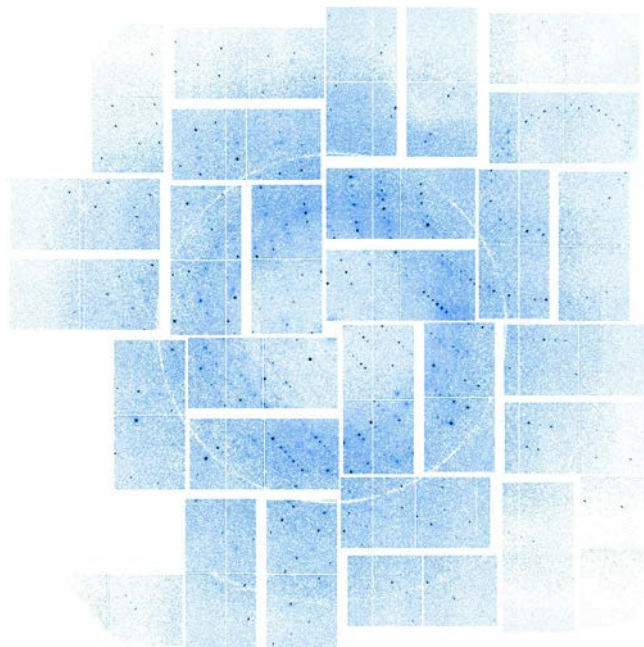
La première étape sur la voie de ces films moléculaires a été franchie en 2000, quand les biophysiciens Janos Hajdu et Richard Neutze, alors à l'université d'Uppsala en Suède, ont calculé que les molécules commenceraient à exploser une dizaine de femtosecondes après avoir été touchées par des rayons X. Il fallait donc prendre un cliché en un temps plus court. C'est ce qu'ont réussi à faire en 2006 Henry Chapman, aujourd'hui au synchrotron allemand DESY (*Deutsches Elektronen-Synchrotron*), et ses collègues: ils ont enregistré une image de basse résolution d'un minuscule motif gravé sur une membrane en nitrure de silicium (Si_3N_4), juste avant qu'il ne soit détruit par l'impulsion de rayons X.

Mais cela fonctionnerait-il pour de délicates molécules biologiques? Une grande partie de la communauté scientifique était très réservée, et nos dix premières demandes de financement ont toutes été rejetées. Selon les sceptiques, les impulsions laser X ne seraient pas assez brèves, ou les cristaux de protéines seraient trop petits pour produire un signal détectable, ou nous ne serions pas capables de déterminer l'orientation du cristal au moment où il était frappé par l'impulsion laser, information nécessaire à la détermination de sa structure.

Petra Fromme (l'une d'entre nous) et son équipe ont entrepris de faire la démonstration de la SFX avec l'un des tests les plus difficiles que l'on puisse imaginer: le photosystème I. Constitué de 36 protéines et de plus de 300 pigments verts et orangés qui captent la lumière, c'est à ce jour l'une des structures protéiques les plus complexes analysées avec des rayons X.

UN CLICHÉ DE DIFFRACTION

Les points foncés indiquent ici les directions dans lesquelles les rayons X ont été diffractés par un cristal formé de molécules de lysozyme, une enzyme (*les pavés résultent de la structure du détecteur*). La figure de diffraction dépend de l'orientation du cristal; pour déterminer la structure de la molécule, il faut analyser les clichés correspondant à de nombreuses orientations différentes.



Petra Fromme connaissait intimement le photosystème I, ayant travaillé pendant des années à le cristalliser et à déterminer sa structure par d'autres méthodes. Nous pensions également que la grande taille du complexe moléculaire serait en fait un avantage, parce que même avec un petit nombre de clichés de diffraction, nous pourrions obtenir une image à basse résolution qui serait reconnaissable comme étant le photosystème I. Et c'est ce que nous sommes parvenus à faire en 2009 dans ce laboratoire souterrain.

Pour obtenir notre cliché, nous avons tout d'abord besoin de cristaux du photosystème I. En cristallographie classique, on fait croître de gros cristaux, afin que la diffusion des rayons X soit suffisamment importante pour que l'on puisse reconstituer la structure de la molécule. Mais il faut parfois des années d'expériences pour réaliser de gros cristaux de bonne qualité de certaines protéines. Cela s'est parfois révélé presque impossible, notamment pour le photosystème I.

DES CRISTAUX MICROSCOPIQUES

Au lieu de cela, la SFX utilise des cristaux d'une fraction de micromètre, qu'il est beaucoup plus facile d'obtenir en laboratoire. Mais cela signifiait de nouvelles difficultés. Non seulement il fallait obtenir un signal suffisamment fort à partir d'un cristal tout petit, mais, de plus, s'ajoutaient des défis physiques élémentaires:

comment détecter des microcristaux trop petits pour être vus au microscope, sans parler de les positionner correctement par rapport aux impulsions laser, et ce à une cadence de 120 microcristaux par seconde?

En premier lieu, il fallait inventer de nouveaux moyens de voir nos microcristaux. Nous avons entre autres appliqué une méthode nommée Sonicc (*Second-Order Non-linear Imaging of Chiral Crystals*, «imagerie non linéaire au second ordre de cristaux chiraux»), dans laquelle les cristaux convertissent deux impulsions infrarouges ultra-brèves en photons de lumière verte, ce qui a pour effet d'allumer les nanocristaux comme des lucioles dans la nuit.



Les séquences d'images produites grâce à la SFX pourraient conduire à des avancées scientifiques, mais aussi, de façon plus immédiate, à des médicaments plus efficaces



Il fallait aussi trouver le moyen de propulser les cristaux pour qu'ils traversent l'impulsion laser à un rythme soutenu et régulier. L'un de nous (John Spence), aidé des physiciens Uwe Weierstall et Bruce Doak, de l'université d'État de l'Arizona, a conçu un dispositif qui fonctionne un peu comme une imprimante à jet d'encre: il produit un jet d'une solution contenant des nanocristaux. Cet injecteur envoie les nanocristaux avec une telle précision qu'ils traversent le faisceau de rayons X en file indienne.

Pour empêcher que l'injecteur ne s'encrasse (ce qui risquerait d'éteindre le jet de nanocristaux), Uwe Weierstall a dû concevoir une buse large qui soit néanmoins capable de produire un jet très fin. Il y est parvenu en entourant

l'extrémité de la buse d'un flux d'hélium gazeux; il en résulte un jet de cristaux beaucoup plus fin qu'un cheveu humain, même si la buse elle-même est 10 fois plus grosse.

Et quand tout le dispositif expérimental a enfin été prêt, restait un problème: comment gérer la masse de données qu'il allait produire? Une seule expérience peut engendrer jusqu'à 100 téraoctets de données, suffisamment pour remplir 25 disques durs d'ordinateurs de bureau de haute gamme. Et pour construire une image tridimensionnelle, nous devons déterminer l'orientation correspondant à chacun des dizaines de milliers de clichés de diffraction, puis combiner ces informations. Pour ce faire, nous avons développé un logiciel spécial en collaboration avec Richard Kirian et Thomas White, qui faisaient alors tous deux partie de l'équipe de Henry Chapman à Desy.

Pas à pas, nous avons amélioré notre technique. Et en 2014, nos travaux nous ont livré le premier aperçu en temps réel du transfert d'électrons entre deux acteurs clés de la photosynthèse: le gros photosystème I, qui capte la lumière, et une protéine nommée ferrédoxine (études faites avec des cristaux où sont présents les deux acteurs). Quand la lumière atteint le photosystème I, elle est convertie en électrons, que la ferrédoxine emporte et utilise pour convertir le dioxyde de carbone (CO_2) en molécules biologiques. Quand la ferrédoxine migre, les cristaux de protéines se dissolvent vite, ce qui rend la réaction difficile à suivre. Seul le processus ultrarapide de la SFX permet de voir ce changement éclair.

COMPRENDRE COMMENT LES PLANTES DISSOCIENT LES MOLÉCULES D'EAU

Le défi suivant dans cette voie de recherche est l'un des principaux axes de l'activité de Petra Fromme en tant que biochimiste: découvrir comment une plante scinde les molécules d'eau en hydrogène et en oxygène en utilisant seulement la lumière solaire et les abondants métaux terrestres. Décomposer l'eau à la manière des plantes pourrait fournir de l'hydrogène bon marché, un carburant propre pour les automobiles ou les groupes électrogènes – un vieux rêve relatif aux énergies renouvelables.

Nous avons obtenu les premiers clichés à basse résolution du processus de dissociation de l'eau, et ce que nous voyons suggère des changements structuraux significatifs du complexe protéique impliqué, le photosystème II. Récemment, l'équipe de Jian-Ren Shen, à l'université d'Okayama au Japon, a appliqué la technique SFX pour visualiser le processus avec encore plus de détails. Nous essayons à présent de réaliser des films à haute résolution qui montreraient les détails de toutes les étapes du

>

➤ processus au niveau atomique et qui élucideraient la photosynthèse.

Les séquences d'images produites grâce à la SFX pourraient non seulement déboucher sur des avancées scientifiques, mais aussi, de façon plus immédiate, sur des médicaments plus efficaces. Nous avons perçu ce potentiel en étudiant les antagonistes des récepteurs de l'angiotensine II (ARA-II ou sartans). Ces médicaments empêchent l'angiotensine II, hormone qui joue un rôle essentiel dans la vasoconstriction (réduction du diamètre des vaisseaux sanguins), de se lier à son récepteur à la surface des cellules. On utilise les ARA-II pour traiter l'hypertension, principale cause d'accidents vasculaires cérébraux et de crises cardiaques aux États-Unis et ailleurs. La première génération de ces médicaments s'est révélée utile, mais ils ne se lient que faiblement à leur cible et il faut donc les employer à haute dose, ce qui accentue leurs effets secondaires – des maux de tête aux vertiges, avec parfois des problèmes plus graves tels que des gonflements du visage et de la gorge.

Nos recherches ont mis en évidence la raison de cette mauvaise liaison : les molécules ne s'insèrent pas très bien dans le récepteur, et beaucoup se détachent. En déterminant plus précisément les structures des récepteurs, on pourrait développer une nouvelle génération d'ARA-II plus efficaces pour contrôler la pression artérielle.

On pourrait améliorer de nombreux autres médicaments par la même approche. Les récepteurs de l'angiotensine II appartiennent à un groupe plus vaste et très important de récepteurs cellulaires nommés récepteurs couplés aux protéines G. Ces molécules de la membrane des cellules permettent à celles-ci d'interagir avec leur environnement. Les scientifiques qui ont été pionniers dans la découverte de la structure et des fonctions des récepteurs de cette classe ont été récompensés du prix Nobel de chimie en 2012. Le rôle joué par ces derniers dans la survie et la croissance des cellules, et leurs dysfonctionnements, impliqués dans de nombreuses maladies, en fait des cibles cruciales pour de nouveaux médicaments. Voir comment leur structure se modifie durant leur activité biologique aidera les pharmacochimistes à concevoir des médicaments qui correspondent précisément aux récepteurs visés, et ce dans leur état actif, ce qui limitera les risques d'effets secondaires.

« Nous avons montré que dans tous les modèles moléculaires précédents, les meilleures estimations de l'adéquation des récepteurs et des médicaments étaient erronées sur de nombreux détails importants », dit Vadim Cherezov, de l'université de Californie du Sud, qui a mené l'expérience sur l'angiotensine II. Par exemple, la SFX a révélé des différences de structure des récepteurs couplés aux

protéines G à température ambiante par rapport aux très basses températures employées en cristallographie classique. Cela signifie que les médicaments conçus pour des récepteurs que l'on a étudiés à basse température ne correspondront pas bien quand on les utilisera dans le corps humain, plus chaud.

Et parfois, les médicaments visent une cible trop large. C'est le cas avec la maladie du sommeil. Nos séquences d'images moléculaires ont montré que les médicaments utilisés pour traiter cette maladie parasitaire interagissent de manière similaire avec les protéines du parasite et avec des protéines des cellules humaines. Ces images plus précises pourraient aider les chimistes à concevoir des médicaments qui n'agissent que sur les protéines du parasite.

DÉCRYPTER COMMENT NOS YEUX VOIENT

Nous avons également été ravis de voir comment d'autres chercheurs utilisent nos techniques SFX pour répondre à différentes questions. Par exemple, Marius Schmidt, de l'université du Wisconsin, et ses collègues ont récemment obtenu des films moléculaires qui contribuent à expliquer comment nos yeux voient. Bien que les bactéries ne soient pas dotées d'une véritable vision, elles ont des protéines sensibles à la lumière qui préfigurent, sur le plan de l'évolution, celles de notre propre système visuel. En enregistrant des clichés avec une rapidité inédite, l'équipe a réalisé une vidéo montrant au ralenti des événements extrêmement rapides, qui révèle comment une protéine bactérienne capte la lumière et y réagit.

Le groupe de Marius Schmidt a utilisé la SFX pour obtenir, de la protéine cristallisée qui réagissait à la lumière, des images se succédant de moins de 1 billionième de seconde (10^{-12} seconde). Spécifiquement, l'équipe a cartographié les déplacements des atomes de la protéine pendant qu'une molécule pigmentaire enfouie dans la protéine jaunissait en réaction à la lumière. Pour la première fois, la structure du pigment était enregistrée immédiatement après l'absorption de la lumière et avant qu'il n'ait eu le temps de réagir ; cet état est fondamental pour la perception de la lumière chez tous les organismes vivants, y compris les bactéries et les plantes, et c'est la première étape de la vision humaine.

Nous sommes convaincus que l'avenir de la cristallographie des protéines – et notre connaissance de la nature – se trouve du côté de la méthode SFX. Qui sait, peut-être que d'ici à une dizaine d'années, la moitié de toutes les structures protéiques connues ne seront plus des images statiques sur la page d'un traité, mais des films de scènes moléculaires en relief. ■

BIBLIOGRAPHIE

P. Fromme, **XFELs open a new era in structural chemical biology**, *Nature Chemical Biology*, vol. 11(12), pp. 895-899, 2015.

T. R. Barends et al., **Direct observation of ultrafast collective motions in CO myoglobin upon ligand dissociation**, *Science*, vol. 350, pp. 445-450, 2015.

M. M. Waldrop, **X-ray science : The big guns**, *Nature*, vol. 505, pp. 604-606, 2014.

J. C. H. Spence et al., **X-ray lasers for structural and dynamic biology**, *Reports on Progress in Physics*, vol. 75(10), article 102601, 2012.

H. N. Chapman et al., **Femtosecond X-ray protein nanocrystallography**, *Nature*, vol. 470, pp. 73-77, 2011.

ABONNEZ-VOUS À **POUR LA SCIENCE**

**OFFRE
SPÉCIALE
NOUVELLE
FORMULE**

**FORMULE
INTÉGRALE**
-46%



99€

**FORMULE
PASSION**
-36%



79€

**FORMULE
DÉCOUVERTE**
-25%



59€

AVEC VOTRE ABONNEMENT INTÉGRALE OU PASSION LE DVD "LE MYSTÈRE ETTORE MAJORANA, UN PHYSICIEN ABSOLU"

Ettore Majorana, un jeune physicien, théoricien fulgurant, disparaît mystérieusement le 28 mars 1938 à bord d'un navire. Son corps n'a jamais été retrouvé. De nombreuses hypothèses ont été émises sur sa disparition : il se serait suicidé ou même aurait été enlevé par les nazis... Le mystère reste entier. Etienne Klein, physicien renommé, directeur de recherche au CEA, part sur les traces de Majorana. Son histoire permet-elle de percer le secret de sa disparition ?

"(Un) passionnant récit (...). La grande force du film est d'être à la fois pédagogique et personnel" **Télérama**



BULLETIN D'ABONNEMENT

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

☐ OUI, JE M'ABONNE À **POUR LA SCIENCE** POUR 1 AN, JE CHOISIS MA FORMULE CI-DESSOUS :

☐ FORMULE **INTÉGRALE**

12 n° de *Pour la Science*
+ 4 Hors-Séries
+ Accès illimité aux archives en ligne depuis 1996
+ Le DVD "Le Mystère Ettore Majorana"

11A99EK3

99€
Au lieu de 183,44€*

☐ FORMULE **PASSION**

12 n° de *Pour la Science*
+ 4 Hors-Séries
+ Le DVD "Le Mystère Ettore Majorana"

11A79EK1

79€
Au lieu de 123,44€*

☐ FORMULE **DÉCOUVERTE**

12 n° de *Pour la Science*

11A59E

59€
Au lieu de 78,45€*

J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme

Nom : _____ Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal : _____ Ville : _____

Téléphone : _____

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

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

• Je choisis mon mode de règlement :

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

☐ Par carte bancaire

N° _____

Date d'expiration : _____ Clé (Les 3 chiffres au dos de votre (B)) : _____

Signature obligatoire

* Par rapport au prix de vente en kiosque, l'accès numérique aux archives et la valeur du DVD. Vous pouvez également si vous le souhaitez acquérir séparément le DVD "Le mystère Ettore Majorana" au prix de 14,99€, chaque n° de *Pour la Science* au tarif de 6,50€, notre n° spécial au tarif de 6,95€ et nos hors-séries au tarif de 7,50€. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 31/12/2017 en France métropolitaine uniquement et dans la limite des stocks disponibles. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site www.pourlascience.fr. Conformément à la loi "Informatique et libertés" du 6 janvier 1978, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification aux données vous concernant en adressant un courrier à *Pour la Science*. Photos non contractuelles.

L'ESSENTIEL

> Les paléontologues ont longtemps jugé impossible la restitution des couleurs des animaux fossiles, notamment les dinosaures.

> La découverte de pigments bien conservés dans une série de dinosaures change la donne.

> En étudiant ces pigments, les chercheurs parviennent à déduire quelles étaient les couleurs de ces dinosaures.

> Les motifs qu'arbore la robe de certains dinosaures livrent des informations sur le comportement et l'habitat de ces animaux.

Octobre 2006, université Yale, États-Unis. Installé devant un microscope électronique dans une pièce sombre, j'observe l'encre fossilisée d'un calmar de 200 millions d'années d'âge. Une mer de billes translucides d'un cinquième de micromètre de diamètre environ s'offre à ma vue. D'apparence banale pour l'œil non averti, elles me fascinent car elles ressemblent à des grains de mélanine, le pigment qui colore l'encre des céphalopodes actuels.

Peut-être n'aurais-je pas dû être si surpris, puisque des granules d'encre fossile avaient été découverts deux ou trois ans auparavant. Mais les voir de mes propres yeux changeait tout. Après cette expérience, j'ai examiné des fossiles de céphalopodes de diverses époques et lieux, et je me suis rendu compte que leur encre, parfaitement conservée pendant des centaines de millions d'années, était restée identique à elle-même.

Je me suis donc demandé si la mélanine pouvait se préserver aussi dans les fossiles d'autres types d'organismes que les céphalopodes. La mélanine est un pigment qui colore les cheveux, la peau, les plumes et les yeux. Elle peut produire des teintes rouges, brunes, grises et noires, éventuellement accompagnées de reflets métalliques, comme sur les ailes des corbeaux. Je me disais ainsi qu'en trouvant de la mélanine dans les fossiles d'animaux disparus, notamment de dinosaures, je pourrais peut-être restituer leurs couleurs.

Les paléontologues pensaient cependant que les pigments résistent difficilement à la fossilisation. Les quelques exemples de pigments conservés au sein de fossiles concernaient tous des invertébrés, mais jamais de vertébrés. Les chercheurs ne pouvaient donc

L'AUTEUR



JAKOB VINTHER
biologiste, enseigne à l'université de Bristol, en Angleterre

© Greg Ruit

LE DINOSAURE PSITTACOSAURUS

La couleur rouge du cou de ce dinosaure a été déduite de la forme et de la répartition de ses mélanosomes fossiles, les organites cellulaires qui fabriquent la mélanine, un pigment.



Les vraies couleurs des dinosaures

VERT REPTILE, LES DINOSAURES ? PAS SEULEMENT : ROUGE, NOIR, CHATOYANT, BLANC, FAUVE... LES PIGMENTS FOSSILES NOUS RÉVÈLENT UNE PALETTE BIEN PLUS DIVERSE QU'ON NE LE PENSAIT.

> que s'inspirer des robes des animaux actuels pour essayer de deviner les couleurs des animaux disparus. En conséquence, les restitutions des robes de dinosaures sont très variables: certaines sont d'un ton terreux rappelant celui des reptiles et amphibiens; d'autres portent les teintes éclatantes des dinosaures actuels, c'est-à-dire des oiseaux.

Toutefois, d'autres chercheurs et moi avons fait au cours des onze dernières années une série de découvertes, qui réduisent les doutes dans la reconstitution des robes (ou des plumages) de dinosaures. Nous sommes en effet parvenus à mettre en évidence des structures porteuses de mélanine dans des dizaines de fossiles. En étudiant leurs formes et leur organisation, nous avons pu déduire les couleurs et les motifs qui ornaient des dinosaures et plusieurs autres espèces animales éteintes. Et ces informations ont livré d'intéressants indices sur le comportement et l'habitat de ces organismes.

MÉLANINE RÉSISTANTE À LA FOSSILISATION

Quel a été notre cheminement? Après avoir lancé l'idée que la mélanine d'organismes vertébrés, comme celle des céphalopodes, avait très bien pu résister à la fossilisation, il me fallait la mettre à l'épreuve. Pour ce faire, je devais trouver des fossiles présentant des taches sombres dans les régions du corps susceptibles de contenir de la mélanine: les phanères (plumes, poils...) et les yeux. Et il me fallait pouvoir examiner ces zones sombres au microscope électronique, ce qui nécessite parfois de prélever sur le fossile un échantillon assez petit pour rentrer dans l'appareil. Or les fossiles bien conservés sont rares et jalousement protégés par les muséums...

Heureusement, la formation de Fur Ølst, au Danemark, a livré de nombreux fossiles datant de l'Yprésien (56 à 47,8 millions d'années) extrêmement bien conservés. Ce remarquable gisement de mon pays natal allait me permettre de tester mon idée. J'ai pu convaincre le conservateur des fossiles de vertébrés du Muséum géologique de Copenhague de découper dans un bloc de calcaire contenant le fossile d'un petit oiseau un échantillon ayant les dimensions d'une tranche de pain. C'était nécessaire pour que l'on puisse placer sous le faisceau du microscope électronique ce fossile, qui présentait des taches au niveau des yeux et des impressions de plumes.

J'avais une assez bonne idée de ce qu'il fallait rechercher. J'avais lu de nombreux articles pour savoir comment la mélanine se présente dans les plumes des oiseaux actuels. Ce pigment est synthétisé au sein de cellules spécialisées, nommées mélanocytes, par des organites dédiés – les mélanosomes. Il reste en général enfermé dans ces organites longs

FOSSILE DE PSITTACOSAURUS

Des restes de peau entourent toujours son squelette. Ils semblent plus colorés sur le haut du corps (dos) que sur le bas (ventre).



de 0,5 à 2 micromètres et dont il existe deux formes. La première, cylindrique, produit la variante de la mélanine nommée eumélanine, qui absorbe la lumière de toutes les longueurs d'onde (y compris les ultraviolets). C'est l'eumélanine qui confère sa couleur noire à l'encre du calmar et aux plumes du corbeau. La seconde forme de mélanosome est globulaire. Elle produit la phéomélanine, variante de mélanine qui donne une couleur rouille. L'absence de pigments sur les plumes se traduit par une couleur blanche. Quant aux couleurs grises et brunes observées parfois, elles résultent de combinaisons de zones riches en eumélanine et phéomélanine et de zones dépourvues de pigments.

J'avais aussi consulté l'un des plus grands spécialistes de la couleur des oiseaux: Richard Prum, de l'université Yale. Comme le cas de l'encre fossile prouvait que l'eumélanine peut se conserver, j'ai pensé qu'il me fallait rechercher d'abord ce pigment dans les plumes. En discutant avec Richard Prum et Vinod

Saranathan, son doctorant d'alors, j'ai appris que les mélanosomes cylindriques sont disposés d'une façon caractéristique le long des barbes et des barbules dont la plume est constituée. C'est au cours du développement que les kératinocytes (les cellules spécialisées à l'origine des phanères) les disposent en ces endroits. Ainsi, si les taches sombres visibles sur le fossile de l'oiseau danois provenaient bien de la mélanine, alors le microscope devait me montrer des mélanosomes cylindriques fossilisés le long des barbes et des barbules.

Impatient, je zoomai sur les plumes fossiles et observai aussitôt des millions de structures de forme cylindrique! Malheureusement, comme une ligne du métro de Copenhague passe à moins de 50 mètres du sous-sol où est installé le microscope électronique du musée, les vibrations empêchaient l'obtention d'images bien nettes. Elles l'étaient toutefois assez pour que l'on distingue des cylindres. J'envoyai immédiatement mes prises de vue à Derek Briggs, mon directeur de thèse à Yale. Ce pionnier de l'étude des fossiles bien conservés me répondit avec moins d'enthousiasme que je ne l'espérais. Il me déclara que ces structures étaient bien connues: depuis des décennies, lui-même et d'autres chercheurs en découvraient dans les plumes et les poils fossiles et ils les identifiaient à des bactéries.

Je continuais cependant à penser que les structures cylindriques en question étaient bien

portèrent et Derek Briggs commença à s'habituer à l'idée. Il ne se laissa toutefois convaincre définitivement qu'après la confirmation par Richard Prum de la très exacte ressemblance de mes structures à des mélanosomes.

UN DEUXIÈME EXEMPLE POUR CONVAINCRE

Pour s'en persuader complètement, Derek Briggs voulait un autre exemple. Il fouilla dans la littérature scientifique et trouva la description d'une petite plume vieille de 108 millions d'années découverte au Brésil. Ce fossile comportait des bandes de couleurs noires et blanches distinctes (voir l'illustration page 63). Étant donné que la coloration blanche résulte d'une absence de pigments, Derek Briggs pensait que si nous pouvions montrer que ce spécimen contenait des mélanosomes alignés uniquement dans les bandes noires, nous aurions assez d'éléments pour défendre notre point de vue.

Après avoir obtenu le prêt du spécimen brésilien, nous avons placé sous le microscope électronique le bloc entier dans lequel il se trouvait. J'ai alors vu, dans les bandes noires de cette plume, des milliers de petits mélanosomes alignés le long des axes des barbes et barbules. L'examen des bandes blanches, en revanche, n'a révélé que la matrice rocheuse, c'est-à-dire exactement ce que l'on pouvait attendre en l'absence de pigment.

Depuis la publication de ces résultats, en 2008, mon équipe et plusieurs autres ont décrit la découverte de mélanosomes et d'autres pigments dans divers fossiles. Des chercheurs se sont aussi mis à étudier la chimie de la mélanine fossile et leurs résultats corroborent les observations suggérant que la mélanine peut traverser quasi intacte les millions d'années. Avec Caitlin Colleary, alors étudiante à l'université de Bristol où je travaille aujourd'hui, nous avons montré que les légères altérations apparaissant dans la mélanine fossile sont la conséquence des fortes pression et température régnant dans le sol profond (quelques chercheurs maintiennent encore que les structures observées seraient des bactéries, mais ils sont à court d'arguments).

Notre résultat le plus spectaculaire est la reconstitution de couleurs de plumes de dinosaures. En 2009, mes collègues de Yale et moi nous sommes associés à Matthew Shawkey et Liliana D'Alba, à l'université de Gand en Belgique, et à d'autres chercheurs pour reconstituer les couleurs du plumage d'*Anchiornis huxleyi*. Il s'agit d'un petit dinosaure prédateur qui, il y a environ 155 millions d'années, vivait dans ce qui allait devenir le nord de la Chine. Tout comme l'oiseau provenant du Danemark que j'avais étudié auparavant, le fossile d'*Anchiornis* présentait des taches sombres visibles à l'œil nu, qui suggéraient la présence de matière



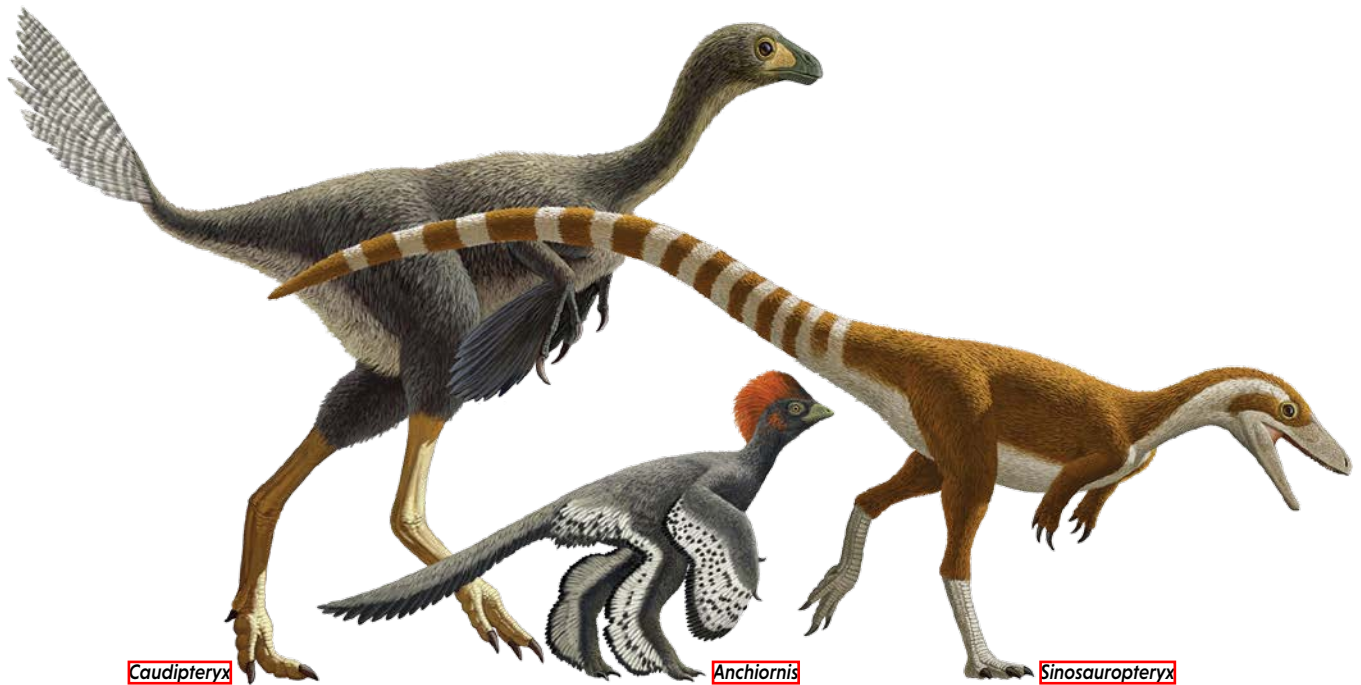
Impatient, je zoomai sur les plumes fossiles et observai aussitôt des millions de structures de forme cylindrique



des mélanosomes fossiles. Je fis part de mes arguments à Derek Briggs: d'une part, ces structures ont la bonne taille et la bonne forme; d'autre part, leur orientation dans la structure des plumes est identique à celles des mélanosomes noirs dans les plumes actuelles; enfin, le cas de l'encre de calmar fossile prouvait que la mélanine peut se fossiliser. Ces arguments

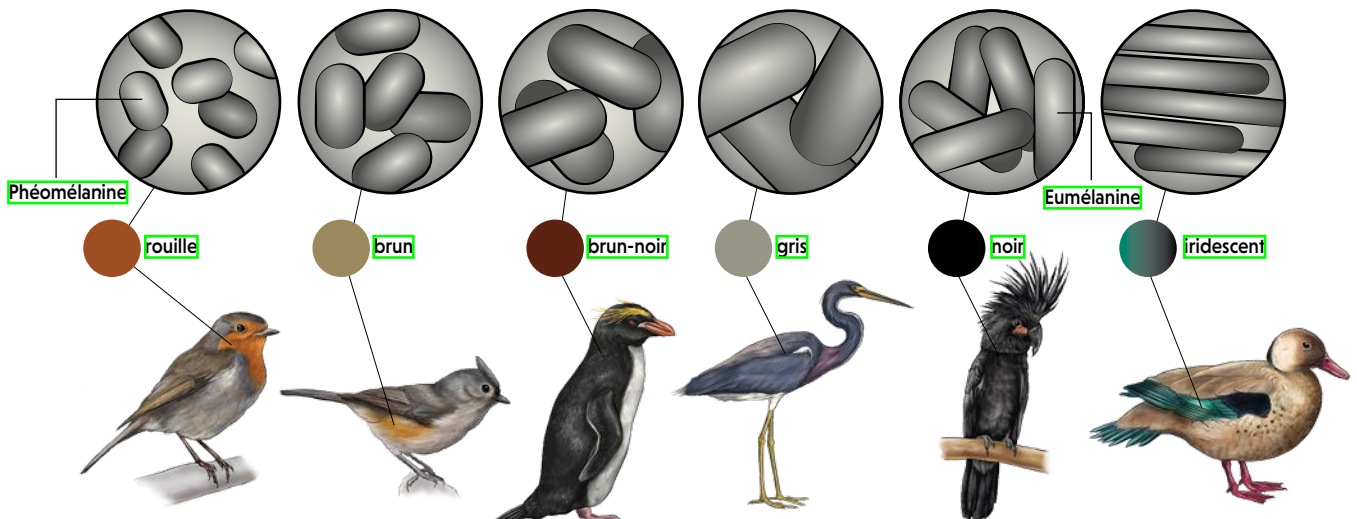
DES COULEURS VIVANTES

Les mélanosomes, des organites cellulaires porteurs de pigments, peuvent se conserver dans les fossiles pendant des dizaines de millions d'années. En étudiant la nature des pigments et leur disposition, les chercheurs ont reconstitué les couleurs de nombreux animaux, dont des dinosaures. Ces avancées révèlent pour la première fois l'apparence réelle de ces animaux et laissent entrevoir certains aspects de leur mode de vie, tels que leurs périodes d'activité (diurne ou nocturne) et le type de milieu qui les abritait.



DETERMINER LA COULEUR D'APRÈS LA FORME, LA TAILLE ET LA RÉPARTITION DES MÉLANOSOMES

Les deux formes de mélanine donnent lieu à des couleurs différentes: l'eumélanine est associée aux tons noirs tandis que la phéomélanine correspond aux teintes rouge-roux. Les combinaisons de ces formes de mélanine et de l'absence de pigment produisent les couleurs brune, grise et blanche. Les reflets irisés de certains plumages sont produits par des structures constituées d'empilements plus ou moins réguliers de mélanosomes, qui diffractent la lumière. L'étude des mélanosomes et de leur répartition dans les plumes des oiseaux actuels a fourni aux chercheurs des données de référence, à partir desquelles ils peuvent déterminer les couleurs vraisemblables de zones du corps d'animaux disparus et les motifs colorés que ces derniers arboraient.

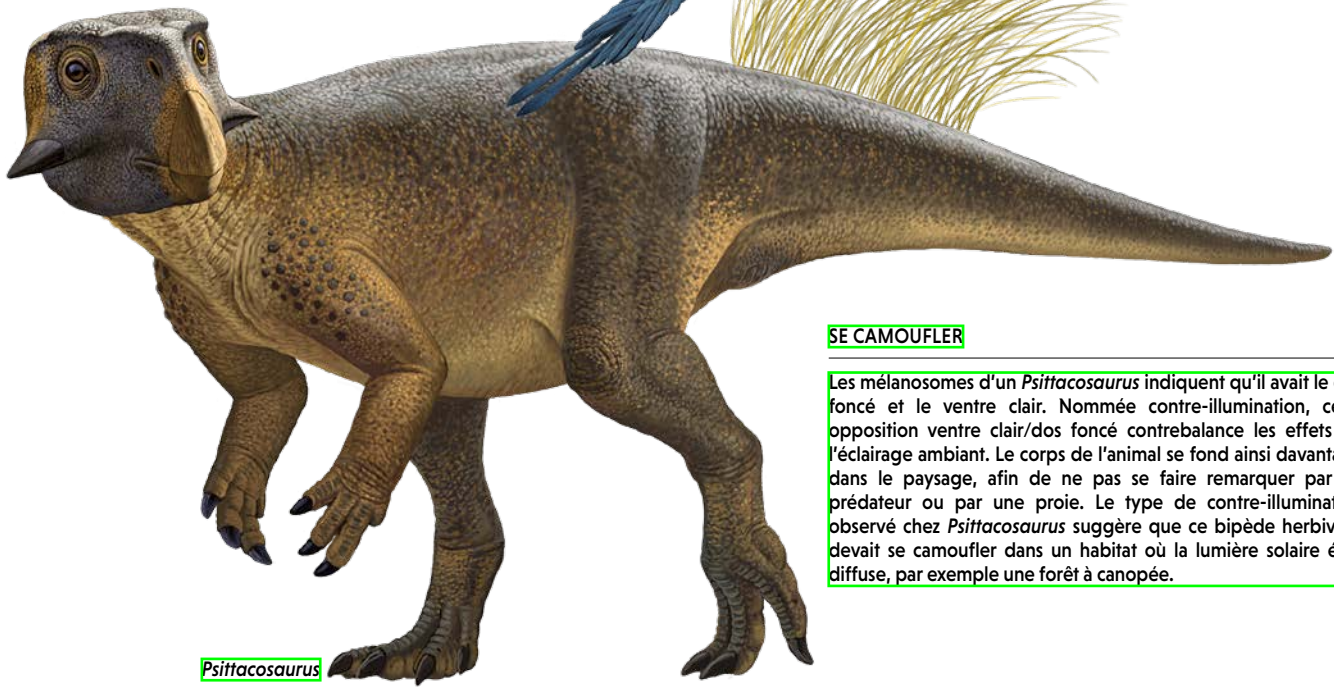


SORTIR DU LOT

La microstructure formée par les mélanosomes du petit dinosaure *Microaptor* révèle que son plumage était semblable à celui d'un corbeau, c'est-à-dire d'un beau noir chatoyant. Les paléontologues pensaient que *Microaptor* était nocturne, étant donné les grandes orbites de ses yeux. Or les oiseaux actuels parés d'un plumage iridescent tendent à être actifs pendant la journée, ce qui suggère que, comme eux, *Microaptor* était diurne.



Microaptor



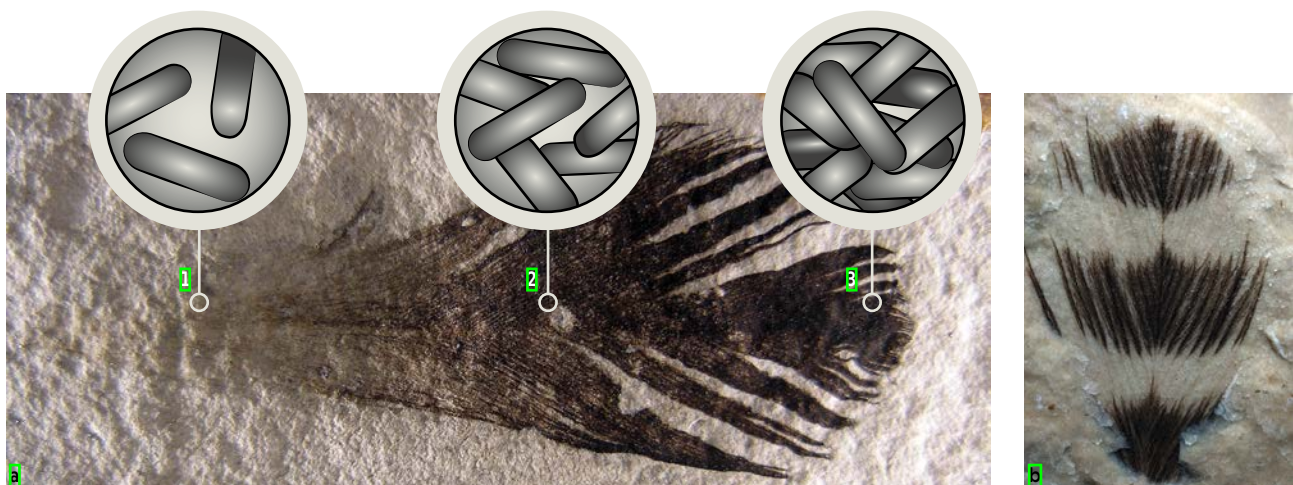
Psittacosaurus

SE CAMOUFLER

Les mélanosomes d'un *Psittacosaurus* indiquent qu'il avait le dos foncé et le ventre clair. Nommée contre-illumination, cette opposition ventre clair/dos foncé contrebalance les effets de l'éclairage ambiant. Le corps de l'animal se fond ainsi davantage dans le paysage, afin de ne pas se faire remarquer par un prédateur ou par une proie. Le type de contre-illumination observé chez *Psittacosaurus* suggère que ce bipède herbivore devait se camoufler dans un habitat où la lumière solaire était diffuse, par exemple une forêt à canopée.

RESTITUER LE MOTIF COLORE D'APRÈS LA DENSITÉ ET LA RÉPARTITION DES MÉLANOSOMES

Des plumes fossiles illustrent la façon dont des variations dans la concentration en mélanosomes créent des motifs. Les dégradés observés dans un spécimen fossile datant de 55 millions d'années découverts au Danemark (a) résultent d'une combinaison de faibles concentrations (couleurs pâles, 1), de concentrations intermédiaires (tons plus soutenus, 2) et de concentrations élevées (couleurs intenses, 3). Dans un autre cas, celui d'un fossile vieux de 108 millions d'années découvert au Brésil (b), des alternances de zones denses en mélanosomes et de zones où ils sont absents produisaient une plume à bandes noires et blanches.



organique, probablement de la mélanine. Toutefois, nous avions l'intention de reconstituer tout le motif de son plumage – une tâche beaucoup plus ambitieuse qu'établir simplement la présence ou l'absence de mélanosomes. Nous ne pouvions donc pas nous contenter d'étudier ces taches. Il nous fallait mettre au point une façon de prédire les couleurs à partir de la forme des mélanosomes. Pour ce faire, nous avons étudié les mélanosomes de 12 plumes noires, de 12 plumes brunes et de 12 plumes grises d'oiseaux d'aujourd'hui. Nous avons pris en compte le rapport longueur/largeur et l'aspect des mélanosomes, ainsi que la variabilité de leur forme, afin de prédire la couleur de la plume. Grâce à une méthode statistique, l'«analyse discriminante quadratique», nous avons obtenu des prédictions ayant une probabilité de 90 % d'être justes.

ANCHIORNIS : UNE CRÊTE ROUGEÂTRE

Dans le cas d'*Anchiornis*, cette approche a produit des résultats frappants. Nos calculs statistiques suggèrent que la plupart des plumes couvrant le corps de cet animal étaient grises. En revanche, les longues plumes couvrant ses bras et ses pattes n'étaient pas colorées par des mélanosomes sauf aux extrémités, où leur dense présence produisait une couleur noire (comme les extrémités des ailes de nombreux oiseaux modernes). La mélanine ne fait pas que colorer les plumes : elle les renforce mécaniquement aussi, ce dont *Anchiornis* bénéficiait sans doute aussi. De façon très surprenante, les plumes du haut de sa tête contenaient des empreintes de mélanosomes globulaires, de sorte qu'*Anchiornis* devait avoir une crête rougeâtre. Ce dinosaure devait avoir fière allure !

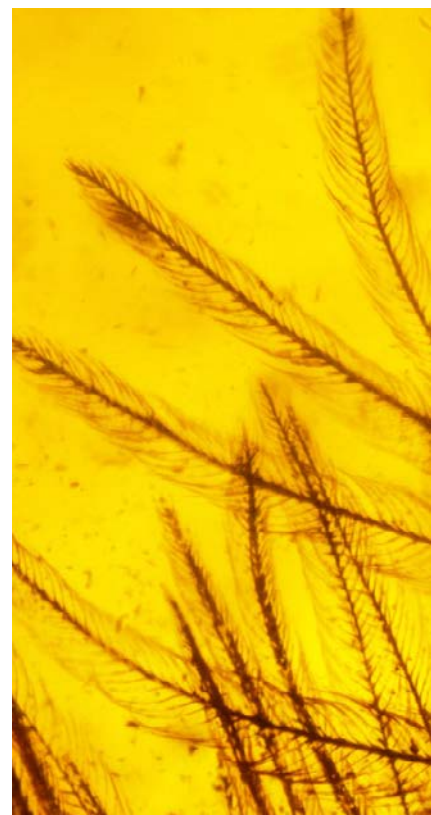
A peu près à la même époque où nous avons publié notre étude sur *Anchiornis*, Fucheng Zhang, de l'Institut de paléontologie des vertébrés de l'Académie chinoise des sciences, Michael Benton, de l'université de Bristol, et leurs collègues ont annoncé la découverte de mélanosomes dans toute une série d'oiseaux et de dinosaures fossilisés dans des roches chinoises datant de 130 millions d'années. La répartition des mélanosomes globulaires chez *Sinosauropteryx*, un dinosaure couvert de duvet, impliquait que ce dernier arborait une robe rousse et une queue striée comme celles d'un tigre. Le premier dinosaure roux connu !

Depuis cette époque pionnière, nos données se sont multipliées jusqu'à comprendre aujourd'hui des centaines d'échantillons. Certains d'entre eux nous permettent d'affirmer avec certitude la présence d'iridescence, c'est-à-dire des reflets métalliques comme ceux qui caractérisent par exemple les plumages des colibris et des paons. Les mélanosomes responsables de cet effet ont tendance à être plus

longs que les mélanosomes typiques et peuvent être creux ou aplatis. L'iridescence résulte d'empilements particuliers des mélanosomes, lesquels diffractent la lumière de diverses façons, ce qui produit différentes couleurs suivant l'angle de vue ou l'éclairage.

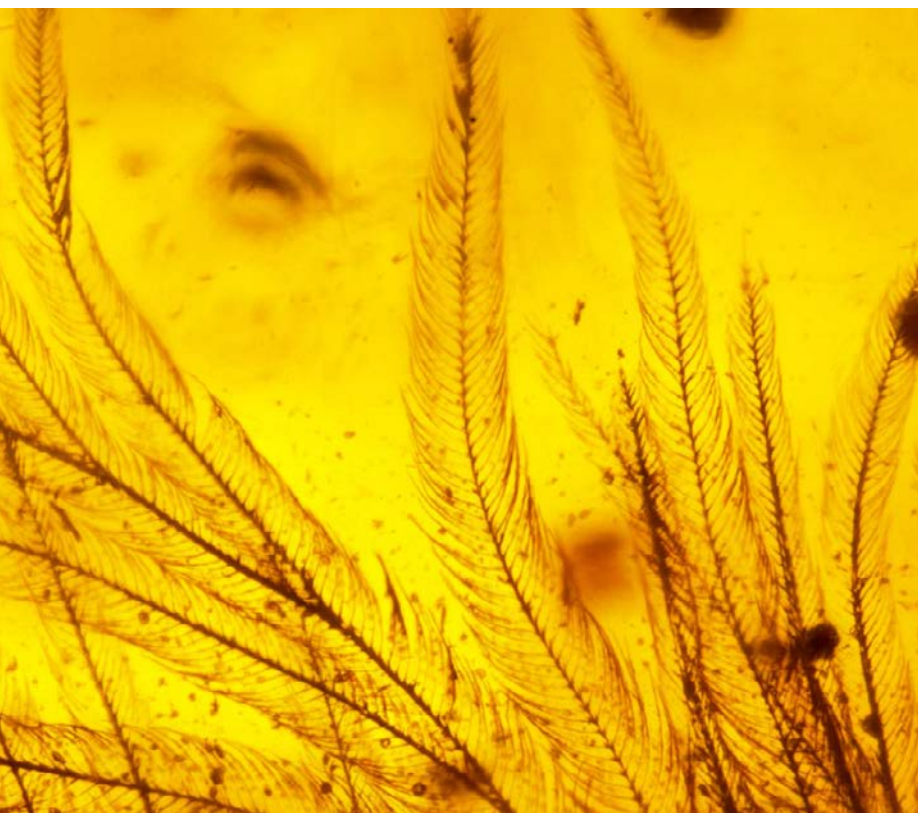
En 2009, nous avons trouvé des preuves de cette iridescence dans une plume fossile, datant de 49 millions d'années, mise au jour dans la carrière de Messel, en Allemagne. Ce fossile conservé au Muséum Senckenberg, à Francfort, présente une iridescence encore perceptible, car il a conservé la disposition initiale des mélanosomes. Ces derniers sont disposés en une couche dense et lisse se trouvant dans les fines entretoises de la plume, c'est-à-dire les barbuies. Ils ne sont présents que sur le bord le plus externe de la plume et sur le dessus, c'est-à-dire seulement sur les parties non recouvertes par les autres plumes. La disposition des mélanosomes produit ce que l'on nomme en optique une couche mince, structure qui crée des interférences, donc une iridescence (une mince couche d'huile flottant sur l'eau produit le même effet). Nous en avons déduit que les extrémités des plumes étaient iridescentes.

Il n'a pas fallu longtemps pour que nous découvriions à nouveau de l'iridescence, chez



Le motif suggéré par des traces était subtil : il comportait de fines marbrures, des points et des traits

un véritable dinosaure cette fois : *Microraptor*. De la taille d'un corbeau, ce petit prédateur avait la particularité de posséder quatre ailes, ou plutôt quatre membres en forme d'ailes. Il s'agit d'un cousin primitif de *Velociraptor*, rendu célèbre par le film *Jurassic Park*, où il est représenté avec une peau à écailles. Aujourd'hui, on sait que *Microraptor* et *Velociraptor* étaient en fait couverts de plumes. Celles de *Microraptor* contenaient de longs mélanosomes cylindriques disposés de telle façon qu'ils



PLUMES DE DINOSAURES

Celles-ci proviennent de la queue d'un petit dinosaure non avien découverte dans un bloc d'ambre birman. Elles comportaient un rachis (tige centrale), ainsi que des barbes (branches) et des barbules (rameaux) imbriquées.

diffraquent la lumière. Son plumage devait donc être noir, mais avec le même type de reflets que celui du corbeau.

Récemment, Jennifer Peteya, de l'université d'Akron dans l'Ohio, et Matthew Shawkey ont découvert la même iridescence chez *Bohaiornis*, un oiseau de Chine du groupe des énantionithes, qui était doté d'une longue queue formée de deux plumes.

DU PLUMAGE AU COMPORTEMENT

Les pigments fossiles ont aussi l'intérêt de révéler des facettes auparavant inconnues de la vie quotidienne des dinosaures et d'autres animaux disparus depuis longtemps. En raison de la très grande taille de ses orbites, les paléontologues pensaient par exemple que *Microraptor* était nocturne. La découverte de son plumage iridescent suggère qu'il était en fait diurne, car ce type de coloration se rencontre aujourd'hui généralement chez des espèces actives durant la journée. Quant aux couleurs vives d'*Anchiornis*, elles permettaient probablement d'attirer un partenaire ou jouaient un rôle dans la parade nuptiale, comme les ramages parfois si criards des oiseaux modernes. La restitution des plumages de dinosaures pourrait ainsi nous fournir les moyens de tester nos hypothèses sur leurs comportements.

Les mélanosomes fossiles peuvent aussi nous aider à préciser dans quel type d'environnement une forme de vie disparue vivait. Nous

avons mené notre premier essai en ce sens grâce à un splendide fossile de *Psittacosaurus*, un petit dinosaure végétarien apparenté au célèbre *Triceratops*. Assez fréquents dans le nord-est de la Chine, les squelettes de cette espèce sont souvent très complets. Le spécimen que nous avons étudié sort du lot cependant, puisqu'il est entouré d'un mince film : les vestiges d'une peau et de délicates écailles. Sa queue présente de longues soies filamenteuses, qui pourraient être des précurseurs de plumes. Toutes les découvertes précédentes de plumes concernaient des dinosaures principalement carnivores – des théropodes. *Psittacosaurus* appartient, lui, à un groupe de dinosaures herbivores : les cératopsiens. C'est peut-être un indice que le plumage était bien plus répandu chez les dinosaures qu'on ne le pensait.

Lors de ma première observation de ce spécimen en 2009, soit un an après l'annonce de la découverte de mélanosomes dans des oiseaux fossiles, j'ai vu d'emblée des indices de la présence d'un magnifique motif coloré sur tout le corps. Il était subtil, puisqu'il comportait de fines marbrures, des points et des traits. J'ai aussi pu constater que l'animal avait le dos sombre et le ventre pâle. L'opposition de ton entre le dos et le ventre contrebalance l'ombre créée sur l'animal par l'éclairage ambiant, ce qui a pour effet de le rendre moins visible dans le paysage. Nommée contre-illumination, cette forme de camouflage se rencontre aujourd'hui chez de nombreux animaux, depuis les dauphins jusqu'aux cerfs en passant par les antilopes et les requins.

Quand j'ai montré le motif de la robe de *Psittacosaurus* à Innes Cuthill, dont l'équipe étudie le camouflage animal à l'université de Bristol, nous avons compris qu'il y avait là l'occasion d'étudier la contre-illumination chez un dinosaure et d'en déduire le type de milieu où il vivait.

Pour reconstituer l'habitat d'un animal, les chercheurs réunissent généralement des indices fournis par les fossiles d'autres animaux et de végétaux découverts à proximité. Ce type d'approche est problématique, car, souvent, le milieu où un fossile est découvert ne correspond pas à celui où l'organisme vivait. Le psittacosure chinois, par exemple, a été retrouvé dans les sédiments d'un ancien lac, alors que ce dinosaure ne semble pas avoir été aquatique.

Récemment, Innes Cuthill et ses collaborateurs ont étudié la contre-illumination chez les ongulés actuels (chevaux, antilopes, chameaux, sangliers, rhinocéros...). Le camouflage par contre-illumination implique une coloration plus sombre sur le haut du corps que sur le bas, mais le contraste des deux tons et la nature de la transition diffèrent d'une espèce à l'autre. L'équipe d'Innes Cuthill a étudié la contre-illumination chez les ongulés pour

> essayer de mettre en évidence si la variation de ton qui produit ce camouflage est corrélée aux conditions de luminosité, lesquelles varient avec la latitude et la densité de végétation. Or ses résultats vont dans ce sens.

De façon générale, dans un milieu ouvert, la lumière solaire directe tend à créer une ombre qui monte haut sur le corps, avec une transition bien nette vers la zone du corps illuminée. Les animaux vivant dans un tel habitat présentent en général une contre-illumination adaptée: le dos est sombre et le cède brusquement à un ventre clair, donc sans zone de coloration intermédiaire. L'antilope d'Amérique (*Antilocapra americana*) est un cas typique de ce genre de contre-illumination. Dans les habitats fermés, en revanche, de la lumière diffuse à travers la végétation et se disperse dans toutes les directions, ce qui produit une ombre moins haute sur le corps, accompagnée d'une transition douce vers la zone éclairée. Les animaux de ce genre d'habitat tendent à présenter une contre-illumination où la transition du ventre clair au dos plus sombre est progressive, ce qui est le cas par exemple des cerfs à queue noire (*Odocoileus hemionus*) et à queue blanche (*O. virginianus*), communs dans les forêts nord-américaines.

CAMOUFLAGE PAR CONTRE-ILLUMINATION

Le simple examen visuel du spécimen de *Psittacosaurus* révélait un certain type de contre-illumination, mais lequel? Pour le déterminer avec plus de précision, nous avons cartographié la répartition de la mélanine conservée sur le fossile à l'aide d'une technique d'imagerie spéciale. Avec le concours du paléoartiste britannique Bob Nicholls, nous avons ensuite projeté la carte obtenue sur un modèle précis et en grandeur nature du dinosaure. Nous avons ainsi établi que la transition du foncé au clair se situait bas sur le ventre et la queue de *Psittacosaurus*.

Afin de préciser la fonction exacte de ce camouflage par contre-illumination, nous avons photographié les ombres formées sur une copie peinte en grise de notre modèle grandeur nature dans toute une série de conditions d'éclairage, du soleil le plus éclatant jusqu'au ciel plombé de nuages, et cela tant sous des conifères qu'en terrain dégagé. Nous avons ensuite inversé les nuances sombres et claires des photographies afin de définir les contre-illuminations adaptées à telle ou telle condition. De cette façon, nous sommes parvenus à la conclusion que le type de contre-illumination de *Psittacosaurus* était adapté à un milieu baigné par une lumière diffuse: une forêt à canopée par exemple.

Enfin, les pigments conservés dans les proies probables de certains dinosaures peuvent aussi nous renseigner sur eux. Chez les insectes, la plupart des motifs colorés sont en effet

apparus au cours de l'évolution afin de leur éviter d'être dévorés. Or les fossiles des névroptères, un grand groupe d'insectes prédateurs généralistes, en offrent un exemple fascinant. Il y a entre 170 et 150 millions d'années, les ailes de certains névroptères ont commencé à arborer des ocelles, c'est-à-dire des taches en forme d'yeux, susceptibles d'intimider un prédateur approchant très vite. Ces insectes ont été parmi les premiers à acquérir de tels caractères.

Contre quel type de prédateurs se défendaient-ils? La plupart des motifs colorés des insectes actuels sont destinés à tromper les oiseaux, leurs principaux prédateurs. Toutefois, les névroptères sont antérieurs aux oiseaux tels que nous les connaissons. On pense donc que leurs prédateurs étaient des paraviens, c'est-à-dire des membres du groupe (Paraves) de dinosaures théropodes contemporains des névroptères, qui allait donner les oiseaux (entre autres). Le registre fossile des paraviens n'indique pas clairement à quel moment la capacité de voler est apparue, mais l'apparition d'ocelles chez les névroptères constitue un indice qu'une intense pression de prédation s'est exercée sur eux, celle-ci étant probablement due à des animaux volants. Les ocelles des insectes nous renseignent donc sur la date d'apparition du vol chez les dinosaures.

La recherche sur les paléocouleurs est loin d'être close. Il reste des pigments à rechercher et à identifier dans les fossiles, notamment les caroténoïdes qui produisent les rouges et des jaunes vifs et les porphyrines qui donnent des tons verts, rouges et bleus. Occasionnellement, de tels pigments ont été découverts dans certains fossiles – notamment des caroténoïdes dans des bactéries fossiles vieilles de plusieurs milliards d'années et des porphyrines dans un moustique gorgé de sang vieux de 46 millions d'années, ou encore dans les œufs d'un oviraptorosaure datant de 66 millions d'années. Des pigments inconnus chez les organismes actuels ont aussi été découverts au sein d'organismes bien plus anciens.

Il est clair que nous finirons par nous heurter à des limites, puisque après des millions d'années de fossilisation, une partie de l'information est irrémédiablement perdue. Nous avons aussi une forte contrainte: les fossiles exceptionnels, dans lesquels le matériau organique est conservé, sont si rares et si précieux qu'il est hors de question de les détruire en y prélevant trop d'échantillons. Cependant, comme les techniques progressent, les découvertes qu'elles rendent possibles vont sans aucun doute changer notre vision du passé de plus en plus vite. Chacune de ces découvertes nous rapprochera du moment où nous verrons les dinosaures ou d'autres animaux éteints tels qu'ils étaient réellement: en couleurs! ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Vinther et al., **3D camouflage in an Ornithischian dinosaur**, *Current Biology*, vol. 26(18), pp. 2456-2462, 2016.

J. Vinther et al., **The colour of fossil feathers**, *Biology Letters*, vol. 4(5), pp. 522-525, 2008.

EXPO

cité
des sciences &
de l'industrie

VALERIAN ET LAURELINE

en mission pour la Cité

13 JUIN 2017
14 JANVIER 2018

M PORTE DE LA VILLETTE

#ExpoValerian



ICI L'AFFICHE
AUGMENTÉE



AVEC LE SOUTIEN DE



BNP PARIBAS

EN COLLABORATION AVEC

DARGAUD

EN PARTENARIAT AVEC

MY TFI

Syfy

CNEWS Matin

SCIENCE



Le drone, sur le point de décoller, est piloté à distance par les chercheurs. Il recueillera des microorganismes en suspension dans l'air afin d'en comprendre la propagation.



L'ESSENTIEL

> De nombreux microorganismes se dispersent dans l'air, notamment des pathogènes qui affectent les cultures de céréales.

> Grâce à des drones et des modélisations complexes reproduisant les mouvements changeants des masses d'air, les auteurs déterminent comment se dispersent certaines maladies. Des pathogènes, tels ceux de la fusariose

des épis, se sont propagés dans de nombreuses régions du globe.

> À terme, les chercheurs pourront aider les agriculteurs à mieux protéger leurs champs en surveillant la dissémination des agents pathogènes.

> Des microorganismes influeraient aussi sur la météo, en favorisant, par exemple, les précipitations.

LES AUTEURS



DAVID SCHMALE
professeur
à l'université
Virginia Tech,
aux États-Unis



SHANE ROSS
maître
de conférences
à l'université
Virginia Tech

Des drones pour traquer les microbes

FUSARIOSE DES ÉPIS, ROUILLE NOIRE DU BLÉ ET AUTRES MALADIES DES CÉRÉALES RAVAGENT LES CULTURES DE CÉRÉALES DANS LE MONDE ENTIER. LA CAUSE : DES MICROORGANISMES QUI, TRANSPORTÉS PAR LES VENTS, PARCOURENT DES MILLIERS DE KILOMÈTRES. POUR LES SUIVRE, LES CHERCHEURS SORTENT LES DRONES...

L'air qui nous entoure grouille de bactéries, de virus et de champignons. À chaque inspiration, nous inhalons des milliers de ces microorganismes. Depuis plus de 150 ans, nous savons que certains d'entre eux provoquent des maladies chez les végétaux, les animaux et les humains.

Plus récemment, on a découvert que les microorganismes influent aussi sur la météo : ils facilitent par exemple la naissance de gouttes d'eau dans les nuages et provoquent des précipitations ou favorisent la formation de gel. Et ces microorganismes sont de grands voyageurs. Ils empruntent les grands flux d'air pour voler sur plusieurs centaines de kilomètres et traverser océans ou continents. Grâce à de nouveaux outils et de nouvelles techniques, les chercheurs sont capables de déterminer le lieu d'origine de ces organismes et la façon dont ils se dispersent.

Outre l'intérêt biologique de comprendre les interactions des microorganismes avec l'atmosphère, les enjeux économiques sont de taille. En effet, les agents pathogènes, vecteurs de maladies et de contaminations pour les cultures, provoquent des dégâts considérables. À l'échelle mondiale, les pertes se chiffrent en milliards d'euros chaque année.

Depuis une dizaine d'années, par une approche pluridisciplinaire, nous étudions les pathogènes les plus nocifs pour les céréales. L'un de nous (David Schmale) étudie l'aérobiologie, partie de la biologie qui s'intéresse à ce microcosme en suspension dans l'air, et en particulier aux microorganismes qui provoquent des maladies chez les végétaux ; l'autre (Shane Ross) développe des modèles mathématiques qui décrivent et prévoient comment les masses d'air se déplacent sur de courtes ou sur de longues distances. Nous nous sommes associés en 2006 pour retracer les chemins par lesquels

toutes les photographies sont de Adam Ewing

> les agents pathogènes des végétaux, ou phytopathogènes, se disséminent d'un champ, d'une région ou d'un continent à l'autre.

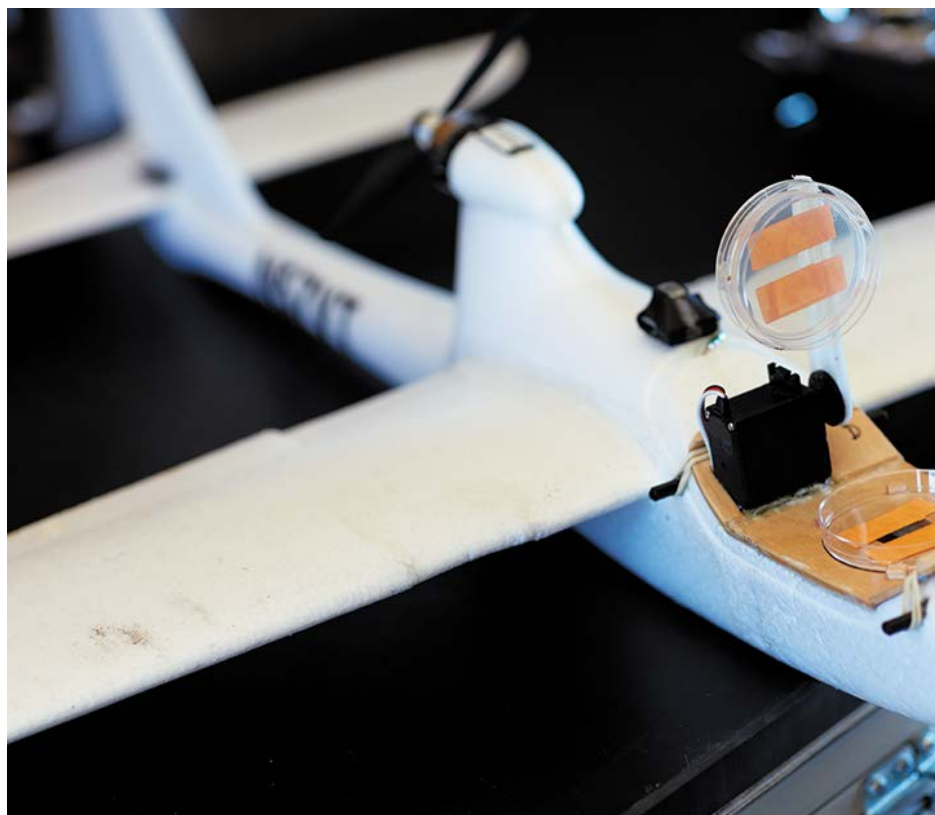
Pour y parvenir, nous avons d'abord eu l'idée de déployer une petite flotte aérienne constituée de drones. Ces aéronefs pilotés à distance sont équipés de dispositifs d'échantillonnage, afin de collecter et d'analyser les microorganismes de la basse atmosphère. Lors de chaque vol, nous récoltons une grande diversité d'organismes – dont beaucoup n'étaient pas bien étudiés ou étaient même inconnus. Grâce à ces prélèvements et à la mise au point de nouveaux outils informatiques, nous espérons reconstituer le processus de dispersion à grande échelle de ces microorganismes.

L'un des objectifs de ces travaux est de fournir aux acteurs du monde agricole des moyens de surveiller les microorganismes phytopathogènes dans l'air, de prévoir où ils pourraient se répandre, et donc d'identifier les champs à traiter ou à «mettre en quarantaine». Grâce ce type d'information, les agriculteurs pourront décider, en fonction des risques de contamination, quelles variétés de céréales planter ou quand pulvériser des produits phytosanitaires pour protéger leurs récoltes.

Nous avons concentré une grande partie de nos recherches sur un agent phytopathogène en particulier, *Fusarium graminearum*. Au cours des dernières décennies, ce champignon s'est dispersé plus loin et plus rapidement que jamais auparavant, en partie à cause du changement climatique et de certaines pratiques agricoles de conservation des sols, qui consistent à garder des résidus de culture dans les champs, ce qui permet à l'infection d'y prospérer d'une année à l'autre. Si le réchauffement climatique global se poursuit, de tels pathogènes étendront certainement leur zone d'influence au point de menacer l'approvisionnement alimentaire mondial en rendant impropres à la consommation de très grandes quantités de céréales.

DES TOXINES DANS VOTRE ALIMENTATION

Beaucoup de personnes ignorent à quel point les microorganismes phytopathogènes sont dévastateurs pour l'agriculture. L'une des maladies végétales, la fusariose des épis, décolore les épis de blé, d'avoine, d'orge, et d'autres céréales à petits grains. Plus grave, elle contamine les grains avec des composés toxiques, des mycotoxines. Lorsqu'elles sont ingérées en quantités suffisantes, ces mycotoxines provoquent notamment des vomissements chez les humains et le bétail. Or dans un champ contaminé, il n'est généralement pas possible de séparer les grains contenant ces toxines des grains sains. Il faut alors tester les récoltes moissonnées et les détruire si



elles contiennent des traces de toxines dépassant un certain seuil.

Dans le monde, différentes espèces de champignons du genre *Fusarium* provoquent une fusariose des épis. *Fusarium asiaticum* est depuis longtemps un problème en Chine centrale, d'où il a récemment commencé à se déplacer vers le nord. *Fusarium graminearum* est prédominant aux États-Unis, où il survit à l'hiver dans les résidus végétaux laissés au sol après la récolte de l'année précédente. Au printemps et à l'été, des structures fongiques, les périthèces, se développent sur ces résidus et libèrent des spores de *Fusarium* dans l'air. Ces spores se posent ensuite sur les anthères de blé et les soies de maïs. Elles germent et le champignon se développe dans la plante, ce qui conduit finalement à l'accumulation de mycotoxines dans les grains.

Ainsi, dans les années 1970, *Fusarium* a fait des ravages dans les cultures américaines de maïs, ce qui a provoqué une maladie chez de nombreux porcs (ces cas ont conduit à la découverte du désoxynivalenol, une mycotoxine qui entraîne chez les cochons des vomissements et les conduit à refuser de s'alimenter).

A cause du risque de contamination d'une variété de céréale à une autre, on déconseille souvent aux agriculteurs de planter du blé dans des champs immédiatement après que ces derniers ont été utilisés pour faire pousser du maïs ou d'autres céréales sensibles à la fusariose. De façon générale, la lutte contre la fusariose des



Les drones transportent des boîtes de Pétri spécialement adaptées que l'on peut ouvrir et fermer depuis le sol, de façon à pouvoir déterminer avec précision à quel endroit les microorganismes ont été collectés (ci-contre). Une spore de *Fusarium* capturée dans l'air a ensuite été isolée dans une nouvelle boîte de Pétri (ci-dessus) pour en étudier les propriétés.

épis est très onéreuse. Cette maladie a rendu la culture du blé de moins en moins rentable dans de nombreux États des États-Unis où l'on cultivait traditionnellement cette céréale.

Pour mieux faire face à ces problèmes, nous avons voulu comprendre comment les microorganismes sont transportés dans l'atmosphère, parfois sur de longues distances. Dans une première étape, nous avons décidé de mesurer la distance que *F. graminearum* pouvait parcourir en 24 heures dans l'air depuis un champ infecté.

Avec le soutien du Programme américain contre la fusariose du blé et de l'orge, et du Comité des cultures céréalières de Virginie, nous avons mené une série d'expériences sur des champs de blé dans l'État de Virginie. Nous avons pris une souche particulière de *F. graminearum* dans une certaine zone et nous l'avons implantée ailleurs. Au préalable, nous l'avons caractérisée par séquençage de son ADN afin de la distinguer des autres souches déjà présentes dans les champs que nous allions étudier. Nous avons répandu des tiges de maïs infecté avec notre champignon-test sur une surface d'environ un demi-hectare. Et, à différentes distances du site initialement contaminé, nous avons placé au sol une série de boîtes de Pétri pour recueillir d'éventuelles spores de *Fusarium*.

Nous avons retrouvé des spores provenant de notre souche-test à presque un kilomètre de l'endroit où elles avaient été libérées. Mais

certaines spores ont peut-être voyagé bien plus loin : en effet, nous n'avions installé des boîtes de Pétri que dans un périmètre de un kilomètre de rayon.

Au lieu de continuer simplement à disperser des boîtes de Pétri sur le sol de plus en plus loin pour rechercher nos spores de *Fusarium*, nous avons décidé de rechercher des microorganismes dans l'air au-dessus des champs que nous étions en train d'étudier. Si les spores se dispersent assez haut, elles entrent dans des systèmes d'écoulements aériens complexes dont la dynamique est modélisée par les météorologues et qui peuvent les transporter très loin.

Nous avons entamé la recherche de microorganismes dans l'air en modifiant un certain nombre de drones. Nous les avons équipés de dispositifs d'échantillonnage pour recueillir et analyser en vol des microorganismes. Nous avons ainsi collecté certaines des spores de *F. graminearum* qui flottaient au-dessus de nos têtes en Virginie. L'analyse des données recueillies a montré que certains de ces champignons étaient en suspension dans l'air depuis plusieurs heures – assez longtemps pour être mis en mouvement par des systèmes atmosphériques de grande échelle, qui s'étendent sur des centaines de kilomètres.

DES MASSES D'AIR QUI SE HEURTENT À DES MURS

Il était donc crucial de bien comprendre la dynamique des masses d'air. Des travaux récents en mécanique des fluides et en météorologie ont mis en évidence le rôle primordial de « murs d'air » pour suivre la propagation de particules en suspension et ainsi déterminer la distance parcourue par ces champignons et l'endroit où ils risquent de se déposer. Techniquement, ces murs d'air invisibles et temporaires portent le nom de structures lagrangiennes cohérentes (SLC). Ils apparaissent quand différents flux d'air (ou tout autre fluide, d'ailleurs) entrent en collision ou circulent autour d'un obstacle, tel qu'une montagne ou l'aile d'un avion. Il se forme alors des lignes de séparation invisibles que ne franchissent pas les masses d'air, mais qu'elles vont suivre en emportant les microorganismes.

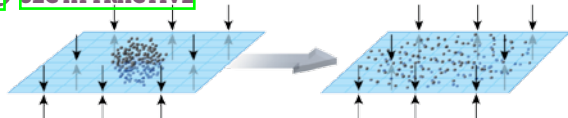
Les outils mathématiques qui décrivent ces structures lagrangiennes cohérentes relèvent de la théorie du chaos et d'une sous-discipline de la physique, celle des systèmes dynamiques non linéaires. En exploitant ces outils, il est possible de simuler les mouvements de l'air et des microorganismes qu'il transporte.

Ces murs d'air temporaires régissent aussi pour une bonne part la météo du quotidien. En outre, il a été montré comment les SLC guident

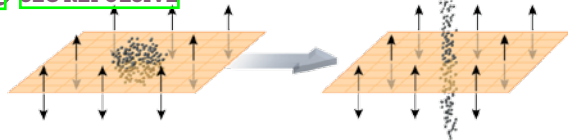
DES MURS D'AIR

L'écoulement de l'air, ou de tout autre fluide, crée certaines configurations (le jet-stream en est un exemple) dont la forme est influencée par des « murs » invisibles et temporaires, constitués par le fluide et nommés structures lagrangiennes cohérentes (SLC). Ces structures entrent dans deux catégories principales : les murs qui attirent les masses d'air (et toutes les particules qu'ils contiennent) et les murs qui repoussent les éléments d'air voisins. Les mathématiques qui régissent ces structures (représentées ci-dessous en bleu et en orange) déterminent si un ensemble de particules – des spores de champignons par exemple – se disperse le long de la surface du mur ou s'il forme une colonne de chaque côté de la SLC ②.

1 SLC ATTRACTIVE

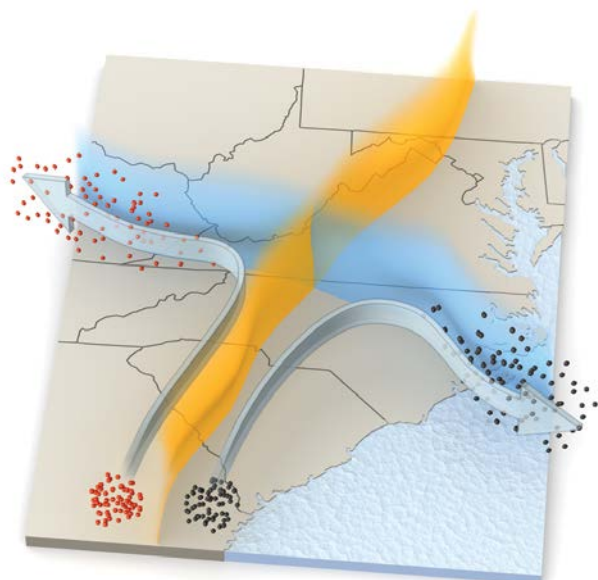


2 SLC RÉPULSIVE



LES SLC CRÉENT DIFFÉRENTS MOTIFS DE FLUX D'AIR

L'intersection d'une SLC attractive (en bleu) et d'une SLC répulsive (en orange) crée un flux d'air particulier nommé point-selle. Dans l'exemple ci-dessous, deux groupes de particules, initialement assez proches l'un de l'autre mais de part et d'autre de la SLC répulsive, longent ce mur sans le traverser. En atteignant le point-selle, les particules se dispersent dans des directions opposées et se retrouvent à des centaines de kilomètres les unes des autres. Cette dynamique met en évidence le besoin de comprendre le rôle des SLC pour anticiper la dissémination de microorganismes transportés dans l'air.



les vents qui alimentent des ouragans. À une échelle plus modeste, ces structures déterminent comment des agents phytopathogènes se dispersent en traversant une vallée et pourquoi, parfois, ils se posent sur une exploitation agricole particulière et pas sur la propriété voisine. En suivant l'évolution temporelle et spatiale des SLC, nous avons commencé à déterminer d'où les menaces microbiennes proviennent et vers quels endroits elles se dirigent. Quand nos programmes gagneront en fiabilité, les agriculteurs trouveront aussi utile de consulter nos prévisions microbiennes que les bulletins météorologiques!

DES AUTOROUTES ATMOSPHÉRIQUES

Les champignons du genre *Fusarium* sont loin d'être la seule menace pour les cultures et tous ces pathogènes font fi des frontières. Une souche du champignon responsable de la rouille noire du blé (Ug99) s'est répandue sur le continent africain et au Moyen-Orient à partir de son lieu d'origine en Ouganda à la fin des années 1990. Les cultivateurs en Australie et en Amérique du Nord s'inquiètent de son arrivée possible chez eux *via* des courants atmosphériques puissants et réguliers qui traversent, respectivement, l'océan Indien et l'océan Atlantique.

En 2004, la rouille du soja est arrivée aux États-Unis depuis l'Amérique du Sud, portée par l'ouragan Ivan. Depuis, elle passe l'hiver dans le sud des États-Unis et se déplace, à chaque saison de pousse, dans le Nord-Est et le Midwest, *via* des « autoroutes » aériennes. Plusieurs acteurs du monde agricole ont même créé un réseau de surveillance, à l'échelle nationale, de la propagation saisonnière de cet agent pathogène.

Pourtant, une grande partie de ces microorganismes ne devraient pas survivre pendant ces longs voyages dans l'atmosphère. Notamment, une exposition prolongée au rayonnement ultraviolet du Soleil devrait leur être fatale. Comment survivent-ils? En se fixant sur des particules de poussière, ils sont protégés de la lumière nocive.

Dale Griffin, de l'USGS (l'Institut américain d'études géologiques), et d'autres chercheurs ont étudié plusieurs de ces grandes voies de transport de la poussière reliant les différents continents. De fait, on estime que des centaines de millions de tonnes de poussière saharienne – et les microorganismes l'accompagnant – atterrissent en Floride chaque année. Hormis le fait qu'ils donnent lieu à des jours brumeux et à des couchers de soleil magnifiques, ces nuages de poussière provoqueraient de graves dégâts écologiques dans leur sillage.

Ainsi, plusieurs travaux récents suggèrent que les pathogènes responsables de la maladie du corail dans les Caraïbes – l'aspergillose des

gorgones (ou éventails de mer) en particulier – auraient été transportés dans de la poussière venue d'Afrique. Cela reste à confirmer, mais la désertification croissante du nord-ouest de l'Afrique accroît ce danger potentiel. En effet, de plus en plus de terres semi-arides se transforment en poussière, qui peut alors véhiculer un plus grand nombre de microorganismes.

Les microorganismes aériens favoriseraient des épisodes de grêle, de neige ou de pluie

Ces microbes ne font pas que propager des maladies en voyageant dans le ciel. Certains chercheurs suggèrent qu'ils influeraient aussi localement sur le temps en favorisant des épisodes de grêle, de neige ou de pluie. En règle générale, la formation d'un flocon de neige ou d'une goutte de pluie commence par la constitution de minuscules cristaux. Des gouttes d'eau ou des flocons se forment alors autour de ces microcristaux en fonction de certaines conditions, notamment la présence de particules, comme de la suie. Avec ces particules, l'eau gèle à des températures plus élevées que d'habitude (sans perturbation, l'eau pure peut rester liquide jusqu'à environ -38°C par le phénomène de surfusion).

CES MICROORGANISMES QUI FONT PLEUVOIR

En 1982, David Sands, de l'université d'État du Montana, et ses collègues ont avancé l'idée selon laquelle des microorganismes – à savoir la bactérie *Pseudomonas syringae* – pouvaient aussi servir de noyaux pour les cristaux de glace dans l'atmosphère. Dans des travaux ultérieurs, les chercheurs ont esquissé un mécanisme possible: certaines souches de *Pseudomonas syringae* produisent une protéine particulière à leur surface qui piège les molécules d'eau de telle façon qu'elles commencent à créer un réseau cristallin.

Au niveau du sol, les souches qui produisent ces protéines dites glaciogènes peuvent causer des dommages aux céréales en induisant un épisode de gel. Dans l'atmosphère, où la température est bien inférieure à 0°C , si une

quantité suffisante de ces bactéries et de leurs protéines glaciogènes est présente, un épisode de pluie ou de neige pourrait en découler.

Depuis les travaux précurseurs de David Sands, les chercheurs ont trouvé beaucoup de *Pseudomonas syringae* dans des échantillons de pluie et de neige. Il reste difficile de démontrer si ces microorganismes sont responsables du déclenchement des précipitations ou s'ils ne font que «suivre le mouvement». Des responsables de stations de ski n'ont pas attendu une réponse à cette question: un grand nombre d'entre eux utilisent des agents de nucléation de la glace vendus dans le commerce, qui contiennent des cellules de *Pseudomonas syringae*, pour fabriquer de la neige artificielle durant les journées d'hiver trop douces.

L'hypothèse de David Sands nous a incités à chercher d'autres microorganismes dans l'atmosphère qui déclencheraient des précipitations. David Schmale et ses collègues ont montré que les microorganismes associés à des précipitations sont beaucoup plus divers qu'on ne le pensait. En Virginie, Boris Vinatzer et David Schmale ont collecté de nombreux types de bactéries et de champignons dans l'atmosphère et dans des précipitations, qui pourraient servir d'agents de nucléation de la glace, au moins d'après des résultats en laboratoire. Et ces microorganismes qui «font la pluie» varieraient d'une région à une autre.

En combinant les informations sur la biodiversité locale, sur le mouvement des microorganismes dans l'air et sur les mécanismes de nucléation, nous pourrions mieux anticiper certains épisodes de précipitation. Et, au-delà de l'aspect prédictif, nous pourrions finalement utiliser certains de ces microorganismes pour faire pleuvoir dans les régions arides ou frappées de sécheresse.

Jusqu'à présent, nous nous sommes surtout intéressés aux processus qui se déroulent au-dessus de la terre ferme. En combinant nos résultats sur les microorganismes contenus dans les gouttelettes d'eau et nos calculs sur les structures lagrangiennes cohérentes, nous voulons décrire ce qui se passe dans l'air au-dessus de la surface des lacs, des rivières et des océans.

Nous avons déjà commencé à collecter des microorganismes au-dessus de l'eau en utilisant des flottes de bateaux sans pilote et des drones aériens. La situation à décrire est plus complexe mathématiquement, car les équations doivent tenir compte du mélange de l'air chargé en microorganismes et de l'eau provenant des embruns, de vagues déferlantes et même des éclaboussures de la pluie. Cependant, comme l'eau recouvre environ 70 % de la planète, nous sommes certains que ce que nous trouverons nous révélera de nouveaux éléments fascinants sur la façon dont les microorganismes parcourent le globe. ■

BIBLIOGRAPHIE

D. G. Schmale III et S. D. Ross, **Highways in the sky : Scales of atmospheric transport of plant pathogens**, *Annual Review of Phytopathology*, vol. 53, pp. 591-611, 2015.

L. E. Ogden, **Life in the clouds**, *BioScience*, vol. 64(10), pp. 861-867, 2014.

T. Peacock et G. Haller, **L'ordre caché des écoulements chaotiques**, *Pour la Science*, n° 434, décembre 2013.

Aristote contemplant le buste d'Homère (1653). Cette peinture de Rembrandt rassemble deux des grands Anciens auxquels la plupart des Modernes se réfèrent encore au XVII^e siècle.



L'ESSENTIEL

> On a longtemps vu le XVII^e siècle comme celui d'une grande révolution scientifique qui aurait donné naissance à la science moderne.

> Mais depuis quelques années, les historiens des sciences commencent à prendre en compte l'omniprésence de l'Antiquité dans le discours des savants de l'époque.

> Entre Modernes convaincus, tel Descartes, et Modernes respectueux des Anciens, la querelle est âpre non seulement en art et en littérature, mais aussi en sciences.

> Nombre de savants que l'on croyait porteurs de la révolution se révèlent très hésitants à larguer les amarres ancestrales.

L'AUTEUR



PASCAL DURIS
professeur
en épistémologie
et histoire des sciences
à l'université
de Bordeaux

Pas si Modernes...

Y A-T-IL EU UNE RÉVOLUTION SCIENTIFIQUE AU XVII^e SIÈCLE ?
HORMIS DESCARTES ET SES PARTISANS, AUCUN SAVANT DE L'ÉPOQUE
NE PERCEVAIT SON ŒUVRE COMME TELLE, BIEN AU CONTRAIRE.
L'ÉMANCIPATION DES MODERNES VIS-À-VIS DU POIDS
DES ANCIENS S'EST FAITE AU PRIX D'UNE LONGUE BATAILLE.

Au XVII^e siècle, le nombre d'ouvrages scientifiques proclamant la nouveauté de leur contenu est impressionnant : *Astronomia nova* (1609), de Johannes Kepler, *Novum Organum* (1620), de Francis Bacon, *Nouvelles conjectures sur la digestion* (1636), de Marin Cureau de La Chambre, *Discours et démonstrations mathématiques concernant deux sciences nouvelles* (1638), de Galilée, *Expériences nouvelles touchant le vuide* (1647), de Blaise Pascal, *Opuscula anatomica nova* (1649), de Jean Riolan, *Methodus plantarum nova* (1682), de John Ray, *Traité de plusieurs nouvelles machines et inventions extraordinaires sur différents sujets* (1698), de Denis Papin, et tant d'autres. Pendant longtemps, les historiens des sciences ont ainsi vu le XVII^e siècle comme celui de la nouveauté scientifique, celui qui voit l'émergence en Europe occidentale de la science moderne, c'est-à-dire d'une science expérimentale et quantitative, se libérant de l'autorité des Anciens et de la Bible, et guidée par la raison, à la fois graine et fruit d'une révolution scientifique sans précédent.

Pour Alexandre Koyré – le premier d'entre eux, dans les années 1930, à proposer cette notion de révolution scientifique –, celle-ci, caractérisée par une « mathématisation de la nature », s'étend des travaux de Copernic à ceux de Newton. Copernic et Galilée ont détruit le cosmos géocentrique grec et anthropocentrique médiéval. Et avec Descartes et Newton, l'espace s'est géométrisé.

UNE RÉVOLUTION SCIENTIFIQUE ?

Il est difficile de contester l'émergence, à cette époque, de nouvelles représentations du monde et de l'homme. Pourtant, quand on examine les écrits des savants du Grand Siècle, on constate qu'aucun, à l'exception de Descartes et de ses partisans – et dans une moindre mesure Bacon et Galilée – ne pense son œuvre ou celle de ses contemporains en termes de rupture. Leibniz en désapprouve même entièrement l'idée le 15 avril 1673, dans une lettre au père Huet : « Comme si on avait besoin d'une grande reconstruction, à en croire Bacon, ou d'une table rase, à en

croire Descartes, pour juger de façon juste», s'indigne-t-il.

Le mot «révolution», dérivé du latin médiéval *revolutio*, retour, a d'ailleurs alors pour première acception (c'est toujours le cas aujourd'hui) celle de phénomène astronomique cyclique et un deuxième sens, politique, longtemps synonyme de trouble, désordre, changement, disgrâce, malheur, décadence... Ce n'est qu'au début du XVIII^e siècle, après l'expérience d'une première véritable révolution politique au sens où nous l'entendons aujourd'hui (la Glorieuse Révolution anglaise), que le mot commence à être employé pour désigner aussi de profonds bouleversements dans les sciences. En 1727, le philosophe et savant Bernard Le Bovier de Fontenelle considère ainsi, dans la préface à ses *Éléments de la géométrie de l'infini*, que la découverte du calcul infinitésimal par Newton et Leibniz constitue «l'époque d'une révolution presque totale arrivée dans la géométrie».

Mais s'il n'y a pas eu de révolution scientifique, que s'est-il passé au XVIII^e siècle? Comment la science est-elle devenue «moderne»? Et comment ses acteurs ont-ils vécu cette transformation? C'est en explorant une célèbre querelle de l'époque, bien réelle celle-ci, mais surtout étudiée en littérature, art et histoire – la querelle des Anciens et des Modernes –, que les historiens des sciences cernent mieux ce qui a pu se produire alors. Les historiens de la littérature font commencer cet affrontement féroce en 1687 quand Charles Perrault, l'auteur des fameux *Contes*, dénigra l'Antiquité devant les membres de l'Académie française: «La belle Antiquité fut toujours vénérable, / Mais je ne crus jamais qu'elle fût adorable. / Je vois les Anciens sans ployer les genoux, / Ils sont grands, il est vrai, mais hommes comme nous; / Et l'on peut comparer sans craindre d'être injuste, / Le Siècle de Louis au beau Siècle d'Auguste.» La querelle gronde en réalité depuis le début du siècle et ne concerne pas seulement les lettres

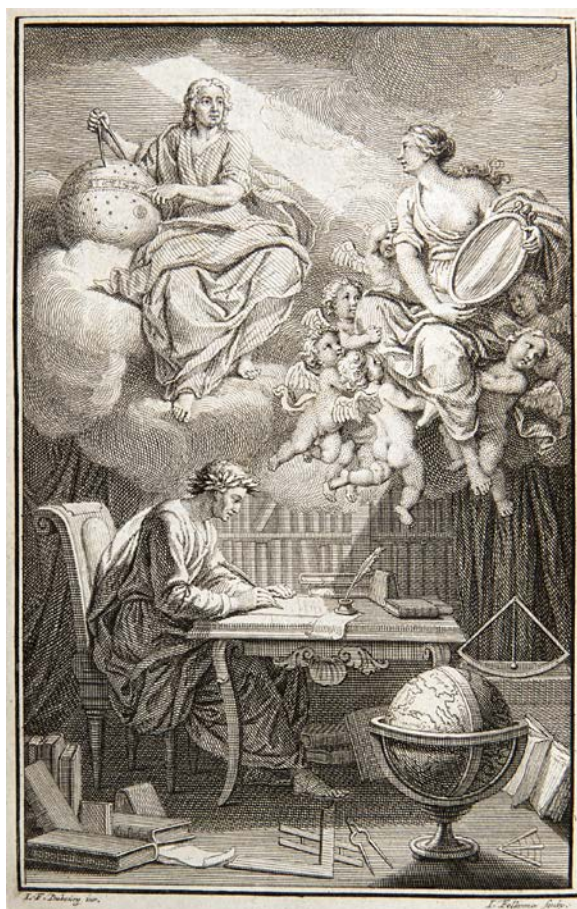
et les arts. Nombre de ses acteurs et témoins puisent aussi dans l'histoire et l'actualité des sciences – médecine, physiologie, astronomie, mathématiques, physique... – des arguments propres à soutenir la cause tantôt des Modernes, tantôt des Anciens. Leurs écrits, un peu trop littéraires pour l'histoire des sciences et un peu trop scientifiques pour l'histoire littéraire, et donc généralement ignorés de ces deux disciplines, permettent de jeter un regard neuf sur les conditions d'émergence et le fonctionnement de la science moderne au XVIII^e siècle.

« MODERNES MODERNES » VERSUS « MODERNES ANCIENS »

Les Modernes sont multiples: c'est d'abord ce qui ressort de l'abondante littérature générée par la querelle. Au début du XVIII^e siècle, la distinction entre Anciens et Modernes est principalement, voire exclusivement, une affaire de chronologie. Les auteurs entendent par «Anciens» leurs devanciers de l'Antiquité,

VOLTAIRE TRADUISANT NEWTON

Sur ce frontispice des *Eléments de la philosophie de Newton* (1738) où Newton et une muse (Émilie du Châtelet) éclairent Voltaire, les objets de science symbolisant l'œuvre de Newton sont ceux des Anciens: règle, compas, équerre. De fait, Newton ne rompt pas avec les Anciens dans ses écrits.



Il y a souvent
loin du discours
des Modernes
à sa mise en œuvre

IL Y A NOUVEAUTÉ ET NOUVEAUTÉ

L'âge classique distingue au moins trois sortes de nouveauté : en matière de politique, en matière de religion et en matière de science. Les deux premières n'ont pas bonne presse à l'époque et parasitent l'image de la dernière. Dans son *Dictionnaire françois* (1680), César-Pierre Richelet nous apprend qu'on appelle nouveautés les « troubles, remuements et brouilleries qui changent la face d'un état ». Antoine Furetière explique de son côté dans son *Dictionnaire universel* (1690) que « toutes les nouveautés sont dangereuses en matière de religion » mais qu'elles « sont bonnes en physique, parce qu'elles sont fondées sur de nouvelles expériences, sur de nouvelles découvertes ». Francis Bacon établit une distinction nette entre la nouveauté dans les affaires politiques et celle dans les arts

et les sciences : « Ce n'est pas en effet le même danger qui vient d'un mouvement nouveau et d'une lumière nouvelle », écrit-il dans le *Novum Organum*. En politique, elle peut occasionner des troubles, car aucune démonstration ne la fonde, alors qu'en science, elle ne peut qu'être féconde. Dans les choses de la foi, toute nouveauté est synonyme d'erreur au regard de la Vérité. Les partisans des Anciens, dans leur querelle avec les Modernes, sauront étendre ce raisonnement à la vérité scientifique pour disqualifier par avance les découvertes de leurs adversaires, nécessairement fausses puisque nouvelles. Au ^{xvii}e siècle, il en va des nouveaux philosophes comme des hérétiques. Moyennant quoi, la vérité de la science antique sera sauve, et il ne restera plus alors aux Modernes qu'à dissimuler, voire nier, comme le fait un peu trop Descartes, la nouveauté de leurs découvertes.

et par « Modernes » leurs contemporains ou leurs prédécesseurs immédiats. Au fond, il n'y a des Modernes que parce qu'il y a des Anciens. Cette distinction n'est sous-tendue par aucun jugement de valeur, même si la Renaissance pare les Anciens de toutes les vertus.

A partir de Bacon, les choses se compliquent. Si la modernité renvoie toujours au temps présent – en ce sens, nous avons toujours été modernes –, elle recouvre peu à peu une vision du monde et des méthodes d'étude inédites, continuellement perfectionnées, à l'aune desquelles les Anciens peuvent être jugés.

Trois grands groupes se distinguent alors : les « Modernes modernes », défenseurs de ces méthodes nouvelles, dont Descartes est la figure emblématique, mais aussi le mathématicien Jacques Rohault ou Fontenelle ; les « Anciens », qu'incarnent les grandes figures de l'Antiquité – Hippocrate, Aristote, Galien, Ptolémée, etc. –, longtemps intouchables ; et les « Modernes anciens », qui, bien que contemporains des « Modernes modernes », n'en demeurent pas moins fidèles aux Anciens, tels le médecin Jean Riolan ou le savant Athanasius Kircher.

Cette typologie sommaire montre que la construction de la science moderne s'opère dans

un contexte où prédominent les références à l'Antiquité. De fait, nombreux sont les savants qui ont marqué le siècle par des avancées obtenues en s'appuyant sur les Anciens. En 1628, le médecin anglais William Harvey, qui cite abondamment Aristote dans ses œuvres, lui emprunte l'idée de mouvement circulaire, que le philosophe utilise pour décrire le cycle naturel de l'eau dans ses *Météorologiques*. Reprenant cette idée, Harvey affirme que le sang circule dans l'organisme et que le cœur, par ses mouvements et ses pulsations, est le véritable moteur de cette circulation. Or à l'époque, on pense que le sang est distribué dans le corps, par les veines à partir du foie, et par les artères à partir du cœur, sans jamais revenir à son point de départ. Les « Modernes modernes » revendiquent Harvey comme l'un des leurs, alors que lui-même est loin d'inscrire son œuvre en rupture avec celle des Anciens.

Même Newton ouvre ses *Principia mathematica* (1687) en citant le mathématicien grec Pappus d'Alexandrie et préfère la géométrie euclidienne aux innovations mathématiques de son temps – la géométrie analytique et le calcul infinitésimal.

UN MICROSCOPE... POUR SE RAPPROCHER DE DIEU

Cette place accordée aux Anciens invite à ne pas prendre au pied de la lettre les plaidoyers réitérés des Modernes en faveur de la prévalence de l'œil sur le livre, de la force démonstrative des expériences ou du recours nouveau à la raison : il y a souvent loin du discours à la mise en œuvre.

Prenons les discours sur la primauté de l'observation personnelle. Harvey en donne un bon exemple quand il écrit en 1628 dans son *De motu cordis* que « [l']anatomie doit être étudiée et enseignée, à l'aide, non des livres, mais des dissections, non dans les théories des philosophes, mais dans l'examen de la nature ». De fait, le nombre et l'importance des découvertes réalisées au ^{xvii}e siècle grâce, par exemple, au microscope sont incontestables : « cellules » en 1665, infusoires (des animaux unicellulaires microscopiques) en 1674, animalcules spermatozoïdes en 1677, etc.

Il en va de même en astronomie où Galilée, armé de lunettes de sa fabrication, décrit au début du siècle les cratères de la Lune, les satellites de Jupiter, l'anneau de Saturne, les taches du Soleil, etc. L'histoire des sciences nous a convaincus que, en découvrant des mondes inconnus des Anciens grâce à ces nouveaux outils, les naturalistes et astronomes du ^{xvii}e siècle avaient pu se libérer de leur autorité et adopter rapidement une nouvelle conception de la scientificité et de la rationalité. Or s'ils prescrivent, dans le sillage de Bacon, l'étude du Livre de la Nature de préférence aux textes des Écoles, ils sont convaincus comme

lui que ce livre a été écrit par Dieu, tout comme les Saintes Écritures. Multiplier les observations permet de démontrer son existence et sa toute-puissance à partir de l'examen de ses œuvres. Un atout du microscope n'est-il pas de persuader les Modernes que Dieu a apporté autant de soin à la création des êtres les plus vils qu'à celle de l'homme lui-même? «*Maximus in minimis*» (très grand jusque dans ce qu'il y a de plus petit), dit-on alors. L'œil d'une mouche, par exemple, ou mieux encore d'un ciron, constitue l'archétype de la magnanimité des desseins divins. Mais, inversement, jusqu'où Dieu nous permet-il de nous enfoncer

dans l'infiniment petit? En même temps qu'ils ouvrent de nouveaux horizons, microscopes et télescopes suscitent de profondes angoisses chez les Modernes.

La science moderne n'a pu s'épanouir au XVII^e siècle qu'en s'émancipant de la tutelle religieuse, dit-on souvent. On voit qu'il n'en est rien et que l'étude de la nature est longtemps une entreprise intrinsèquement chrétienne. Il n'y a aucune raison de s'y livrer sans motivations religieuses, voire pieuses. La profonde religiosité affichée par presque tous les savants aux XVI^e et XVII^e siècles, et encore au XVIII^e, par exemple chez le naturaliste suédois Carl von Linné, ne les empêche pas d'accomplir une œuvre authentiquement scientifique. Vérifier si la vision de l'Enfer proposée par Dante est géométriquement fondée relève pour Galilée d'une démarche scientifique. C'est de la contestation prudente et argumentée de la littéralité de la Bible que naît peu à peu un questionnement scientifique. Science et foi ne sont pas vécues par les savants du Grand Siècle comme deux magistères inconciliables.

Au reste, les partisans de l'Antiquité ne se laissent pas impressionner par les découvertes de leurs contemporains obtenues, considèrent-ils, par des moyens contestables. Leurs grands prédécesseurs ont-ils eu besoin, eux, que des instruments les secondent pour faire les découvertes qui les ont rendus célèbres jusqu'à aujourd'hui? N'est-ce pas là une preuve supplémentaire du génie des Anciens? Et de l'incapacité des Modernes à les dépasser sans recourir à des «commodités», comme dit Fontenelle, qui les disqualifient dans cette compétition? «Qui pourrait avec quelque ombre d'équité relever notre siècle au-dessus de celui d'Hipparque ou de Ptolémée, parce que nous avons découvert les satellites de Jupiter et de Saturne, par le moyen de nos lunettes dont ils n'avaient pas la connaissance; ou rabaisser tant d'autres grands hommes, parce que n'ayant pas l'usage du microscope, ils n'ont pu que raisonner sur des objets, pour la connaissance desquels nous n'avons eu besoin que d'ouvrir les yeux», s'exclame avec d'autres en 1687 le baron de Longepierre, auteur dramatique, dans son *Discours sur les Anciens*.

LA RAISON RÈGNE, ARISTOTE GOUVERNE

Un autre point sur lequel les Modernes insistent beaucoup dans leur discours est la force démonstrative des expériences. De fait, si les travaux de Harvey sur la circulation du sang, du médecin italien Francesco Redi sur la génération spontanée ou du naturaliste hollandais Jan Swammerdam sur la contraction musculaire retiennent notre attention, c'est qu'ils témoignent d'une démarche scientifique dans laquelle il semble possible de trouver les prémices de la nôtre. Redi, par exemple, a montré

LA BATAILLE DES LIVRES

«Paracelse étant à la tête de ses troupes aperçut Galien dans l'aile qui lui était opposée; il saisit un javelot nouveau, et le lui lance avec une force presque surnaturelle; le vaillant Ancien le reçoit sur son bouclier, et la pointe se brise dans la seconde doublure faite du cuir d'un puissant taureau. [...] Ils portèrent leur chef dangereusement blessé dans son char. [...] Aristote voyant Bacon qui se poussait dans la plaine d'un air furieux, place sur son arc une flèche bien acérée; il approche la fatale corde jusqu'à sa tête; la flèche ailée fend l'air avec la rapidité de la foudre, elle manque le brave moderne; et vole par-dessus sa tête en sifflant, mais elle frappe le grand Descartes; la pointe trouve le défaut de son casque, elle perce le cuir qui



l'attache, et lui entre dans l'œil droit; la violence de la douleur fait pirouetter le vaillant archer, comme une tempête agite les branches d'un jeune sapin. Il accuse les astres, de sa destinée, jusqu'à ce que la mort comme une étoile d'une force supérieure l'enveloppe dans son tourbillon. [...] Tandis que le cheval d'Homère tue Westley d'un coup de son pied nerveux, le guerrier lui-même saisit Perrault, l'arrache de dessus son cheval, le jette contre Fontenelle, et du même coup il leur fait sauter la cervelle à l'un et à l'autre. »

Jonathan Swift, *Récit véritable, & exact, d'une bataille Entre les Livres anciens & modernes*, 1704

en 1668 que les insectes ne naissent pas par génération spontanée à partir de matières en décomposition à l'aide de ce que nous appelons aujourd'hui des expériences témoins.

Or les intentions et modalités que suivent les savants dans leurs approches expérimentales sont souvent bien différentes de celles qui nous sont familières aujourd'hui. Tout est sujet à études expérimentales, surtout l'histoire naturelle des Anciens. En 1658, par exemple, le père Huet, grande figure de la République des Lettres, jette dans le feu des salamandres d'une espèce normande pour vérifier si cette espèce diffère ou non de celle décrite par Pline et Dioscoride. Et comme les salamandres ne résistent pas à l'épreuve, il en conclut qu'il s'agit bien de deux espèces distinctes.

Par ailleurs, l'expérimentation en tant que telle suscite des débats au XVII^e siècle, car certains déplorent la dimension coercitive qu'y attache Bacon. Pour beaucoup d'auteurs, bousculer la nature, lui extorquer ses secrets par la contrainte, donne des résultats artificiels, bien inférieurs à ceux obtenus par la seule observation d'une nature laissée à son libre cours.

Autre argument clé du discours des Modernes, qui pourrait laisser croire à une rupture par rapport au passé: le recours à la raison. L'expérience est aveugle si elle n'est éclairée par la raison, répète-t-on volontiers. L'expérience et la raison, voilà le leitmotiv des Modernes qui font du recours à cette dernière la principale caractéristique de leur démarche. Or cette idée n'a rien de nouveau. Galien, au I^{er} siècle de notre ère, comme Aristote six siècles avant lui, considère déjà que raison et expérience doivent être les deux piliers de la médecine et des arts. Et pour les scolastiques du Moyen Âge, la nature humaine se distingue de l'animalité par sa rationalité. Il ne faut donc pas croire les Modernes modernes, par exemple Charles Perrault dans son *Parallèle des Anciens et des Modernes* (1688-1697), quand ils ramènent leur querelle avec les partisans des Anciens à celle de la raison contre l'autorité.

UNE ÉMANCIPATION TIMIDE

On le voit, les savants Hippocrate et Aristote (Anciens), Harvey (Moderne ancien) et Descartes (Moderne moderne) occupent toute leur place dans la querelle des Anciens et des Modernes, au même titre qu'Homère et Virgile (Anciens), Boileau (Moderne ancien) et C. Perrault (Moderne moderne) dans la sphère littéraire et artistique. Souvent, les historiens de la littérature voient dans cette confrontation le triomphe des Modernes. Lesquels opposent la liberté intellectuelle de tout un chacun au poids de traditions séculaires mis en avant par leurs adversaires. Or l'histoire des sciences au XVII^e siècle montre que les Modernes, qui mettent beaucoup de temps à croire en eux, peinent à gagner la partie.

SCIENCE CLASSIQUE OU SCIENCE MODERNE?

Au XVII^e siècle, la notion de « science » n'a pas la même signification qu'aujourd'hui. Il faut en effet y inclure des pratiques comme l'astrologie, la chiromancie, la magie, l'alchimie et des objets d'étude tels que la licorne, le centaure ou l'Enfer, qui ne relèvent plus du champ scientifique aujourd'hui. Mieux vaudrait, d'ailleurs, parler de « philosophie naturelle » ou de « physique », comme on le fait volontiers jusqu'au XVIII^e siècle. Si l'on continue à parler de « science » à

l'âge classique, c'est donc uniquement par commodité, mais avec le risque de commettre des anachronismes. Par ailleurs, doit-on parler de science classique ou de science moderne ? Il n'est pas possible de trancher, et les deux dénominations, qui désignent le même objet, se font concurrence dans les écrits des historiens des sciences. Tout au plus pourrait-on dire que le qualificatif « classique » renvoie davantage à la science du XVII^e siècle et qu'il est moins porteur d'enjeux idéologiques que celui de « moderne », qu'on peut opposer à « ancien », comme dans la querelle des Anciens et des Modernes.

La bataille avec les partisans des Anciens, qui voient dans leurs héros des précurseurs en tout des Modernes, est féroce partout en Europe, ainsi qu'en témoignent par exemple *La guerre des auteurs Anciens et Modernes* (1671), de l'avocat Gabriel Guéret, *l'Histoire poétique de la guerre nouvellement déclarée entre les Anciens et les Modernes* (1688), du diplomate François de Callières ou le *Récit véritable, & exact, d'une bataille Entre les Livres anciens & modernes, Donnée Vendredi passé dans la bibliothèque de St. James* (1704), de l'essayiste irlandais Jonathan Swift (voir l'encadré page ci-contre).

A aucun moment, au XVII^e siècle, la science moderne ne semble vraiment s'émanciper de la science antique. Ce n'est que pas à pas, au terme de questionnements, de démarches et de procédures parfois insolites, que les Modernes en viennent à faire une œuvre personnelle. Le XVII^e siècle n'est pas cet âge souvent décrit du rationalisme prenant son essor en rejetant le carcan de l'autorité. Si Bacon répète que la vérité est fille du temps et non de l'autorité, il ne dit pas qu'elle doit être fille de l'expérience. L'expérimentation n'a pas plus de poids que la phrase d'un Ancien, *a fortiori* qu'un passage de la Bible. La science du XVII^e siècle ne désenchant pas brutalement le monde et ne témoigne d'aucune révolution scientifique. Comme Voltaire l'écrit fort justement, « les idées ne marchent pas comme les divinités d'Homère, qui en trois pas traversent le ciel. La raison humaine voyage à petites journées ». ■

BIBLIOGRAPHIE

P. Duris, *Quelle révolution scientifique ? Les sciences de la vie dans la querelle des Anciens et des Modernes (xvi^e-xviii^e siècles)*, Hermann, 2016.

C. Lehner et H. Wendt, *Mechanics in the Querelle des Anciens et des Modernes*, *Isis*, vol. 108 (1), pp. 26-39, 2017.

P. Bullard et A. Tadié (dir.), *Ancients and Moderns in Europe : Comparative Perspectives*, Voltaire Foundation, 2016.

R

ENDEZ-VOUS

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

LE TOUT EST-IL PLUS QUE LA SOMME DE SES PARTIES?

Mettre à l'épreuve une vieille maxime un peu trop vague est un excellent stimulant mathématique: selon le sens qu'on donne aux mots, le mathématicien trouve que le tout est plus que la somme de ses parties... ou l'inverse!

L'AUTEUR



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

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



La maxime «Le tout est plus que la somme de ses parties» serait due au grand Aristote. Abondamment évoquée, elle est presque toujours applaudie sans sens critique. D'après les spécialistes, on ne trouve pas dans Aristote la phrase tant adulée. Seules certaines considérations du grand philosophe sur ce qu'est une droite évoquent une idée proche. Pour Aristote, la droite géométrique n'est pas composée de points qui seraient mis côte à côte et, ensemble, lui donneraient corps, comme nous le propose aujourd'hui la conception ensembliste. Pour lui, la droite est, en ce sens, plus que la somme de ses parties, les points.

L'intuitionnisme mathématique est une conception philosophique qui veut laisser à nos perceptions intuitives naturelles toute leur importance, sans les réduire à des manipulations symboliques. Elle refuse de traiter l'infini et le continu, donc la droite géométrique, de la manière simplifiée qu'on pratique aujourd'hui et adopte, vis-à-vis du continu, une attitude proche de celle d'Aristote: la droite est bien plus qu'un ensemble de points disposés côte à côte!

Toutefois, cette description de la droite et sa réduction ensembliste à des points est un problème de philosophie des mathématiques, alors que, lorsqu'on évoque le *tout* et la *somme de ses parties*, ce n'est pas à cela qu'on pense. L'idée est plutôt celle de la bicyclette qui est bien plus que la somme de ses composants posés au sol sans ordre: roues, pédales, chaînes, selle, etc. Pour enfourcher l'engin et aller faire un tour, il faut d'abord

assembler soigneusement ses parties, ce qui confère au *tout* des propriétés que ne possède aucun de ses composants. De même, une cellule n'est pas un tas de molécules, et un être humain n'est pas non plus un sac d'organes serrés en vrac.

C'est sans doute à cause de tels exemples que la formule est reprise par toutes sortes de systèmes philosophiques à propos de toutes sortes de sujets. Mentionnons plusieurs de ces idées et théories qui s'appuient sur la maxime.

UNE MAXIME D'ARISTOTE BRANDIE PAR DIVERSES THÉORIES

Le «holisme» du Sud-Africain Jan Christiaan Smuts (1870-1950) voit dans la nature une tendance à former des *touts* plus grands que la somme de leurs parties, en particulier grâce à l'évolution biologique.

L'idée de «synergie» évoque que le résultat d'une action collective est supérieur à la somme des résultats des actions des individus. Elle est évoquée quand plusieurs acteurs travaillant à un même but réussissent à obtenir mieux que ce qu'ils obtiendraient en œuvrant chacun de son côté.

En biologie, et dans l'étude des systèmes complexes, on parle d'«émergence» pour décrire une entité regroupant divers composants où l'on voit apparaître en son sein des propriétés ou des sous-systèmes qui ne figurent dans aucun des composants initiaux.

En psychologie, la Gestalt-thérapie du psychiatre allemand Fritz Perls (1893-1970) défend

qu'un individu doit être considéré comme un tout qu'il ne faut pas tenter de réduire à la somme de ses parties.

En médecine, en chimie et en pharmacologie, on mentionne l'«effet cocktail» quand l'action combinée de plusieurs substances n'est pas le simple cumul des actions de chacune des substances.

On discerne parfois dans ces théories ou mouvements la volonté de mettre en évidence des réalités dépassant la raison et le prétendu réductionnisme scientifique. La satisfaction un peu trop facile de donner un nom savant à ce qui n'est, dans certains cas, qu'un désir de mystère et même de magie ne doit pas faire illusion: on n'explique rien en parlant de holisme, de synergie, d'émergence, de Gestalt ou d'effet cocktail. Alors, peut-on donner un sens à la maxime «Le tout vaut plus que la somme des parties» et mieux comprendre ce que cela signifie? Tel sera notre objectif ici.

PROUVER LA MAXIME?

Pour que la maxime ait un énoncé précis, et si possible démontrable, il faut fixer une notion de valeur et constater (ou encore mieux, prouver) que la valeur du *tout* est plus grande que la somme des valeurs des *parties*. Or pour effectuer une somme et dépasser les idées vagues, il faut choisir ou définir une mesure. Il faut donc associer un nombre au *tout* et d'autres aux *parties*. La maxime, avec peut-être des hypothèses restrictives à formuler soigneusement, devrait alors devenir un théorème.

Il semble assez naturel de rechercher cette valeur sous la forme d'un contenu en information ou d'une mesure de complexité, car ce «plus» évoqué est vraisemblablement un enrichissement, ce qu'aujourd'hui nous cherchons à comprendre en employant les mots information et complexité. Pour préciser la maxime sur le *tout* et les *parties*, on doit considérer des objets $A_1, A_2, \dots, A_k$ associés chacun à une certaine complexité: $Comp(A_1), Comp(A_2), \dots, Comp(A_k)$. Ne précisons pas, pour l'instant, de quelle complexité il s'agit, ni son rapport éventuel avec de l'information. Si la maxime est vraie, le *tout*, noté $Union(A_i)$, aura une complexité plus grande que la somme des complexités individuelles: $Comp(Union(A_i)) > Comp(A_1) + \dots + Comp(A_k)$.

Sur les trois essais suivants qui viennent naturellement à l'esprit, ce souhait n'est pas exaucé!

ESSAI 1: LES ENSEMBLES

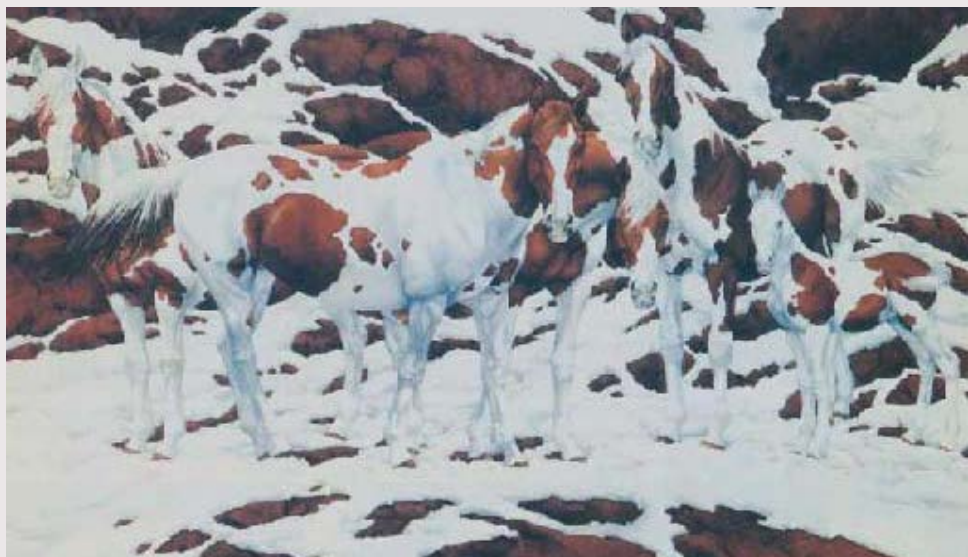
Considérons pour objets des ensembles au sens mathématique et, pour mesure de leur complexité, le nombre de leurs éléments (leur *cardinal*). Ce n'est pas absurde: plus un ensemble contient d'éléments, plus il est complexe. Il y a alors un rapport entre les deux quantités visées, mais inverse de celui attendu: $Card(Union(A_i)) \leq Card(A_1) + \dots + Card(A_k)$.

Lorsqu'un élément est présent dans plusieurs des ensembles considérés, il compte plusieurs fois dans le membre de droite et une seule fois dans le membre de gauche de l'inégalité. Dans le cas de deux ensembles, on précise

DANS LA GESTALT-THÉORIE, LE TOUT EST PLUS QUE LA SOMME DE SES PARTIES

1

L'idée de la Gestalt-théorie, ou théorie de la forme, est qu'il faut considérer la perception d'une forme comme un tout qui est plus que la somme des perceptions des parties. On illustre souvent cette idée avec l'extraction immédiate d'une figure, ici des chevaux d'un ensemble, le tout étant détecté avant ses parties (opération de découpage).



facilement ce supplément dans la somme, car :
 $Card(A \cup B) = Card(A) + Card(B) - Card(A \cap B)$.

Dans le cas d'ensembles finis en nombre fini, il n'y a égalité que lorsqu'il n'y a pas d'éléments communs à deux ensembles, ce qui est rare. Ainsi, notre première tentative de formalisation donne et démontre une maxime opposée à celle attribuée à Aristote !

ESSAI 2: LES ALGORITHMES

Prenons pour objets des problèmes algorithmiques concernant les nombres entiers n . Quelques exemples :

- A_1 : Factoriser n ;
- A_2 : Trouver la somme des diviseurs de n ;
- A_3 : Déterminer si n est un nombre premier;
- A_4 : Déterminer si n est un carré parfait;
- etc.

Prenons en guise de *tout* le problème de résoudre l'ensemble des problèmes élémentaires simultanément (pour un n fixé, ou pour un nombre fini de valeurs de n). Comme mesure de complexité, prenons, cela va de soi pour qui s'intéresse aux algorithmes, le nombre d'opérations ou la taille de la mémoire nécessaires pour effectuer la résolution.

Il a par exemple été démontré en 2002 que savoir si un entier n est premier est polynomial en fonction de la taille de n , c'est-à-dire que cela exige une quantité de calculs élémentaires qui croît comme un polynôme dont la variable est n . On est certain que le polynôme en question est de degré inférieur ou égal à 12 et on conjecture qu'il est de degré inférieur ou égal à 6.

Avec ce type de formalisations naturelles pour qui s'occupe d'algorithmes, la maxime attribuée à Aristote est à nouveau inexacte. En effet, la complexité de la résolution du *tout* sera au plus la somme des complexités des *parties*, et sera souvent inférieure. Certains problèmes bénéficieront des calculs faits pour d'autres, ce qui permettra des économies de ressource (en temps et en mémoire) pour qui cherche à traiter les problèmes simultanément.

Examinons un exemple : factoriser à la fois le nombre 375 (problème A) et le nombre 375000 (problème B). On pourra d'abord factoriser 375, ce qui donne $3 \times 5 \times 5 \times 5$, d'où $375000 = 3 \times 5 \times 5 \times 5 \times 1000$. Il restera alors à factoriser 1000, ce qui donne $2 \times 2 \times 2 \times 5 \times 5 \times 5$, d'où $375000 = 3 \times 5 \times 5 \times 5 \times 2 \times 2 \times 2 \times 5 \times 5 \times 5$. La complexité (en nombre d'opérations élémentaires) de la résolution de A et B est plus faible que $Comp(A) + Comp(B)$, car on a profité du calcul fait pour A quand on s'est intéressé à B.

ESSAI 3: LA COMPLEXITÉ DE KOLMOGOROV

Lorsqu'on considère des objets numériques finis, une autre idée naturelle est de mesurer leur valeur par la complexité de Kolmogorov.

Par définition, la complexité de Kolmogorov d'un objet numérique A, par exemple une image, que nous noterons $Kolmo(A)$, est la taille du plus petit programme qui produit A. Produire une image toute noire demande un programme très court, alors que produire l'image d'un visage nécessite un programme assez long. Même si les images ont la même taille en nombre de pixels, la première est moins complexe que la seconde, ce qu'indique correctement la complexité de Kolmogorov.

Cette mesure de complexité est unanimement considérée comme la bonne mesure du « contenu en information » d'un objet numérique. Généralisant l'entropie de Claude Shannon, elle est utilisée en informatique, en physique, en philosophie des sciences, en biologie, en psychologie. En pratique, calculer $Kolmo(A)$ revient à rechercher son fichier compressé le plus court. Même si l'on ne réussit qu'imparfaitement à trouver ce fichier compressé optimal, disposer de valeurs approchées de $Kolmo(A)$ grâce aux algorithmes de compression usuels est utile et permet par exemple de classer des données.

Pas de chance, et c'est plus grave ici car il s'agit vraiment d'une mesure de contenu en information, la complexité de Kolmogorov d'un ensemble d'objets numériques finis est inférieure ou égale à la somme des complexités de Kolmogorov des objets pris un à un. C'est un théorème de la théorie :

$$Kolmo(Union(A_i)) \leq Kolmo(A_1) + \dots + Kolmo(A_k).$$

L'idée de la démonstration est simple :

- les programmes les plus courts qui engendrent $A_1, A_2, \dots, A_k$, peuvent être mis bout à bout;
- ils constituent alors un programme P qui engendre le *tout* (c'est-à-dire $Union(A_i)$);
- ce programme P n'est peut-être pas le plus court qui donne le *tout*, mais le programme le plus court qui donne le *tout* sera plus court (puisque'il y a déjà ce programme-là) et donc la complexité du *tout* sera inférieure à la somme des complexités des *parties*. Encore une fois, la théorie démontre une inégalité inverse de celle de la maxime.

Fort de ces exemples, il semblait que jamais on ne pourrait trouver de situations mathématiques où la complexité du *tout* est plus grande que la somme des complexités des objets pris individuellement. Même en cherchant le plus honnêtement possible, quelle que soit la façon (naturelle) de définir et de mesurer la complexité, impossible de trouver un *tout* meilleur que la somme des *parties* !

Précisons que dans cette recherche d'une mesure de complexité satisfaisant la maxime, on a exclu les méthodes factices où l'on place dans le *tout* autre chose que l'ensemble des *parties*. Par exemple, on ne peut pas considérer comme une illustration acceptable de la maxime l'affirmation qu'il y a dans un mot

plus que ce qu'il y a dans l'ensemble des lettres qui le composent.

Il est vrai que dans le mot COMPLEXE, il y a plus que dans la donnée de l'ensemble de ses lettres C, E, L, M, O, P, X, mais c'est bien évidemment parce qu'on ordonne les lettres et qu'on en répète, et que cet ordre et ces répétitions ajoutés aux parties constituent un «plus» qu'on trouve dans le *tout* et qui est absent de la somme des *parties*.

De telles illustrations de la maxime étudiée sont triviales et sans portée, puisqu'elles sont fondées sur un ajout caché quand on constitue le *tout*. Les cas soi-disant spectaculaires de synergie, d'effets cocktail et autres doivent le plus souvent s'interpréter de la même façon. Oui, un vélo est plus que ses parties étalées au sol, mais c'est parce qu'on organise ses parties en les assemblant de la bonne façon et que cette bonne organisation ajoute aux parties.

LA COMPLEXITÉ COMME CONTENU EN CALCUL

La théorie algorithmique de l'information qui détaille ce qu'on peut dire et démontrer sur la complexité de Kolmogorov a introduit une notion qui va nous sauver: la «profondeur logique de Bennett» qui est le temps de calcul du plus court programme qui produit l'objet numérique fini auquel on s'intéresse. C'est une mesure de complexité structurelle, ou encore, une mesure de «contenu en organisation et en calcul», alors que la complexité de Kolmogorov n'est qu'une mesure de «contenu incompressible d'information». Plus un objet est finement structuré, comme l'est par exemple un organisme vivant, plus sa profondeur logique est grande.

Ces deux mesures de complexité, complexité de Kolmogorov et profondeur logique, diffèrent radicalement pour les objets aléatoires dont l'exemple typique est une suite finie de 0 et de 1 obtenue par des tirages successifs à pile ou face. Pour un tel objet aléatoire, la complexité de Kolmogorov est maximale: on ne peut pas le décrire de manière sensiblement plus brève qu'en en donnant les éléments un à un, ce qui est la pire situation pour un objet numérique de taille n , puisque l'objet à produire doit alors être écrit explicitement dans le programme, lequel est nécessairement aussi long que l'objet décrit: une suite aléatoire des bits est incompressible.

A l'inverse, la profondeur logique d'une suite aléatoire de longueur n est minimale pour les suites de longueur n . Une suite aléatoire n'est pas structurée, son contenu en organisation est presque nul. Sa profondeur logique de Bennett est réduite au minimum, puisque exécuter le programme le plus court

2

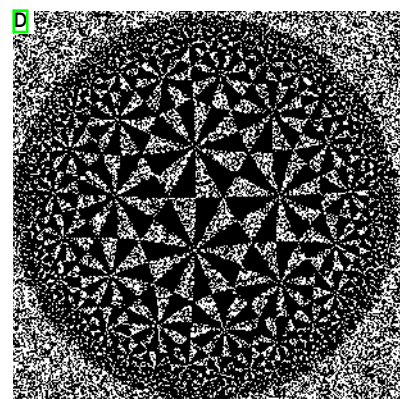
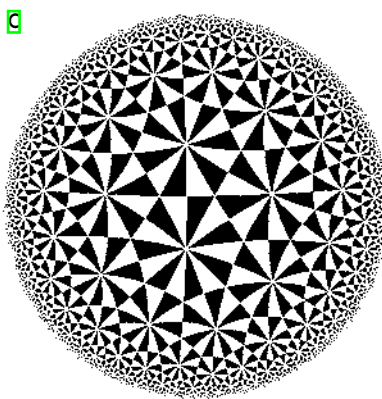
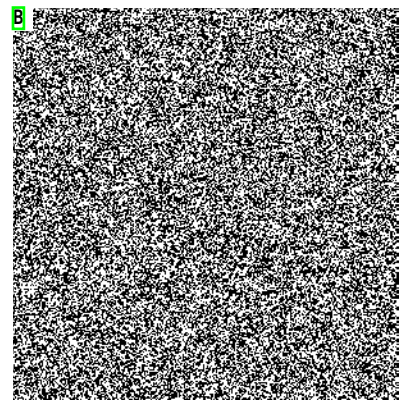
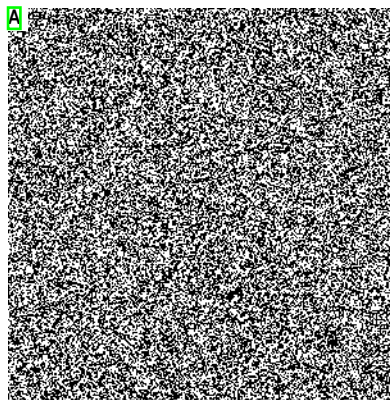
LA CRYPTOGRAPHIE VISUELLE À LA RESCOURSE

La cryptographie visuelle fournit un exemple incontestable de situation où le tout est plus que la somme des parties, plus précisément où le contenu en structures du tout est bien supérieur à la somme des contenus en structures de chacune de ses deux parties prises isolément.

On considère une image A composée à parts égales de points noirs et blancs disposés aléatoirement. Cette image n'a aucun contenu en structure, ou, dit autrement, sa profondeur logique de Bennett est très faible. On considère une image C ayant, elle, un contenu en structure important: il s'agit ici d'un pavage du plan hyperbolique. On calcule l'image $B = A \text{ xor } C$.

Un point est blanc dans B si les points correspondants de A et C sont tous les deux blancs ou tous les deux noirs; sinon, il est noir. L'image B est du même type que l'image A: elle n'a aucun contenu en structure et donc une profondeur très faible. Celui qui dispose de A et de B peut pourtant reconstituer C en calculant $A \text{ xor } B = A \text{ xor } (A \text{ xor } C) = (A \text{ xor } A) \text{ xor } C = C$. Il en résulte que $\text{Profondeur}(A \text{ et } B) \approx \text{Profondeur}(C)$, qui est supérieure à $\text{Profondeur}(A) + \text{Profondeur}(B)$.

Notons que si l'on imprime A et B sur des feuilles transparentes et qu'on les superpose, on voit apparaître l'image D, une forme bruitée de l'image C. C'est le principe de base de la cryptographie visuelle.



qui engendre la suite aléatoire revient à exécuter un programme qui recopie une donnée explicitement inscrite dans le programme et qu'une telle copie ne prend presque pas de temps (contrairement par exemple à la production de chiffres du nombre π par un programme court).

Dans le cas le plus général, la profondeur logique de Bennett n'indique pas que le *tout* a une complexité supérieure à la somme des complexités des *parties*. En effet, si vous prenez un *tout* composé de k fois le même objet, sa profondeur logique sera à peu de chose près la complexité d'un seul objet, et donc sera nettement inférieure à la somme des complexités

des objets pris un à un. Il ne peut y avoir un théorème du *tout* et des *parties* exprimant sans restriction la maxime, même avec la profondeur logique de Bennett!

En revanche, et c'est là une belle surprise, il existe des cas où l'on peut établir avec certitude (ce qui est assez rare quand on manie le concept de profondeur logique) que la complexité d'un tout composé de plusieurs objets est supérieure à la complexité de la somme de chacun d'eux. Voici un tel exemple imparable.

Considérons les deux images A et B de l'encadré 2. Chacune est composée de 0 (pixels blancs) et de 1 (pixels noirs) d'une manière

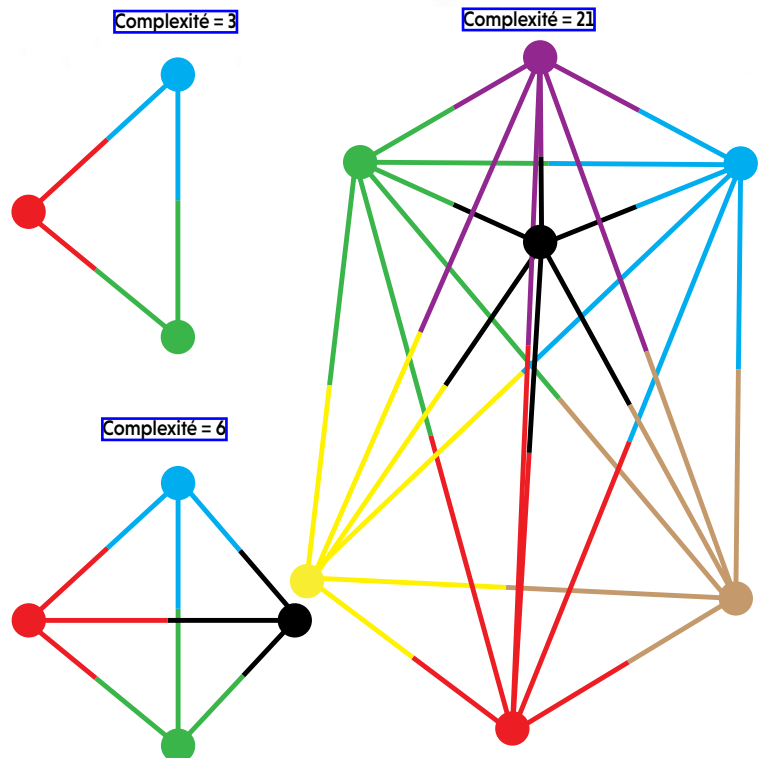
UN CAS ÉLÉMENTAIRE FAVORABLE

3

Mesurons la complexité d'un ensemble d'objets par le nombre de liens que ces objets peuvent avoir entre eux. Quatre objets A, B, C, D ont par exemple potentiellement 6 relations possibles entre eux : A avec B, A avec C, A avec D, B avec C, B avec D, C avec D. Ce nombre, 6, est le nombre de poignées de mains que 4 personnes s'échangent quand elles se rencontrent, ou le nombre de conversations en face-à-face que 2 personnes parmi 4 peuvent avoir. C'est le nombre d'arêtes possibles dans un graphe (non orienté et sans arête joignant un sommet à lui-même) ayant 4 sommets (ci-contre, en bas).

Pour n sommets, ce nombre devient $n(n-1)/2$. Ce nombre est une mesure envisageable de la complexité d'un ensemble d'éléments, car il correspond à la richesse des interactions possibles entre des paires d'éléments. Si l'on considérait les interactions à trois, la formule $n(n-1)/2$ deviendrait $n(n-1)(n-2)/6$ et une généralisation est possible pour les interactions à k , qui conduirait à utiliser les éléments du triangle de Pascal.

Pour cette mesure de complexité, a-t-on la propriété suggérée par la maxime attribuée à Aristote ? La réponse est oui. Si par exemple on considère n objets et qu'on les groupe en deux parties ayant respectivement a et b objets avec $a+b=n$ ($a \geq 1$, $b \geq 1$), alors il est facile d'établir que : $n(n-1)/2 > a(a-1)/2 + b(b-1)/2$. La richesse en interactions mesurée comme nous venons de le faire croît non linéairement en fonction du nombre d'éléments, et c'est ici la raison du succès de l'idée que le tout est plus que la somme des parties.



aléatoire. Leur profondeur logique de Bennett est donc minimale, comme nous venons de le voir: un objet aléatoire n'est pas structuré et a donc une profondeur logique minimale, comparable à celle d'une suite de même longueur composée uniquement de 0.

Le *tout* (composé des deux images A et B) n'est pourtant pas aléatoire, car les deux images sont intimement corrélées. Pour s'en rendre compte, on applique l'opération logique «ou exclusif», notée xor, entre A et B, ce qui donne une image C: quand les deux pixels homologues de A et B sont identiques, on met un 0 pour le pixel homologue de l'image C, sinon on met un 1: $0 \text{ xor } 0 = 0$, $1 \text{ xor } 1 = 0$, $0 \text{ xor } 1 = 1$ et $1 \text{ xor } 0 = 1$.

Les images A et B n'ont pas été produites n'importe comment, et le xor entre A et B fait apparaître un beau dessin géométrique qui est la représentation d'un pavage par des triangles du plan hyperbolique. Le même procédé, que nous allons expliquer, sert de base à ce que l'on dénomme la «cryptographie visuelle», il permet d'obtenir n'importe quelle image aussi structurée qu'on le souhaite en partant de deux objets parfaitement non structurés (mais corrélés).

Le procédé donnant A et B est assez simple. On part d'une image aléatoire A: 50 % de pixels blancs et autant de pixels noirs, tirés au hasard. On choisit une image C quelconque, éventuellement très structurée. L'image B est alors construite en calculant $A \text{ xor } C$. En faisant le calcul $A \text{ xor } B$, on retombera sur C, car:

$$A \text{ xor } B = A \text{ xor } (A \text{ xor } C) \\ = (A \text{ xor } A) \text{ xor } C = [0] \text{ xor } C = C.$$

La dernière égalité mentionne l'image notée [0], qui désigne celle composée uniquement de pixels blancs. Le fait que $[0] \text{ xor } C = C$ résulte de ce que $0 \text{ xor } 0 = 0$ et $0 \text{ xor } 1 = 1$.

L'image B est parfaitement aléatoire elle aussi. Celui qui ne dispose que de A seul, ou que de B seul, ne peut strictement rien en tirer. Ni A ni B n'ont le moindre contenu en organisation.

Il résulte de tout cela que le programme le plus court qui donnera le *tout* sera le programme le plus court de A associé avec le programme le plus court de C, suivi d'un calcul du ou exclusif entre A et C, ou sera quelque chose de très proche. Puisque C est structuré de façon non triviale, ce programme minimal pour le *tout* aura un temps de calcul plus long que la somme des temps de calcul des programmes minimaux pour A et minimaux pour B (qui sont des programmes très rapides, puisqu'il n'y a aucune structure dans A, et aucune structure dans B). La profondeur logique du *tout* est donc supérieure à la somme de la profondeur logique de A et de la profondeur logique de B.

On a ainsi ce qu'on voulait: un cas où la maxime aristotélicienne est démontrable. L'énoncé qui permet de prouver l'inégalité est un théorème: «Quelle que soit la profondeur logique d'un objet numérique C de taille *n*, on peut construire deux objets A et B, chacun de taille *n*, de façon que A et B soient chacun de profondeur minimale (parmi les objets de taille *n*), et tels que le *tout* constitué de A et de B soit de profondeur équivalente à celle de C et donc supérieure à la somme de la profondeur de A et de la profondeur de B.»

LE CAS DES SYSTÈMES COMPLEXES

Il est probable que ceux qui évoquent ce *tout* supérieur à la somme de ses *parties* ont en tête des situations où c'est bien l'organisation (ou encore «la richesse en structures», «la valeur fonctionnelle», «le contenu en calcul») qui sert à mesurer la valeur du *tout* et celle de ses *parties*. L'idée exprimée par la maxime est souvent fautive; elle intéresse d'ailleurs parce qu'on la perçoit comme paradoxale, mais il y a des cas où le paradoxe devient vrai quand ce qui mesure la valeur du tout est vraiment lié à une richesse en organisation. Ces cas font l'intérêt de la maxime.

Croire à la maxime et en faire un pilier philosophique des réflexions sur la complexité sans même chercher à savoir de quoi elle parle, ni si cela peut se mathématiser, est une attitude ridicule. En effet, le plus souvent, c'est l'inégalité inverse qu'on démontre, même quand on envisage la complexité des algorithmes ou la complexité de Kolmogorov. Disposer d'un cas précis où la maxime devient vraie est éclairant, et il faut sans doute y voir une preuve nouvelle de l'intérêt de la définition de Bennett: la complexité structurelle d'un objet fini F se mesure par «le temps de calcul de son programme le plus court», ou, dans la version plus tolérante, par «le temps de calcul des programmes courts qui produisent F».

Il existe peut-être d'autres procédés formels non illusoire donnant un sens à la maxime (l'encadré 3 en présente un), mais celui qui s'appuie sur la profondeur logique de Bennett appliquée à l'association de deux objets corrélés est probablement central, du fait de sa place au sein de la théorie algorithmique de l'information. Dans les systèmes complexes, comme le sont les organismes vivants ou les écosystèmes, les interdépendances font qu'on est assez souvent dans une situation semblable à celle des images A, B et C. Ce qui est apparu dans un premier temps comme une exception y devient la règle. La complexité du *tout* mesurée par la profondeur logique de Bennett est donc, dans de telles structures, supérieure à la somme des complexités des *parties*. ■

BIBLIOGRAPHIE

M. Li et Paul Vitányi, **An Introduction to Kolmogorov Complexity and its Applications**, Springer, 2014.

J.-P. Delahaye, **Qu'est-ce qu'un objet complexe ?**, *Pour la Science*, pp. 78-83, mai 2013.

J.-P. Delahaye, **La cryptographie visuelle**, *Pour la Science*, pp. 86-91, juin 2012.

C. Bennett, **Logical depth and physical complexity**, dans *The Universal Turing Machine : A Half-Century Survey*, pp. 207-235, Oxford University Press, 1988.

Aristote, **Physique - Livre VI**, <http://remacle.org/bloodwolf/philosophes/Aristote/phys6.htm>

L'AUTEUR



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

LE PALAIS SOUS LES DUNES

Une exposition confronte artistes et scientifiques à la problématique des formes dans un esprit transdisciplinaire. Les œuvres sont alors l'occasion de nous interroger sur les multiples origines des formes et sur ce qu'elles nous disent.

B

ienvenue au musée, plus précisément au palais de Tokyo, à Paris. Malgré l'affluence constatée à l'entrée, vous pénétrez dans une grande salle... et là, c'est désert. C'est le désert! Vous êtes face à un paysage de dunes qui se sont formées entre des piliers identiques à ceux croisés plus tôt. Étonnant. C'est l'une des œuvres présentées dans l'exposition *Le Rêve des formes. Art, science, etc.*, coorganisée avec Le Fresnoy-Studio national des arts contemporains, de Tourcoing, à l'occasion de son vingtième anniversaire.

Le fil conducteur est la réflexion engagée entre artistes contemporains et scientifiques autour de l'idée de formes, celles que peut prendre la matière, vivante ou non, quelle que soit l'échelle, du nanométrique à celle de la cosmologie. Cette exposition préfigure le colloque multidisciplinaire *Le Rêve des formes. Arts, sciences & C^{ie}*, qui se tiendra en septembre au Collège de France, à l'invitation d'Alain Prochiantz, neurobiologiste et administrateur général de cette institution.

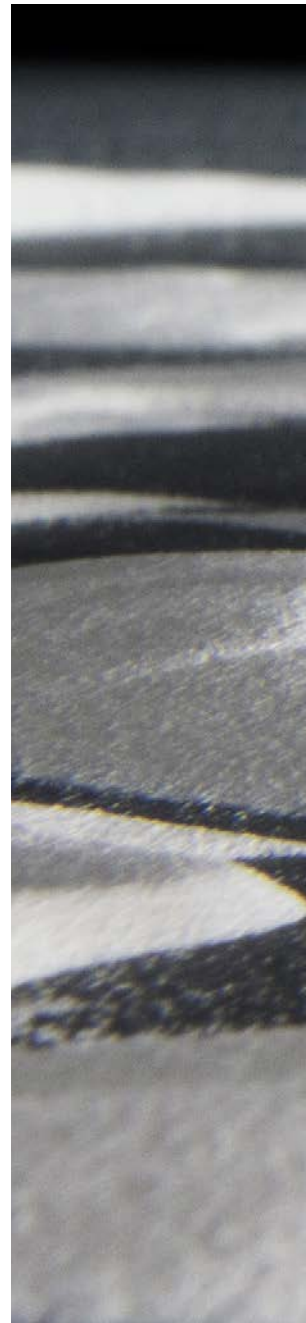
DUNES IMMERGÉES

Les dunes de la grande salle sont un projet réalisé par l'artiste Hicham Berrada en collaboration avec l'architecte Simon de Dreuille et le physicien Sylvain Courrech du Pont. Ce dernier, au laboratoire Matière et systèmes complexes de l'université Paris-Diderot, étudie la formation des dunes, que ce soit dans les déserts terrestres ou ailleurs,

Le comble pour un musée? Mettre en scène le désert en espérant une affluence record.

notamment Mars ou Titan, le satellite de Saturne. Pour ce faire, il a élaboré une machine à fabriquer des dunes. Il s'agit d'un grand aquarium rempli d'eau, 800 fois plus dense que l'air. Elle remplace le vent lorsqu'un plateau est mis en mouvement et sur lequel se forment des dunes immergées... 800 fois plus petites que celles observées dans la nature.

Hicham Berrada s'est emparé de ce simulateur pour réaliser un film. Avec Simon de Dreuille, il a d'abord conçu une maquette tridimensionnelle de la salle, dite paysagée, où vous vous trouviez au début de cet article. Cette reproduction a ensuite été placée dans la machine où le processus





d'ensablement autour du «mini-édifice» a été enregistré. Ce sont ces images qui, projetées agrandies dans l'espace d'exposition, agissent comme un trompe-l'œil: on assiste sans trucage, ou presque, à la fabrication d'un paysage désertique de dunes dans la salle paysagée.

Parmi les autres œuvres exposées, citons celle des physiciens Annick Lesne et Julien Mozziconacci, qui donne à voir la structure tridimensionnelle des 23 chromosomes humains. L'artiste Olivier Perriquet et le chercheur en informatique Jean-Paul Delahaye proposent quant à eux une variation autour du Jeu de la vie, un automate cellulaire inventé par John

Horton Conway en 1970 où, malgré des règles de fonctionnement très simples, des comportements complexes et contre-intuitifs peuvent apparaître: ils se traduisent en formes sur un quadrillage. Dernier exemple, les artistes Jonathan Pêpe et Thibaut Rostagnat, avec le mathématicien David Chavalarias, s'interrogent dans *Stalagmèmes* sur la représentation des traces numériques de notre société.

On déambule entre espèces animales, végétales et non identifiées, entre mutants, créatures hybrides et organismes altérés, entre formes autoorganisées et modèles mathématiques... Claire Moulène, l'une des commissaires de l'exposition, la résume

ainsi: «Elle opère progressivement un lissement entre quatre grandes familles de formes: des formes dynamiques, des formes naturalistes ou mimétiques, des formes mutantes ou monstrueuses et, enfin, des formes algorithmiques.» En d'autres termes, au palais de Tokyo, les arts plastiques jouent avec la plasticité. ■

Le Rêve des formes. Art, science, etc.
Palais de Tokyo, Paris, jusqu'au 10 septembre 2017.
www.palaisdetokyo.com



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

LES AUTEURS



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



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

LES RADIOGRAPHIES PRENNENT DES COULEURS

Dans les contrôles de bagages ou du fret à l'aéroport, comment distinguer un liquide explosif d'un parfum? Un pain de plastic d'un bloc de pâte d'amande? Fondés sur une bonne compréhension de l'interaction des rayons X avec la matière, les nouveaux scanners aident à faire plus efficacement le tri.

Les radiographies classiques, réalisées avec des rayons X, permettent de bien distinguer une fracture du tibia, une dent cariée ou la silhouette des objets à l'intérieur d'une valise. Mais, bien souvent, elles ne suffisent plus, notamment dans le domaine de la sécurité où l'on doit distinguer le pain de plastic du bloc de pâte d'amande. C'est pourquoi ont été développées de nouvelles générations de scanners à rayons X qui mettent à nu les objets dissimulés à notre vue – en tirant astucieusement parti de la physique de l'interaction des rayons X avec les atomes.

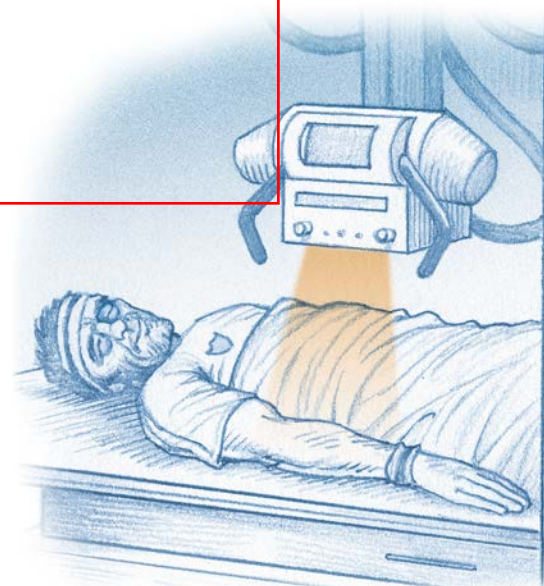
PLUS DENSE, DONC PLUS CLAIR

Rappelons d'abord le principe de la radiographie classique. Il s'agit d'une photographie en négatif, où les zones du cliché apparaissant claires correspondent aux parties de l'objet qui ont absorbé (ou dévié hors champ) les rayons X émis en

direction de la plaque de détection. À épaisseur égale, cette absorption est d'autant plus importante que le matériau traversé est dense, c'est-à-dire que sa masse volumique est élevée. C'est pour cette raison que l'on distingue facilement les os des autres tissus dans une radiographie du corps humain, une dent cariée d'une dent saine, ou les objets métalliques parmi les vêtements d'une valise.

Pourquoi cette absorption (ou déviation) des rayons X est-elle directement reliée à la masse volumique? Parce que ce phénomène est dû aux interactions des rayons X avec les électrons de la matière, et que le nombre total d'électrons présents par unité de volume est quasiment proportionnel à la masse volumique.

Justifions cette dernière affirmation. La masse d'un atome est pratiquement égale à la masse de son noyau, elle-même à peu près égale au produit du nombre de nucléons (protons et neutrons) par la

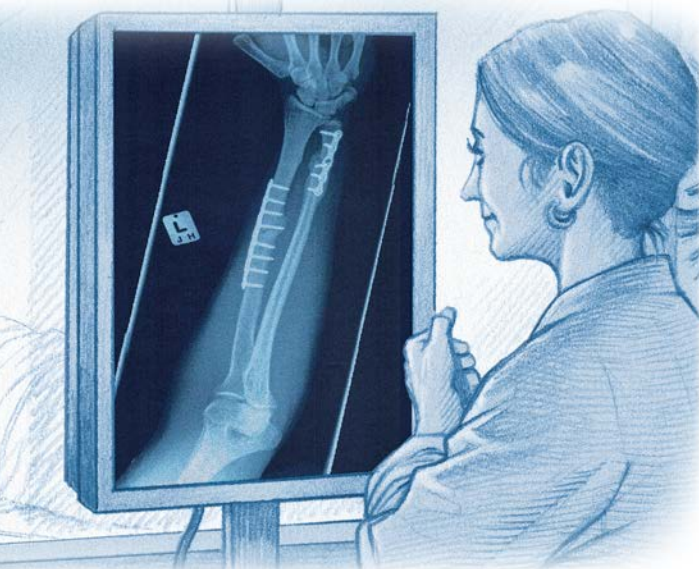
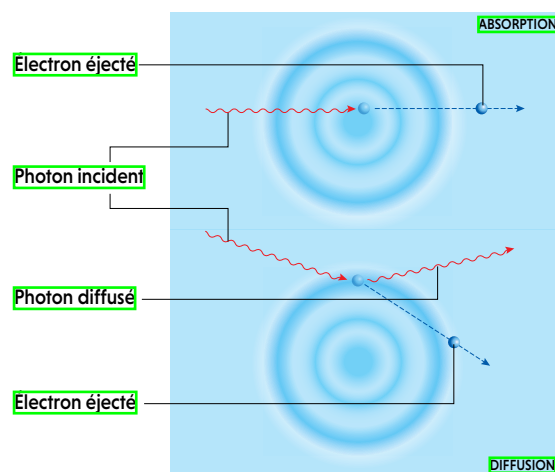
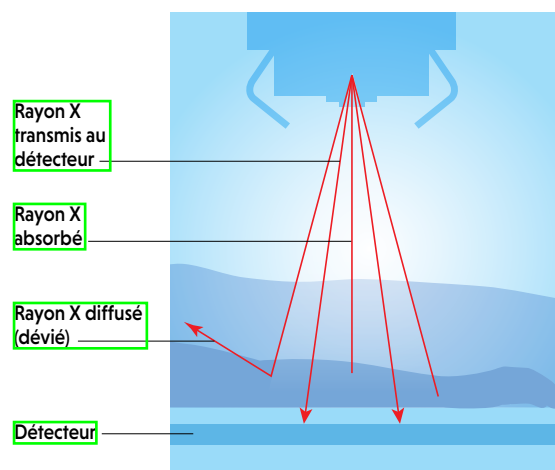


masse d'un proton. Or le nombre de nucléons vaut 2 à 3 fois le nombre de protons et ce dernier est égal au nombre d'électrons, afin d'assurer la neutralité électrique de l'atome. Le nombre d'électrons d'un atome est donc grossièrement proportionnel à la masse de cet atome.

En radiographie X classique, on envoie un faisceau approximativement monoénergétique de rayons X (c'est-à-dire que tous les rayons sont à peu près de même énergie) à travers l'objet examiné. L'image obtenue est en teintes de gris, des ombres sans information sur la nature des matériaux traversés. Les contrôleurs de sécurité expérimentés cherchent à

ABSORPTION OU DIFFUSION

Les photons (quanta d'énergie) des rayons X interagissent avec les électrons des atomes et quasiment pas avec leurs protons ou neutrons, trop lourds. Cette interaction peut prendre deux formes. Le photon X peut être absorbé par un électron d'une couche profonde, lequel est alors éjecté de l'atome : c'est la photo-ionisation. Il peut aussi être juste dévié par un électron périphérique : c'est la diffusion Compton. La probabilité de chacun de ces processus dépend de l'énergie du photon incident et de l'énergie qui lie l'électron à son atome.



Une radiographie classique visualise les contrastes de densité : un organe plus dense laisse passer moins de rayons X en direction de la plaque de détecteur.

reconnaître les profils d'objets dangereux, tels ceux d'une arme blanche ou à feu, mais, puisqu'il peut y avoir plusieurs objets empilés, les ombres se superposent et gênent l'identification. En outre, cette imagerie ne permet pas de distinguer des explosifs ou de la drogue, car ces matériaux n'ont pas de forme particulière. Tout au plus l'opérateur pourrait-il identifier les fils électriques d'un dispositif de mise à feu.

COLLISIONS PHOTON-ÉLECTRON

Pour comprendre comment on a pu améliorer les contrôles de sécurité, revenons à l'interaction des rayons X avec la matière. Les rayons X sont des ondes

électromagnétiques de très courte longueur d'onde, entre 0,001 et 10 nanomètres environ. Les corpuscules associés à ces ondes, les photons, ont des énergies comprises entre la centaine et le million d'électronvolts (eV), bien plus que l'énergie des photons de la lumière visible (de l'ordre de quelques électronvolts).

Pour les scanners à rayons X envisagés ici, l'énergie utilisée est autour de la centaine de milliers d'électronvolts (100 keV). C'est considérable, comparé aux énergies de liaison des électrons à leur noyau atomique (quelques dizaines d'eV). On peut donc penser que le résultat de l'interaction d'un photon X avec

l'atome sera l'ionisation de ce dernier, par éjection d'un électron du cortège électronique. C'est en effet le cas, mais on distingue deux processus, selon que le photon X incident est juste dévié ou, au contraire, totalement absorbé.

Pour les électrons des couches externes de l'atome, l'énergie d'un photon X est très supérieure à leur énergie de liaison. Pour eux, tout se passe donc

Les auteurs ont
dernièrement publié :
En avant la physique !,
une sélection de leurs
chroniques (Belin, 2017).



comme s'ils étaient libres. Dans cette situation, le photon X cède une (faible) partie de son énergie et de sa quantité de mouvement à l'électron: ce dernier est bien éjecté de l'atome, mais le photon X est juste dévié, pas absorbé. C'est le régime dit de diffusion Compton. Il se traduit par une diminution de l'intensité du faisceau dans sa direction de propagation, puisqu'une partie de l'onde incidente est diffusée dans d'autres directions.

Le second mécanisme est celui de photo-ionisation: le photon X est absorbé et cède toute son énergie à l'électron. Ce mécanisme concerne surtout les électrons des couches plus profondes de l'atome, où l'énergie de liaison n'est plus négligeable (plusieurs keV).

Comment se comparent ces deux mécanismes? Pour la diffusion Compton et à des énergies incidentes inférieures à l'énergie de masse de l'électron (500 keV), la probabilité que le photon X soit diffusé (et ne parvienne donc pas au détecteur) ne dépend pas de son énergie: tout se passe comme si chaque électron était un minuscule écran de 10^{-28} mètre carré.

Pour la photo-ionisation, la probabilité d'absorption est maximale si l'énergie du photon X est égale à l'énergie d'ionisation pour l'électron en question. Elle diminue ensuite très vite lorsque l'énergie du photon augmente (de façon inversement proportionnelle à l'énergie).

En résumé, dans le domaine d'énergie considéré, le taux de diffusion Compton est pratiquement constant. Cet effet domine aux hautes énergies. À plus basse énergie, c'est la photo-ionisation, dont le taux varie fortement avec l'énergie, qui l'emporte.

ÉNERGIES DIFFÉRENTES, IMAGES DIFFÉRENTES

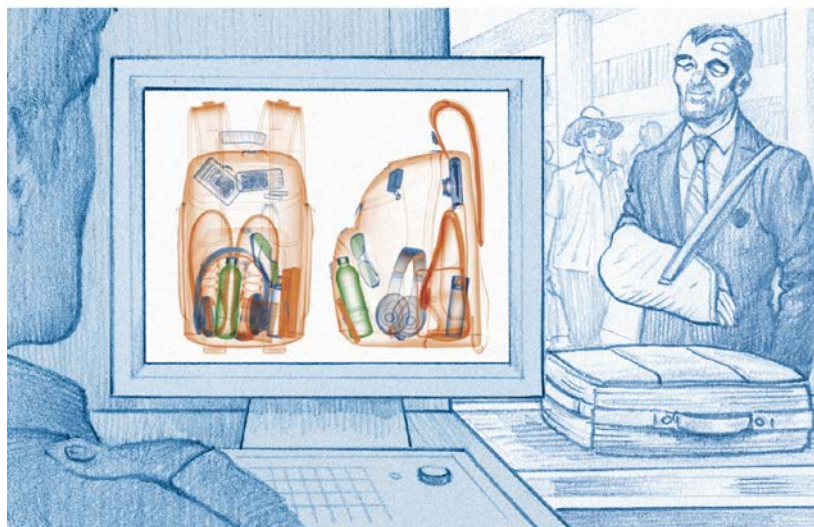
La transition d'un régime à l'autre dépend de la nature de l'atome (vers 20 keV pour des éléments légers tels que le carbone, à 130 keV pour le cuivre par exemple). En fonction de l'énergie de faisceau utilisée, on n'aura donc pas la même image selon les atomes présents.

C'est pourquoi les inspections de sûreté s'effectuent à plusieurs énergies: on prend simultanément deux radiographies (parfois plus) avec des rayons X d'énergies différentes. La comparaison des deux images permet de remonter au numéro atomique (nombre de protons de l'atome) moyen du matériau traversé.

On traduit alors cette information en couleur afin de distinguer trois grands groupes de matériaux. On marque en

CONTRÔLES SUBSTANTIELS

En effectuant des radiographies avec des rayons X de deux énergies différentes, on accède au numéro atomique moyen de la substance traversée, ce qui renseigne sur sa nature. On visualise ainsi en orange les substances de faible numéro atomique, en particulier les matériaux organiques dont font partie les drogues et les explosifs. Il est même possible, par des algorithmes appropriés, de distinguer ces derniers, en s'appuyant sur le fait que les molécules des drogues sont riches en carbone, oxygène et hydrogène, tandis que celles des explosifs ont beaucoup plus d'azote.



orange les éléments de faible numéro atomique, ce qui correspond à de la matière organique: aliments, vêtements (ce sont des polymères), mais aussi drogues ou explosifs.

On indique en vert les éléments de numéro atomique intermédiaire, typiquement l'aluminium, et en bleu les éléments de numéro atomique élevé, tels que le cuivre ou le fer. On utilise en outre la gamme clair-sombre pour visualiser le degré d'absorption, c'est-à-dire l'épaisseur traversée. Et pour résoudre en partie le problème de la superposition des ombres, on prend deux images dans des directions perpendiculaires.

Il est possible de faire encore mieux. Certains dispositifs détectent les rayons X diffusés par l'objet vers l'arrière (en direction de la source), qui renseignent sur les éléments légers, donc sur les substances organiques. C'est notamment le cas avec les scanners corporels, qui doivent minimiser l'absorption de rayons X.

Et l'on peut effectuer de la tomographie, c'est-à-dire prendre des images à l'aide de détecteurs qui tournent autour de l'objet afin d'avoir des vues dans toutes les directions, ce qui permet de reconstruire le contenu dans les trois dimensions. Ce type de scanner est maintenant obligatoire dans les aéroports pour contrôler les bagages allant en soute. ■

BIBLIOGRAPHIE

O. E. Wetter, **Imaging in airport security: Past, present, future, and the link to forensic and clinical radiology**, *Journal of Forensic Radiology and Imaging*, vol. 1(4), pp. 152-160, 2013.

H. Vogel et D. Haller, **Luggage and shipped goods**, *European Journal of Radiology*, vol. 63(2), pp. 242-253, 2007.

V. Rebuffel et J.-M. Dinten, **Dual-energy X-ray imaging: Benefits and limits**, *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, vol. 49(10), pp. 589-594, 2007.

ABONNEZ-VOUS À **POUR LA SCIENCE** EN TOUTE LIBERTÉ

OFFRE
SPÉCIALE
NOUVELLE
FORMULE

FORMULE
INTÉGRALE -46%

FORMULE
PASSION -36%

FORMULE
DÉCOUVERTE -26%



AVEC VOTRE ABONNEMENT INTÉGRAL OU PASSION LE DVD LE MYSTÈRE ETTORE MAJORANA, UN PHYSICIEN ABSOLU
Ettore Majorana, un jeune physicien, théoricien fulgurant, disparaît mystérieusement le 28 mars 1938 à bord d'un navire. Son corps n'a jamais été retrouvé. Il avait 31 ans. De nombreuses hypothèses ont été émises sur sa disparition : il se serait suicidé ou même aurait été enlevé par les nazis... Le mystère reste entier. Etienne Klein, physicien renommé, directeur de recherche au CEA, part sur les traces de Majorana. Son histoire permet-elle de percer le secret de sa disparition ?
"(Un) passionnant récit (...). La grande force du film est d'être à la fois pédagogique et personnel" *Télérama*

BULLETIN D'ABONNEMENT

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

☐ OUI, JE M'ABONNE À **POUR LA SCIENCE** EN PRÉLÈVEMENT AUTOMATIQUE, JE CHOISIS MA FORMULE ET JE COMPLÈTE L'AUTORISATION DE PRÉLÈVEMENT CI-DESSOUS.

☐ FORMULE **INTÉGRALE**

12 n° de *Pour la Science* + 4 Hors-Séries
+ Accès illimité aux archives depuis 1996
+ Le DVD "Le Mystère Ettore Majorana"

8,20€

Par mois

-46%

PV82UR8

☐ FORMULE **PASSION**

12 n° de *Pour la Science*
+ 4 Hors-Séries
+ Le DVD "Le Mystère Ettore Majorana"

6,50€

Par mois

-36%

PV65UR7

☐ FORMULE **DÉCOUVERTE**

12 n° de *Pour la Science*

4,90€

Par mois

-26%

DPV4E9U

MES COORDONNÉES

Nom : _____
Prénom : _____
Adresse : _____

Code postal : _____

Ville : _____

Tél. Pour le suivi client (facultatif) : _____

E-mail obligatoire : _____ @ _____

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

MANDAT DE PRÉLÈVEMENT SEPA

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

TYPE DE PAIEMENT : PAIEMENT RÉCURRENT

Titulaire du compte

Nom : _____

Adresse : _____

Code postal : _____ Ville : _____

Désignation du compte à débiter

BIC (Identification internationale de la banque) : _____

BAN : _____

(Numéro d'identification international du compte bancaire)

Etablissement teneur du compte

Nom : _____

Adresse : _____

Code postal : _____ Ville : _____

Date et signature

Organisme Créancier : Pour la Science
170 bis, bd. du Montparnasse - 75014 Paris
N° ICS FR92ZZ426900
N° de référence unique de mandat (RUM)

Joindre un RIB

Partie réservée au service abonnement. Ne rien inscrire

* Par mois et par rapport au prix de vente en kiosque, l'accès numérique aux archives et la valeur du DVD. Vous pouvez également si vous le souhaitez acquérir séparément le DVD "Le mystère Ettore Majorana" au prix de 14.99€, chaque n° de *Pour la Science* au tarif de 6.50€, notre n° spécial au tarif de 6.95€ et nos hors-séries au tarif de 7.50€. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 31/12/2017 en France métropolitaine uniquement et dans la limite des stocks disponibles. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site www.pourlascience.fr. Conformément à la loi "Informatique et libertés" du 6 janvier 1978, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification aux données vous concernant en adressant un courrier à *Pour la Science*. Votre abonnement en prélèvement est reconduit automatiquement et peut être interrompu par simple lettre.

L'AUTEUR



HERVÉ LE GUYADER
professeur émérite de biologie
évolutive à l'université
Pierre-et-Marie-Curie, à Paris

SUR LES BORDS DU NIL, ESPÈCES DE CROCODILES!

Le Nil de l'Égypte ancienne hébergeait non pas une, mais deux espèces de crocodiles, l'une redoutable, l'autre plus douce...

Prédateur vorace dont certains individus peuvent atteindre plus de 6 mètres de longueur, le crocodile du Nil avait une place prépondérante dans la mythologie de l'Antiquité. Sobek (*Suchus* en latin), représenté par un homme à tête de crocodile, joue un rôle essentiel dans la naissance du dieu Horus. Symbolisant les pouvoirs militaires du pharaon, c'est une entité ambivalente – cruelle et redoutable, mais aussi gage de la fertilité du Nil. De récentes analyses moléculaires des crocodiles africains apportent un nouvel éclairage sur cette ambivalence: elles semblent prouver qu'il n'existait pas une, mais deux espèces de crocodiles sur les bords du Nil.

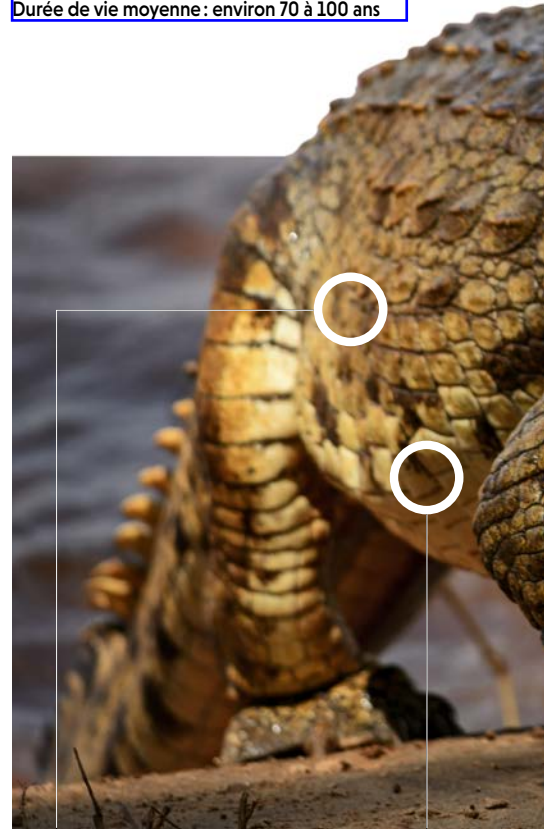
Classiquement, les zoologistes décrivaient l'existence de trois espèces de crocodiles en Afrique: le crocodile à nuque cuirassée (*Mecistops cataphractus*) et le crocodile nain (*Osteolaemus tetraspis*) en

Afrique équatoriale de l'ouest; le crocodile du Nil (*Crocodylus niloticus*) – celui qui nous intéresse ici – sur l'ensemble de l'Afrique subsaharienne et à Madagascar. Si l'on en croit Hérodote (v^e siècle avant notre ère), ce dernier était alors présent en mer Rouge, en Israël et même en Syrie. On le trouve fossile aux Comores et aux Seychelles. En Égypte, il peuplait le Nil jusqu'à son delta et il vivait en grand nombre dans le lac Moëris, au nord de l'oasis du Fayoum, près du delta. Actuellement, il a disparu en aval du barrage d'Assouan. Comme souvent chez des animaux à large répartition, on observe de légères variations – surtout de taille et de couleur – entre l'est et l'ouest de l'Afrique et Madagascar. C'est pourquoi diverses sous-espèces – jusqu'à sept – ont été proposées au cours des xix^e et xx^e siècles, sans qu'aucune classification ne fasse consensus.

En 2011, deux équipes ont donc tenté d'éclaircir l'histoire évolutive du crocodile

***Crocodylus niloticus* (de l'est)**

Taille : 4 m de long en moyenne pour les mâles, parfois jusqu'à 7 m
30 % de moins pour les femelles
Poids : 500 kg en moyenne pour les mâles
Nichée : 20 à 60 œufs
Durée de vie moyenne : environ 70 à 100 ans



Il peut vivre 10 mois sans manger.

Élevé pour sa viande et son cuir dans plusieurs pays d'Afrique du Sud, dont la Somalie, l'Éthiopie, le Kenya, la Zambie et le Zimbabwe. On présentait souvent cette industrie comme durable, jusqu'à la découverte de *C. suchus*. Cet autre crocodile du Nil, lui aussi exploité, est menacé d'extinction.

EN CHIFFRES

623 km

C'est la distance qu'a parcourue un *Crocodylus porosus* mâle en un mois le long de la péninsule du Cap York, au nord de l'Australie, en 2004.

275 à 745 attaques

de *Crocodylus niloticus* contre des humains entre 2000 et 2007, dont 63 % fatales.

C'est l'un des crocodiles les plus dangereux.

250 000 à 500 000

individus de *C. niloticus* dans le monde.

Leur nombre est en augmentation, mais leurs habitats diminuent.



La force de sa morsure est d'environ 2 000 newtons au niveau de ses canines, soit environ 10 fois plus que celle d'un humain. Celle du crocodile le plus dangereux de tous, *C. porosus*, atteint environ 5 800 newtons, soit près du triple...

du Nil et, plus généralement, des différentes espèces du genre *Crocodylus*. De fait, dix autres espèces du genre *Crocodylus* ont été décrites dans le monde, dont six se trouvent entre l'Inde, l'Asie du Sud-Est et l'Australie, et quatre peuplent les Amériques (voir l'encadré page 94).

En comparant des séquences quasi complètes de l'ADN que contiennent les mitochondries, les usines à énergie des cellules, Robert Meredith, de l'université de Californie, à Riverside, et ses collègues ont recherché les liens de parenté de tous les *Crocodylus*. De leur côté, Evon Hekkala, de l'université Fordham, à New York, et leurs collègues se sont surtout intéressés au crocodile du Nil: ils ont examiné, à partir des ADN mitochondrial et nucléaire, les liens

de parenté de 123 spécimens issus de toute l'Afrique. Le résultat de ces deux études est un arbre phylogénétique qui se sépare franchement en deux groupes frères, les crocodiles australo-asiatiques et les crocodiles américano-africains. Mais ce deuxième groupe révèle une surprise de taille. Il apparaît comme composé de trois sous-groupes: *C. niloticus* de l'Afrique de l'Ouest, *C. niloticus* de l'Afrique de l'Est et un groupe formé des quatre crocodiles américains. Le crocodile du Nil ne constitue donc pas un clade simple, monophylétique, c'est-à-dire un groupe rassemblant un ancêtre commun et tous ses descendants.

LE CROCODILE DE GEOFFROY SAINT-HILAIRE

Elucidons tout d'abord le problème des crocodiles du Nil « de l'ouest » et « de l'est ». Pour ce faire, une parenthèse historique s'impose, car la campagne d'Égypte de Bonaparte, de 1798 à 1801, amena sur les rives du Nil les savants de son expédition scientifique, dont le zoologiste Étienne Geoffroy Saint-Hilaire (1772-1844), qui y développa, suivant ses dires, « un sentiment exquis des crocodiles ».

En 1799, Geoffroy Saint-Hilaire suit la division du général Louis Desaix vers la

Haute-Égypte, et il passe vingt-trois jours à explorer les ruines de Thèbes, d'où il rapporte de nombreuses momies, dont deux de crocodile. Son objectif ? Fournir « les moyens d'éclaircir la question tant débattue de nos jours, si les espèces dégénèrent ou acquièrent des qualités en se perpétuant sur un terrain qui a éprouvé d'assez grands changements ». Revenu en France, il étudie méthodiquement les collections animales qu'il a rassemblées. En 1807, il dissèque le crâne d'une des deux momies et s'étonne : « Comparé au crâne d'un très bel individu que j'avais aussi rapporté d'Égypte, il m'a paru en différer. Il est bien plus étroit et plus allongé ; ses pommettes sont proportionnellement plus écartées, et l'entrée des fosses orbitaires est beaucoup plus large. D'aussi grandes différences indiquaient une autre espèce. »

Le « très bel individu » était un *C. niloticus* de l'est, l'unique crocodile que l'on trouve aujourd'hui encore au bord du Nil. Ainsi, Geoffroy Saint-Hilaire postule l'existence non pas d'une, mais de deux espèces de crocodile dans l'ancien Nil ! S'appuyant sur des textes historiques (Strabon, Hérodote...) et des indications des pêcheurs du Nil, il affirme : « Il y a eu en Égypte deux espèces de crocodiles : l'une, d'un naturel farouche et indomptable, dont la religion encourageait la destruction en enseignant que ce crocodile était une production de Typhon ; et l'autre, d'un caractère plus doux, qu'on appelait *suchos*, et dans laquelle on choisissait les individus destinés au service des autels. »

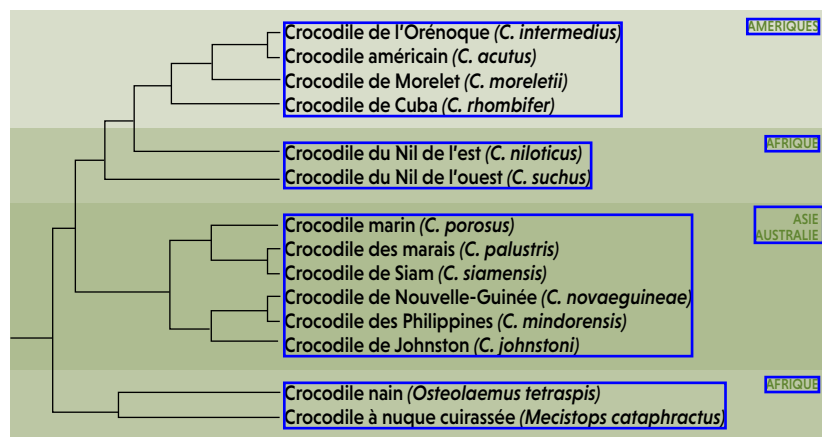
Tout naturellement, il baptise ce dernier du nom de *Crocodylus suchus*. Par la suite, ces travaux ont été laissés de côté. Au mieux, *C. suchus* est devenu chez certains auteurs une des sept sous-espèces de crocodile du Nil répertoriées jusqu'au ^{xx}e siècle.

L'ADN DES MOMIES DE CROCODILES

Or les études moléculaires incluent l'utilisation de fragments d'ADN mitochondrial ancien, extraits de momies de crocodiles de l'Ancienne Égypte, également rapportées de Thèbes. Considérons tout d'abord les animaux actuels. Les études chromosomiques fournissent une différence significative entre les deux clades : les animaux « de l'ouest » présentent une garniture de 34 chromosomes, ceux « de l'est », ainsi que les crocodiles du Nouveau Monde, 32. Tout prouve donc que les crocodiles africains ne correspondent

L'ARBRE DES CROCODILES

Les phylogénies moléculaires des crocodiles ont permis de préciser leur histoire évolutive. Le genre *Crocodylus*, présent dans toutes les régions tropicales et équatoriales, est composé de 12 espèces : 4 peuplent les Amériques, 2 l'Afrique (les crocodiles du Nil *C. niloticus* et *C. suchus*) et 6 l'Asie et l'Australie. On s'est ainsi aperçu que les crocodiles américains descendent d'un ancêtre commun plus proche du féroce *C. niloticus* que du « placide » *C. suchus*. Quant aux autres « crocodiles » africains (en bas), ils n'appartiennent pas au genre *Crocodylus*. C'est toute l'ambiguïté entre les termes vernaculaires et zoologiques...



pas à une, mais à deux espèces. Cerise sur le gâteau, les fragments d'ADN ancien des momies correspondent à l'ADN des crocodiles « de l'ouest ». Geoffroy Saint-Hilaire avait raison, car c'est la preuve que ces animaux vivaient dans les temps anciens dans le Nil. À juste titre, cette « nouvelle » espèce porte désormais le nom de *Crocodylus suchus*.

Quant aux crocodiles du Nouveau Monde, ils forment un groupe monophylétique qui présente un ancêtre commun avec *C. niloticus* (nouvelle acception), daté d'un peu plus de 8 millions d'années, dans le Miocène. À cette époque, des animaux ont traversé l'Atlantique pour rejoindre les Amériques où ils ont divergé en plusieurs espèces. Comment ont-ils voyagé ? On peut imaginer des radeaux mus par le courant nord-équatorial. Par ailleurs, des zoologistes australiens viennent de constater qu'un crocodile marin a pu réaliser un voyage de plus de 600 kilomètres dans les courants de la mer de Corail.

Ainsi, on voit que les *Crocodylus* américains sont de « jeunes » descendants de crocodiles africains ; de plus, deux espèces de *Crocodylus*, et non une seule, vivent en Afrique, ce qui change beaucoup de choses sur la politique de conservation ; enfin, on peut constater que les prêtres des temples égyptiens étaient de bons zoologistes. ■

BIBLIOGRAPHIE

E. Hekkala et al.,
An ancient icon reveals new mysteries : Mummy DNA resurrects a cryptic species within the Nile crocodile, *Mol. Ecol.*, vol. 20, pp. 4199-4215, 2011.

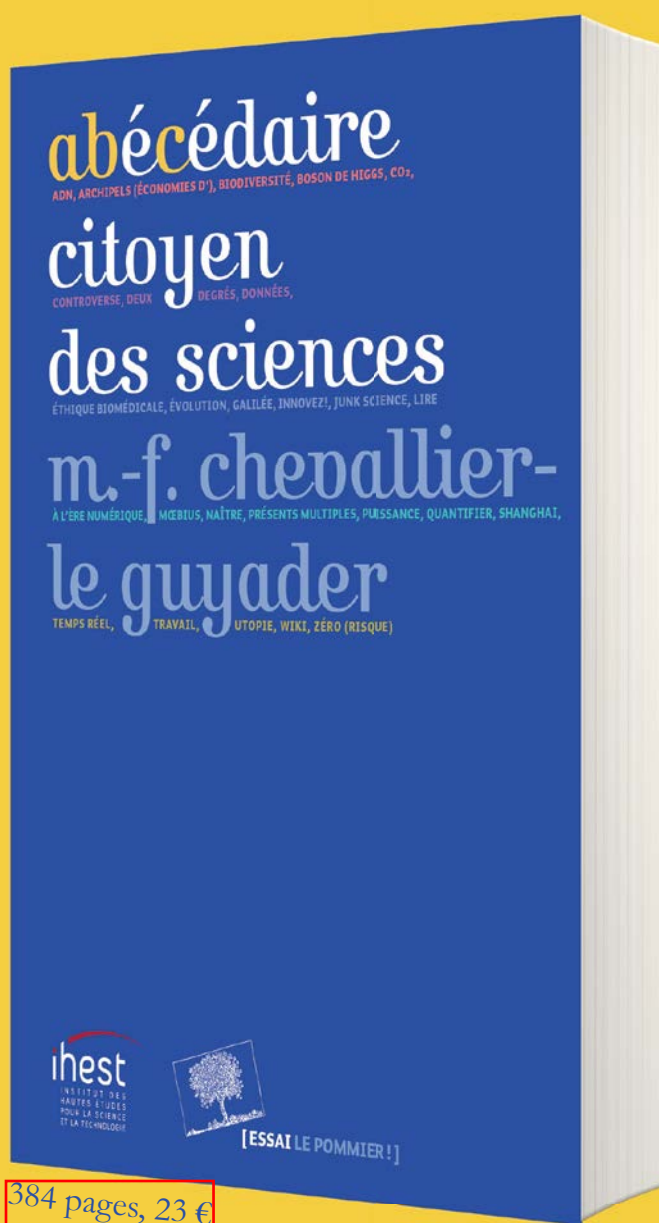
E. Meredith et al.,
A phylogenetic hypothesis for *Crocodylus* (Crocodylia) based on mitochondrial DNA : Evidence for a trans-Atlantic voyage from Africa to the New World, *Mol. Phyl. Evol.*, vol. 60, pp. 183-191, 2011.

H. Campbell et al.,
Estuarine crocodiles ride surface currents to facilitate long-distance travel, *J. An. Ecol.*, vol. 79, pp. 955-964, 2010.

E. Geoffroy Saint-Hilaire,
Description de deux crocodiles qui existent dans le Nil, comparés au crocodile de Saint-Domingue, *Annales du Muséum d'Hist. Nat.*, vol. 10, pp. 67-86, 1807.



Partager les sciences : un enjeu de citoyenneté



De A comme ADN
à Z comme Zéro (risque),
en passant par Cyborg,
Évolution, ou Réalité virtuelle,
plongez au cœur des sciences
d'aujourd'hui !

*« Une stimulante invitation à la
réflexion sur cette interpénétration
entre science et société bien plus
complexe qu'il n'y paraît.
Et dont dépend en bonne partie
le devenir de nos démocraties. »*
Les Échos - mai 2017

En partenariat avec



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



L'AUTEUR



HERVÉ THIS
physicochimiste, directeur
du Centre international
de gastronomie moléculaire
AgroParisTech-Inra
et directeur scientifique
de la fondation Science
et culture alimentaire
(Académie des sciences)

L'ART DE SOUFFLER LES POMMES DE TERRE

Réussir des pommes de terre soufflées n'est pas facile.
La préparation doit suivre une procédure précise,
dont de nombreux aspects demeurent inexpliqués.



Les rondelles de pomme de terre
dans le second bain de friture
et le magnifique résultat final.



Les pommes de terre soufflées sont une préparation culinaire étonnante: le mécanisme de leur gonflement est évident, mais la mise en œuvre de la théorie est très difficile.

Les pommes de terre soufflées auraient été découvertes lors de l'inauguration du chemin de fer entre Paris et Saint-Germain. Le chef, Jean-Louis-François Collinet, avait mis des rondelles de pomme de terre à frire, mais comme le train fut retardé, il sortit les rondelles du bain de friture et, quand vint le moment de servir, il les remit dans l'huile bouillante. Les rondelles soufflèrent, formant de petits ballons creux, croustillants. *Se non è vero...*

Considérons la théorie: une première friture forme des croûtes imperméables sur les deux faces d'une rondelle; puis une seconde friture évapore l'eau restant à l'intérieur des rondelles, et l'évaporation de cette eau provoque le gonflement.

Si la théorie est simple, la pratique l'est beaucoup moins, tant les paramètres à maîtriser sont nombreux: la variété de pomme de terre, l'épaisseur des rondelles, la température du premier bain, la durée de séjour des rondelles dans ce premier bain, la nature de la matière grasse utilisée pour la friture, le temps de repos entre les bains, la température du second bain...

Et même un protocole précis ne conduit pas toujours au succès. Lors d'un séminaire organisé il y a deux ans, nous avons ainsi passé deux heures... à échouer dans la confection de ces pommes de terre soufflées, alors que nous avions varié les températures des deux bains de cinq degrés en cinq degrés. Finalement, trois cuisiniers de talent ont récemment accepté de nous présenter leur pratique,

que nous avons caractérisée quantitativement. Voici ce que nous avons pu en conclure.

La variété de la pomme de terre semble essentielle. Certaines variétés qui soufflent donnent des colorations trop foncées, marque d'une réalisation médiocre. Et les tubercules ne doivent pas être conservés au froid, car le taux de succès est alors réduit.

L'épaisseur (régulière!) semble devoir être celle d'une pièce de deux euros et les praticiens ont discuté le fait que certains des ustensiles utilisés (des «mandolines») ne convenaient pas à un travail de qualité.

Puis la matière grasse du premier bain semble devoir être de la graisse de bœuf, clarifiée, qui «nourrirait» les rondelles de pommes de terre. C'est étonnant: la matière grasse étant composée de triglycérides, on voit mal comment la nature de la graisse interviendrait, mais l'empirisme semble converger vers cette prescription. La nature saturée ou insaturée des résidus d'acides gras des triglycérides a-t-elle vraiment un effet?

Le premier bain semble devoir être à 130 °C, à 10 °C près, et il doit durer jusqu'à ce que la surface des rondelles cloque légèrement. Surtout, il faut agiter la matière grasse pour réussir. On sort alors délicatement les rondelles du premier bain, et on les laisse reposer, pendant plus de

20 secondes selon nos déterminations. Après quoi on place les rondelles dans un second bain, qui peut être d'huile, à la température de 180 °C... et on les voit alors souffler.

Chacun de tous ces paramètres empiriques mérite une exploration: tant que les prescriptions ne seront pas comprises, il restera la possibilité de faire autrement, plus efficacement ou mieux! ■



LA RECETTE

- 1 Peler des pommes de terre Agria.
- 2 Découper des rondelles de l'épaisseur d'une pièce de deux euros.
- 3 À l'aide d'un torchon, sécher les rondelles sans les presser.
- 4 Dans un bain de graisse de bœuf, à une température comprise entre 120 °C et 140 °C, mettre les rondelles une à une.
- 5 Secouer le bain de friture, soit en agitant le récipient, soit en remuant la matière grasse à l'aide d'une louche.
- 6 Quand des cloques apparaissent sur certaines rondelles, sortir les rondelles les unes après les autres, en commençant par celles dont les cloques sont les plus visibles.
- 7 Déposer les rondelles sur du papier absorbant et les laisser reposer pendant plus de 20 secondes.
- 8 Mettre les rondelles dans un bain d'huile chauffée à 180 °C, et cuire les pommes de terre soufflées jusqu'à ce qu'elles prennent une coloration blonde.

DÉCOUVREZ LES ARCHIVES DE

POUR LA
SCIENCE



RETROUVEZ TOUS
LES NUMÉROS
DEPUIS 1996

COMPLÉTEZ
VOTRE COLLECTION
SUR www.pourlascience.fr



A

PICORER



Retrouvez tous
nos articles sur
www.pourlascience.fr

P.92

2 000 NEWTONS

C'est la force de la morsure au niveau des canines du crocodile du Nil, *Crocodylus niloticus*, soit environ 10 fois plus que celle d'un humain. Celle du crocodile le plus dangereux de tous, *Crocodylus porosus*, atteint environ 5 800 newtons.

P.9

OVAIRES 3D

Une équipe a conçu des ovaires artificiels qu'ils ont implantés chez des souris stérilisées. Des ovules ajoutés dans l'organe artificiel sont arrivés à maturité et les souris ont donné naissance à des petits.

P.7

« Le projet de budget de la Maison Blanche est tragique pour plusieurs domaines de recherche. Il prévoit des coupes sombres allant jusqu'à 40% pour les sciences du climat et de l'environnement. »

VALÉRIE MASSON-DELMOTTE
paléoclimatologue au LSCE, CEA, Gif-sur-Yvette

P.40

GOÛT

Un chien distingue aussi clairement le goût laissé par une cuillerée de sucre dans 4 millions de litres d'eau, soit le volume de deux piscines olympiques, que nous distinguons le goût laissé par cette même cuillerée dans notre café.

P.50

100 TÉRAOCTETS

C'est la masse de données que peut produire une seule expérience de SFX, technique récemment développée pour radiographier de façon quasi instantanée des microcristaux et accéder ainsi à la structure de leurs molécules. Soit l'équivalent de la capacité de 25 disques durs d'ordinateurs de bureau haut de gamme.

P.80

DEVISE FAUSSE

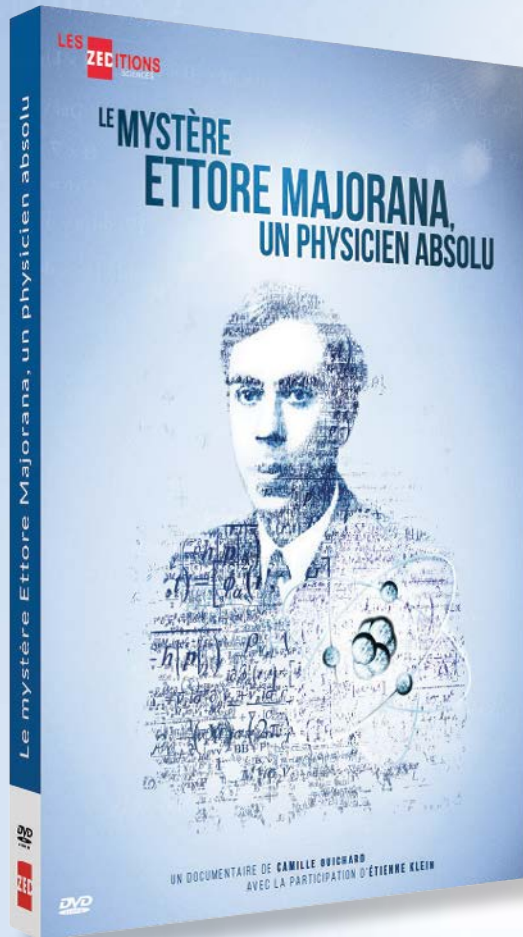
Une maxime d'Aristote dit : « Le tout est plus que la somme de ses parties. » Faux : le nombre d'éléments d'un ensemble E qui est la réunion de deux ensembles A et B est inférieur à la somme des nombres d'éléments de A et de B, lorsque leur intersection est non vide. Et ce n'est pas le seul exemple !

P.58

ANCHIORNIS

Ce dinosaure était doté de plumes principalement grises, sauf celles de ses bras et pattes dont les extrémités étaient noires. Plus surprenant, une crête rouge ornait le dessus de sa tête. Un dinosaure qui devait avoir fière allure !

LE MYSTÈRE ETTORE MAJORANA, UN PHYSICIEN ABSOLU



Un documentaire de **Camille Guichard**
avec la participation d'**Étienne Klein**

**L'ÉTRANGE DESTIN
D'UN PHYSICIEN HORS NORME**

**"La grande force du film est d'être à la
fois pédagogique et personnel"**
Télérama

POUR LA
SCIENCE



ÉGALEMENT DISPONIBLES EN DVD



**HYPERCONNECTÉS
LE CERVEAU EN
SURCHARGE**



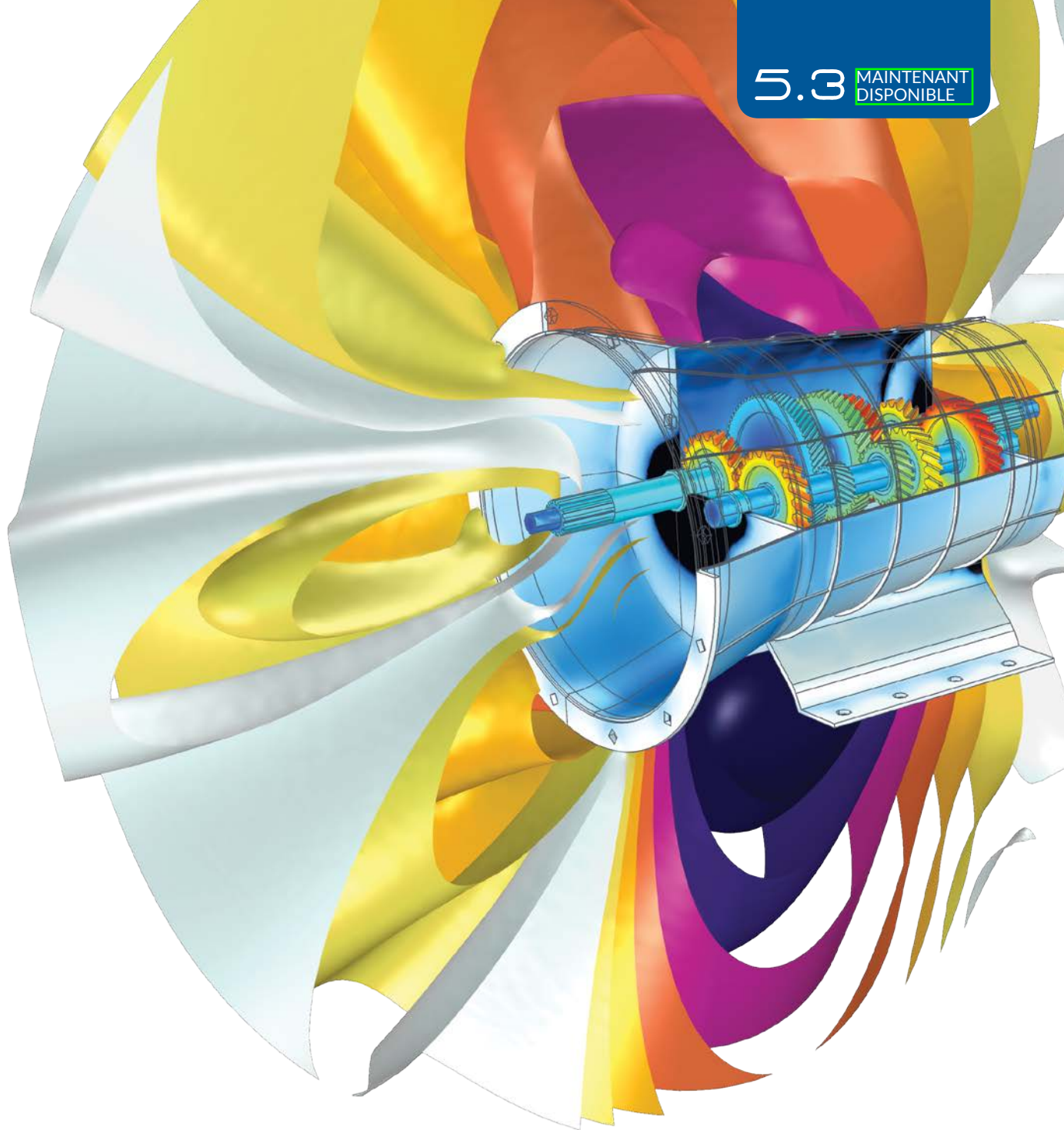
**VOYAGE
SOUS NOS PIEDS**



**IMMORTALITÉ
DERNIÈRE
FRONTIÈRE**



**SUPER SPIDER
LE RÈGNE DE
L'ARAIGNÉE**



LA MULTIPHYSIQUE POUR TOUS

avec COMSOL Multiphysics®

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

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

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

N'attendez plus. Bénéficiez de la puissance des simulations multiphysiques.
[comsol.fr/products](https://www.comsol.fr/products)