

■ POUR LA

SCIENCE

PÉTRA

Sur les traces
des
Nabatéens

Août 2015 - n° 454

www.pourlascience.fr

Édition française de Scientific American



Des océans tombés du ciel

Enquête sur l'origine de l'eau terrestre

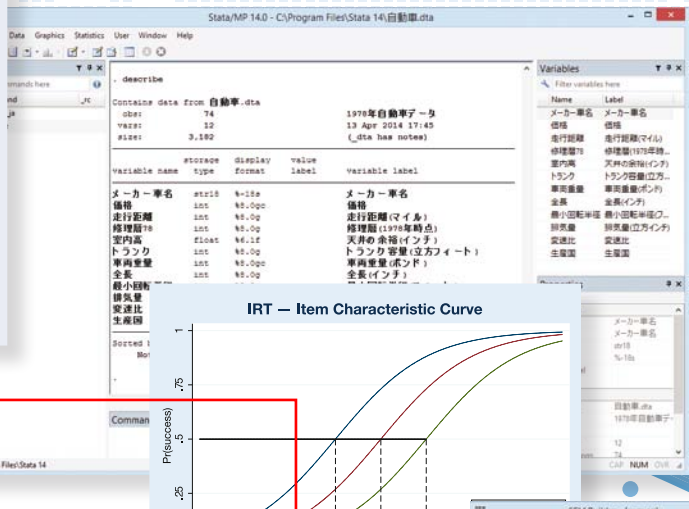
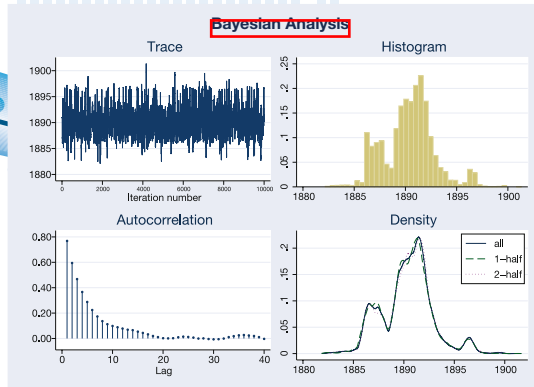
M 02687 - 454 - F: 6,50 € - RD



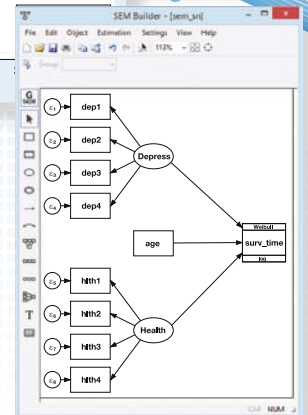
Allemagne : 9,30 € - Belgique : 7,20 € - Canada /S : 10,95 CAD - Grèce /S : 7,60 € - Guadeloupe/St Martin /S : 7,30 € - Guyane /S : 7,30 € - Italie : 7,20 € - Luxembourg : 7,20 €
Maroc : 60 MAD - Martinique /S : 7,30 € - Nlle Calédonie Wallis /S : 980 XPF - Polynésie française /S : 980 XPF - Portugal : 7,20 € - Réunion /A : 9,30 € - Suisse : 12 CHF

STATA[®] 14

release



- Analyse Bayésienne
- Modèles de survie multi-niveaux et données de panel
- Effets de traitement endogène
- IRT (estimation des paramètres d'item et de sujet)
- Modèles multi-niveaux pour les données de survey
- Modèles Markov-switching
- Unicode
- Et bien plus encore...



STATISTIQUES



GRAPHIQUES



GESTION DE DONNÉES



Distributeur officiel en Suisse



Distributeur officiel en France, Belgique et Luxembourg

SCIENTIFIC SOLUTIONS SA
Rue du Midi 2, CH-1009 Pully-Lausanne, Suisse
+41 (0) 21 711 15 20 www.scientific-solutions.ch

RITME
34 Bd Haussmann, 75009 Paris, France
+33 (0) 1 42 46 00 42 www.ritme.com

■ POUR LA SCIENCE

www.pourlascience.fr

8 rue Férou - 75278 Paris Cedex 06

Groupe POUR LA SCIENCE

Directrice des rédactions : Cécile Lestienne

Pour la Science

Rédacteur en chef : Maurice Mashaal

Rédactrice en chef adjointe : Marie-Neige Cordonnier

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

Dossier Pour la Science

Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin

Développement numérique : Philippe Ribeau-Gésippe, assisté de Dylan Beiner (stagiaire)

Directrice artistique : Céline Lapert

Maquette : Pauline Bilbault, Ingrid Leroy, Nathalie Ravier (stagiaire)

Correction et assistance administrative : Maud Bruguère

Marketing : Élise Abib et Ophélie Maillet, assistées de Héloïse Clément (stagiaire)

Direction financière et direction du personnel : Marc Laumet

Fabrication : Marianne Sigogne et Olivier Lacam

Presse et communication : Susan Mackie

Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé

Anciens directeurs de la rédaction : Françoise Pétry et Philippe Boulanger

Conseiller scientifique : Hervé This

Ont également participé à ce numéro :

Adrien Coffinet, Valérie Dufour, Eitan Haddok, Éric Lagadec, Miguel Montargès, Antoine Moreau, Christophe Pichon, Daniel Tacquenet, Haiyan Tong

PUBLICITÉ France

Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin

(j.f.guillotin@pourlascience.fr)

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

SERVICE ABONNEMENTS

Nada Mellouk-Raja. Tél. : 01 55 42 84 04

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

Courriel : abonnements@pourlascience.fr

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

Commande de livres ou de magazines :

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

DIFFUSION DE POUR LA SCIENCE

Contact kiosques : À Juste Titres ; Benjamin Boutonnet

Tél. : 04 88 15 12 41

Information/modification de service/réassort :

Magazine disponible sur www.direct-editeurs.fr

Canada : Edipresse : 945 avenue Beaumont, Montréal,

Québec, H3N 1W3 Canada.

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

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

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

SCIENTIFIC AMERICAN Editor in chief : Mariette DiChristina.

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

Editors : Ricky Rusting, Philip Yam, Robin Lloyd, Mark Fischetti, Seth

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

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

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public

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

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

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

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

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

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

duction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous

les pays. La marque et le nom commercial

« Scientific American » sont la propriété de

Scientific American, Inc. 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].



Maurice Mashaal
rédacteur en chef

Préhistoire d'eau

Nous avons souvent lu ou entendu que les océans occupent 70 % de la superficie de notre planète. Nous sommes beaucoup moins familiers avec l'affirmation que cette eau ne représente que 0,02 % de la masse de la Terre ! Ce liquide, précieux parce que la vie sur Terre en est tributaire, est donc rare. Sans oublier qu'il s'agit là d'eau salée, à laquelle nous autres animaux terrestres ne sommes pas adaptés, et que l'eau douce est encore plus rare – c'est même un facteur de conflit dans plusieurs régions du monde...

Un liquide venu des comètes ? Des astéroïdes ?

Certes, l'eau n'est pas si abondante que cela sur notre globe. Mais parmi les planètes et satellites évoluant au sein du Système solaire, la Terre est l'un des rares corps à en détenir aujourd'hui en quantités notables sous forme liquide. D'où est venue cette eau ? Des comètes, des astéroïdes ? À quel(s) moment(s) notre planète, qui était à ses débuts une boule de magma brûlant, l'a-t-elle acquise ? Selon quels processus ?

L'enjeu de ces questions n'est pas seulement de mieux comprendre l'histoire de notre planète depuis sa formation, il y a environ 4,5 milliards d'années. En éclairant les mécanismes par lesquels de l'eau peut migrer d'une région à l'autre au sein d'un système planétaire, ces recherches aideront peut-être à localiser des exoplanètes où de l'eau liquide serait présente en abondance, avec en filigrane l'espoir d'y découvrir des formes de vie.

L'origine de l'eau sur Terre occupe les astrophysiciens depuis longtemps. Des travaux et résultats récents, dont ceux de la sonde Rosetta, ont renouvelé le débat scientifique et conduit à des hypothèses originales. David Jewitt et Edward Young, deux spécialistes, décrivent dans ce numéro (voir pages 26 à 34) les dernières avancées sur cette question... qui n'est pas encore close ! ■

3 **Édito**

Actualités

6 **La plus vieille tortue du monde est un lézard**

8 **Maladie de Parkinson : des neurones envahis par des rubans et des fibres**

11 **Des chaînes coopératives pour comprendre la transition vitreuse**

12 **La première génération d'étoiles de l'Univers enfin détectée**



Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

Réflexions & débats

14 **Point de vue**
Expérimentation animale : il faut donner son plein effet à la loi

Sonia Canselier

16 **Entretien**
Terres rares : « Nous avons en Europe un grand potentiel et un grand savoir-faire »

Dominique Guyonnet

20 **Lu sur SciLogs.fr**
Les vertus pédagogiques de Kaamelott

Richard Taillet

22 **Homo sapiens informaticus**
Que devient notre schizophrénie ordinaire ?

Gilles Dowek

24 **Cabinet de curiosités sociologiques**
Le danger invisible de l'hôpital

Gérald Bronner

Ce numéro comporte un encart d'abonnement *Pour la Science*, eté en cahier intérieur de toute la diffusion kiosque et posé sur toute la diffusion abonné. Des offres d'abonnement exceptionnelles sont proposées également en pages 35, 74 et 75.
En couverture : © Aleksandra Aleksandrova ; deeeplblue/shutterstock.com

4 **Sommaire**

À LA UNE

26

ASTROPHYSIQUE

Des océans tombés du ciel

David Jewitt et Edward Young

De nouvelles observations relancent le débat sur l'origine de l'eau présente sur Terre : comètes, astéroïdes ou autres corps célestes ?



36

ÉTHOLOGIE

L'intelligence de la poule

Carolynn Smith et Sarah Zielinsky

Loin de mériter leur réputation d'oiseaux stupides, les poules ont des capacités cognitives étonnantes. Elles sont rusées, empathiques et communiquent de façon élaborée.

42

ARCHÉOLOGIE

Sur les traces des Nabatéens

Laïla Nehmé et Michel Mouton

Comment, au III^e siècle avant notre ère, une tribu caravanière a-t-elle pu ériger un riche royaume dominant le nord-ouest de l'Arabie ? Les fouilles de ses deux principales cités, Pétra et Hégira, apportent des réponses.



52 INFORMATIQUE

Le casse-tête mathématique de Candy Crush*Toby Walsh*

Derrière ce jeu tout simple en apparence se dissimulent des problèmes calculatoires difficiles. C'est probablement pourquoi Candy Crush est aussi addictif.



58 GÉOGRAPHIE

Changement climatique : les mauvaises solutions de Kiribati*Simon Donner*

La montée du niveau des mers menace à long terme les populations des îles coralliennes. Mais l'aide précipitée qu'on leur apporte menace de leur faire plus de mal que de bien. Le cas des îles Kiribati, dans le Pacifique, illustre bien cette situation.



68 HISTOIRE DES SCIENCES

L'eau qui gèle, une énigme au temps des Lumières*Frédérique Rémy*

Aux XVII^e et XVIII^e siècles, de nombreux savants ont tenté de comprendre comment la glace se forme dans l'eau, les fleuves et la mer. Ils se sont longtemps empêtrés, en partie à cause d'un vocabulaire inapproprié.

Rendez-vous

76 Logique & calcul

Tous les chemins mènent au rond*Jean-Paul Delahaye*

Le rotor-router, mécanisme déterministe de cheminement fondé sur des règles simples, forme des structures aux propriétés étonnantes.

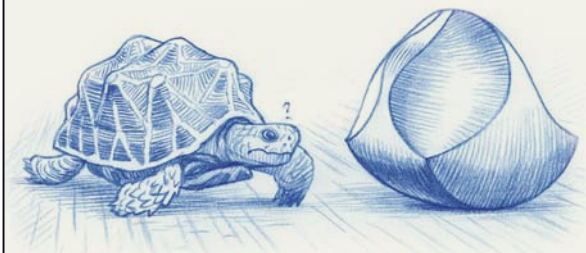
82 Science & fiction

L'art de fabriquer des monstres*J. Sébastien Steyer et Roland Lehoucq*

86 Art & science

Les paréidolies artificielles*Loïc Mangin*

89 Idées de physique

Le culbuto, la gömböc et la tortue*Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik*

93 Question aux experts

L'argent fait-il le bonheur ?*Rébecca Shankland*

95 Science & gastronomie

Légumes artificiels à foison*Hervé This*

96 À lire

98 Bloc-notes

Les chroniques de Didier Nordon**SCIENCE.fr**

LETTRE D'INFORMATION

Ne manquez pas la parution de votre magazine avec la NEWSLETTER ÉDITORIALE !

Découvrez la sélection d'articles de *Pour la Science*, des offres préférentielles et nos autres magazines en kiosque !



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

Suivez-nous sur les réseaux sociaux



Actualités

Paléontologie

La plus vieille tortue du monde est un lézard

Une forme intermédiaire entre tortue et lézard a été découverte en Allemagne. Elle résout enfin l'énigme de l'origine des tortues.



Le fossile de *Pappochelys rosinae* tel qu'il a été mis au jour. La masse noire à droite (flèche) est l'une des côtes renforcées de cette prétortue, dont une reconstitution est donnée dans l'image de droite (et au milieu, une tortue actuelle).



Un mardi de novembre, il y a 240 millions d'années. Je suis tranquillement couchée sur une branche, quand un lézard me pousse à l'eau en tentant de me mordre. Toutefois, mon blindage résiste et je lui échappe en plongeant. Si cette anecdote est vraie, elle a peut-être été vécue par *Pappochelys rosinae*. Il s'agit d'une espèce fossile de tortue qui vient d'être découverte, et qui confirme ce que l'on suspectait déjà : les tortues sont des proches parentes des lézards qui se seraient adaptées à la vie aquatique.

Pappochelys rosinae est extraordinaire : « On ne trouve un tel fossile qu'une seule fois dans sa vie, ou pas ! » s'exclame Rainer Schoch du Muséum d'histoire naturelle de Stuttgart, qui partage la découverte avec Hans-Dieter Sues, du Muséum américain d'histoire naturelle, à Washington. *Pappochelys* est l'un des fossiles que les deux

paléontologues ont extraits dans la carrière Schumann à Vellberg, dans le Bade-Wurtemberg. Une fois dégagé de sa gangue d'argilite lacustre (un fond de lac pétrifié), l'un des fossiles s'est révélé être celui, rarissime, d'une tortue (voir le cliché ci-dessus).

Comme la strate dont il provient date de 240 millions d'années, il s'agirait du plus ancien fossile de tortue à ce jour. Rainer Schoch et Hans-Dieter Sues viennent de publier la description de la nouvelle espèce et, en l'étudiant, ils ont découvert que ses caractères archaïques en font une forme intermédiaire entre les lézards triassiques et les tortues.

La trouvaille est d'un grand intérêt, car on ignorait à quels reptiles anciens l'ordre des Chéloniens, c'est-à-dire l'ordre des reptiles à carapace (les tortues), était apparenté. On situait son origine plutôt au Trias (il y a 252 à 201 millions d'années),

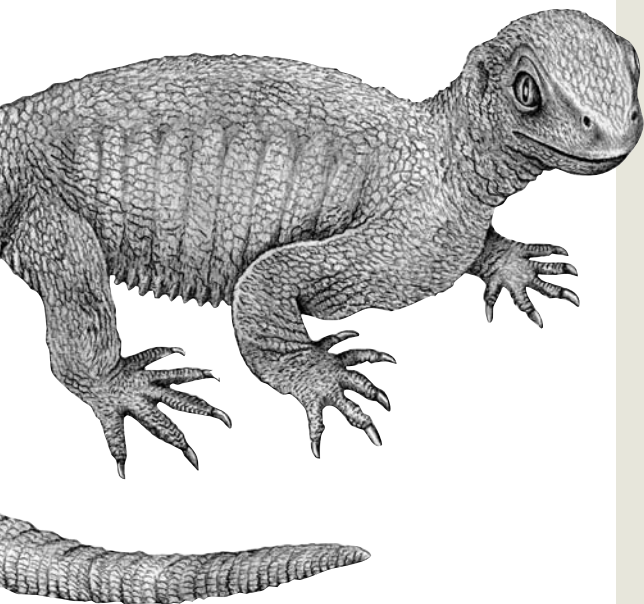
mais fallait-il relier les tortues aux lézards, aux crocodiles ou aux pré-dinosaures triassiques ? Aussi l'étude paléontologique publiée par Rainer Schoch et Hans-Dieter Sues sera-t-elle sûrement examinée par les autres spécialistes...

Pourquoi pensait-on que les tortues et les lézards triassiques étaient proches ? La découverte en 2011 d'ARN commun aux lézards et aux tortues indiquait une parenté proche. Toutefois, cette donnée et les autres données génétiques ne s'accordaient pas bien à ce que l'on savait du registre fossile.

En effet, vieux de 220 millions d'années, le reptile chinois *Odontochelys* passait pour la plus ancienne tortue : son blindage ventral était complètement ossifié, tandis que son blindage dorsal ne consistait qu'en côtes élargies. On avait aussi remarqué de telles côtes sur *Eunotosaurus*,

un reptile vieux de 260 millions d'années, qui vivait donc à la fin du Permien (298,9 à 252,2 millions d'années). Toutefois, d'après son aspect, on ne pouvait être sûr qu'*Eunotosaurus* soit bien un ancêtre des Chéloniens. La période d'apparition du plan d'organisation des tortues restait donc difficile à situer dans le temps, et les Chéloniens difficiles à relier aux lézards ou à d'autres groupes.

Ce trouble est dépassé : *Pappochelys* suggère que l'évolution de certains lézards a produit les tortues il y a quelque 240 millions d'années ou avant, au Permien peut-être. En effet, *Pappochelys* ressemble à un lézard (voir en haut à droite), qui serait doté de côtes élargies, mais pas (encore) fusionnées en un blindage ventral ossifié unique comme chez *Odontochelys*. Par ailleurs, *Pappochelys* a des dents et son crâne, comme celui des



Science et société

Maths : un impact sur 9 % des emplois

Les mathématiques sont au cœur des économies modernes. C'est ce que confirme la première étude française sur leur influence socio-économique, selon laquelle les maths concernent 9 % des emplois du pays et 15 % du PIB. Stéphane Cordier, qui dirige l'agence AMIES, commanditaire de l'étude, nous explique le sens de ces chiffres.

Quelles sont les conclusions marquantes de cette étude ?

Stéphane Cordier : Elle a confirmé la place centrale des mathématiques dans l'économie du pays : 9 % des emplois impactés, une valeur ajoutée correspondant à 15 % du PIB, un rôle dans près de la moitié des « technologies clés » du pays (imagerie médicale, sécurité informatique, etc.)...

Quand on dit que 9 % des emplois sont « impactés » par les maths, qu'est-ce que cela signifie ? Et comment calcule-t-on ce chiffre ?

S. C. : Cela signifie que 9 % des travailleurs en France utilisent les maths d'une façon ou d'une autre – sans être forcément mathématiciens. Le cabinet de conseil CMI, qui a réalisé l'étude, a calculé ce chiffre de deux façons. Il a compilé des données de l'Insee pour évaluer le nombre de travailleurs par secteur, puis il a estimé le pourcentage d'entre eux qui se servent des maths en interrogeant des experts de chaque secteur. Ce pourcentage est par exemple de 28 % pour l'automobile. Cette méthode est aussi appliquée dans d'autres pays, ce qui permet des comparaisons internationales. La deuxième méthode est fondée sur le nombre de diplômés en activité dont la formation intègre une part notable de mathématiques. Ces diplômés n'utilisent bien sûr pas toujours les maths au travail et, de façon

générale, toute méthodologie peut être discutée. Cependant, les chiffres obtenus de ces deux manières sont similaires, ce qui renforce la confiance dans les résultats. Globalement, ils semblent réalistes.

Ces chiffres paraissent pourtant énormes !

S. C. : Mais les mathématiques sont partout ! Elles sous-tendent les méthodes de modélisation, de conception, de gestion des stocks... Elles sont omniprésentes dans les métiers



Stéphane Cordier, directeur de recherche au CNRS.

tiés à l'informatique ou à la finance, mais aussi dans de nouvelles entreprises telles que celles qui gèrent les vélos en libre-service, grosses consommatrices de statistiques. Les industries plus traditionnelles ne sont pas en reste. Par exemple, pour améliorer l'aérodynamisme d'une voiture, il faut résoudre les complexes équations qui décrivent l'écoulement des fluides.

Comment pense-t-on que ces chiffres évolueront ?

S. C. : Ils devraient fortement augmenter. En

effet, les secteurs les plus consommateurs de mathématiques ont une croissance supérieure à la moyenne. On risque d'ailleurs de manquer d'experts. De façon générale, les matheux sont très demandés : selon une enquête réalisée en 2013, 94 % des docteurs en mathématiques d'Île-de-France ont trouvé un emploi six mois après leur soutenance, contre 79 % sur l'ensemble des autres disciplines.

Recherche académique et industrie marchent-elles main dans la main pour exploiter ce potentiel ?

S. C. : Pas assez. Si les grandes entreprises sont souvent en pointe et dialoguent beaucoup avec la recherche académique, ce n'est pas le cas des PME. De l'autre côté du miroir, les laboratoires de mathématiques (42 en France, pour environ 4 000 chercheurs) ont encore peu de collaborations avec le monde industriel. L'objectif d'associations comme l'AMIES (Agence pour les mathématiques en interaction avec l'entreprise et la société) est de favoriser leur rencontre. Le nombre d'entreprises travaillant avec des laboratoires de maths est passé d'une centaine en 2011 (année de la création d'AMIES) à environ 200 en 2015, et le potentiel de croissance est énorme.

Guillaume Jacquemont

www.agence-maths-entreprises.fr/ai/?q=fr/node/535

lézards, montre deux fenêtres temporelles, au lieu d'avoir le caractère beaucoup plus massif de celui des tortues. Il est donc clair que *Pappochelys*, et avec elle les tortues, sont ce que les paléontologues nomment des Diapsides (des reptiles à deux fenêtres temporelles). Désormais, on peut être certain que les tortues sont issues des lézards, et sont apparentées aussi aux crocodiles (des lézardoïdes) et aux oiseaux.

En tout cas, pour les découvreurs de la tortue de Vellberg, « l'âge géologique de *Pappochelys* correspond exactement à la fenêtre temporelle à laquelle on s'attend pour de telles formes. Notre découverte montre à quoi a ressemblé le blindage ventral des tortues à l'origine, ce qui lui donne sa très grande signification biologique ».

Et quel genre d'animal était *Pappochelys* ? Long d'une vingtaine de centimètres, il ressemblait à un lézard et vivait dans un petit cours d'eau douce. Comme les iguanes marins des Galápagos, il semble qu'il ait volontiers séjourné dans l'eau. Ses côtes renforcées lui permettaient de plonger profondément et peut-être de rester plus longtemps dans l'eau que les autres lézards, par exemple pour y chasser ou y paître. Tout cela suggère que le blindage des tortues, en plus d'être une défense contre les prédateurs, serait une adaptation à la vie aquatique, ce que la tortue chinoise *Odontochelys* laissait déjà penser.

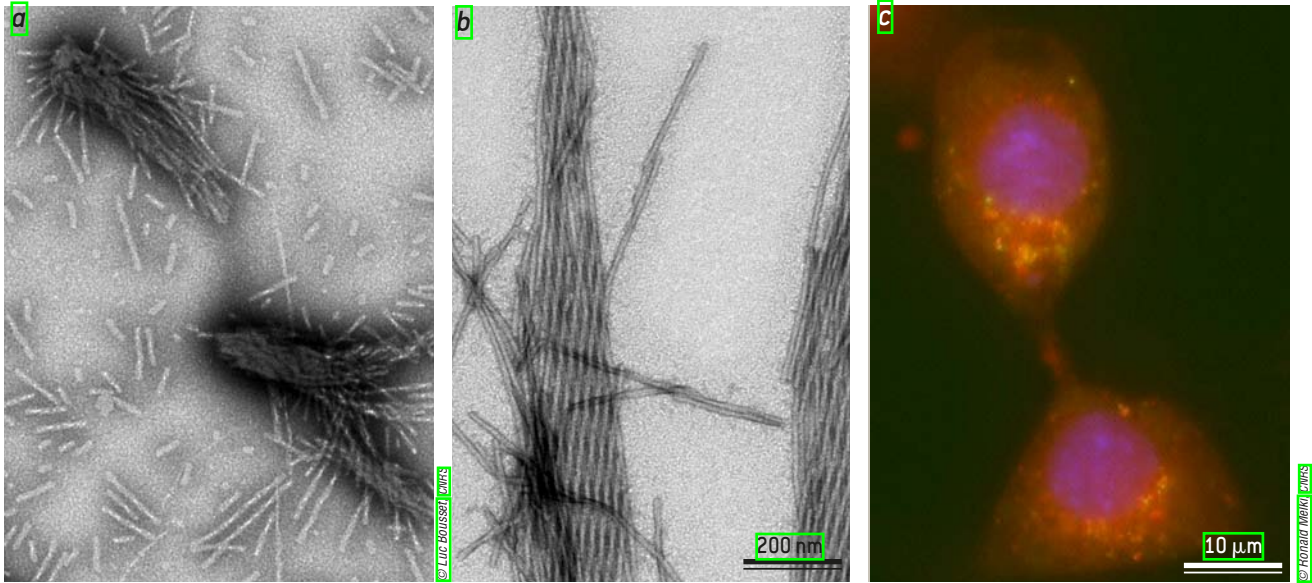
François Savatier

R. Schoch et H.-D. Sues, *Nature*, publié en ligne le 24 juin 2015

Neurosciences

Maladie de Parkinson : des neurones envahis par des rubans et des fibres

La forme des agrégats qui s'accumulent dans le cerveau lors de la maladie de Parkinson et d'autres pathologies proches influe sur les symptômes développés.



Des amas de fibres (a, b) ou de rubans se forment à partir de protéine α -synucléine soluble (c, en rouge), recrutée par les fibres déjà formées (en vert-jaune).

6,3 millions

de personnes sont atteintes de la maladie de Parkinson dans le monde, 1,2 million en Europe et 117 000 en France.*

La maladie de Parkinson, la démence à corps de Lewy et l'atrophie multisystématisée sont des pathologies neuro-dégénératives caractérisées par un même phénomène : l'accumulation d'agrégats d'une protéine, l' α -synucléine, dans les cellules du cerveau, qui entraîne leur mort. Les questions autour de cette protéine sont multiples. Quelle est sa fonction ? Pourquoi s'agrège-t-elle ? Comment différentes maladies sont associées à l'agrégation d'une même protéine ? Si la fonction de l' α -synucléine reste énigmatique, d'autres éléments de réponse se dessinent.

Notamment, on sait à présent que ces agrégats sont non pas une conséquence de la maladie, mais une cause de son développement. Et récemment, Wouter Peelaerts, de l'université catholique de Louvain, et ses collègues ont observé que la forme des agrégats détermine les caractéristiques des maladies développées.

L' α -synucléine normale est localisée à l'extrémité des neurones.

Sans structure tridimensionnelle stable, elle s'organiserait avec ses voisins en tétramères hélicoïdaux qui résistent à l'agrégation. Mais pour une raison inconnue, il arrive que les protéines deviennent anormales et s'agrègent, à l'instar des prions dans la maladie de la vache folle ou des peptides β -amyloïdes dans la maladie d'Alzheimer.

En 2013, à l'Institut des neurosciences Paris-Saclay (CNRS/université Paris-Sud), à Gif-sur-Yvette, l'équipe de Ronald Melki, coauteur de l'étude, avait montré que dans la maladie de Parkinson, la protéine α -synucléine s'agrège sous deux formes distinctes – fibres et rubans – et que les fibres tuent plus vite les cellules que les rubans. Pour savoir si la forme des agrégats influe sur les caractéristiques d'une synucléinopathie, les biologistes ont injecté quatre formes d' α -synucléine dans le cerveau de rats : fibres, rubans, extraits de cerveau de souris produisant des agrégats d' α -synucléine et oligomères (de courtes chaînes d' α -synucléine anormale).

Ils ont ainsi observé que les rubans causaient plus de dépôts que les autres formes et entraînaient la formation d'agrégats semblables à ceux détectés dans les trois synucléinopathies : des corps et des neurites de Lewy dans les neurones, comme dans la maladie de Parkinson et la démence à corps de Lewy, et, lorsque l' α -synucléine est abondante, des inclusions cytoplasmiques dans les cellules qui entourent les neurones, comme dans l'atrophie multisystématisée.

Les fibres, elles, produisaient moins de dépôts, mais déclenchaient une dégénérescence neuronale plus marquée et perturbaient les fonctions motrices, comme dans la maladie de Parkinson. Ainsi, la nature des agrégats – fibres ou rubans – expliquerait la variabilité des symptômes observée d'un patient à l'autre. Les biologistes espèrent utiliser ces structures comme biomarqueurs pour mieux caractériser chaque maladie.

Marie-Neige Cordonnier

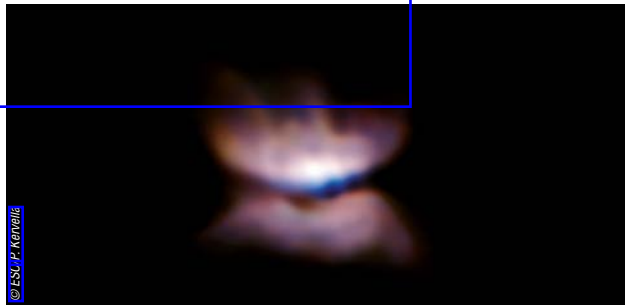
W. Peelaerts et al., Nature, 10 juin 2015

Astrophysique

Une nébuleuse planétaire à la loupe

Les nébuleuses planétaires sont des nuages de gaz rejeté par les étoiles en fin de vie. Leur structure complexe fait parfois penser à de délicats papillons. Comment naissent ces formes ? Les observations de l'étoile L_2 Puppis par Pierre Kervella, de l'Unité mixte internationale franco-chilienne d'astronomie, à Santiago du Chili, et ses collègues confortent certains scénarios de la formation de ces structures.

L_2 Puppis, située à seulement 200 années-lumière, est une cible idéale pour tester *Sphere*, le nouvel instrument du VLT (*Very Large Telescope*), au Chili. La combinaison de ce spectro-polarimètre, d'un télescope de 8 mètres et d'une optique adaptative de nouvelle génération donne des images trois fois plus précises que le télescope spatial *Hubble*. L'optique adaptative consiste à mesurer les turbulences atmosphériques et à déformer le miroir principal en temps réel pour corriger l'image. Pour l'instrument *Sphere*, le miroir est déformé



L'étoile L_2 Puppis, en fin de vie, émet de grandes quantités de gaz et constitue une nébuleuse planétaire dont la forme évoque un papillon.

usqu'à 1200 fois par seconde par 1400 actionneurs.

Grâce aux données de *Sphere*, les astrophysiciens ont reconstruit la structure tridimensionnelle de la nébuleuse de L_2 Puppis. L'astre est entouré d'un disque vu quasiment sur la tranche. De la poussière est émise de l'étoile en spiralant, ce qui forme deux cônes perpendiculaires au disque. D'où l'aspect de papillon qu'a l'ensemble. En outre, deux jets sont aussi émis à l'intérieur du cône nord.

Comment expliquer la formation de ces cônes ? Selon les modèles, une étoile compagnon interagirait avec le gaz expulsé soit en l'accrétant dans un disque et en émettant des jets, soit en le repoussant avec le vent stellaire. Pierre Kervella et ses collègues confirment la présence d'un compagnon pour L_2 Puppis et pensent que plusieurs mécanismes d'interaction sont simultanément en jeu.

Sean Bailly

P. Kervella et al., *Astronomy & Astrophysics*, vol. 578, A77, 2015

Philae s'est réveillé !

C'est finalement après sept longs mois d'hibernation que l'atterrisseur *Philae* s'est réveillé sur la comète Tchouri, en juin. D'après Stephan Ulamec, responsable de la mission, « *Philae* va très bien, il fonctionne à une température de -35°C et dispose d'une puissance de 24 watts », de quoi communiquer avec *Rosetta* et commencer à recueillir des données. Si tout se poursuit ainsi, *Philae* pourrait reprendre certaines de ses activités scientifiques.

Anticorps narcoleptiques

Un léger pic de narcolepsies s'est récemment produit en Europe après une campagne de vaccination contre la grippe. Avec ses collègues, Syed Ahmed de la société GSK a montré qu'un des vaccins, retiré depuis, déclenchait la fabrication d'anticorps qui bloquent la production d'une hormone clef de l'éveil chez des individus ayant certaines prédispositions génétiques. Il faut donc adapter finement la composition des vaccins, dont l'intérêt n'est pas remis en cause.

Nanotechnologies

Des spirales d'or lumineuses

Dans le futur, votre carte d'identité sera peut-être quasi infalsifiable grâce à une zone de sa surface invisible à l'œil nu et couverte de minuscules spirales en or, difficiles à fabriquer. Ces structures réémettent de la lumière bleue lorsqu'elles sont éclairées par un laser infrarouge. Mais avant d'en arriver aux applications, Roderick Davidson et ses collègues, de l'université Vanderbilt, aux États-Unis, ont étudié de près ces spirales.

Les chercheurs ont conçu des nanospirales en or ayant un diamètre total de 395 nanomètres. En éclairant les spirales avec

de très brèves impulsions d'un laser infrarouge, ils excitent les électrons du métal et obtiennent un signal lumineux dominé par l'infrarouge mais avec une petite partie bleue – il s'agit d'une réponse non linéaire que l'on retrouve aussi dans des cristaux dits doubleurs de fréquence.

Pour obtenir une émission bleue maximale, il faut accumuler les électrons au centre de la spirale. Pour ce faire, les chercheurs ont polarisé la lumière du laser. La polarisation caractérise la direction du champ électrique (ou magnétique) de la lumière. La configuration la plus efficace est une lumière polarisée

circulairement de telle façon que le champ tournant guide les électrons sur une trajectoire quasi circulaire le long de la spirale, en direction du centre de cette dernière.

Des questions subsistent. La réponse bleue reste faible et pour l'augmenter, il faudrait accroître l'énergie du laser. Or si les spirales ne dissipent pas assez cette énergie, elles fondent. Un compromis est à trouver entre ces contraintes, afin d'obtenir un signal exploitable sans détruire le dispositif.

S. B.

R. B. Davidson II et al., *Nanophotonics*, vol. 4(1), 2015

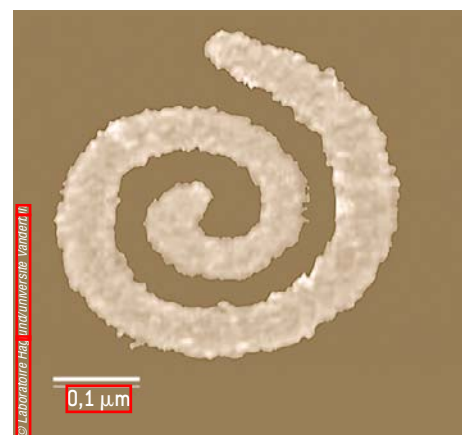


Image d'une nanospirale d'or obtenue au microscope électronique à balayage.

Des insecticides nocifs

Présents notamment dans les shampoings antipoux et les produits antimoustiques, les insecticides dits pyréthrinoides font partie de notre quotidien. Ils paralysent les insectes en perturbant leur système nerveux. Selon une étude statistique réalisée sur près de 300 couples mère-enfant par Cécile Chevrier, de l'Inserm, et ses collègues, ils pourraient être neurotoxiques pour les jeunes enfants : une augmentation des résidus de pesticides dans leurs urines est en effet associée à une baisse de certaines performances cognitives.

Osciller pour comprendre

L'activité électrique dans le cerveau est marquée par des oscillations périodiques, qui dépendent de la tâche effectuée et de l'état cognitif (éveillé et détendu, concentré, etc.). L'équipe d'Anne-Lise Giraud, de l'université de Genève, a montré que ces fluctuations jouent un rôle dans le traitement du langage, participant à son découpage en syllabes et en phonèmes. Les oscillations sont d'ailleurs perturbées chez les personnes dyslexiques ou autistes.

Pollen et abeilles sauvages

Une méta-étude réalisée par une équipe internationale, dont des chercheurs de l'Inra et du CNRS, indique que dans la pollinisation des cultures par les abeilles, la contribution des espèces sauvages est à peu près la même que celle des abeilles domestiques. Et la pollinisation par les abeilles sauvages est réalisée à 80 % par 2 % seulement des espèces, les plus communes. Ainsi, selon David Kleijn et ses collaborateurs, on ne peut pas invoquer le seul argument économique de la pollinisation des cultures pour mener des actions visant à sauvegarder ou à rétablir la biodiversité des abeilles sauvages.

Entomologie

Le papillon de nuit et le bougé des fleurs



Un sphinx du tabac butine une fleur artificielle, qui abrite une solution d'eau sucrée. Il voit son bougé et reste ainsi en vol face à elle tout en pompant la solution.

Comment y voir quand la nuit est presque noire? Certains insectes nocturnes accumulent les photons sur un temps plus long – tout comme un photographe augmente le temps de pose. En contrepartie, ils perçoivent moins bien les mouvements rapides. En quelque sorte, leur cerveau ralentit pour former moins d'images par seconde. Simon Sponberg, de l'université de Washington, et ses collègues ont montré que le sphinx du tabac (*Manduca sexta*), un papillon de nuit, était parvenu à un compromis idéal pour distinguer les fleurs qui se balancent dans le vent – une faculté vitale pour lui qui se nourrit de leur nectar.

À chaque repas, le sphinx doit rester en vol face au végétal avec assez de précision pour y pomper

le précieux liquide. Afin de percer le secret de ce guidage chirurgical, les chercheurs ont conçu des fleurs en plastique abritant une solution sucrée et montées sur un bras robotisé, qui les faisait osciller à diverses fréquences.

Ils ont constaté qu'au-dessous de 1,7 hertz, les papillons suivent bien le mouvement des fleurs, même dans l'obscurité. Au-delà, ils sont d'autant plus en retard sur le végétal que la luminosité est faible, signe que leur système visuel ralentit. Or dans la nature, l'oscillation des fleurs ne monte presque jamais au-dessus de 1,7 hertz. Les papillons sont donc toujours capables de bien voir leur dîner se balancer lentement dans le vent.

G. J.

S. Sponberg et al., *Science*, 11 juin 2015

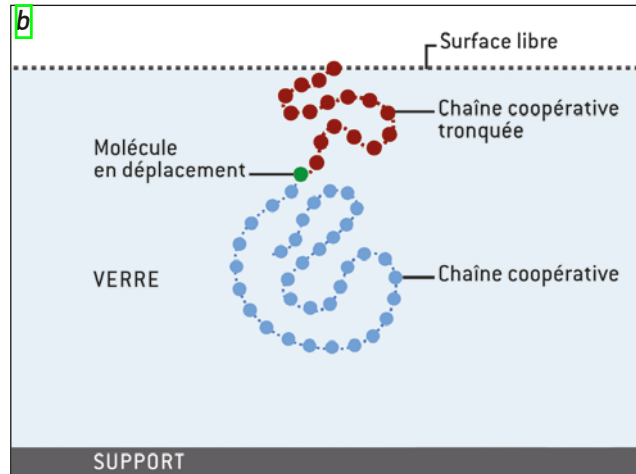
Insolite

Des balles de fronde romaines en Germanie

À la fin de notre ère. Le chef germain Arminius terrasse trois légions romaines dans la forêt du Teutoburg. Les survivants rallient le camp de la XIX^e légion à Haltern, puis, craignant l'arrivée des Germains, le désertent très vite. En fouillant le camp plus de 2000 ans plus tard, l'archéologue Birgitta Bremner et son équipe retrouvent un tas de 81 balles de fronde en plomb. Un légionnaire en fuite a jeté le sac de cuir qui les contenait!



Physique



Des chaînes coopératives pour comprendre la transition vitreuse

Un modèle relativement simple des déplacements à l'échelle moléculaire permet d'étudier ce qui se passe lorsqu'un liquide se transforme en verre en refroidissant.

Le passage de la matière d'un état liquide à l'état de verre, c'est-à-dire un solide où les positions désordonnées des atomes ou molécules ont été figées, constitue l'un des grands problèmes encore non résolus en physique de la matière condensée. Cette « transition vitreuse », qui se produit quand la température a suffisamment diminué, présente en effet plusieurs caractéristiques incomprises. Les travaux d'une équipe de quatre physiciens et d'un mathématicien à Paris et dans l'Ontario, au Canada, ont cependant permis de faire un pas en avant.

Ces chercheurs ont élaboré une modélisation théorique qui, notamment, explique deux propriétés surprenantes de la transition vitreuse de couches minces de polymères. Lesquelles ? D'une part, la transition vitreuse d'un film de polymères d'épaisseur nanométrique se produit à une température qui dépend fortement de l'épaisseur. D'autre part, le film semble présenter à sa surface une très mince couche où les molécules sont plus mobiles que celles situées au cœur du verre.

Afin de comprendre ces caractéristiques, Thomas Salez, chercheur à l'institut Perimeter de physique théorique à Waterloo (Canada) et au laboratoire Gulliver (CNRS et ESPCI ParisTech), et ses collègues ont développé un modèle théorique fondé sur des « chaînes coopératives aléatoires ». L'idée essentielle, qui était suggérée par des simulations numériques et des observations sur les matériaux granulaires, est la suivante.

Dans un verre, les molécules se trouvent dans un milieu très encombré et leurs déplacements, nécessaires pour que le matériau atteigne l'équilibre thermodynamique correspondant à la température imposée, se font donc par des mouvements collectifs. Ces derniers impliqueraient surtout des groupes de molécules se suivant à la queue leu leu, formant ainsi des « chaînes coopératives » aléatoires. Thomas Salez et ses collègues proposent l'analogie avec les passagers du métro qui, pour entrer ou sortir d'un wagon bondé, s'organisent spontanément en petites files se frayant un chemin.

En appliquant à son modèle les méthodes d'analyse de la physique statistique, l'équipe franco-canadienne est parvenue à retrouver quantitativement certaines lois qui décrivent la dynamique de l'évolution des verres vers l'équilibre thermodynamique. Qui plus est, le modèle, appliqué aux films minces, explique pourquoi et comment la température de transition vitreuse dépend, dans ce cas, de l'épaisseur du film.

La clef de la réponse est que, lorsqu'elles sont à la surface du matériau, les molécules n'ont plus besoin d'appartenir à une chaîne coopérative pour se mouvoir. Et près de la surface, les chaînes coopératives sont plus courtes. Par suite, à proximité de la surface, la mobilité moléculaire est accrue, ce qui a pour effet d'abaisser la température de transition vitreuse, et cela d'autant plus que le film est mince.

Ainsi, le modèle de l'équipe franco-canadienne, fondé sur des idées assez simples et intuitives, apparaît prometteur pour mieux comprendre la transition vitreuse.

Maurice Mashaal

PNAS, en ligne le 22 juin 2015

Les physiciens comprennent encore mal la transition entre l'état liquide et l'état de verre [a]. Selon le modèle récemment conçu, près de la surface libre d'une couche mince de matériau vitreux [b], une molécule peut se déplacer en faisant partie d'une chaîne coopérative du cœur du matériau. Elle peut aussi le faire si elle appartient à une chaîne coopérative tronquée par l'interface ; or une telle chaîne est plus courte, donc plus probable. La mobilité est par conséquent accrue à proximité de la surface libre, ce qui réduit la température de transition vitreuse du film par rapport à celle du matériau massif.

Astrophysique

La première génération d'étoiles de l'Univers enfin détectée

La présence de ces astres, jusqu'ici jamais observés, a été mise en évidence dans une galaxie particulièrement brillante et lointaine.



ILLUSTRATION © NASA

Vue d'artiste de la galaxie CR7, la plus brillante des galaxies connues parmi celles présentes 800 millions d'années après le Big Bang. Elle semble contenir des étoiles de population III, la toute première génération d'étoiles.

En 2018
le télescope James Webb

sera mis en orbite et devrait détecter de nombreuses étoiles de la première génération.

La vie des étoiles est un cycle perpétuel : un nuage de gaz s'effondre par auto-gravité et forme une étoile ; celle-ci tire son énergie des réactions de fusion thermonucléaire des atomes légers qu'elle contient ; enfin, elle meurt en expulsant son gaz dans le milieu interstellaire, alimentant un nuage qui s'effondre de nouveau pour former d'autres étoiles...

En remontant dans le temps – ce qui revient à regarder très loin dans l'Univers –, on pourrait, en principe, voir la toute première génération d'étoiles. Ces étoiles, dites de population III, sont supposées être constituées des éléments légers produits dans les premières minutes de l'Univers (hydrogène, hélium et traces de lithium). Ces astres n'avaient encore jamais été observés. David Sobral, de l'université de Lisbonne, Daniel Schaerer, de l'université de Genève et du CNRS, et leurs collègues pourraient bien avoir détecté, pour la première fois, ces étoiles de population III.

Ces astres seraient apparus plusieurs centaines de millions

d'années après la naissance de l'Univers. Ils auraient été colossaux : jusqu'à 1 000 fois plus massifs que le Soleil et très chauds, brûlant en quelques millions d'années leur combustible – et synthétisant des éléments aussi importants que le carbone, l'azote ou l'oxygène – avant d'exploser en supernova. Leurs restes forment la matière première pour les générations suivantes d'étoiles, dites de population II (des étoiles anciennes contenant peu d'éléments lourds) et de population I (les étoiles riches en éléments lourds, à l'instar du Soleil).

Lointains, les astres de population III sont difficiles à observer ; mais ils sont activement recherchés car leur existence est indispensable pour comprendre l'histoire des étoiles. Or l'équipe de David Sobral pourrait en avoir débusqué grâce au programme d'observation *Cosmos* qui sonde l'Univers profond. En combinant les données du télescope *Subaru* et de l'observatoire Keck à Hawaï, du VLT (*Very Large Telescope*) au Chili, et du télescope spatial

Hubble, les chercheurs ont découvert plusieurs galaxies très lointaines dont une trois fois plus brillante que les autres situées à des distances équivalentes, correspondant à l'époque où l'Univers était âgé de 800 millions d'années.

Le spectre de la galaxie très brillante, nommée CR7 (pour *Cosmos Redshift 7*), indique la présence d'hélium ionisé – correspondant à des astres de température très élevée – et l'absence d'éléments plus lourds : la signature attendue pour les étoiles de population III. De plus, CR7 présente aussi des sources plus évoluées, des étoiles de population II, indiquant une coexistence de différentes générations stellaires. Comment expliquer ce mélange ? Des étoiles formées rapidement auraient chauffé le gaz de nuages voisins, ralentissant ainsi leur effondrement. La formation d'étoiles de population III dans ces nuages a donc été tardive et contemporaine de la présence d'étoiles plus évoluées.

S. B.

D. Sobral et al., *The Astrophysical Journal*, sous presse, 2015

Biomédecine

Du virus au diabète

Certains virus, tels les coxsackievirus, déclenchent un diabète de type 1. Anne Op de Beeck, de l'Université libre de Bruxelles, et ses collègues ont précisé le mécanisme en jeu. Chez les patients atteints de cette maladie, le taux de sucre dans le sang n'est plus régulé par l'insuline, car leur propre système immunitaire détruit les cellules β du pancréas, qui produisent cette hormone. Les chercheurs se sont demandé pourquoi le système immunitaire ne s'en prend pas aussi aux cellules α du pancréas, voisines des cellules β . Ils ont comparé, chez le rat, la réponse antivirale de ces deux types de cellules à une infection par un coxsackievirus. Celle des cellules α est plus efficace. L'éradication rapide du virus au début de l'infection serait suffisante et leur éviterait d'alerter le système immunitaire.

S. B.

L. Marroqui et al., *eLife*, 10 juin 2015

Géosciences

Le noyau terrestre est soufré

Le noyau terrestre est trop léger pour ne contenir que du fer et du nickel. Des éléments plus légers entrent probablement dans sa composition. Pour la première fois, Frédéric Moynier de l'Institut de physique du globe de Paris et leurs collègues ont apporté la preuve que du soufre est présent dans le noyau.

Comment ont-ils procédé ? Ils ont comparé la composition chimique du manteau et de la croûte terrestre à celle des astéroïdes. Ces derniers ont formé la planète il y a plus de 4 milliards d'années et ont donc une composition comparable à celle de la Terre avant que le noyau et le manteau se soient différenciés. Ainsi, grâce aux différences de composition chimique entre ces échantillons, les géologues déterminent les éléments qui ont migré dans le noyau. Mais le soufre, très volatil, s'échappe facilement du manteau et son analyse directe n'est pas exploitable. Les chercheurs ont donc étudié le cuivre, un élément souvent associé à du soufre et qui a donc accompagné le soufre lors de sa migration dans le noyau. Ils estiment ainsi qu'il y aurait $8,5 \times 10^{18}$ tonnes de soufre dans le noyau, ce qui représente 0,5% de sa masse.

S. B.

P. S. Savage et al., *Geochemical Perspectives Letters*, vol. 1, pp. 53-64, 2015

Astrophysique

Une mangrove magnétique chauffe l'atmosphère du Soleil

À cœur du Soleil, la température avoisine les 15 millions de degrés. Elle n'est plus que de 6 000 °C dans la photosphère, la couche de surface de l'astre. De façon surprenante, la température de l'atmosphère juste au-dessus de la surface (la chromosphère) grimpe jusqu'à plus de 10 000 °C, et celle de la couronne, plus éloignée encore, dépasse le million de degrés ! Quels mécanismes réchauffent ainsi l'atmosphère solaire ? Tahar Amari, du Centre de physique théorique de l'École polytechnique, et ses collègues ont en partie résolu cette énigme vieille de plus de 80 ans.

Les physiciens ont modélisé le champ magnétique à la surface de l'étoile. Son aspect rappelle celui d'une mangrove. Autour de zones de température relativement stable se forment des lignes de champ magnétique qui

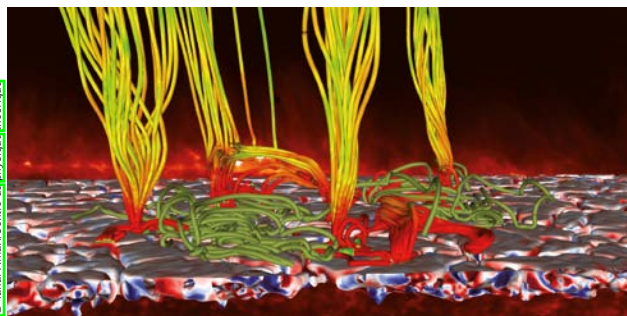
restent près de la surface. Elles s'enchevêtrent, telles des racines, aux pieds de lignes de champ qui s'échappent verticalement vers l'atmosphère comme des troncs d'arbres.

Le mouvement du plasma sous les racines conduit à des éruptions et des réorganisations des lignes de champ magnétique (ou reconnections magnétiques). Ce phénomène libère de l'énergie qui chauffe la chromosphère.

Pour la couronne, un autre mécanisme entre en jeu. Lors des éruptions dans le plasma photosphérique, des ondes d'Alfvén (des vibrations du champ magnétique) se forment et se propagent le long des lignes de champ verticales (les troncs de la mangrove). Ces ondes s'élèvent jusque dans la couronne où elles se dissipent peu à peu en chauffant l'atmosphère.

S. B.

Nature, vol. 522, pp. 188-191, 2015



Le plasma à la surface du Soleil (bleu et rouge) engendre un champ magnétique de surface (vert et rouge). Des mécanismes plus profonds créent des lignes de champ magnétique verticales (jaune et vert).

Des volcans actifs sur Venus

Eugene Shalygin, de l'institut Max-Planck de Munich, et ses collègues ont mis en évidence une activité volcanique en cours sur Vénus. L'observation a été réalisée grâce à la sonde *Venus Express* de l'Agence spatiale européenne (ESA), qui a détecté à plusieurs reprises des points chauds, indices d'éruptions volcaniques. Vénus fait donc partie, avec la Terre et Io, satellite de Jupiter, des seuls corps du Système solaire où le volcanisme est encore actif.

Liaisons chimiques sur demande

Détruire des liaisons chimiques avec un laser est simple, en créer est plus complexe. En 2013, Liat Levin, du Technion en Israël, et ses collègues ont réussi à former des liaisons entre atomes de magnésium grâce à des impulsions de laser femtoseconde. Le taux de réussite était

faible, mais les chercheurs ont récemment multiplié le rendement par cinq. Pour ce faire, ils ont modulé l'émission laser : la fréquence augmente progressivement au cours de chaque impulsion. Le système de deux atomes passe alors par un état quantique intermédiaire qui favorise la formation de la liaison de la molécule.

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



Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr



le domaine de la conception de procédures expérimentales sur les animaux ; 2/ Une personne justifiant de compétences dans le domaine de la réalisation de procédures expérimentales sur les animaux ; 3/ Une personne justifiant de compétences dans l'un au moins des domaines suivants : soins des animaux/mise à mort des animaux ; 4/ Un vétérinaire ; 5/ Une personne non spécialisée dans les questions relatives à l'utilisation des animaux à des fins scientifiques ».

Cette transposition du droit européen ouvre la porte à une interprétation *a minima* peu propice au changement portée par la directive de 2010. De fait, ces nouveaux comités sont en général créés à partir des comités d'éthique déjà existants, ce qui donne l'impression d'une nouvelle dénomination sans réelle incidence. La « personne non spécialisée » se réduit parfois au vétérinaire mentionné au 4/, lequel remplit les deux fonctions à la fois. Quant aux compétences figurant au 3/, elles sont prévues comme une alternative, ce qui permet de ne pas exiger la présence d'une personne s'occupant des animaux sans les mettre à mort.

Pourtant, le regard porté sur l'animal varie selon que l'on est en charge de tuer ou non, et selon que l'on est formé ou non dans la culture des sciences biologiques. Or, si l'évaluation scientifique implique une compétence en lien avec l'expérience envisagée, le questionnement éthique demande une pluralité de points de vue et l'acceptation de la légitimité d'un regard extérieur. Ainsi, selon la composition du comité d'éthique, l'évaluation réalisée ne respectera que théoriquement les exigences réglementaires nationales ou remplira pleinement l'objectif de la loi européenne.

Des chercheurs s'inquiètent de la contestation persistante de leurs pratiques. Ils perçoivent aussi les évolutions juridiques comme des contraintes et des immixtions non justifiées dans leur travail. Cependant, une autre attitude est possible : recevoir les procédures réglementaires comme un dispositif d'accompagnement plutôt que comme un signe de défiance. La protection des animaux passe d'abord par une certaine préoccupation à leur égard, qui doit devenir partie intégrante de la recherche. La formation des personnels et la possibilité de prévoir un bilan réflexif

LE DROIT DE LA PROTECTION animale a progressé, mais le nombre d'animaux utilisés à des fins scientifiques reste impressionnant.

L'AUTEUR



Sonia CANSELIER est chargée de recherche à l'UMR de droit comparé de Paris (UMR 8103 CNRS-Paris 1) et au laboratoire DCS (UMR 6297 CNRS-Université de Nantes).

EN CHIFFRES

11,5 millions d'animaux utilisés en 2011 à des fins scientifiques dans l'Union européenne (UE), contre plus de 12 millions en 2008.

Plus de 2,2 millions d'animaux utilisés en 2010 en France, dont près de deux tiers de rongeurs.

90 animaux utilisés en 2011 dans l'UE pour les cosmétiques et les produits d'hygiène corporelle, contre 1 960 en 2008.

345 000 animaux utilisés en 2011 pour d'autres évaluations toxicologiques et de sécurité, contre 223 000 en 2008 (soit 54 % de plus).

Presque 92 000 animaux utilisés en 2011 pour l'étude de contaminants potentiels de l'environnement, contre 65 000 en 2008 (soit 41 % de plus).

sur l'expérience achevée participent de cette dynamique. Bien appliquées et comprises, ces mesures intégreraient le souci de l'animal dès la conception des expériences, au lieu de plaquer un cadre réglementaire dans une démarche qui n'a d'éthique animale que le nom.

En l'état du droit français, la procédure n'est efficace que si les comités d'éthique jouent leur rôle. S'ils se cantonnent, comme encore souvent, à une lecture superficielle et très administrative du dossier, comment les chercheurs percevraient-ils cette étape autrement que comme une fastidieuse pape-rasserie ? Si les textes juridiques ne sont pas interprétés et appliqués dans la plénitude de leurs implications et dans le respect de leur finalité protectrice, mais comme autant de contraintes inutiles et chronophages, comment serviraient-ils de gages d'un équilibre satisfaisant ? Les opposants à l'expérimentation animale trouvent dans ces biais des éléments pour dénoncer l'inefficacité des solutions intermédiaires et réclamer une mesure plus radicale : l'interdiction. Les chercheurs et les autorités nommant les comités d'éthique seraient bien inspirés de les priver d'un argument en restituant au droit toute son efficacité et en s'engageant pour réaliser les ambitions du législateur européen. ■



Réagissez au Point de vue sur www.pourlascience.fr

ENTRETIEN

Terres rares : « Nous avons en Europe un grand potentiel et un grand savoir-faire »

Le projet français ASTER a fait le point sur les « terres rares », des métaux essentiels pour l'industrie. Dominique Guyonnet, qui l'a coordonné, nous explique les facteurs de pénurie et les actions de l'Europe pour s'en prémunir.



Dominique GUYONNET est géologue au BRGM et directeur de l'École nationale d'application des géosciences.

POUR LA SCIENCE

Que sont les terres rares ?

DOMINIQUE GUYONNET : Les 14 terres rares sont, au sens strict, les lanthanides, des éléments dont les numéros atomiques vont de 57 à 71. Parce qu'il en est proche chimiquement, on y ajoute l'yttrium, qui est un quasi-métal de numéro atomique 39. Leurs atomes ont une configuration électronique interne qui comprend 14 places sur la sous-couche 4f, ce qui crée la fratrie des 14 lanthanides. Leurs propriétés électromagnétiques particulières proviennent du fait que les orbitales 4f écrantent mal le champ du noyau. Et ils ont par ailleurs des propriétés chimiques similaires, dû à leurs trois électrons de valence. Contrairement à ce que laisse croire leur nom qui date du XIX^e siècle, ils ne sont pas si rares. Mais ils constituent des matériaux stratégiques.

PLS

Pourquoi ces éléments métalliques sont-ils importants ?

D.G. : L'industrie est très demandeuse de certains d'entre eux – par exemple le néodyme, le praséodyme et le dysprosium – parce que ces éléments servent à produire des aimants permanents puissants. On utilise de tels aimants dans

certaines éoliennes, dans les moteurs électriques, notamment ceux des voitures, dans les petits moteurs d'ordinateurs, etc. D'autres terres rares – le terbium, l'euprômium et l'yttrium – sont utilisées dans les luminophores, constituants de base des ampoules fluorescentes. Les batteries rechargeables nickel-métal-hydrure – celles notées NiMH – sont une autre application importante des terres rares. D'autres applications concernent certains alliages métalliques, la catalyse pétrolière, la dépollution automobile, etc.

PLS

En quoi le projet ASTER a-t-il consisté ?

D.G. : Le marché international des terres rares a subi de fortes tensions ces dernières années, en raison des restrictions à l'exportation adoptées par le principal pays producteur, la Chine. Aussi le BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières) a-t-il lancé le projet ASTER pour avoir une vision des flux et stocks de terres rares tout au long de la « chaîne de valeur », la chaîne qui va de leur extraction jusqu'à leur utilisation, et même jusqu'à la gestion des déchets.

Le projet a été mené avec le groupe de chimie Solvay, le cabinet BIO by Deloitte, l'université Paul-Sabatier à Toulouse et l'institut

polytechnique LaSalle Beauvais dans le cadre du programme ECOTECH de l'ANR (Agence nationale de la recherche). Les équipes d'ASTER ont travaillé en lien avec celles du projet européen EURARE (EUropean RARE Earth), coordonné par le Service géologique britannique (British Geological Survey).

PLS

Quels sont ses principaux résultats ?

ASTER (acronyme de *Analyse Systémique des TERres rares - flux et stocks*) a fourni une vision des flux et stocks de terres rares tout au long de la chaîne de valeur. Ils consistent en valeurs quantitatives de flux et de stocks de terres rares jugées critiques pour l'économie française et européenne. Alors que pour la Commission européenne toutes les terres rares sont critiques, les analyses faites dans le cadre d'ASTER mettent en évidence que la menace de pénurie ne concerne que certaines d'entre elles : essentiellement celles mises en jeu dans les aimants permanents et les batteries. Viennent ensuite les terres rares utilisées dans les ampoules fluorescentes, mais il semble qu'à terme, les lampes à diodes électroluminescentes (LED) prédomineront, de sorte que ce problème devrait s'atténuer.

PLS

Les menaces de pénurie sur les terres rares sont-elles liées au manque de gisements ?

D. G. : En fait, les prospections minières ont révélé que la Terre dispose d'une ressource prouvée suffisante pour plusieurs siècles de consommation actuelle. En Europe aussi, il existe des gisements importants, notamment en Suède et au Groenland ; le potentiel serait limité en France, mais des explorations restent à mener. S'il y a menace de pénurie, c'est parce que la Chine produit aujourd'hui au moins 85 % des terres rares employées par l'industrie mondiale, y compris par sa puissante industrie domestique. Or les coûts salariaux de ce pays et sa politique industrielle maintiennent les cours des terres rares trop bas pour que les projets d'investissement menés hors de Chine puissent être rentables.

Cela pourrait évoluer cependant. Un point essentiel de cette problématique est que, pour le moment du moins, les Européens tiennent sans doute beaucoup plus que les Chinois à protéger l'environnement autour des mines. Or dans les gisements d'oxydes de terres rares se trouvent presque toujours des éléments radioactifs, tel le thorium et l'uranium. Éviter la dissémination de la radioactivité associée dans l'environnement nécessite donc une bonne gestion, plus coûteuse.

PLS

Le manque de terres rares n'est donc pas d'origine géologique, mais géopolitique ?

D. G. : L'inquiétude qui règne en Europe quant à l'approvisionnement en terres rares a été amplifiée par la crise de 2010-2011, crise qui était en partie d'origine géopolitique, avec le conflit territorial des îles Senkaku, ces îles de la mer de Chine orientale que les deux républiques chinoises disputent au Japon. Pour exercer une rétorsion contre le Japon, la République populaire de Chine a cessé temporairement de livrer des terres rares à ce grand producteur d'aimants permanents.

Par ailleurs, les Chinois ont réduit en 2010 leurs quotas d'exportation de terres rares, ce qui a entraîné une envolée des cours. Cette tendance s'est inversée avec la diversification des approvisionnements à l'échelle mondiale.

D'ailleurs, au début de 2015, la Chine a mis un terme à ses quotas.

PLS

La Chine contrôle-t-elle volontairement les cours mondiaux pour conserver un quasi-monopole ?

**Deng Xiaoping, 1992 :
« Le Moyen-Orient
a son pétrole, la Chine a
ses terres rares. »**

D. G. : On rapporte souvent qu'en 1992, Deng Xiaoping, qui était alors le dirigeant suprême de la République populaire de Chine, aurait dit : « Le Moyen-Orient a son pétrole, la Chine a ses terres rares. » Cette déclaration est un indice de la volonté manifeste des Chinois de garder la domination qu'ils ont construite dans le secteur des terres rares. Un signe qui ne trompe pas est qu'ils investissent massivement dans des projets miniers hors de Chine. Ainsi, ils sont en train de s'investir dans la maîtrise industrielle de la future production groenlandaise, donc européenne, de Kvanefjeld !

PLS

Des gisements intéressants existent en Europe, mais celle-ci dispose-t-elle du savoir-faire pour les exploiter ?

D. G. : Absolument. Le savoir-faire en matière d'extraction et de traitement du minerai reste important ici, par exemple en Finlande et en Suède. En France, Areva, Eramet et d'autres acteurs miniers ont aussi ce savoir-faire. La hauteur des investissements nécessaires est le principal frein à un engagement européen dans le secteur des terres rares. Un projet minier exige des centaines de millions d'euros... Sans perspective de rentabilité à court terme ni volonté politique européenne, il sera difficile d'ouvrir des mines, d'autant plus qu'il existe des freins sociétaux.

PLS

Quels sont les secteurs industriels européens qui emploient beaucoup de terres rares ?

D. G. : Toutes les industries qui emploient des aimants permanents, comme les fabricants de moteurs électriques, de bobines d'allumage, de capteurs, de haut-parleurs, d'éoliennes, etc. S'y

Le tableau de Mendeleïev est présenté avec une coloration spécifique pour les terres rares. Les éléments sont classés par périodes et groupes. Les terres rares (lanthanides et actinides) sont mises en évidence par une couleur rouge, tandis que l'yttrium est mis en évidence par une couleur bleue. Les autres éléments du tableau sont en blanc avec des bordures grises.

LES TERRES RARES sont tous les lanthanides (cadre rouge dans ce tableau de Mendeleïev) plus l'yttrium (cadre bleu). Ces éléments ont des propriétés chimiques similaires.



DE GRANDS GISEMENTS DE TERRES RARES se trouvent au Groenland, où ce géologue prospecte. Le gisement de Kvanefjeld, découvert dans le sud-ouest du Groenland dans les années 1950, est réputé constituer le troisième plus grand dépôt d'oxydes de terres rares et le sixième plus grand gisement d'uranium. Il est aussi riche en zinc. La société australienne Greenland Minerals and Energy projette de l'exploiter en partenariat avec la société chinoise NFC.

ajoutent les producteurs de batteries rechargeables NiMH, des acteurs de la chimie de la catalyse, etc. Par exemple, Vacuum Schmeltze en Allemagne et sa filiale en Finlande représentent environ 2 % de la production mondiale d'aimants permanents. Les petits producteurs européens de batteries NiMH représentent moins de 1 % de la production mondiale.

PLS

L'Europe semble avoir des positions faibles tant sur le plan minier que sur celui de la fabrication de ces composants industriels de base que sont les aimants permanents et les batteries NiMH. La Commission européenne essaie-t-elle d'améliorer la situation ?

D. G. : Elle a lancé des initiatives pour réduire les risques d'approvisionnement. Citons en particulier l'initiative *Matières premières* en 2008, qui définit la stratégie européenne pour réduire les risques de pénurie de métaux, dont les terres rares.

Cette stratégie a trois axes : favoriser l'accès des industriels européens aux marchés mondiaux sans distorsion de concurrence ; promouvoir la production de matières premières minérales à partir de sources européennes, ce qui inclut à la fois les ressources du sous-sol et celles issues du recyclage

[ce que l'on nomme la « mine urbaine »] ; enfin, réduire par des choix industriels la consommation européenne de matières premières minérales et favoriser la réutilisation, par exemple des aimants permanents, dans les produits en fin de vie.

PLS

Le recyclage des terres rares ne suffirait-il pas à réduire les problèmes d'approvisionnement ?

D. G. : Le recyclage ne saurait suffire, mais en le développant, on parviendrait à des contributions significatives du recyclage dans le cas de certaines terres rares. Ainsi, dans le cas des poudres de lampes fluorescentes, dont la demande devrait chuter, les acteurs concernés estiment qu'à l'horizon 2020, le recyclage du terbium pourrait couvrir jusqu'à 40 % des besoins.

Pour les aimants permanents, en revanche, la demande devrait croître avec la transition énergétique, de sorte que la part issue du recyclage du néodyme ne dépassera pas 10 %. Cette question est d'autant plus complexe que la demande en terres rares a beaucoup varié avec les époques en fonction des modes de vie, de sorte que le recyclage ne fournit qu'un flux proportionnel à la demande d'hier, souvent bien plus faible que celle d'aujourd'hui.

PLS

Sur quoi porte l'essentiel de l'effort de recherche européen relatif à la filière des terres rares ?

D. G. : Les Européens, dont le BRGM, réfléchissent beaucoup au développement de ce que l'on nomme la « mine responsable », c'est-à-dire des exploitations minières où l'on extrait des ressources minérales tout en maîtrisant les risques environnementaux, qui sont toujours associés à cette activité. De gros efforts portent aussi sur le développement de procédés de récupération de terres rares à partir des résidus miniers déjà existants ainsi qu'à partir des aimants, lampes, batteries, etc. mis au rebut.

PLS

L'approvisionnement de l'Europe en terres rares reste incertain. Quel bilan ASTER permet-il de dresser face à cette inquiétude ? Que doivent faire l'Union européenne et la France ?

D. G. : En fait, les conclusions d'ASTER sont rassurantes, tant au niveau des ressources primaires, c'est-à-dire géologiques, que des ressources secondaires, c'est-à-dire liées au recyclage. Nous avons en Europe un grand potentiel et un grand savoir-faire. L'Europe et la France doivent accompagner, voire susciter le développement de projets qui profitent à ce continent. La transition énergétique est un moteur possible de développement de tels projets. Tout dépend de quand elle s'intensifiera et de quelle façon elle sera maîtrisée.

PLS

Finalement, quelle est la principale conclusion que vous tirez pour l'Europe ?

D. G. : Même si la filière européenne de production puis de mise en application des terres rares est modeste, nous avons encore le savoir-faire nécessaire à la création de valeur industrielle tout au long d'une chaîne de valeur qui est mondiale. Il conviendrait donc d'investir pour nous garantir ces ressources et, ce faisant, nous assurer à long terme les emplois associés à une filière industrielle européenne historique.

Propos recueillis par François SAVATIER

Objets D'ici & D'ailleurs



Bijoux solaires



Météorites



Cadrams solaires



Montres solaires



 bijouxsolaires.com

La Clef des ÉTOILES

Boutique à Toulouse
& sur internet

laclefdesetoiles.com

Votre spécialiste du
matériel d'observation
astronomie & nature

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



Les vertus pédagogiques de *Kaamelott*

par Richard Taillet, sur le blog Signal sur bruit

« **F**aîtes des phrases », « Je ne comprends pas », « Pourquoi ? »... Las d'écrire ces mêmes mots en rouge dans la marge des copies que je corrige à longueur d'année, j'ai fini par les faire graver sur des tampons. Mes séances de correction sont devenues plus sonores et agitées, au grand dam de mon chat !

Les corrections de copies obligent à faire face à ce qui constitue à mon avis notre plus grand échec collectif, à nous autres enseignants : beaucoup d'étudiants (titulaires d'un baccalauréat) éprouvent d'énormes difficultés à faire des phrases qui soient correctes et compréhensibles sur les plans grammatical et logique (sans même parler de l'orthographe). C'est frustrant, parfois désespérant, voire déprimant.

À l'université, nous proposons des cours de « méthodologie du travail universitaire », qui ont pour ambition d'aborder, entre autres, ce problème. Ou au moins de transmettre aux étudiants un message qui pourrait se résumer à « Attention ! Nous, enseignants, futurs interlocuteurs et évaluateurs, avons l'impression de ne pas vous comprendre, vous les étudiants, quand vous écrivez ou posez des questions ».

Bien entendu, dire aux étudiants « Il faut faire des efforts pour mieux vous exprimer » ne sert strictement à rien, comme tout message qui commence par « Il faut... ».

La pédagogie étant un art sournois, il faut biaiser. L'humour ouvre beaucoup de portes, et je ne cesse de remercier mentalement Alexandre Astier pour avoir réalisé la série *Kaamelott*. Outre le fait qu'elle me fait rire, certains épisodes fournissent des perles qui m'ont permis de me libérer de la frustration évoquée plus haut et de faire évoluer un peu la situation. En particulier, chaque année, la première séance de méthodologie du

travail universitaire commence par le visionnage collectif de l'épisode *Tel un chevalier*, dans lequel Perceval tente d'adresser une demande à Arthur sans parvenir à se faire comprendre (<http://kaamelott.co/livre-1/tel-un-chevalier/>).

Cet épisode donne une forme précise au message que j'essaie de faire passer à mes étudiants. Les répliques, comme celles qui suivent, éveillent en moi le souvenir de l'agacement face à des échecs de communication :



Arthur : *Par exemple, un colifichet, qu'est-ce que c'est pour vous ? Comment vous vous le représentez ?*

Perceval : *Un colifichet, c'est quelqu'un qui...*

Arthur : *Non. Déjà non. Je suis désolé, mais pas du tout.*

Il existe sans doute un nom savant pour cette méprise, cette antfigure de style, cette phrase qui dès les premiers mots part dans le décor, mais pour ma part, je l'ai dénommée « percevalade ».

Après ce prélude, je présente un certain nombre de percevalades trouvées dans des extraits de copies anonymes des années précédentes. Par exemple : « Les conditions de Gauss sont un faisceau arrivant de l'infini et un système lentille/écran ».

Nous essayons, collectivement, de comprendre certaines de ces percevalades. Il ne s'agit pas de se moquer mais, sans s'empêcher de sourire, de réaliser, comme Arthur dans ce même épisode, que « Non, mais je sens bien que vous essayez de dire quelque chose ! »

Bien entendu, lorsque deux personnes ne se comprennent pas, il est idiot de projeter systématiquement les torts sur l'autre. La séance s'achève par un petit jeu destiné à mettre en évidence ce partage des responsabilités, pour mettre l'étudiant à la fois dans le rôle de mal-exprimant et de mal-comprenant. Ce jeu consiste à distribuer à chaque étudiant un dessin géométrique, et à lui demander de décrire ce dessin par un petit texte rédigé sur un bout de papier, pour qu'un camarade qui ne l'a pas vu puisse le redessiner en s'appuyant uniquement sur cette description. Lorsque le dessin final est très différent de l'original, on peut alors décortiquer le processus de communication et instaurer un dialogue entre les deux interlocuteurs, pour tenter de départager les torts.

Pour terminer en assumant ma part de responsabilité, je dois avouer qu'il m'arrive, certains jours en cours de physique, de m'identifier à Perceval en train d'expliquer les règles du contre-sirop (<http://kaamelott.co/livre-2/perceval-et-le-contre-sirop/>) ! ■



Richard TAILLET
est professeur à l'université Savoie Mont Blanc et chercheur au Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de physique théorique (LAPTh). Il est l'auteur du blog Signal sur bruit (www.scilogs.fr/signal-sur-bruit).



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

PASSIONS DE CHERCHEURS

À L'OCCASION DE SES 70 ANS,
LE CEA EST PRÉSENT À LA CITÉ DES SCIENCES ET L'INDUSTRIE
DU 8 OCTOBRE AU 1^{ER} NOVEMBRE 2015.

UNE EXPOSITION
« LE CEA, 7 DÉCENNIES AU SERVICE
DE LA RECHERCHE ET DE L'INNOVATION »

ENERGIE NUCLEAIRE
SANTÉ
RENOUVELABLES
MICRO & NANOTECHNOLOGIES
TRANSFERTS INDUSTRIELS



UN MARATHON
DES SCIENCES
SUITE DE COURTES CONFÉRENCES
NON-STOP DE 11 H À 18 H
LE SAMEDI 10 OCTOBRE

UNE REPRÉSENTATION
THÉÂTRALE BINÔME
SUR LE THÈME DE LA SIMULATION
NUMÉRIQUE, À 15 H
DIMANCHE 11 OCTOBRE

ENTRÉE LIBRE
LES 10 & 11 OCTOBRE



HOMO SAPIENS INFORMATICUS chronique de Gilles Dowek

Que devient notre schizophrénie ordinaire ?

Avec le Web, chaque individu exhibe, simultanément ou presque, des facettes différentes de sa personnalité.



L'été nous offre parfois l'occasion d'assister à des saynètes pittoresques, comme celle de cet homme avachi dans une chaise longue à la buvette de la plage, qui doit en être à son troisième mojito en plein soleil quand son téléphone se met à sonner. Il décroche et, après quelques instants de flottement, se met à parler avec le ton impérial d'un président de conseil d'administration.

Cette personne souffre, comme chacun de nous, de schizophrénie ordinaire : elle est composée de nombreuses personnalités et, comme l'écrit Nathalie Sarraute, chaque fois que l'une d'elles se montre au dehors, elle se désigne par « je », par « moi », comme si elle était seule, comme si les autres n'existaient pas (*Tu ne t'aimes pas*, Gallimard, 1989). D'ailleurs, notre vie serait-elle possible si nous étions contraints d'avoir une personnalité constamment identique ? Si nous n'avions pas la liberté d'être parfois le docteur Hyde et parfois Mister Jekyll ?

Toutefois, depuis la fin du XX^e siècle, notre schizophrénie ordinaire est mise à rude épreuve. La première raison est la disparition de l'espace. Naguère, l'organisation géométrique de nos personnalités – à la maison, au travail, sur un ring de boxe, etc. – nous garantissait, plus ou moins, la possibilité d'anticiper celle de nos personnalités à laquelle nos interlocuteurs s'attendaient, et nous donnait le temps de passer de l'une à l'autre. De nos jours, il nous est parfois demandé de changer brutalement de personnalité, parce qu'un collègue nous appelle au téléphone alors que nous

pareassons sur la plage, ou parce que nous avons machinalement consulté nos courriers professionnels au cours d'une randonnée en montagne.

Mais ce n'est pas là l'unique raison de cette mise à l'épreuve : en nous exposant sur le Web, par exemple en utilisant un réseau social, nous rendons souvent accessibles plusieurs de nos personnalités, qui ne peuvent



désormais plus dire « je » ou « moi » comme si les autres n'existaient pas.

Bien entendu, cette exposition n'est pas tout à fait nouvelle : au XX^e siècle, par exemple, le cinéma et la télévision ont exposé de nombreuses actrices et de nombreux acteurs aux yeux du public. Mais précisément parce qu'ils étaient acteurs, tout le monde savait que leur personnalité publique n'était qu'un rôle de plus. Personne ne doutait que Marilyn Monroe ou Marilyn Manson avaient aussi des personnalités très différentes de l'image construite qu'ils exposaient. Publier,

sur un réseau social, à la fois ses sextapes et son *curriculum vitae* est tout à fait différent : il ne s'agit plus d'exposer l'une de ses personnalités construite pour cela, mais d'exposer plusieurs de ses personnalités, qui ne peuvent désormais plus s'ignorer.

Cette situation est sans doute transitoire, car le Web et les téléphones mobiles n'ont que quelques décennies. Mais il n'est pas si facile d'anticiper la manière dont elle va évoluer. Une première possibilité est une évolution vers une plus grande porosité entre nos différentes personnalités : nous pourrions finir par accepter l'idée que, comme nous-mêmes, les personnes que nous côtoyons souffrent de schizophrénie ordinaire et cesser d'être embarrassés quand nous accédons involontairement à l'une de leurs personnalités dont nous ignorions l'existence.

Une autre est, au contraire, un plus grand cloisonnement de nos personnalités : comme ces écrivains qui publient sous différents noms de plume, nous pourrions finir par avoir plusieurs personnalités indépendantes sur le Web. La généralisation de la pseudonymie – y compris dans un cadre semi-professionnel, comme le blogage ou la contribution à une encyclopédie – semble aller dans ce sens. Peut-être sera-t-il un jour impossible de savoir que derrière les pseudonymes Jekyll et Hyde se cachait une personne unique.

D'ailleurs, l'était-elle ?

Gilles DOWEK est chercheur à l'institut Inria et membre du conseil scientifique de la Société informatique de France.

UN ÉVÉNEMENT



RADIO FRANCE

Cycle MUSIQUE & CERVEAU

**SAMEDI
12 SEPTEMBRE
2015**

9H30 - 17H
STUDIO 105
MAISON
DE LA
RADIO

**NEURO
SYMPHONIE :
LA MUSIQUE
ET NOTRE
CERVEAU**
VOYAGE DANS
LE CERVEAU
MUSICIEN



Avec la participation de

Pierre Lemarquis
et Daniele Schön
Animé par Hervé Platel

> **Soigner par la musique - Histoire et hypothèses**
> **La musique au secours du langage - Dyslexie et surdité**
> **Musicothérapie et cerveau**

Musique et Santé

Mail : info@musique-sante.org
Tél : 04 94 07 76 19

Inscription :
<http://www.musique-sante.org/>

Coût :

Prise en charge formation continue/OPCA

- Par conférence : 95 €
- Pour le cycle de trois conférences : 240 €

Prise en charge individuelle :

- Par conférence : 80 €
- Pour le cycle de trois conférences : 200 €

Association loi 1901, non assujettie à la TVA N°d'organisme de formation professionnelle : 11 75 317 04 75 N°Siret 421 942 863 000 34

Cerveau & Psycho



Fondazione
Pierfranco e Luisa Mariani
neurologia infantile



un lieu
universcience



Inserm

SACEM UNIVERSITÉ

CABINET DE CURIOSITÉS SOCIOLOGIQUES par **Gérald Bronner**

Le danger invisible de l'hôpital

On surestime le risque lié aux attentats terroristes, alors qu'on tend à ignorer celui des infections contractées à l'hôpital. Or le second risque est très supérieur au premier !



Depuis l'attentat de juin 2015, le tourisme est en berne en Tunisie. Pourtant, le risque d'y mourir des mains d'un terroriste est objectivement très faible. Malgré cela, l'émotion suscitée par ce drame l'associera à un danger d'une telle visibilité sociale qu'il fausse la boussole de notre entendement. Il est par exemple incontestablement plus risqué de prendre votre automobile pour traverser la France que de vous rendre en Tunisie pour vos vacances : 3 384 personnes ont perdu la vie en 2014 sur les routes de l'Hexagone. Pourtant, vous prendrez le volant sans frayeur particulière la plupart du temps.

Il est par ailleurs un risque plus léthal dont nous sommes plus inconscients encore que ceux que nous prenons en voiture. Selon un rapport remis à l'Office parlementaire d'évaluation des politiques de santé en 2006, ce risque provoquerait le décès de 9 000 individus par an en France. Ce danger qui, sans être toujours mortel, touche 750 000 personnes par an, porte un nom : les infections nosocomiales. Venant des mots grecs *nosos* et *komein* signifiant « maladie » et « soigner », le terme désigne les infections que nous pouvons contracter dans un établissement de santé.

Sans être un danger tout à fait inconnu, ces infections ne suscitent pas autant d'émotion et de crainte qu'elles le pourraient, comme si certains phénomènes inquiétants passaient inaperçus ou presque. Compte tenu de l'ampleur du phénomène, on pourrait être surpris de constater que l'hôpital garde son image d'univers sûr et aseptisé. Comment expliquer cette confiance relative,

dans une société devenue par ailleurs si sensible au risque ?

D'abord, les victimes d'infections nosocomiales sont majoritairement des personnes de plus de 50 ans ou des personnes dont le système immunitaire est défaillant en raison de leur état de faiblesse ou de leur traitement thérapeutique. Statistiquement, ces personnes sont susceptibles d'aller



CHACQUE ANNÉE EN FRANCE, plusieurs milliers de personnes meurent d'infections contractées à l'hôpital.

plus fréquemment à l'hôpital. De surcroît, on peut supposer qu'elles y vont pour des raisons parfois si graves qu'elles ont une probabilité non négligeable d'y mourir. De ce fait, lorsqu'une d'elles décède à l'hôpital des suites d'une maladie nosocomiale, la famille ne verra pas toujours que cette mort est un *accident*, et la prendra pour la conclusion normale et prévisible d'un processus inéluctable.

Ensuite, on ignore que les hôpitaux sont particulièrement chauffés et que cela favorise la prolifération microbienne, et on

oublie qu'ils sont fréquentés par d'innombrables visiteurs dont la présence multiplie les risques de transmission des germes.

Enfin, on ne sait pas toujours que ce sont les progrès des techniques thérapeutiques eux-mêmes qui accroissent le risque de contracter une infection. La pose de prothèses, les intubations, les endoscopies, etc. sont autant d'actes qui, en introduisant des corps étrangers dans les organismes, augmentent fortement les risques infectieux. Autre rançon du succès : les progrès des antibiotiques (un tiers des hospitalisés en reçoivent) ont en milieu hospitalier entraîné l'apparition de souches très résistantes (comme le staphylocoque doré qui résiste à la pénicilline) qui seraient une cause importante des morts par infection nosocomiale.

Il existe un « biais de disponibilité » – les psychologues le définissent comme la tendance des individus à estimer une probabilité à partir de la facilité avec laquelle ils retrouvent de mémoire des exemples illustrant l'événement qui est objet de leur estimation – qui concourt à la surestimation des risques. De la même façon, il existe un effet d'indisponibilité qui produit le résultat inverse. Ceux qui conduisent des campagnes d'information de santé publique pourraient tirer profit d'une cartographie des peurs collectives localisant ces zones d'invisibilité et de visibilité pour rationaliser leurs efforts de communication. ■

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



LA MARCHÉ DES SCIENCES

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



AURÉLIE LUNEAU
CHAQUE JEUDI
14H - 15H

Écoute, réécoute, podcast
franceculture.fr



Des océans tombés

De nouvelles observations relancent le débat sur l'origine de l'eau présente sur Terre : comètes, astéroïdes ou autres corps célestes ?

David Jewitt et Edward Young

L'ESSENTIEL

■ Pendant que les planètes se formaient, la chaleur du Soleil a expulsé l'eau vers les régions externes du Système solaire.

■ Dans les régions internes, les planètes – dont la Terre – sont relativement sèches.

■ L'eau serait arrivée à un stade tardif de la formation de la Terre par le biais soit d'astéroïdes, soit de comètes.

■ Les mesures récentes ne tranchent pas entre ces deux pistes. La source n'est peut-être pas unique ou pourrait être assez différente.

PROT M. 1162

du ciel



Debout sur la grève, les yeux rivés sur les vagues qui déferlent de l'horizon, il est facile de s'imaginer que l'océan a toujours été là, éternel. Nos lointains ancêtres le pensaient certainement : dans de nombreux mythes de la création, un abîme océanique existait avant l'émergence de la Terre et de la lumière. Aujourd'hui, nous savons que les océans de notre planète n'ont pas toujours été présents. L'eau des mers, celle de toutes les gouttes de pluie, de votre corps et de toutes les gorgées de votre tasse de café sont les restes d'événements anciens, qui ont vu les océans littéralement tomber du ciel.

D'où provient l'eau du Système solaire ? La question nous renvoie au nuage primordial géant, composé de gaz et de poussière, qui s'est effondré pour former le Soleil et les planètes il y a plus de 4,5 milliards d'années. Ce nuage était riche en hydrogène et en oxygène, respectivement premier et troisième éléments les plus abondants de l'Univers (le deuxième est l'hélium, chimiquement inerte). L'essentiel du gaz a été absorbé par le Soleil et les planètes gazeuses géantes formées avant les planètes rocheuses. Une partie de l'oxygène encore libre s'est liée avec d'autres atomes, tels que le carbone et le magnésium, puis le reste s'est associé à l'hydrogène pour produire une masse d'eau (H_2O) plusieurs fois supérieure à celle des roches dans le Système solaire.

Et pourtant, les planètes les plus proches du Soleil – Mercure, Vénus, la Terre et Mars – sont principalement rocheuses et pauvres en eau. Cela résulte des conditions de leur naissance. Le nuage qui allait devenir le Système solaire s'est d'abord effondré en formant un disque tourbillonnant, où toutes les planètes se sont constituées. La formation de planètes rocheuses a été un processus progressif. Les petits objets du disque sont entrés en collision et se sont agrégés, formant petit à petit des objets plus gros : les grains microscopiques sont devenus des gravillons, puis des rochers qui ont donné des briques planétaires de taille kilométrique nommées planétésimaux. Beaucoup des planétésimaux résiduels de la formation planétaire sont devenus les objets que nous connaissons aujourd'hui sous le nom de comètes et astéroïdes.

Et l'eau dans tout ça ? Dans les régions internes du disque, proches du Soleil, l'intense échauffement du gaz par friction et l'ensoleillement plus important ont

probablement fait évaporer l'hydrogène et les autres éléments légers vers les régions externes du Système solaire, ne laissant aux planètes en formation dans cette région que des matériaux relativement secs.

Tandis que des corps rocheux sans eau se développaient à proximité du Soleil, un peu plus loin, dans la région de l'actuelle ceinture d'astéroïdes et de Jupiter, les températures du disque étaient suffisamment basses pour que l'eau et d'autres éléments volatils forment de la glace. Les astronomes nomment « ligne de neige » (ou de glace, ou de gel) la zone de transition.

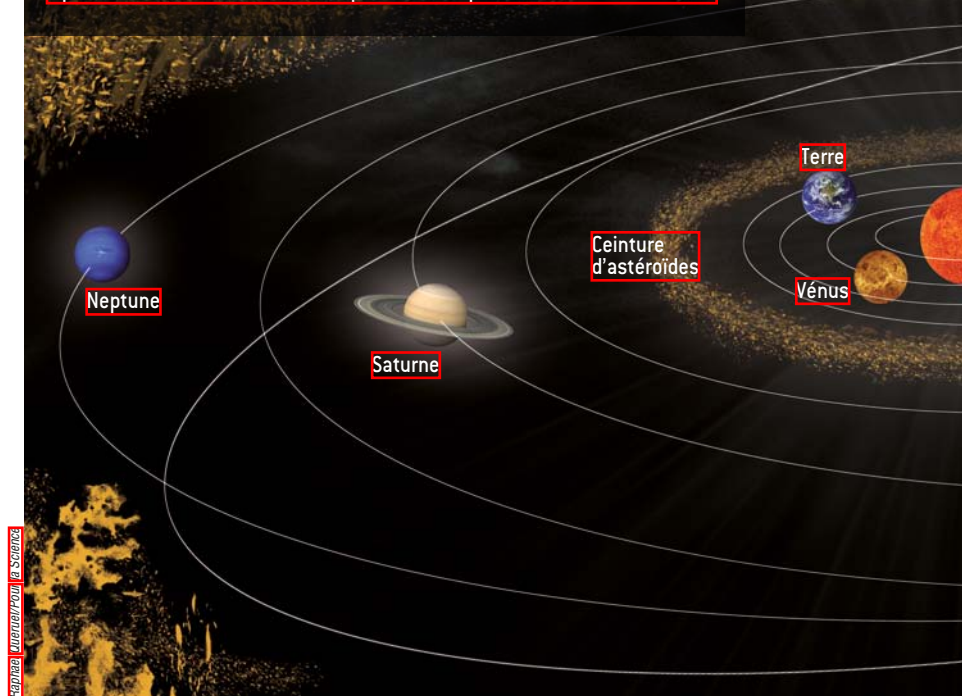
Récemment, les astronomes ont observé des lignes de neige et des collisions de planétésimaux autour d'étoiles dont le disque est en pleine formation planétaire. Nous voyons ailleurs les processus primordiaux qui se sont certainement déroulés dans le Système solaire. Si le mécanisme semble universel, de nombreux aspects de la formation de l'océan terrestre restent à comprendre et font l'objet de recherches actives. En particulier, si l'eau a été transportée

LES AUTEURS

David JEWITT est membre de l'Académie américaine des sciences et professeur à l'université de Californie à Los Angeles (UCLA).

Edward YOUNG est professeur de géochimie et cosmochimie, et membre de l'Institut des planètes et exoplanètes à l'université de Californie à Los Angeles.

LE SYSTÈME SOLAIRE (non représenté à l'échelle) contient plusieurs réservoirs de planétésimaux. La ceinture principale d'astéroïdes est située à une distance du Soleil comprise entre 1,7 et 4,5 unités astronomiques (l'unité astronomique est la distance moyenne Terre-Soleil, soit environ 150 millions de kilomètres). Il existe deux réservoirs de comètes : la ceinture de Kuiper, distante de 30 à 55 unités astronomiques, et le nuage d'Oort, à plus de 20 000 unités astronomiques et non représenté sur le schéma.



Jusqu'à notre planète initialement sèche, d'où vient-elle exactement et quand est-elle arrivée ?

Le consensus veut que l'essentiel de l'eau de la Terre provienne de la région située au-delà de la ligne de neige. Les astéroïdes et les comètes sont les candidats les plus évidents. Ils auraient été catapultés vers la partie interne du Système solaire dans les derniers soubresauts de la formation planétaire. Ils auraient apporté l'eau sur Terre lors de bombardements successifs de la planète. De nouvelles mesures permettent d'affiner ce scénario, mais elles soulèvent aussi des interrogations et pourraient pointer vers un mécanisme bien différent.

Vue de l'espace, la planète Terre mériterait plutôt de s'appeler la « planète Océan ». L'eau recouvre plus des deux tiers de la surface et les organismes vivants en sont généralement tout aussi riches. Les océans, d'une profondeur moyenne de 4 kilomètres, contiennent assez d'eau pour remplir une sphère de plus de 1 300 kilomètres de diamètre. Et pourtant, beaucoup de gens sont

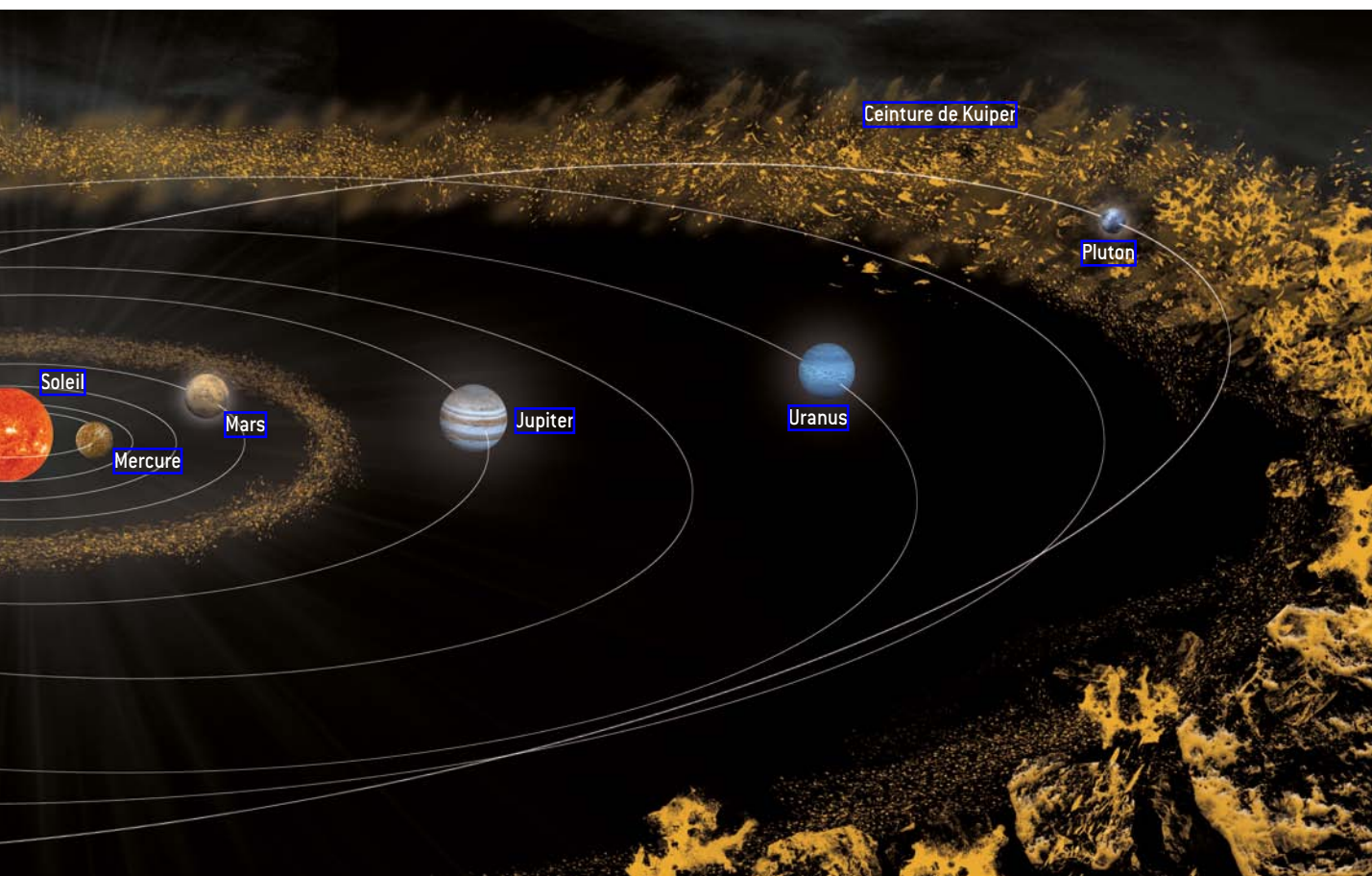
étonnés d'apprendre que toute cette eau ne représente que 0,02 % de la masse de la Terre. Dit autrement, si notre planète avait la masse d'un Boeing 777, soit 300 tonnes, toute l'eau des océans ne représenterait qu'un passager. L'eau douce contenue dans les calottes glaciaires des pôles, les nuages, les rivières, les lacs, le sol et l'ensemble des organismes vivants ne représente qu'une minuscule fraction de ce total.

De l'eau dans le manteau et le noyau

Davantage d'eau serait profondément enfouie sous nos pieds, dans le manteau rocheux de la planète, qui s'étend sur une épaisseur de plus de 3 000 kilomètres sous la croûte. L'eau ne s'y trouve cependant pas sous forme liquide. Elle fait partie intégrante de la structure moléculaire des roches et minéraux « hydratés », qui ont été entraînés sous la croûte par les processus tectoniques. Une certaine quantité de cette humidité piégée dans la roche

peut s'échapper du manteau et refaire surface par l'intermédiaire des volcans, mais la majeure partie reste enfouie. Plus en profondeur encore se trouve l'imposant noyau planétaire composé de fer et de nickel. Représentant à lui seul environ 30 % de la masse de la Terre, il contient potentiellement encore plus d'eau que le manteau, sous forme d'hydrogène qui se lierait avec de l'oxygène si la chaleur et la pression n'étaient pas aussi importantes.

Personne ne sait quelle quantité exacte d'eau contient l'intérieur de la planète. Cette incertitude résulte du manque d'échantillons de ces régions, ainsi que d'une piètre compréhension de l'efficacité du transport d'eau depuis et vers la surface. On peut raisonnablement estimer que le manteau à lui seul contient au moins autant d'eau que les océans, doublant de fait l'inventaire aquatique total de la Terre. Mais même ainsi, en ajoutant cette eau à celle de la surface, on atteint 0,04 % de la masse de la planète : deux passagers d'un Boeing 777 à pleine charge. Néanmoins, la question reste

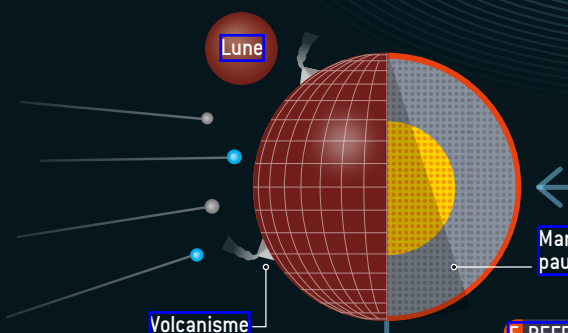
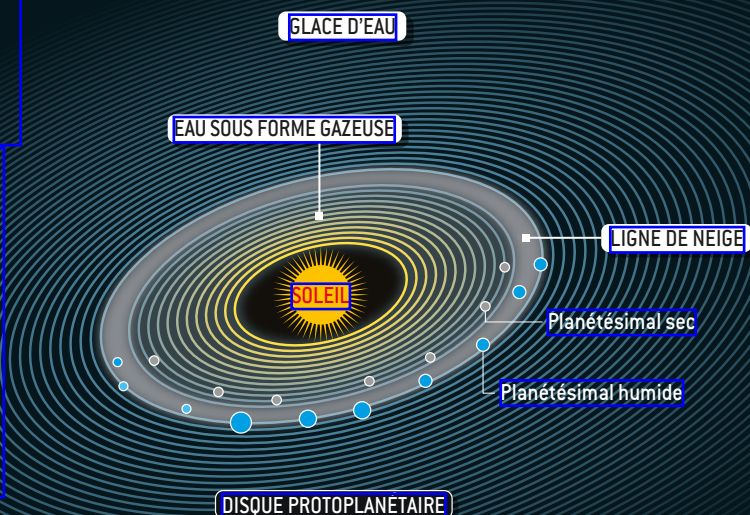


L'HISTOIRE TUMULTUEUSE DE L'EAU SUR TERRE

La Terre n'a pas toujours été une planète bleue. Elle est née il y a environ 4,5 milliards d'années en accréant de la matière dans un disque de gaz et de poussière en rotation autour du jeune Soleil. Ce disque était riche en hydrogène et en oxygène, les éléments de l'eau (H_2O). De l'eau s'est formée mais elle était, pour l'essentiel, reléguée aux régions froides du disque externe, au-delà de la « ligne de neige », où elle se trouvait sous forme de glace.

Au sein du disque, la Terre a subi des collisions violentes avec des briques planétaires nommées planétésimaux. Certains, provenant du voisinage du Soleil, étaient secs, mais d'autres, issus de l'extérieur de la ligne de neige, étaient humides, constituant pour notre jeune planète un premier apport d'eau.

Pour en arriver aux océans d'aujourd'hui, de nombreuses étapes ont été nécessaires. Les chercheurs s'accordent sur les grandes lignes du scénario, mais ils débattent encore des détails – par exemple, de savoir si ce sont les comètes ou les astéroïdes qui ont livré le plus d'eau à la Terre.



4 CONSEQUENCES

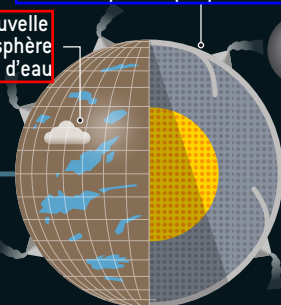
La Terre est maintenant sèche et se remet lentement de l'impact qui a formé la Lune. Les volcans et des impacteurs (corps heurtant la Terre) reconstituent peu à peu l'atmosphère.

5 REFROIDISSEMENT

L'eau des impacteurs et du dégazage des volcans forme de petites mers à la surface de la Terre qui se refroidit.

La tectonique des plaques s'amorce

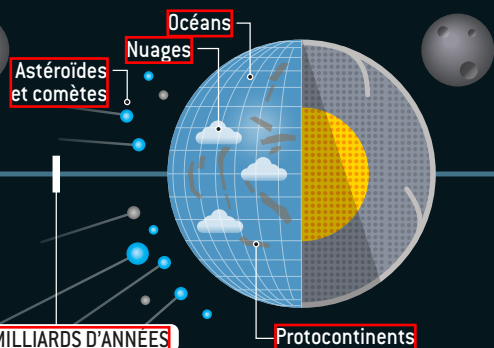
Nouvelle atmosphère d'eau



6 LIVRAISON TARDIVE

Une giboulée de planétésimaux résiduels (mélange d'astéroïdes et de comètes) s'abat sur la planète en provenance du Système solaire externe, riche en eau. Le ciel, rempli de vapeur d'eau, donne naissance aux océans.

IL Y A 3,9 MILLIARDS D'ANNÉES



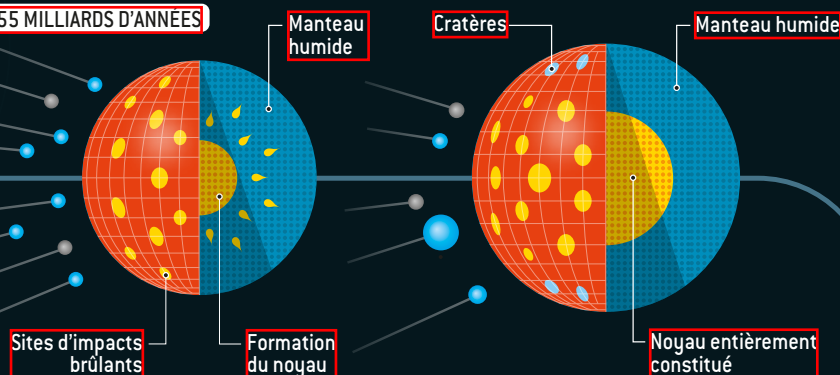
1 DEMARRAGE A CHAUD

La Terre est à l'état fondu en raison de la chaleur libérée lors de sa formation, mais elle conserve une part d'eau dans le manteau.

2 PROTO-TERRE

La planète grossit au fil des bombardements par les planétésimaux et son noyau se forme à partir des éléments lourds qui s'accumulent vers le centre. La majeure partie de l'eau se trouve dans le manteau sous forme de minéraux hydratés, bien qu'il en subsiste une partie à la surface quand la planète se refroidit.

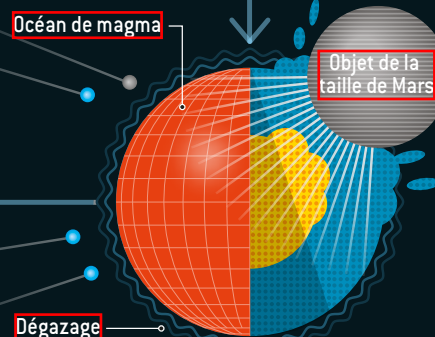
IL Y A 4,55 MILLIARDS D'ANNEES



IL Y A 4,47 MILLIARDS D'ANNEES

3 NAISSANCE DE LA LUNE

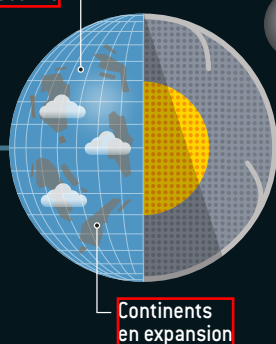
Un impact géant secoue la planète jusqu'au noyau, soufflant son atmosphère, perturbant le manteau et expédiant une grande partie de l'eau de la Terre dans l'espace. La Lune se forme à partir des débris rocheux.



7 DE LA PLANETE OCEAN...

Le bombardement terminé, la planète se refroidit. Les continents continuent à s'étendre, nourris par le matériau que déversent les volcans sous-marins.

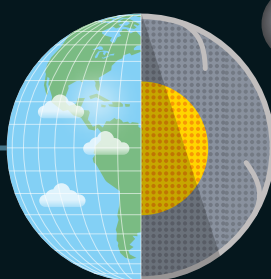
Océans

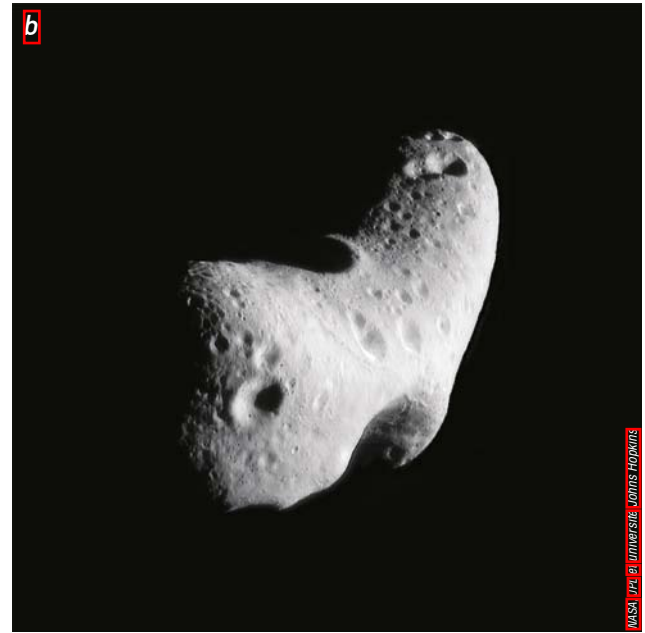


8 ... A LA PLANETE TERRE

Les continents et océans, parvenus à maturité, confèrent désormais à la Terre l'aspect qui nous est familier.

AUJOURD'HUI





entière : comment l'eau qui nous entoure est-elle arrivée sur Terre ?

Au début de sa formation, la Terre, comme les autres planètes rocheuses, a présenté une surface au moins partiellement fondue pendant quelques dizaines de millions d'années. Cette fusion est le résultat de l'importante énergie insufflée à la planète par les nuées de planétésimaux grands comme des montagnes qui s'abattaient sur elle. Il existe des preuves géochimiques que l'océan de magma de la Terre contenait de l'eau ; mais la roche brûlante en fusion ne conserve pas bien celle-ci, et une grande partie de l'humidité de la proto-Terre et des planétésimaux a été libérée sous forme de gaz ionisé et de vapeur. Une partie de l'eau se serait perdue dans l'espace, tandis qu'une certaine quantité serait retombée sur la Terre lors de son refroidissement et aurait été à nouveau emprisonnée dans la roche avant d'être entraînée en profondeur dans le manteau.

Par la suite, d'autres impacts gigantesques auraient encore modifié la teneur en eau de la surface et à faible profondeur. En particulier, la Terre semble être entrée en collision avec un objet (que les astrophysiciens ont nommé Théia) de la taille de Mars il y a environ 4,5 milliards d'années, éjectant un panache de matériau qui s'est refroidi puis aggloméré pour former la Lune. L'énergie de cet impact aurait soufflé une grande partie de l'atmosphère, vaporisé en un instant les éventuels océans d'eau et produit un

océan de magma de plusieurs kilomètres de profondeur. Que la Terre ait été pourvue d'eau ou non, le formidable choc de cet impact aurait vidé la planète de pratiquement toute son eau primordiale.

Des comètes riches en glace d'eau

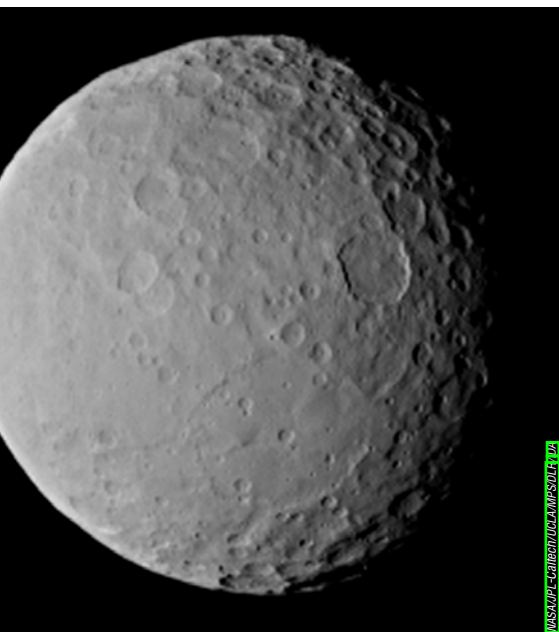
Les chercheurs étudient donc d'où l'eau est venue après la formation du système Terre-Lune et son refroidissement. On sait depuis les années 1950 que les comètes sont riches en glace d'eau, et qu'elles pénètrent dans le Système solaire interne en provenance de deux vastes réservoirs situés dans le Système solaire externe : la ceinture de Kuiper (qui commence autour de l'orbite de Pluton, voir la figure pages 30-31) et le nuage d'Oort (beaucoup plus lointain que la ceinture de Kuiper et qui s'étend peut-être jusqu'à mi-chemin de l'étoile la plus proche). Beaucoup de chercheurs ont donc supposé que les comètes étaient la principale source de l'eau terrestre.

Toutefois, cette idée a été mise en difficulté à partir des années 1980, quand des astronomes ont effectué les premières mesures du rapport deutérium/hydrogène (D/H) sur les comètes du nuage d'Oort. Le deutérium est un isotope de l'hydrogène (son noyau contient un proton et un neutron), et sa prévalence rapportée à celle de l'hydrogène normal (noyau à un proton) est un marqueur utile pour déterminer l'histoire d'un objet. Si l'océan de la

Terre était constitué de l'eau de comètes, son rapport D/H devrait correspondre environ à celui des comètes que nous observons aujourd'hui. Or les comètes du nuage d'Oort présentent des rapports D/H deux fois supérieurs à ceux de l'eau de mer ordinaire. L'essentiel de l'eau terrestre doit avoir une autre provenance.

Ces dernières années, des mesures sur des comètes de la ceinture de Kuiper ont fait état de rapports D/H comparables à ceux de l'océan, ce qui a relancé la théorie des comètes comme source d'eau de la Terre. Mais aujourd'hui, de nouvelles mesures contredisent ce résultat. En effet, les instruments de la sonde *Rosetta* de l'Agence spatiale européenne ont mesuré en 2014 pour la comète 67P/Tchourioumov-Guérassimenko (« Tchouri ») un rapport D/H trois fois supérieur à celui des océans. Ce résultat, couplé à des arguments s'appuyant sur la dynamique orbitale des corps nous arrivant des régions riches en comètes, suggère que même si des impacts cométaires ont pu, à l'occasion, apporter de l'eau sur Terre, ils n'en sont probablement pas la source principale.

Les astéroïdes sont l'autre possibilité qui vient aussitôt à l'esprit. Comme les comètes, ces planétésimaux ont participé à la formation des planètes. Les astéroïdes de la « ceinture principale » sont en orbite entre Mars et Jupiter, bien plus près de la Terre que la ceinture de Kuiper. De ce fait, une fois délogés de cette région, ils ont beaucoup plus de chances que les comètes



LE SYSTÈME SOLAIRE

regorge de corps riches en eau, qui auraient pu pourvoir aux océans terrestres : les comètes, telle 67P/Tchourioumov-Guérassimenko [a], les astéroïdes, à l'image d'Éros [b] ou encore les planètes naines, telle Cérès [c].

de venir heurter la Terre. La Lune est criblée de cratères qui trahissent un passé riche en bombardements d'astéroïdes. En outre, les nombreux fragments rocheux d'astéroïdes à la surface de la Terre, que l'on nomme dans ce cas météorites, nous rappellent que la Terre est encore bombardée régulièrement par des débris interplanétaires. En étudiant ces morceaux d'astéroïdes, nous pouvons entrevoir leur histoire plus intime et déterminer s'ils ont pu alimenter les océans terrestres. Des chercheurs ont effectivement montré que certaines familles de météorites ont des rapports D/H compatibles avec celui de l'eau de mer.

Le deutérium désigne les météorites

Cependant, les météorites, comme les astéroïdes dont elles sont issues, présentent un éventail de compositions et de contenus en eau. Les astéroïdes du bord interne de la ceinture principale, située environ à deux fois la distance Soleil-Terre, engendrent beaucoup de météorites rocheuses pauvres en eau. En revanche, les astéroïdes de régions plus lointaines sont relativement humides. Ils ont tendance à produire des météorites nommées chondrites carbonées, des conglomerats de minéraux hydratés et de carbonates, dans lesquels l'eau peut représenter plusieurs pour cent de la masse de la roche. L'un de nous (Edward Young) a étudié l'histoire de ces roches en s'inspirant des observations de l'eau s'écoulant à

travers les roches sur Terre. La formation des minéraux riches en eau contenus dans les chondrites carbonées s'est déroulée lors de réactions entre la roche et de l'eau sous forme soit liquide, soit gazeuse à des températures relativement basses, de l'ordre de quelques centaines de degrés Celsius. Sur Terre, ces minéraux se forment lorsque de l'eau percole à travers des roches poreuses. Au sein des météorites, ils témoignent d'une époque où de la glace d'eau a fondu et a coulé à travers la matrice rocheuse de l'astéroïde.

La source de chaleur qui a fait fondre cette glace d'eau était probablement l'aluminium 26, un élément radioactif qui existait en abondance dans le Système solaire jeune. Cet isotope de l'aluminium a libéré des quantités importantes d'énergie pendant quelques millions d'années, tandis qu'il se désintérait en magnésium 26. Aux confins du jeune Système solaire, au-delà de la ligne de neige, la chaleur émise par l'aluminium 26 a été pendant une courte période une puissante force qui a façonné la géologie et l'hydrologie des astéroïdes riches en éléments volatils.

Pendant quelques millions d'années après la formation du Soleil, de nombreux astéroïdes auraient contenu de l'eau liquide, entretenant des systèmes de circulation hydrothermale tels que ceux présents aujourd'hui au niveau des événements volcaniques le long des dorsales océaniques de la Terre. Les carbonates et minéraux hydratés se seraient formés tandis que des eaux saumâtres chaudes percolaient à travers les fentes et fissures au sein de l'astéroïde chauffé par la radioactivité. Puis, dans les toutes dernières étapes de la formation planétaire, la gravité des planètes géantes externes aurait perturbé la ceinture d'astéroïdes, propulsant des corps humides vers l'intérieur du Système solaire, sur des trajectoires les faisant entrer en collision avec la Terre et les autres planètes rocheuses.

Le scénario de l'apport d'eau tardif par les astéroïdes est étayé par certaines analyses chimiques sur Terre. Par exemple, des éléments tels que le platine sont sidérophiles, c'est-à-dire qu'ils ont une grande affinité chimique pour le fer et d'autres métaux. Sur la toute jeune Terre pas encore refroidie, ces éléments se seraient associés au fer et auraient été entraînés avec lui dans les profondeurs de la planète pour former le noyau. Il ne devrait donc rester

BIBLIOGRAPHIE

J. Encrenaz et J. Lequeux, **À la rencontre des comètes**, Belin-Pour la Science, 2015.

K. Altwegg et al., **67P/Churyumov-Gerasimenko, a Jupiter family comet with a high D/H ratio**, *Science*, en ligne le 10 décembre 2014.

A. Rubin, **Le secret des météorites primitives**, *Pour la Science*, n° 425, mars 2013.

A. Doressoundiram, **Au-delà de Neptune : la ceinture de Kuiper**, *Dossier Pour la Science*, n° 64, juillet-septembre 2009.

D. Lin et D. Dixon, **La naissance des planètes : tohu-bohu dans les nuages**, *Dossier Pour la Science*, n° 64, juillet-septembre 2009.

H. H. Hsieh et D. Jewitt, **A population of comets in the main asteroid belt**, *Science*, vol. 312, pp. 561-563, 2006.

que très peu d'éléments sidérophiles dans le manteau et la croûte. Comme ce n'est pas le cas, il y a eu un apport ultérieur de ces éléments. L'abondance du platine dans la croûte et le manteau terrestres serait alors due à un bombardement de chondrites, en quantité équivalente à environ 1 % de la masse de la Terre.

L'eau de ces chondrites pourrait avoir rempli les océans. Selon toute vraisemblance, toutes les planètes internes rocheuses, et pas seulement la Terre, ont été pilonnées par cette salve d'astéroïdes dans les étapes finales de la formation planétaire.

Des difficultés surgissent cependant dans ce scénario quand on étudie la teneur de l'eau des océans et des météorites en xénon et argon, éléments chimiquement inertes (ils ne prêtent pratiquement pas à des réactions chimiques). Du fait de cette propriété, ces éléments servent de marqueurs de divers processus physiques. Si les planètes rocheuses et les astéroïdes sont étroitement apparentés, leurs éléments inertes devraient être présents en proportions similaires. Mais les astrochimistes ont constaté que la proportion de xénon est bien plus faible dans les matériaux planétaires de la Terre et de Mars que dans les météorites.

Diverses réponses au problème du xénon manquant ont été avancées ces dernières années. Certaines remettraient les comètes sur le devant de la scène en tant que pourvoyeuses d'eau et d'autres éléments volatils. À l'heure où nous écrivons ces lignes, les chercheurs attendent avec impatience les premières mesures sur les gaz inertes de la comète Tchouri effectuées grâce à la sonde *Rosetta*. Ces mesures nous aideront peut-être à répondre de façon définitive à la question de l'origine des océans. Mais comme souvent en science planétaire, elles ont aussi de bonnes chances de soulever des questions plus difficiles qui continueront à alimenter le débat pendant plusieurs décennies.

Dans la quête pour déterminer qui des astéroïdes ou des comètes a rempli les océans de la Terre, il semble qu'il n'y ait pas de solution simple. Il se peut que le problème ne soit pas dans la nature,

mais dans les questions que nous posons. La dichotomie entre astéroïdes et comètes n'est peut-être pas aussi nette qu'on le croyait. L'un d'entre nous (David Jewitt), avec Henry Hsieh de l'Institut d'astronomie et astrophysique de l'Academia sinica de Taïwan, a récemment découvert des comètes dans la ceinture principale d'astéroïdes. Ces objets suivent des trajectoires comparables aux astéroïdes, mais ils éjectent de la poussière périodiquement au cours de leur révolution autour du Soleil, comme les comètes ordinaires. Ces objets sont riches en glace. Les notions de comètes et d'astéroïdes ne sont donc pas aussi claires et distinctes qu'on le pensait, ce qui pose des questions sur

Si la Terre avait la masse d'un Boeing 777, toute l'eau de la planète pèserait autant que deux passagers.

l'homogénéité de chaque réservoir de planétésimaux.

De plus, comme nous l'avons montré, la véritable question n'est sans doute pas tant de savoir pourquoi la Terre a autant d'eau, mais pourquoi elle en a si peu. Cette quantité somme toute limitée d'eau a pu être apportée par de multiples voies, qui dépendent étroitement de l'histoire exacte de la planète, des corps qui l'ont heurtée et des conditions initiales de leur formation.

Toutes ces ambiguïtés laissent une place considérable à d'autres scénarios plus exotiques pour l'apport de l'eau, scénarios peut-être improbables, mais qui ne peuvent pour autant être écartés.

En théorie, par exemple, il est possible que l'essentiel de l'eau de la Terre ait été présent dès les débuts de la planète. De nouvelles recherches suggèrent que des ions hydrogène du vent solaire auraient pu s'accumuler pour former des minéraux hydratés à la surface des particules de poussière interplanétaire. Ces poussières auraient alors transporté ce matériau aqueux jusqu'aux planétésimaux et aux planètes à un stade précoce de leur formation. Mais même ainsi, il est difficile de concevoir comment un réservoir aussi ancien se serait maintenu dans les profondeurs du manteau pour ne remonter qu'après les ravages des grands impacts qui ont marqué la fin de la formation de notre planète et la naissance de la Lune.

Des corps plus imposants que la plupart des comètes et astéroïdes ont également attiré l'attention récemment.

Considérons la « planète naine »

Cérès, qui, avec 900 kilomètres de diamètre, est le plus grand astéroïde du Système solaire.

En 2014, les chercheurs ont observé ce qui semblait être de la vapeur s'échappant de Cérès au rythme de 20 tonnes par heure, étayant l'idée que Cérès est riche en eau. La Terre est à peu près 6 000 fois plus massive que Cérès. Si, comme beaucoup le soupçonnent, Cérès est constituée pour moitié d'eau, alors l'inventaire total en eau (souterraine et de surface) de la Terre correspond à l'eau que contiendraient environ cinq corps semblables à Cérès.

Ce type d'objets était beaucoup plus répandu dans le Système solaire chaotique des débuts qu'ils ne le sont aujourd'hui, et il est facile d'imaginer que plusieurs corps du même type que Cérès aient pénétré jusque dans le Système solaire interne et frappé la Terre. Une poignée seulement de ces objets aurait suffi à doter notre planète d'un océan, sans même la contribution ultérieure de pluies de petits astéroïdes et de comètes.

La sonde *Dawn* de la Nasa est en orbite autour de Cérès depuis février 2015. Elle devrait permettre d'apercevoir de près sa glace et ses émissions gazeuses. Ses observations nous réservent, à n'en pas douter, de nouvelles surprises concernant l'histoire de l'eau sur notre planète et ailleurs. ■



Offre DÉCOUVERTE

POUR LA
SCIENCE

Le magazine mensuel
Pour la Science (12 n°s/an)

4,90 €/mois
seulement
ou 59€ pour 1 an

VOS AVANTAGES ABONNÉ

- ✓ 24 % d'économie et plus par rapport au prix en kiosque
- ✓ L'envoi des magazines en avant-première
- ✓ La garantie de ne manquer aucun numéro

BULLETIN D'OFFRE DÉCOUVERTE

A compléter et à retourner, accompagné de votre règlement, dans une enveloppe non affranchie, à : Groupe Pour la Science Service abonnements - Boîte réponse 90 382-75 281 Paris cedex 08

POUR LA
SCIENCE

1. MA FORMULE

☐ **OUI, je m'abonne à l'Offre Découverte à 4,90 € par mois** ou 59 € pour 1 an. Je reçois le magazine *Pour la Science* (12 n°/an) et bénéficie des versions numériques offertes sur www.pourlascience.fr !

Mon e-mail obligatoire pour l'accès aux contenus numériques (à remplir en majuscules)

A réception de votre bulletin, comptez 5 semaines pour recevoir votre n° d'abonné. Passé ce délai, merci d'en faire la demande à abonnements@pourlascience.fr

2. MES COORDONNÉES

Nom : _____ Prénom : _____
Adresse : _____
Code postal : _____ Ville : _____ Pays : _____ Tél. : _____

Pour le suivi client (facultatif)

3. MON MODE DE RÈGLEMENT

☐ Je règle par prélèvement **4,90 € par mois**. Je remplis l'autorisation ci-dessous en joignant impérativement un IBAN/BIC.

* Pour la France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'étranger (pays de la zone SEPA) : 5,90 €/mois. Abonnement renouvelable tacitement à échéance et dénonçable à tout moment avec un préavis de 3 mois.

AUTORISATION DE PRÉLÈVEMENT PAR MANDAT 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.

1 - COORDONNÉES DU TITULAIRE DU COMPTE

Nom, prénom : _____
Adresse : _____
Code postal : _____ Ville : _____ Pays : _____

2 - COORDONNÉES BANCAIRES

BAN : _____
BIC : _____
Type de paiement : Paiement récurrent/répétitif

☐ Je préfère régler mon abonnement d'un an en **une seule fois 59 €**

* Offre valable en France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter : Europe 12€ - autres pays 25€

☐ Par chèque à l'ordre de *Pour la Science* ☐ Par carte bancaire N° _____
Date d'expiration : _____ Clé : _____

3 - DATE ET SIGNATURE OBLIGATOIRES

A _____
Date : _____
Signature : _____

NOM DU CREA NCIER : **ICS** N° FR92ZZ426900
Pour la Science - 8 rue Férou - 75006 Paris
N° de référence unique de mandat (RUM) : _____

* Carte réservée au service abonnements. Ne pas inscrire

En application de l'article 27 de la loi du 6 janvier 1978, les informations ci-dessus sont indispensables au traitement de votre commande. Elles peuvent donner lieu à l'exercice du droit d'accès et de rectification auprès du groupe *Pour la Science*. Par notre intermédiaire, vous pouvez être amené à recevoir des propositions d'organismes partenaires. En cas de refus de votre part, merci de cocher cette case ☐.

PLS454 Offre réservée aux nouveaux abonnés de PLS jusqu'au 31/03/2015

Loin de mériter leur réputation
d'oiseaux stupides, les poules ont
des capacités cognitives étonnantes...

L'intelligence de la poule

Carolynn Smith et Sarah Zielinsky

Rusé comme un renard, malin comme un singe, bavard comme une pie... Quel est cet animal qui étonne aujourd'hui par son intelligence ? Il ne s'agit pas d'un de nos cousins primates, mais d'une espèce plus inattendue : *Gallus gallus domesticus* – autrement dit, la poule domestique !

Sur le plan cognitif, celle-ci appartient à une classe plutôt brillante : les oiseaux ont de nombreuses facultés remarquables, autrefois considérées comme l'apanage de l'homme. Ainsi, les pies reconnaissent leur reflet dans un miroir. Les corneilles de Nouvelle-Calédonie fabriquent des outils, un savoir-faire qu'elles se transmettent de génération en génération. Les perroquets gris du Gabon sont capables de compter, de classer des objets en fonction de leur couleur et de leur forme, et d'apprendre des mots humains. Et un cacatoès à huppe jaune dénommé Snowball sait danser en rythme.

Au sein de ces petits génies à plume, on imagine rarement la poule parmi les

premiers de la classe. Pourtant, ces dernières années, les éthologues ont découvert qu'elle ne mérite pas sa réputation de cancre. Elle est fûtée et a des capacités de communication voisines de celles de certains primates. Quand elle prend des décisions, elle tient compte de son expérience et de ses connaissances sur la situation. Elle peut résoudre des problèmes complexes et se montrer compatissante envers des individus en danger.

Est-ce à dire que la poule est un petit Einstein ? Plus probablement, certaines capacités cognitives classiquement attribuées aux seuls primates sont davantage répandues qu'on ne le pensait. Quoi qu'il en soit, ces découvertes obligent à une réflexion éthique sur les élevages de poules, conçus pour optimiser les rendements sans considération du bien-être des animaux.

Il a fallu presque un siècle aux chercheurs pour comprendre ce qui se passe dans le cerveau des poules, gros comme une noisette. Le biologiste norvégien Thorleif



LES AUTEURS



Carolynn SMITH est chercheuse à l'université Macquarie, à Sydney, en Australie. Elle est colauréate du prix Eureka du Muséum australien.

Sarah ZIELINSKI est journaliste scientifique à Washington, aux États-Unis.

L'ESSENTIEL

■ **Nombre d'études** indiquent que la poule domestique est bien plus intelligente qu'on ne le pensait.

■ **Elle est rusée,** empathique et a des capacités de communication élaborées.

■ **Une telle intelligence est** sans doute assez répandue dans le règne animal.

■ **Elle impose un** questionnement éthique sur la façon dont on traite les poules dans les élevages industriels.

Photo: iStockphoto.com / J. K. K. K.

Schjelderup-Ebbe a mené les premières études dans les années 1920, établissant que ces oiseaux ont une organisation hiérarchique : les mâles dominants ont un accès prioritaire à la nourriture et aux femelles, et ils punissent de violents coups de bec les subordonnés qui tentent d'usurper leurs privilèges. Le chercheur a nommé cette organisation *pecking order* (littéralement « ordre de picorage »).

Le langage de la poule

Quelque trente ans plus tard, Nicholas et Elsie Collias, tous deux à l'université de Californie à Los Angeles, ont montré que les poules ont un répertoire d'environ 24 cris différents, souvent associés à des événements particuliers. Ainsi, quand elles perçoivent une menace venue du ciel, un aigle affamé par exemple, elles s'accroupissent et émettent doucement un « iiii » aigu. Face à un prédateur terrestre, elles gloussent. Lorsque les mâles découvrent de la nourriture, ils poussent une série de « cot-cot » animés, en particulier si une femelle est dans les parages.

Ces premières découvertes suggéraient que les vocalisations des poules codent des informations spécifiques, supposées provoquer certaines réponses chez les congénères. Leur signification précise n'a cependant été comprise que dans les années 1990. À cette époque, Chris Evans, de l'université Macquarie à Sydney, en Australie, et d'autres chercheurs ont proposé des rencontres virtuelles aux oiseaux, en entourant leur cage de téléviseurs qui projetaient des images d'animaux variés – un partenaire sexuel, un rival, un prédateur. Une poule voyait ainsi tantôt un faucon la survolant, tantôt un renard courant vers elle, tantôt un coq émettant une série de « cot-cot »... Les éthologues enregistraient ensuite la réaction de l'oiseau et de son entourage.

Grâce à ce dispositif, ils ont confirmé que les gloussements, caquètements et autres dandinements des poules constituent un complexe système de communication. Ainsi, les oiseaux se comportent comme s'ils avaient eux-mêmes vu un prédateur aérien dès lors qu'ils entendent le cri d'avertissement d'un congénère. Pour reprendre la terminologie behavioriste (un courant de psychologie focalisé sur l'étude du comportement), les cris des poules sont « fonctionnellement référentiels », c'est-à-dire qu'ils se réfèrent à des objets

et des événements spécifiques, à l'instar des mots humains. Ces cris semblent créer chez les oiseaux qui les entendent une image mentale déclenchant une réponse adaptée – par exemple fuir un prédateur ou s'approcher d'une source de nourriture.

Autre surprise, les poules ne communiquent pas leurs informations à n'importe qui. Quand un coq voit une menace dans le ciel, il envoie un cri d'alerte s'il a remarqué une femelle à proximité, mais reste silencieux en présence d'un mâle rival. Les femelles sont tout aussi sélectives : elles ne sonnent l'alarme que si elles ont des poussins.

Ces découvertes suggèrent que les cris ne sont pas qu'un simple réflexe traduisant l'état intérieur d'un oiseau – par exemple « effrayé » ou « affamé ». Les poules semblent interpréter les événements et réfléchir avant d'agir, une caractéristique habituellement associée aux mammifères à gros cerveau.

Une question se pose alors : les poules sont-elles capables de transmettre de fausses informations pour en tirer bénéfice ? La réponse est venue de l'étude de leurs comportements de séduction.

L'appât du grain

Les éthologues savent depuis les années 1940 que les poules annoncent la découverte de nourriture par des démonstrations visuelles complexes. La plus impressionnante est une série d'actions appelée *tidbitting* (qu'on peut traduire par « parade alimentaire »), où un mâle dominant remue rapidement la tête tout en ramassant et relâchant les aliments à de nombreuses reprises, afin de signaler sa trouvaille à une femelle. Cette annonce théâtrale est sa principale arme de séduction.

Et si c'est un coq subordonné qui tombe sur la précieuse et convoitée réserve de nourriture ? Les chercheurs pensaient qu'il ferait profil bas pour s'éviter les foudres du mâle dominant, un jaloux susceptible de poursuivre, becqueter et éperonner les concurrents trop entreprenants envers ses femelles. Mais la réalité n'est pas si simple et la ruse est de mise dans le poulailler !

Les conspirations de basse-cour sont longtemps passées inaperçues, car les interactions sont brèves et souvent secrètes au sein des groupes, les volailles préférant se cacher dans les hautes herbes et les buissons. L'une d'entre nous (Carolynn Smith) a alors mis en place un dispositif qu'elle

a qualifié de *Big Brother* des poules : un réseau de caméras haute définition et de microphones, installé dans les volières de l'université Macquarie (de grands espaces en plein air entourés de filet) et destiné à capter tous les mouvements et les cris des oiseaux.

Big Brother chez les volailles

Les éthologues ont ensuite analysé les enregistrements. Comme prévu, le mâle dominant de chaque groupe s'affirmait comme le maître du territoire à grand renfort de « cocorico », enchaînait les parades alimentaires pour attirer les femelles et poussait des cris d'alarme quand il détectait un prédateur aérien. Mais les mâles subordonnés se sont révélés plus fûtés que prévu. Ils ont utilisé une tactique furtive inattendue chez des oiseaux en ne réalisant que la partie visuelle de la parade alimentaire : ils en pratiquaient les mouvements de tête caractéristiques, mais sans émettre les sons « cot-cot ». Ils ont ainsi créé un nouveau signal, susceptible d'attirer discrètement une femelle sans provoquer le courroux du coq dominant.

Une telle flexibilité comportementale a étonné les chercheurs. Et ils n'étaient pas au bout de leurs surprises...

Pour examiner plus en détail le comportement des volailles, ils avaient besoin de s'en rapprocher encore. En effet, les vocalisations des poules étaient souvent si ténues qu'elles échappaient aux microphones disséminés un peu partout. Pour les enregistrer, il fallait équiper les oiseaux de petits sacs munis de microphones sans fil très légers. Mais les sacs de taille poulet sont peu communs dans les magasins de sport ! Carolyn Smith a alors trouvé les candidats idéaux : des soutiens-gorge (de préférence noirs pour ne pas contraster avec les plumes), qu'elle a transformés en harnais où elle a fixé les microphones. Une fois sanglé sur la taille d'une poule, cet appareil de fortune – affectueusement surnommé *Chicken Big Brother 2.0* – enregistrait tout ce qu'elle disait et entendait.

Carolynn Smith était particulièrement intriguée par les cris d'alarme des mâles qui apercevaient un prédateur aérien, car ils augmentaient le risque pour le coq d'être lui-même repéré et attaqué. Les éthologues supposaient que le mâle avait tant besoin de protéger sa femelle et ses petits que le jeu en valait la chandelle. Les coqs étaient-ils



donc d'héroïques guetteurs prêts à remplir leur tâche au péril de leur vie ?

Pas tout à fait. La plongée dans l'intimité des volailles grâce à *Chicken Big Brother 2.0* a révélé que les mâles ont parfois des motivations moins honorables. Ils sont en effet plus susceptibles de crier quand ils sont à l'abri sous un buisson et que les autres mâles sont à découvert, exposés au prédateur. Si le coq est chanceux, il fera d'une pierre deux coups et protégera sa femelle tout en se débarrassant d'un rival.

Cette stratégie est appelée compensation de risque et c'est un comportement que nous partageons avec les poules. Beaucoup d'entre nous prennent plus de risques en présence d'un facteur atténuant. Par exemple, nous roulons souvent plus vite quand nous portons une ceinture de sécurité ou quand la voiture est équipée d'un système de freinage antiblocage. De même, les coqs prennent plus de risques s'ils se sentent en sécurité.

Des mères poules

La liste des capacités cognitives des poules s'allonge de jour en jour. Une étude publiée en 2011 par Joanne Edgar, de l'université de Bristol en Grande-Bretagne, a révélé que ces oiseaux ressentent de l'empathie. Dans cette étude, un souffle d'air – inoffensif – ébouriffait le plumage de poussins sous l'œil de leur mère. Les poussins percevaient le souffle comme une menace et présentaient des signes classiques de stress, tels qu'une augmentation du rythme cardiaque et une diminution de la température de l'œil. Et

L'ÉLEVAGE EN BATTERIE, comme dans cette ferme à Fleurus, en Belgique, convient-il à des animaux aussi intelligents ?

Des poussins mathématiciens

Un poussin suit sa mère partout, un comportement essentiel à sa survie. Mais quand on l'élève près d'un objet quelconque, il se trompe et cherche aussi à rester à proximité, ce qui permet de tester ses capacités cognitives. Ainsi, des poussins élevés près d'un objet marqué d'un triangle se dirigent ensuite vers cette forme géométrique même quand elle est partiellement occultée, preuve qu'ils savent la compléter mentalement. Quand on les élève avec trois objets, ils se dirigent de préférence vers les groupes comprenant ce nombre d'entités, même si leur aspect global diffère : ils savent donc compter au moins jusqu'à trois !

Des fanions sous le bec

Les coqs sont parés d'étranges cravates : les caroncules, des excroissances charnues qui pendent sous leur bec. À quoi servent-elles ? Des décennies de recherche avaient échoué à y répondre. L'une d'entre nous (Carolynn Smith) et ses collègues ont résolu l'énigme grâce à un coq animé en 3D.

Quand les coqs effectuent une parade alimentaire – une série de mouvements de la tête désignée par le terme anglais *tidbitting* et destinée à signaler de la nourriture à des compagnes potentielles –, leurs caroncules se balancent, allant parfois jusqu'à frapper le côté de leur tête. Carolynn Smith les soupçonnait de rendre ces mouvements plus voyants et d'augmenter ainsi les chances du mâle d'attirer les femelles. Pour le vérifier, elle a étudié la réaction des poules face à la parade alimentaire d'un coq

virtuel, dont elle modifiait la flexibilité et la taille des caroncules.

Et ces dernières agissaient bien comme un fanion pour les femelles, qui voyaient mieux le mâle annonçant la découverte de nourriture. L'ornement a un coût pour le coq : des caroncules plus grosses sont associées à une production plus importante de testostérone, ce qui affaiblit le système immunitaire. Mais l'investissement en vaut la peine, car il permet au mâle de s'accaparer les femelles.

- C. L. et S. Z.



LES CARONCULES (les bouts de peau rouges sous le bec) sont comme des fanions que le coq agite pour signaler la découverte de nourriture aux femelles.

© P. J. B. / A. S. / ILLUSTRATION.COM

007, reine de l'évasion

Lors d'une expérience de Carolynn Smith, les poules devaient patienter derrière une porte télécommandée. De l'autre côté les attendait une vidéo d'un mâle avec de la nourriture. Mais l'une des volailles, surnommée « 007 » en raison des chiffres 0 et 7 inscrits sur son brassard orange, s'est impatientée. Elle s'est mise à examiner de près le mécanisme d'ouverture, puis à arracher le fil qui commandait le verrou. La porte s'est ouverte et 007 est sortie de la cage. Par la suite, elle n'a plus jamais attendu. Malgré plusieurs changements de configuration du verrou, elle a toujours réussi à ouvrir la porte !

les mères qui observaient leur progéniture exhibaient les mêmes signes, même si elles ne recevaient pas le souffle d'air elles-mêmes. Elles redoublaient ensuite de glossements en direction de leurs poussins. Cette expérience révèle que les poules prennent en compte le sort de leurs congénères et manifestent une contagion émotionnelle.

De l'intelligence partout ?

Et dans le poulailleur, l'intelligence commence au berceau ! Giorgio Vallortigara, de l'université de Trente en Italie, a montré que les poussins sont des calculateurs émérites et de fins géomètres (voir l'encadré dans la marge page précédente). Ils savent compter et additionner ou soustraire de petits nombres. Ils sont également capables d'identifier des triangles même quand ces derniers sont partiellement cachés. Cette capacité à compléter mentalement les formes leur serait utile pour reconnaître leur mère dans la végétation.

Comment se fait-il que la poule domestique ait de telles capacités cognitives, alors qu'elle n'est pas étroitement apparentée à d'autres espèces d'oiseaux connues pour leur intelligence ? Peut-être l'intelligence

est-elle plus répandue dans le règne animal qu'on ne le pensait auparavant. Elle apparaîtrait ainsi chaque fois que les conditions sociales la favorisent, au lieu d'être un petit bijou d'évolution nécessitant une conjonction rare de multiples facteurs environnementaux et physiologiques.

Pour sa part, la poule a vraisemblablement hérité ses prouesses cognitives de ses ancêtres sauvages, dont le principal est le coq bankiva, qui vit aujourd'hui dans les forêts d'Indonésie et de Chine. Son mode de vie renseigne sur celui des volailles ancestrales. Ces dernières formaient des groupes de 4 à 13 individus d'âges différents. Un mâle et une femelle dominants dirigeaient chaque groupe et avaient la priorité pour la nourriture, l'espace ou le sexe. Les mâles passaient une grande partie de leur temps à parader devant les femelles et à leur apporter de la nourriture. Les femelles observaient attentivement ce manège et jugeaient les coqs sur leurs actions présentes et passées, évitant ceux qui se montraient trompeurs ou déplaisants. La réputation d'un coq conditionnait son succès reproductif et la compétition pour les femelles était féroce.

La vie dans une société complexe a ainsi entraîné l'accroissement des capacités

mentales des poules ancestrales. D'autres pressions évolutives y ont contribué. Les volailles devaient affronter une série de menaces extérieures – incluant des prédateurs tels que les renards et les faucons –, ce qui nécessitait diverses stratégies d'échappement. Vie sociale et dangers environnants ont donc conduit les poules à élaborer des réponses variées, ainsi que des moyens de communiquer à propos de toutes ces situations. Ces caractéristiques ont persisté chez leurs descendants domestiques.

De telles capacités poussent à s'interroger sur la façon dont l'homme traite ces animaux, qu'il consomme par milliards. Des oiseaux qui devraient vivre en petits groupes dans la nature sont parfois parqués dans des élevages de 50 000 individus. La durée de vie, potentiellement de 10 ans, tombe à 6 semaines chez les poules élevées pour leur viande. Elles sont tuées aussi jeunes car elles ont été génétiquement sélectionnées pour une croissance rapide, de sorte que si on les laissait prendre de l'âge, elles seraient victimes de maladies cardiaques, d'ostéoporose et de fractures

osseuses. Les poules pondeuses ne s'en tirent guère mieux, vivant seulement 18 mois sur une surface de la taille d'une feuille de papier. Leur flexibilité et leur adaptabilité, héritées de leur ancêtre, ont probablement contribué à leur perte, permettant aux oiseaux de survivre dans les rudes conditions des élevages.

Cependant, leur situation commence à s'améliorer. En Europe et dans certains États américains, telle la Californie, de nouvelles lois imposent une amélioration des conditions d'hébergement des poules pondeuses, en grande partie grâce aux consommateurs, qui poussent pour une meilleure prise en compte du bien-être animal et pour une nourriture plus saine. En Australie, les producteurs mettent en avant leurs bonnes pratiques en matière d'élevage, afin de séduire une population croissante de consommateurs éthiques. Il reste cependant beaucoup à faire.

Et beaucoup à apprendre. Les chercheurs commencent juste à percevoir l'intelligence des poules. Mais une chose est déjà sûre : il ne faut pas les prendre pour des dindes ! ■

BIBLIOGRAPHIE

C. L. Smith et J. Johnson, *The chicken challenge: What contemporary studies of fowl mean for science and ethics*, *Between the Species*, vol. 15, pp. 75-102, 2012.

C. L. Smith et al., *Tactical multimodal signalling in birds: facultative variation in signal modality reveals sensitivity to social costs*, *Animal Behavior*, vol. 82, pp. 521-527, 2011.

B. Heinrich et T. Bugnyar, *Les corbeaux sont-ils intelligents ?*, *Cerveau&Psycho*, n° 23, 2007.



Dans l'intérêt de la science

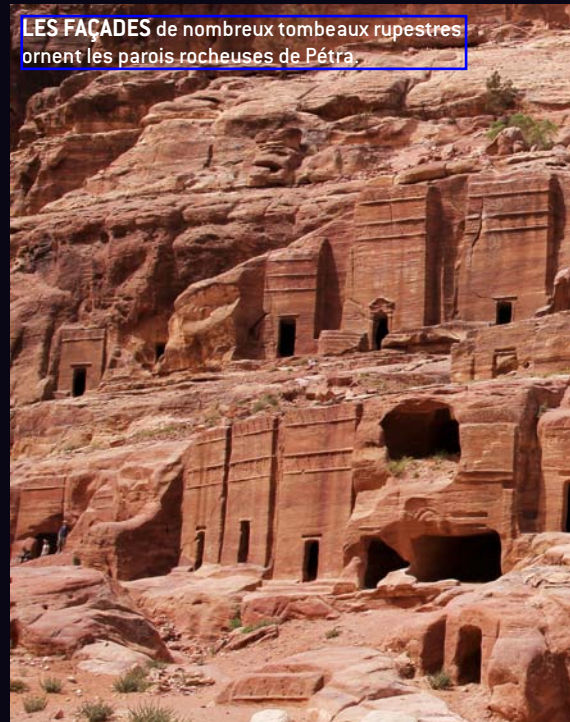
mathieu vidard | **la tête au carré 14:05-15:00**

france inter
intervenez
franceinter.fr



A HEGRA, des tombeaux rupestres nabatéens creusés dans la roche.

LES FAÇADES de nombreux tombeaux rupestres ornent les parois rocheuses de Pétra.



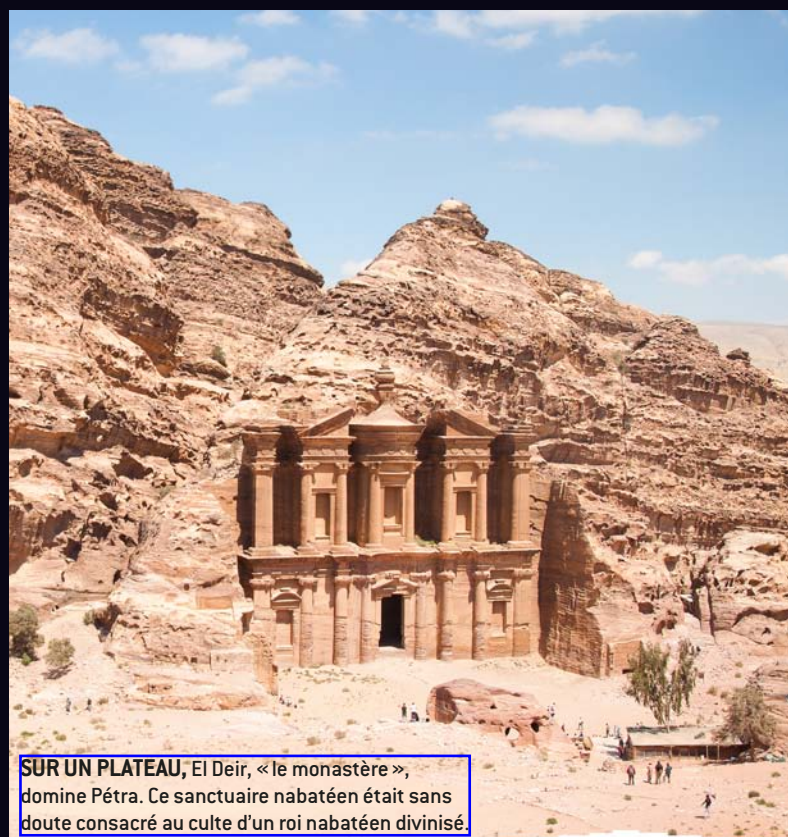
Laïla Nehmé et Michel Mouton

Comment, au III^e siècle avant notre ère, une tribu caravanière a-t-elle pu ériger un riche royaume dominant le nord-ouest de l'Arabie ? Les fouilles de ses deux principales cités, Pétra et Hégra, apportent des réponses.

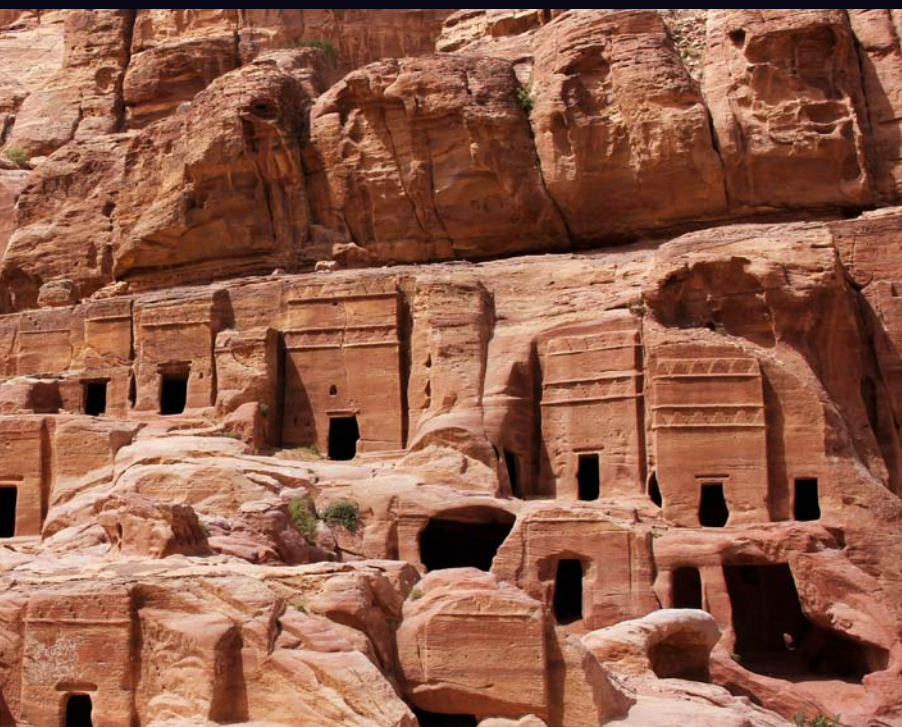
Sur les traces des

Au nord-ouest de la péninsule Arabique, deux cités anciennes témoignent de la grandeur d'un peuple nomade qui, entre le III^e siècle avant notre ère et le début du II^e siècle de notre ère, érigea un riche et vaste royaume au cœur de l'Arabie : les Nabatéens. La capitale du royaume, Pétra en Jordanie, célèbre pour ses magnifiques façades rupestres taillées dans le rocher, continue de livrer ses secrets. L'exploration de Hégra en Arabie saoudite, grande ville à la frontière sud du royaume, commence à peine... Une archéologie interdisciplinaire lève peu à peu le voile sur ces deux joyaux du Proche-Orient antique, inscrits au Patrimoine mondial depuis 1985 et 2008 respectivement.

Le royaume nabatéen est une entité politique dont on retrouve la trace à l'époque hellénistique – à partir du III^e siècle avant notre ère et, surtout, du siècle suivant. À son apogée, il s'étendait de Damas au nord au Hijâz au sud, le rebord montagneux qui surplombe la mer Rouge en Arabie saoudite. Deux régions désertiques le bordaient à l'ouest et à l'est : le Néguev, dans le sud d'Israël, et le désert syro-arabe. Avec Bosra en Syrie, Pétra et Hégra constituent les principaux sites archéologiques de la civilisation nabatéenne, mais nombre d'autres lieux ont livré des vestiges nabatéens, tels Wadi Ram et al-Bad' plus au sud, ou Avdat dans le Néguev (voir la figure page 44).



SUR UN PLATEAU, El Deir, « le monastère », domine Pétra. Ce sanctuaire nabatéen était sans doute consacré au culte d'un roi nabatéen divinisé.



© PRO-ON SHUTTERSTOCK.COM

Nabatéens



© HADEK SURGULEVSKI/SHUTTERSTOCK.COM

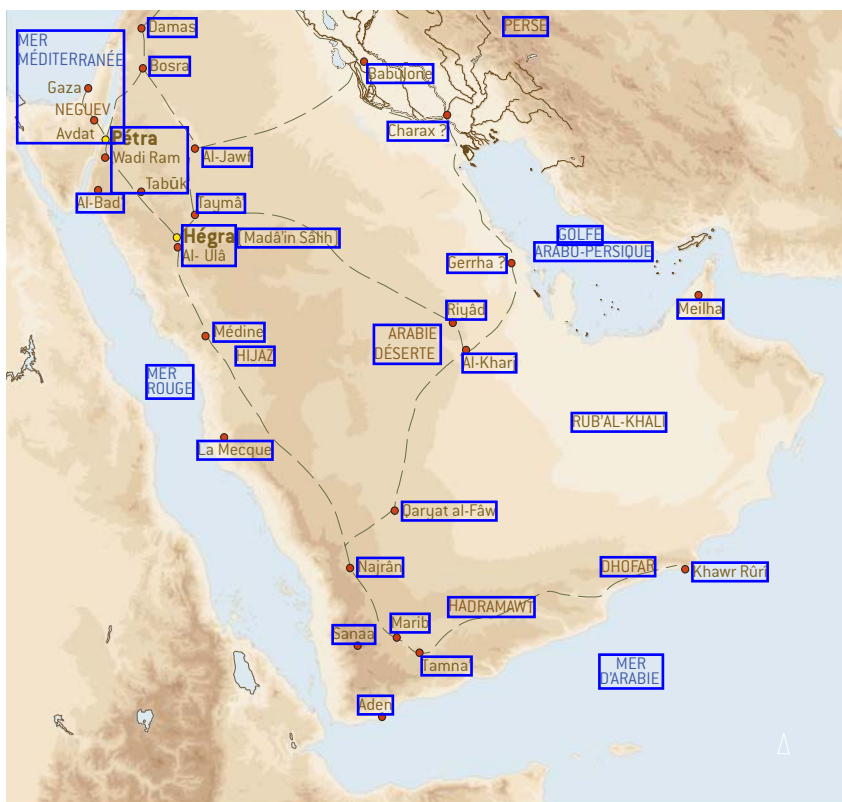
L'ESSENTIEL

- **Peuple de marchands,** les Nabatéens ont formé, à partir du III^e siècle avant notre ère, un riche royaume aux confins du désert arabe.
- Contrôlant les voies caravanières par lesquelles parvenaient les aromates jusqu'en Méditerranée, ils ont fait de Pétra, en Jordanie, et Hégira, en Arabie saoudite, deux importants carrefours commerciaux.
- Les fouilles de Pétra et de Hégira révèlent les étapes de l'installation des Nabatéens, qu'ils connaissaient l'écriture et qu'ils étaient aussi cultivateurs et bâtisseurs.



© STEVEN SUTHERLAND/SHUTTERSTOCK.COM

À PÉTRA, la façade du tombeau rupestre Al-Khaznah, « le trésor », se dresse à l'extrémité du Siq, un étroit défilé rocheux.



PERDUES AU MILIEU DU DÉSERT, Pétra et Hégra constituaient des étapes indispensables sur la route de l'encens et des aromates. Produites au sud, dans le Dhofar et le Hadramawt, ces denrées prisées étaient acheminées jusqu'aux ports méditerranéens tels que Gaza. Les Nabatéens, qui contrôlaient les deux cités, avaient un quasi-monopole sur certaines de ces voies caravanières (en pointillé).

CHRONOLOGIE

V^e-IV^e siècle avant notre ère

Des nomades nabatéens installent des campements provisoires à Pétra. Début de l'occupation à Hégra. À la fin de la période, les Nabatéens sont déjà bien impliqués dans le commerce de l'encens et des aromates.

III^e-II^e siècle avant notre ère

Urbanisation progressive du centre de Pétra. Les Nabatéens frappent désormais leur propre monnaie, d'abord anonyme. Au II^e siècle, les premiers rois nabatéens apparaissent dans les textes.

I^{er} siècle avant notre ère - I^{er} siècle de notre ère

Apogée du royaume nabatéen. Les plus grands monuments de Pétra et de Hégra sont construits ou taillés dans le rocher.

106 de notre ère

L'empereur romain Trajan annexe le royaume nabatéen et forme la nouvelle province romaine d'Arabie.

Les Nabatéens sont connus pour avoir été de riches marchands engagés, dès le III^e siècle avant notre ère, dans le commerce à longue distance de l'encens et des aromates. Caravaniers, ils acheminaient les marchandises à dos de chameau depuis les régions productrices, le Dhofar et le Hadramawt, en Arabie heureuse (le Yémen actuel) jusqu'aux ports de la Méditerranée tels que Gaza. Fins connaisseurs de la région, ils contrôlaient en grande partie ce commerce très lucratif. Toutefois, les fouilles montrent peu à peu qu'ils étaient aussi cultivateurs, bâtisseurs, scribes et bien d'autres choses encore.

La piste du tailleur de pierre

Il y a quelques années, Jean-Claude Bessac, spécialiste de la taille de la pierre à l'Institut français du Proche-Orient, découvrait à Pétra, à l'intérieur d'un monument rupestre inachevé d'accès difficile, voire dangereux (voir la figure page 47), un outil de taille nabatéen à percussion lancée (destiné à

frapper directement la pierre) parfaitement conservé. Il s'agit d'un pic en fer de 32,6 centimètres de long et d'environ 2,5 kilogrammes, évidemment retrouvé sans le manche en bois qui servait à le manier (voir l'encadré page ci-contre). Doté de deux pointes pyramidales, il laisse sur la pierre de longs sillons légèrement arqués et espacés.

Découverte restée unique à ce jour, cet outil a pourtant été largement utilisé dans les chantiers rupestres nabatéens, à en croire les traces dans la roche. Il a probablement été oublié par le dernier tailleur de pierre à avoir participé au creusement de ce que les professionnels des mines nomment une galerie de pilotage, c'est-à-dire une galerie d'avancement horizontale, de forme irrégulière, qui caractérise le début du creusement des chambres rupestres.

L'anecdote illustre parfaitement l'adage selon lequel on ne trouve que ce que l'on cherche. Cet outil oublié par un tailleur de pierre distrahit ne pouvait être exhumé, 2000 ans plus tard, que par un autre tailleur de pierre qui cherchait à comprendre comment les Nabatéens façonnaient leurs monuments rupestres. Jean-Claude Bessac a étudié en détail les traces laissées par ce pic et nombre d'autres outils sur les monuments nabatéens, en particulier à Hégra. Grâce à ce travail minutieux, il a restitué le processus de taille des façades et des chambres rupestres, au point de déterminer, par exemple, le nombre de « mains » différentes ayant participé à la taille d'un tombeau... ou encore la proportion de gauchers (voir l'encadré page ci-contre).

D'autres traces anodines dans les roches des cités nabatéennes sont riches en information. Le royaume nabatéen compte plusieurs milliers d'inscriptions, le plus souvent très courtes. Parmi elles, de nombreux graffitis témoignent de l'évolution de l'écriture nabatéenne et du chemin qui l'a conduite de l'écriture araméenne d'époque hellénistique, dont elle est dérivée, à l'écriture arabe telle qu'on la connaît aujourd'hui, sa descendante directe, dont les témoignages les plus anciens, avec des lettres bien formées et parfaitement identifiables, remontent au VI^e siècle de l'ère chrétienne (voir l'encadré page 46).

Ces deux exemples, l'un pris au domaine de la taille de la pierre, l'autre à l'épigraphie, montrent que la progression des connaissances peut se faire à partir de vestiges *a priori* peu imposants du point de vue

touristique ou même patrimonial: un tombeau inachevé d'un faible intérêt esthétique d'un côté, d'insignifiants graffitis gravés sur les rochers du désert de l'autre. Mais il arrive que certaines questions résistent à des dizaines d'années d'opérations de fouille spécialisée. C'est le cas à Pétra où, notamment, une interrogation persistait: quand et comment ce site perdu au milieu de montagnes inhospitalières est-il devenu la capitale d'un peuple de marchands raffinés? Comment le campement précaire des premières tribus nabatéennes s'est-il

transformé en une véritable ville? Comment, en d'autres termes, s'est produite la sédentarisation des Nabatéens? Ces dernières années, cette question a ainsi fait l'objet d'une attention particulière et de fouilles de plus grande envergure, nécessitant l'intervention d'équipes interdisciplinaires qui interviennent de concert dans leurs spécialités respectives.

Les fouilles archéologiques menées à Pétra depuis 1929 ont porté principalement sur les vestiges les plus visibles et les plus monumentaux, qui datent des périodes

LES AUTEURS



Laïla NEHME est directrice de recherche du CNRS au sein de l'UMR 8167 Orient & Méditerranée, à Ivry-sur-Seine. Michel MOUTON est directeur du Centre français d'archéologie et de sciences sociales, à Djeddah en Arabie saoudite.

Quand un tombeau inachevé révèle son histoire

À Hégra, un tombeau rupestre inachevé et peu élégant, le tombeau IGN 101 (ci-dessous), est particulièrement riche d'enseignements sur la façon dont les Nabatéens construisaient non seulement leurs monuments rupestres, creusés dans la pierre, mais aussi leurs bâtiments faits d'assemblages de pierres.

Avant le début du chantier, la paroi rocheuse naturelle ressemblait certainement au massif de grès qui occupe le tiers droit du cliché: un grès alvéolé que traversent des joints de stratification horizontaux et que des remontées salines du sol ont érodé à sa base. Il est clair que les tailleurs de pierre ont tenu compte, au départ, de la qualité des bancs de grès, parfaitement visibles à la surface du massif, de manière à placer les éléments les plus moulurés de la façade dans des strates de grès sain.

D'après Jean-Claude Bessac, spécialiste de la taille de la pierre, ils ont été surpris par la présence de grandes et petites fissures verticales qui ont nécessité de faire tomber un grand pan de rocher, resté ensuite à l'état naturel puisqu'il n'y a aucune trace d'outil dans la moitié inférieure du monument. Fort mécontent du résultat, le commanditaire, un riche nabatéen qui avait sans doute payé cher l'emplacement où il devait faire tailler son tombeau, a exigé que la chambre funéraire destinée à recevoir les

inhumations des membres de sa famille soit creusée quand même (on n'en distingue que la porte). Bien maigre consolation, même si on peut imaginer qu'il a obtenu un rabais important de la part du maître d'œuvre.

Ce tombeau inachevé permet deux autres observations intéressantes. En dessous des demi-merlons à degrés est taillée une grande moulure concave dite gorge égyptienne. Le creusement de cette gorge a

été réalisé, au pic, par deux tailleurs de pierre travaillant de part et d'autre de la façade. On peut cependant voir, au centre de la gorge (cercle), que son creusement est resté inachevé, ce qui montre que les deux tailleurs de pierre ne se sont jamais rejoints au milieu.

En dessous de la gorge inachevée, on distingue des tranchées dites de havage (flèches), qui séparent des blocs prêts à être extraits exactement comme dans une carrière traditionnelle, où les blocs sont détachés à l'aide de coins (en fer chez les Nabatéens) enfoncés à la masse. La présence de ces tranchées montre que les chantiers rupestres fonctionnaient en partie comme des carrières et qu'ils servaient à

produire des blocs destinés à la construction appareillée (c'est-à-dire non rupestre). Par exemple, à Hégra, les blocs servaient à chemiser les parois des puits creusés dans le sol ou à construire les soubassements des murs en brique crue de la ville.

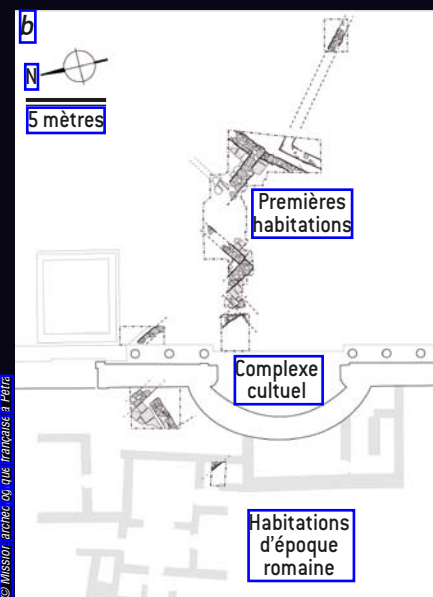
Grâce à ces techniques, les artisans nabatéens pouvaient se passer d'échafaudages puisque le sol de la carrière obtenue au cours de chaque tranche de descente servait de plate-forme de travail et était toujours accessible, moyennant un peu d'escalade. Lorsque cette plate-forme était vraiment haute au-dessus du sol, une petite palissade, dont les poteaux étaient plantés dans des trous, prévenait les chutes.



INACHEVÉ, le tombeau IG 101, à Hégra, fournit des indices sur la méthode de taille des artisans nabatéens. La moulure centrale a été taillée à l'aide de pics tel celui ci-dessus, découvert à Pétra par Jean-Claude Bessac.

© Laïla NEHME

SOUS LE DALLAGE DU TÊMÉNOS, l'enceinte sacrée du sanctuaire du Qasr al-Bint, à Pétra, apparaissent les vestiges des premiers quartiers d'habitation de la ville, antérieurs à l'aménagement du complexe cultuel (a) et alignés sur un axe urbain très différent (b). Ces niveaux anciens remonteraient au IV^e-III^e siècle avant notre ère. Derrière le sanctuaire et les vestiges de son téménos, on distingue, en hauteur, le tombeau inachevé où fut retrouvé l'unique outil de construction nabatéen, un pic en fer (c, flèche).



Du š nabatéen au s arabe

L'écriture nabatéenne, alphabétique et surtout constituée de consonnes (comme l'arabe, elle ne note pas les voyelles brèves et seulement certaines voyelles longues), est très présente à Pétra et à Hégira. En étudiant l'évolution de la forme des lettres, Laïla Nehmé et ses collègues retracent l'histoire de son utilisation dans la péninsule Arabique.

À Hégira, l'écriture nabatéenne apparaît notamment, fine et élégante, dans les inscriptions gravées sur les façades de certains tombeaux (a). Il s'agit d'une trentaine de textes de nature juridique qui dressent la liste des personnes ayant le droit de se faire inhumer dans la chambre funéraire et mentionnent divers interdits.

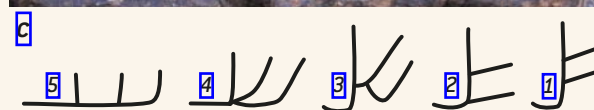
L'écriture très formelle de ces inscriptions, datées du I^{er} siècle, a été tour à tour qualifiée de calligraphique ou de classique.

En raison de son utilisation sur des matériaux souples, cependant, cette écriture s'est développée, est devenue plus cursive (les lettres formant les mots sont plus souvent attachées les unes aux autres) et s'assoit plus

franchement sur une ligne d'écriture, comme sur le texte b, qui provient d'Umm Jadhâidh, un site au nord-ouest de Hégira.

Surtout, cette écriture continue d'être utilisée bien après 106, qui marque la fin du royaume nabatéen indépendant. On la trouve dans des régions qui en faisaient auparavant partie, notamment au sud. La raison est simple : dans ces régions, le nabatéen était alors la seule écriture de prestige, héritière d'une longue tradition scripturale, qui plus est attachée au souvenir d'un royaume indépendant et prospère. Elle s'opposait en cela aux écritures utilisées

par les nomades, moins prestigieuses et encore moins adaptées que le nabatéen à l'écriture de textes destinés à être lus (elles ne notaient même pas les voyelles longues). Cette écriture tend alors à remplacer, y compris dans les graffiti, l'écriture calligraphique, et on en retrouve de nombreux exemples dans le nord-ouest de la péninsule Arabique. Le dessin de la lettre š (ch), équivalent du s arabe, montre son évolution depuis la lettre nabatéenne (c1) jusqu'à la lettre arabe (c5). Des inscriptions des III^e, IV^e et V^e siècles témoignent des différentes étapes de cette évolution.



AU TOURNANT DE L'ÈRE CHRÉTIENNE, la lettre š nabatéenne (rectangles) était verticale et anguleuse (a et c 1), puis elle s'est rapprochée du s arabe (b et c 2 à 5). En b, on la retrouve deux fois dans le mot šlm, formule de salutation équivalente à l'arabe salâm.



hellénistique tardive et romaine. Quelques niveaux d'occupation antérieurs ont été atteints : un habitat dans la partie centrale du site, peut-être des campements temporaires dans des niveaux profonds sur les collines sud, des constructions modestes sur les rives du Wadi Musa (un *wadi* est un oued, le lit d'un cours d'eau temporaire), à l'est du site. Mais c'est au cours des fouilles menées par la Mission archéologique française dans la zone du grand temple dit du Qasr al-Bint que tout un secteur plus ancien a été exploré sous le dallage de grès qui recouvre l'enceinte sacrée du temple – le téménos (voir la figure ci-dessus). Neuf sondages, réalisés sur une centaine de mètres d'est en ouest, ont donné, pour la première fois, une image de l'implantation nabatéenne la plus ancienne au cœur de la ville antique.

Sous le temple de Qasr al-Bint

Les premières installations exhumées à Pétra sont très modestes, construites sur un terrain nivelé par l'aménagement de terrasses. Ce sont des murets, des sols mis à niveau et de petites fosses, dispersés sur les sédiments sableux de la rive du *wadi*. Ces aménagements voisinaient peut-être déjà avec des constructions plus complexes bâties sur les versants de la colline qui domine le centre urbain. En effet, parmi le matériel recueilli se trouvaient

des éléments de mobilier de luxe tels que des céramiques grecques attiques à vernis noir. Ces objets appartenaient à une élite qui affichait sa richesse et son intégration dans la société hellénisée. Ces premières installations du Qasr al-Bint remontent au IV^e ou au III^e siècle avant notre ère, d'après l'étude de la céramique mise au jour et une série de datations par le carbone 14. Pétra n'était pas encore une véritable ville, mais constituait déjà l'implantation centrale des Nabatéens où parvenaient leurs caravanes chargées d'aromates.

Au cours du III^e siècle avant notre ère, de véritables maisons ont été construites. Elles témoignent de la stabilité de l'habitat et de l'urbanisation progressive du centre de Pétra. La qualité du bâti montre que les artisans maîtrisaient déjà les techniques de construction des habitats complexes. L'ancienneté de la tradition architecturale sur le site est d'ailleurs confirmée par la présence de gravats dans une tranchée de fondation, preuve que des constructions antérieures ont été détruites. À cette époque, cependant, le tissu urbain était encore très lâche et des espaces non construits étaient conservés entre les maisons. Cette dispersion du bâti est caractéristique des implantations humaines des régions stepiques d'Arabie, où les populations d'origine nomade réservent des espaces libres autour des habitations pour les activités domestiques, pour parquer les bêtes et pour rester à distance des voisins.

Ce n'est que deux siècles plus tard, vers le milieu du I^{er} siècle avant notre ère, qu'un plan d'urbanisme a remodelé ce quartier domestique sur la rive gauche du Wadi Musa. Les fouilles montrent que toutes les maisons ont été arasées et que le terrain a été nivelé avec les déblais. Le cœur de la ville antique a perdu sa vocation domestique pour devenir un espace voué au culte. Le sanctuaire du Qasr al-Bint a été construit, puis, au I^{er} siècle de l'ère chrétienne, une voie à colonnade le long du Wadi Musa jusqu'au téménos.

Il est clair que le pouvoir a su imposer sa volonté dans un contexte social et politique propice. Pétra n'était plus alors seulement la place centrale des Nabatéens, le lieu de leur habitat permanent, de leurs cimetières familiaux et de leurs pratiques sociales ; elle est devenue une ville à part entière, qui se devait d'exprimer la richesse de ses bâtisseurs – un peuple de caravaniers qui s'est sédentarisé aux marges du monde hellénisé.

Des tombeaux taillés dans la roche

Les tombeaux des Nabatéens nous renseignent aussi sur leur histoire. L'environnement rocheux de Pétra et la facilité avec laquelle le grès se travaille ont favorisé l'éclosion, à Pétra puis à Hégra, d'une architecture funéraire rupestre dont le style très particulier mêle des éléments

orientaux et égyptiens aux canons hellénistico-romains. Notre connaissance de l'évolution et de la chronologie relative des décors de façade reste encore imprécise, mais la présence de merlons à degrés est ancienne (voir les motifs triangulaires sur la figure page ci-contre).

Ces façades évoquent la forme d'une tour encastrée dans la roche. Leur inventaire à Pétra révèle différents degrés de dégagement de la roche, mais six monuments – nommés les *Djinn Blocks* – sont entièrement taillés dans le rocher formant une sorte de tour. Des fouilles ont été menées afin de dater ces monolithes et de mieux comprendre leur utilisation. Il est apparu que cinq d'entre eux sont associés à des tombeaux souterrains distincts de la tour, qui s'ouvrent au pied de celle-ci dans quatre cas, le cinquième étant creusé dans un rocher dominant le monument.

La présence d'un tombeau souterrain associé au sixième monolithe est incertaine. Ces six monolithes étaient des stèles funéraires monumentales associées à des tombeaux souterrains. Ce n'est qu'à une période plus tardive qu'une chambre funéraire a été creusée à l'intérieur de quatre d'entre eux, qui ont ainsi été transformés en tombeaux. La céramique recueillie lors des fouilles et des ramassages de surface rend

bien compte de ces deux phases d'utilisation, toutes les deux antiques. L'assemblage le plus ancien, daté des II^e et I^{er} siècles avant notre ère, correspond à la taille des monolithes et à l'utilisation des chambres souterraines; le plus récent, daté entre le I^{er} et le III^e siècle de notre ère, correspond aux chambres funéraires creusées à l'intérieur des monuments. À Pétra, ces monuments constituent vraisemblablement la manifestation la plus ancienne de la tradition funéraire nabatéenne.

Des pratiques funéraires issues de l'Arabie

Les plus anciens monuments funéraires de Pétra remontent donc au II^e siècle avant notre ère. Ce sont des stèles monumentales décorées de bandeaux de merlons à degrés. Or on connaît des monuments comparables aux mêmes époques sur des sites de l'Arabie antérieure.

À Mleiha, aux Émirats arabes unis, des constructions massives en briques crues, de plan carré, étaient décorées de bandeaux de merlons à degrés encadrés de lignes de moulures horizontales. Ces stèles monumentales, fouillées par la Mission archéologique française à Sharjah, scellaient des chambres funéraires

souterraines. Une rangée de merlons, dont on retrouve les éléments brisés dans les niveaux de destruction, se dressait sans doute au sommet. Ces monuments sont datés des III^e et II^e siècles avant notre ère.

De même, à Qaryat al-Faw, au sud de l'Arabie saoudite, des fouilles saoudiennes menées depuis les années 1970 ont mis en évidence des tombeaux souterrains associés à des constructions en pierre en forme de tour de plan quadrangulaire et décorées de merlons à degrés, tout à fait comparables aux monuments de Pétra et de Mleiha. Sur les trois sites, ces tombeaux se trouvent au sud et à l'est des secteurs habités, dans un espace en marge de la ville.

À Mleiha et à Qaryat al-Faw, les tombeaux associés à ces monuments funéraires sont datés de la phase d'occupation la plus ancienne de ces sites (III^e-II^e siècle avant notre ère). Les monuments funéraires les plus anciens de Pétra présentent donc des ressemblances avec ceux érigés à Mleiha et à Qaryat al-Faw par les plus anciennes communautés qui s'y sont installées.

Ces parallèles sont non seulement morphologiques, mais aussi conceptuels: le tombeau, destiné à recevoir les corps des défunts, est séparé de la stèle commémorative. Ces tombeaux sont la manifestation d'une tradition funéraire partagée par

Un collier de dattes pour le dernier voyage

Un tombeau à Hégira a fourni un matériel si abondant qu'il a permis à l'équipe d'archéologues et de chercheurs qui fouillait les tombeaux de Hégira de reconstituer, pour la première fois dans le domaine nabatéen, la manière dont le corps des défunts était préparé.

Isabelle Sachet, Nathalie Delhospital et leurs collègues y ont mis au jour surtout des fragments de cuir et de textile, mais aussi un collier de dattes enfilées sur un cordon végétal fait de fragments de feuilles de palmier-dattier liés les uns aux autres par torsion (ci-contre). Le défunt portait cette parure mortuaire végétale autour du cou au moment de l'inhumation. Les dattes étaient sans doute plus grosses, donc peut-être encore fraîches, comme le montre le vide qui les entoure,

libéré par le séchage des fruits. La préparation du corps des défunts suivait un protocole minutieux. Il était probablement nu, car aucun élément de tissu ou de cuir ne témoigne de la présence de vêtements. Muni, pour seul atout, de son collier de dattes, il était d'abord enduit d'une substance organique composée d'un mélange d'acides gras provenant d'une huile végétale et de résines. Cette substance servait sans doute à retarder la décomposition du corps.

Celui-ci était alors recouvert

d'une couche de tissu fin en poil (de mouton, chèvre ou dromadaire) teint en rouge. Il était ensuite enveloppé dans deux autres couches de tissu en lin, la seconde plus épaisse et plus grossière que la première, enduites de la même matière résineuse que le corps et maintenues par des sangles

de lin. L'ensemble était ensuite enveloppé dans un linceul en cuir à l'aide de lanières également en cuir.

Le corps ainsi préparé était

alors posé sur un linceul de transport en cuir, manipulé à l'aide de poignées cousues par-dessus. Cette dernière couche, la seule visible, était la seule décorée.



AU MILIEU DES FRAGMENTS DE CUIR ET DE TEXTILE trouvés dans le tombeau IGN 117, à Hégira, un collier de dattes enfilées sur un cordon végétal servait de parure funéraire à un défunt nabatéen.

des groupes qui ont eu un mode de vie nomade, comme le suggèrent la documentation archéologique à Mleiha et le témoignage des auteurs classiques à Pétra, et qui se sont sédentarisés entre le IV^e et le III^e siècles avant notre ère, fondant sur les marges des déserts d'Arabie les relais du commerce transarabique.

Cette parenté, dans un domaine aussi important que celui des traditions funéraires, montre combien ces communautés qui contrôlaient le commerce transarabique à chaque extrémité du désert d'Arabie, étaient culturellement liées.

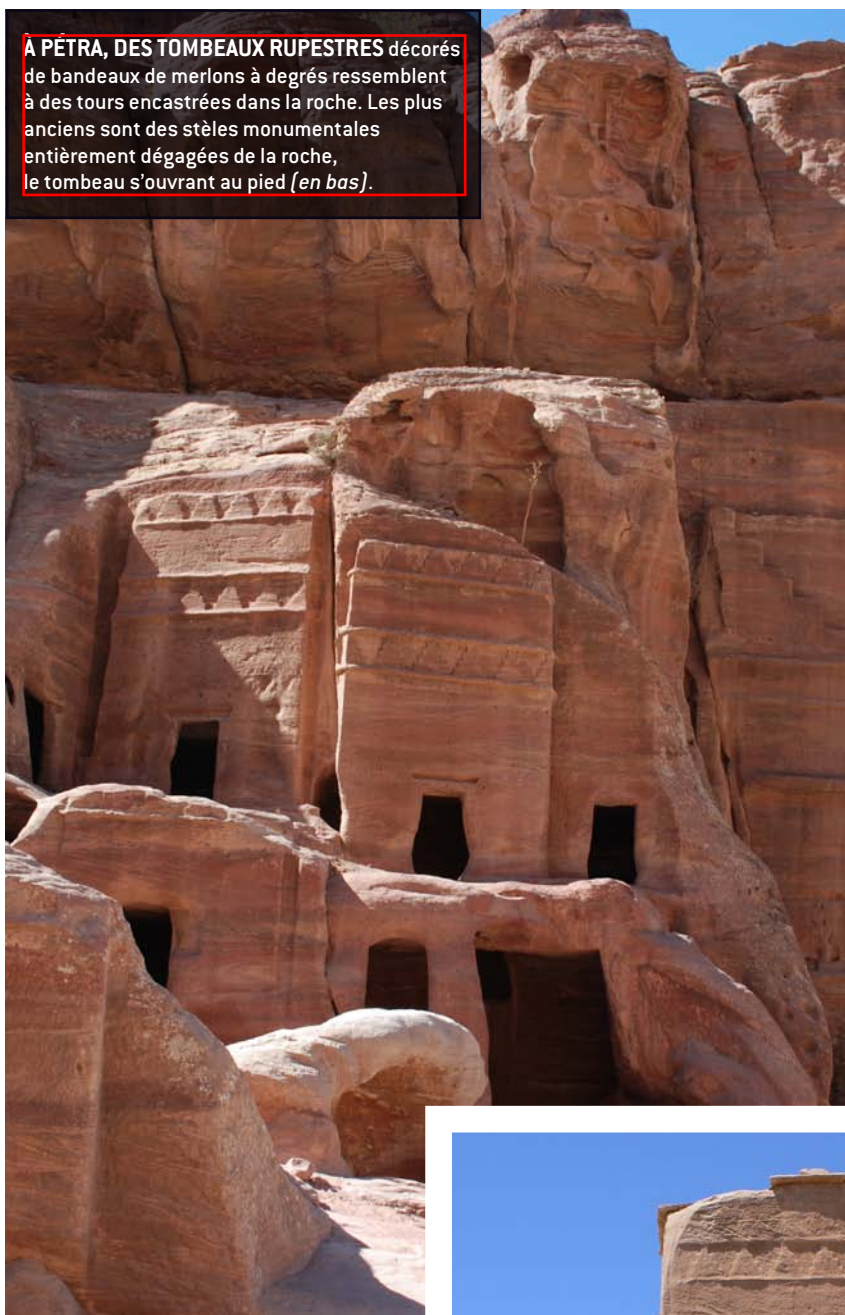
Une oasis riche de 130 puits

À Pétra, les fouilles sont de plus en plus réalisées avec des équipes pluridisciplinaires qui tentent de répondre à des questions communes. C'est aussi le cas à Hégra, très peu explorée jusqu'au début des années 2000. Les recherches s'y poursuivent tous azimuts et les résultats des fouilles entreprises depuis 2008 touchent des domaines très divers, du tracé du rempart de la ville aux rites funéraires en passant par le système d'approvisionnement en eau du site.

Hégra est le nom ancien d'un site plus connu sous celui de Madâin Sâlih. Ce toponyme signifie en arabe « les villes de Sâlih », en référence au prophète éponyme qui, selon la tradition arabo-musulmane, aurait tenté, à une époque éloignée (l'âge du Bronze ?) de convertir les habitants du lieu, membres de la tribu des Thamoud, au culte du dieu unique. Les Thamoudéens ayant massacré la chamelle miraculeuse que le prophète leur avait envoyée comme signe de sa prophétie, la ville aurait été détruite par la colère divine. La mémoire de cet épisode prophétique explique que le site soit en quelque sorte marqué, dans la tradition, d'une tache originelle. Cela n'a pas empêché Hégra de devenir l'un des grands sites de l'Arabie du Nord-Ouest, entre Tabûk, al-Jawf, Taymâ, Médine et al-'Ulâ. Caractérisé par de somptueux paysages, le site de Hégra fait partie des grandes oasis de la région.

Avant les années 2000, il était surtout connu grâce aux travaux des pères dominicains de l'École biblique et archéologique française de Jérusalem, Antonin Jaussen et Raphaël Savignac, auteurs entre 1909 et 1922 d'une monumentale monographie intitulée *Mission archéologique en Arabie*. Mais depuis

À PÉTRA, DES TOMBEAUX RUPESTRES décorés de bandeaux de merlons à degrés ressemblent à des tours encastrées dans la roche. Les plus anciens sont des stèles monumentales entièrement dégagées de la roche, le tombeau s'ouvrant au pied (*en bas*).



Le début des années 2000, la Mission franco-saoudienne de Madâin Sâlih, dirigée par l'un de nous (Laila Nehmé), Daifallah Al Talhi et François Villeneuve, poursuit de nombreuses études sur le terrain.

Très vaste (plus de 1 000 hectares), le site comprend une oasis antique riche de 130 puits creusés dans le sol à intervalles plus ou moins réguliers (voir la figure page 51). D'un diamètre compris entre 4 et 7 mètres, ces puits permettaient d'irriguer de larges surfaces agricoles. L'étude des restes végétaux présents dans les sédiments, entreprise par Charlène Bouchaud au sein de l'équipe, a d'ailleurs mis en évidence l'existence, dans l'ancienne Hégra, d'un agrosystème fondé sur la culture du palmier-dattier, mais aussi de céréales (orge, blé nu et vêtu, c'est-à-dire blé amidonnier), d'arbres fruitiers (olivier, grenadier, figuier, vigne) et, à un moindre degré, de légumineuses.

Surtout, nous avons découvert pour la première fois des graines de coton dans cette partie du Proche-Orient. Ce coton était très probablement cultivé sur place. Les tombeaux recelaient d'ailleurs des fragments de textile en coton. Le coton est une plante qui nécessite beaucoup d'eau. Sa culture à Hégra, où il tombe en moyenne 50 millimètres de pluie par an, témoigne de l'efficacité des moyens mis

**Coton,
fruits,
légumineuses,
céréales, palmier-dattier...**
les Nabatéens cultivaient
à Hégra une grande
variété de plantes.

en œuvre pour pomper l'eau de la nappe phréatique, qui était à quelques mètres sous la surface dans l'Antiquité.

Outre l'oasis, le site comprend les éléments suivants : une centaine de tombeaux taillés dans le rocher, comparables à ceux de Pétra ; un secteur principalement consacré aux réunions des confréries religieuses, bien caché dans une montagne accessible par un seul défilé, comme le Siq, l'étroit passage qui constituait l'entrée sud-est de Pétra, mais beaucoup plus court ; enfin et surtout, au centre, une agglomération de 52 hectares entourée d'un rempart en brique crue dont François Villeneuve a pour la première fois, très récemment, reconnu l'ensemble du tracé sur le terrain. Ce rempart présentait plusieurs portes dont une, dite porte sud-est, monumentale et flanquée de tours, a été fouillée

(voir la figure ci-dessous).

Probablement construite au I^{er} siècle de notre ère, cette porte a continué d'être utilisée à l'époque romaine. Plusieurs inscriptions en grec ou en latin en témoignent. Gravées sur des blocs utilisés en remploi dans les murs en pierre qui flanquent le passage, elles mentionnent notamment des soldats d'une légion romaine, la III^e Légion cyrénéenne, stationnés là. Ainsi, à l'aube du II^e siècle, l'Empire romain s'est étendu

UN REMPART EN BRIQUE CRUE, au centre de Hégra, entourait une agglomération de 52 hectares.

Dans un mur de la porte sud-est du rempart (b), une inscription latine montre que des soldats romains se sont postés à cet endroit (a). À l'arrière-plan, la ville antique est encore très peu fouillée.



CH. VILLeneuve





© LARA MONTRE
© ENR. L'ARABIE SAOUDITE - RIYADH



Jusqu'à cette région du Hijâz, bien plus au sud que ne le laissent croire nombre de cartes de livres scolaires ou de musées.

Une légion romaine aux portes de la cité

L'une de ces inscriptions est, comme souvent en latin, une sorte de rébus, où des lettres parfois imbriquées abrègent chacune un mot. Écrite sur deux lignes, elle commence par les lettres I.O.M., soit *I(ovi) O(ptimo) M(aximo)*, « Jupiter très bon, très grand ». La deuxième ligne contient l'appartenance de son ou ses auteurs – la III^e Légion cyrénéenne – et montre donc la dévotion militaire à ce dieu. Elle indique aussi que des soldats romains étaient stationnés à la porte du rempart de Hégira.

Les fouilles ont également porté sur les autres secteurs du site : l'agglomération, avec ses quartiers habités et ses sanctuaires, les nécropoles monumentales et le secteur des confréries religieuses. Elles ont notamment permis de préciser la durée de l'occupation du site. On pensait qu'il avait été habité entre le I^{er} siècle avant notre ère et le II^e siècle de notre ère seulement. En réalité, la période d'occupation du site couvre un intervalle beaucoup plus large – un petit millénaire entre le V^e siècle avant notre ère et le IV^e ou V^e siècle de notre ère.

L'occupation à Hégira est donc au moins partiellement contemporaine du grand royaume arabe voisin, celui de Lihyan

(aux alentours du milieu du I^{er} millénaire avant notre ère), dont la capitale se trouvait à al-'Ulâ, à une vingtaine de kilomètres plus au sud. Cela montre que lorsque les Nabatéens se sont installés à Hégira, ils ont probablement eu affaire à un pouvoir politique assez fort pour leur résister, ce qui explique peut-être la présence d'une frontière, qui allait devenir celle de l'empire romain, à quelques kilomètres au sud de la ville.

Le nouveau programme de fouilles de la mission franco-saoudienne à Hégira a débuté en 2014 et s'achèvera en 2017. Son objectif rejoint celui des fouilles de Pétra : mettre en évidence, sur le long terme, les phases de développement, de stagnation, de repli et d'abandon de la ville, tout en cherchant à définir, pour chaque période, les caractéristiques principales de l'occupation. Resté indépendant jusqu'en 106, le peuple nabatéen a été annexé à l'Empire romain sous le règne de Trajan pour former une nouvelle province romaine, celle d'Arabie, dont la capitale était Bosra, au sud de la Syrie. Hégira, nous l'avons vu, n'a pas échappé à l'annexion. Mais il est probable qu'au IV^e ou V^e siècle, Rome s'est retirée de ces terres reculées de l'Empire, entourées de déserts et difficiles à contrôler. Le contrôle de la région serait passé aux mains de principautés arabes dont les chefs se qualifient eux-mêmes de rois, et Hégira aurait été peu à peu délaissée... Les pierres confirmeront-elles ce scénario ? ■

LES NABATÉENS ont creusé à Hégira de nombreux puits à l'image de celui-ci (à gauche), remis en service dans les années 1970. Le paysage du site (à droite) reste néanmoins aride. Des chicots gréseux dominent la plaine, dans lesquels les tombeaux paraissent tout petits. Au fond domine un massif couvert de basalte résultant de coulées de lave. Les arbres sont principalement des tamaris et des acacias.

BIBLIOGRAPHIE

L. Nehmé (dir.), *Les tombeaux nabatéens de Hégira*, Ac. des Inscriptions & Belles-Lettres, à paraître.

M. Mouton et S. G. Schmid (éd.), *Men on the Rocks. The Formation of Nabataean Petra*, Logos, 2013.

R. Wenning, *Pétra, une capitale aux confins du désert*, *Pour la Science*, août 2001.

Les fouilles à Pétra et à Hégira sont menées sous l'égide du ministère français des Affaires étrangères et des départements des Antiquités des pays hôtes.

Le casse-tête mathématique de



Il paraît qu'en ville, on n'est jamais à plus de quelques mètres d'un rat. Mais de nos jours, il est encore plus probable que l'on ne soit jamais à plus de quelques mètres de quelqu'un qui joue à Candy Crush Saga. C'est actuellement le jeu le plus populaire sur Facebook. Il a été téléchargé et installé sur des téléphones, des tablettes et des ordinateurs plus d'un demi-milliard de fois. Essentiellement sur la base de ce succès, son développeur Global King a récemment été introduit à la Bourse de New York avec une valorisation initiale de plusieurs milliards de dollars. Pas mal pour un petit jeu consistant simplement à échanger des bonbons virtuels pour former des chaînes d'au moins trois pièces identiques!

Une grande partie de l'attrait de Candy Crush pour les joueurs est liée à la complexité qui sous-tend ce passe-temps apparemment si simple. De façon surprenante,

le jeu est aussi intéressant pour les chercheurs : il apporte un éclairage original sur l'un des problèmes ouverts les plus importants des mathématiques, ainsi que sur la sécurité des systèmes informatiques.

J'ai récemment démontré que Candy Crush est, sur le plan calculatoire, un casse-tête difficile à résoudre (*voir la bibliographie*). Pour ce faire, j'ai dû recourir à l'un des concepts les plus beaux et les plus importants de l'informatique : l'idée de réduction de problème. Il s'agit de transformer un problème en un autre, ou, comme les informaticiens aiment à dire, réduire un problème à un autre. Essentiellement, ce concept découle de la polyvalence du code informatique : on peut utiliser le même type de code pour résoudre plus d'un problème, même si les variables diffèrent. Si le problème initial est difficile, alors le problème auquel on

le réduit est au moins aussi difficile. Le second problème ne peut pas être plus facile, parce que tout programme informatique qui le résout résout aussi le premier. Et si l'on peut prouver l'inverse, c'est-à-dire que le second problème peut également être réduit au premier, alors les deux problèmes sont d'une certaine manière aussi difficiles l'un que l'autre, et prennent autant de temps à résoudre.

Déterminer la difficulté d'un problème est fondamental. Si l'on peut classer un problème en fonction de la difficulté à le résoudre, on sait avec quelle puissance de calcul l'attaquer, et on peut éventuellement déterminer que ce n'est même pas la peine d'essayer de le résoudre. À certains égards, au moins pour les mathématiciens, se pencher sur Candy Crush en tant que problème mathématique peut être aussi addictif que d'y jouer.

Candy Crush

Derrière ce jeu tout simple en apparence se dissimulent des problèmes calculatoires difficiles. C'est probablement pourquoi Candy Crush est aussi addictif.

Toby Walsh



Dans notre analyse de Candy Crush, mes collègues et moi sommes partis de la classe la plus célèbre de problèmes présentant des défis calculatoires, les problèmes dits NP (pour *Nondeterministic Polynomial time*, « temps polynomial non déterministe »), le « temps » se référant à la durée requise pour la résolution.

Solutions difficiles, vérifications faciles

Par définition, la classe NP contient tous les problèmes pour lesquels, si une solution est proposée, on peut rapidement vérifier si elle est correcte, en un temps qui est une fonction polynomiale de la taille des données du problème (par exemple, un temps proportionnel à N^2 , où N est la taille des données). En revanche, l'étape consistant à trouver la

solution d'un problème de classe NP est parfois un défi calculatoire.

Appartiennent à cette classe de nombreux problèmes mathématiques célèbres, tels que déterminer si une formule logique complexe peut être satisfaite, ou si un graphe peut être colorié de telle façon que des nœuds voisins aient des couleurs différentes.

Au-dessous de la classe NP, en termes de complexité, on a la classe P (incluse dans la classe NP) de problèmes « faciles » sur le plan du calcul. Dans ce cas, le P signifie simplement « polynomial ». La classe P contient des problèmes tels qu'ordonner une liste ou trouver un item dans une base de données. Le temps que mettra un programme informatique efficace à résoudre de tels problèmes est court, même dans les pires cas. Plus précisément, le temps de résolution d'un problème de classe P est un polynôme en N , la taille des données

L'ESSENTIEL

■ Candy Crush est un jeu électronique pratiqué par des centaines de millions de personnes.

■ L'auteur a proposé en 2014 une preuve que ce jeu appartient à une classe de problèmes difficiles sur le plan calculatoire, les problèmes « NP-difficiles ».

■ Pour ce faire, Toby Walsh a établi l'équivalence de Candy Crush avec un problème de logique connu pour être de cette classe.

■ La complexité de Candy Crush contribue probablement à l'attrait de ce jeu et à son caractère addictif.

© 2014, P. G. M. M.

du problème. Par exemple, un célèbre algorithme de tri, le tri à bulles, fait remonter progressivement les plus grands éléments d'une liste par une succession de comparaisons deux à deux. Ce processus prend un temps qui augmente comme le carré du nombre d'éléments de la liste. Même si l'on doublait la longueur de la liste, l'algorithme mettrait dans le pire des cas quatre fois plus longtemps (ce « pire cas » se produit quand la liste est dans l'ordre inverse).

Au-dessus du niveau NP de complexité figurent les problèmes extrêmement difficiles sur le plan calculatoire. Il existe même des problèmes pour lesquels notre modèle de calcul standard, celui que tous les ordinateurs implémentent,

L'AUTEUR



Toby WALSH est chercheur au NICTA (National Information Communications Technology Australia) et professeur d'intelligence artificielle à l'université de Nouvelle-Galles du Sud, en Australie.

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

est inadéquat. Pour de tels problèmes, il n'existe pas de programme informatique dont on ait l'assurance qu'il va s'arrêter de tourner et donner un résultat. Ces exemples s'inscrivent dans la classe des problèmes dits indécidables. Cette classe inclut des questions telles que décider si un programme informatique va s'arrêter plutôt que de continuer à tourner indéfiniment en boucle, ce que les informaticiens nomment le « problème de l'arrêt ». Alan Turing, pionnier de l'informatique, a prouvé que le problème de l'arrêt est indécidable : il n'existe aucun programme informatique qui puisse, pour tout programme, indiquer s'il s'arrêtera ou non.

La classe NP se situe juste à la frontière entre « facile » et « difficile ». On y trouve, notamment, de nombreux problèmes représentant un défi, tels que l'organisation des tournées de livraison de colis, du tableau de service pour un hôpital ou de l'emploi du temps d'un lycée. Il s'avère que gagner à Candy Crush s'inscrit dans ce sous-ensemble de NP. L'un quelconque de ces problèmes peut être réduit à n'importe quel autre d'entre eux. En ce sens, ils sont tous d'égale difficulté.

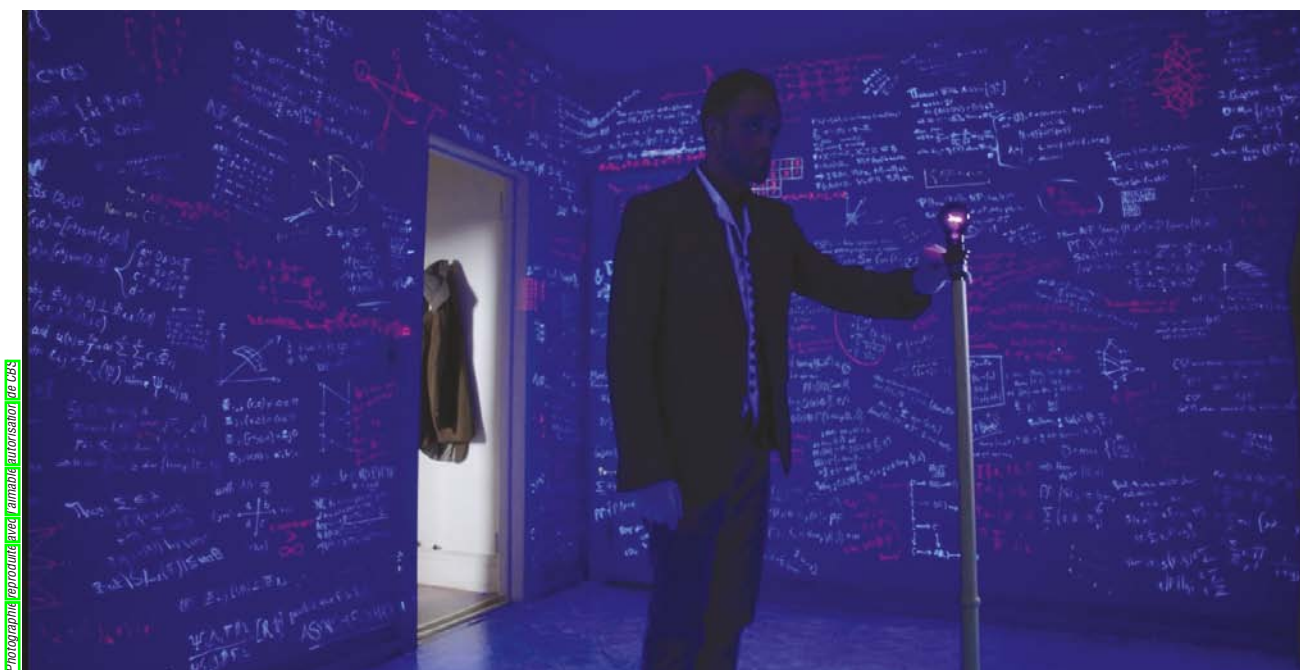
Un calcul plus long que l'âge de l'Univers ?

Malheureusement, les meilleurs programmes informatiques dont nous disposons pour les problèmes NP ont un temps d'exécution qui augmente énormément avec la taille des données du problème. Sur mon ordinateur de bureau, j'ai un programme qui met quelques heures à trouver les tournées optimales pour $N = 10$ camionnettes de livraison et à démontrer que cette solution est la meilleure possible. Mais pour $N = 100$ camionnettes, le même programme devrait tourner pendant plus de temps que l'âge de l'Univers. En fait, le temps d'exécution de mon programme est une fonction exponentielle de la taille N du problème, et les exponentielles ont une croissance extrêmement rapide.

Bien que les informaticiens soient généralement d'accord avec moi pour dire que les problèmes NP sont à la limite entre facile et difficile, il n'y a aucun moyen de savoir avec certitude, pour un problème spécifique, de quel côté il se situe. Les meilleurs programmes informatiques actuellement à notre disposition mettent un temps exponentiellement long à résoudre



UNE BOMBE DE COULEUR DÉTRUIT TOUS LES BONBONS VIOLETS de la grille sur cette capture d'écran d'une partie de Candy Crush Saga. L'une des raisons pour lesquelles le jeu est tellement prenant est qu'il est en fait vraiment difficile, au sens mathématique du terme.



les problèmes de la classe NP. Mais nous ignorons s'il existe un algorithme (à découvrir) qui saurait résoudre les problèmes NP efficacement, en un temps polynomial. Les mathématiciens expriment cette question en la résumant : « P est-il égal à NP ? » En fait, c'est l'un des problèmes ouverts les plus importants des mathématiques d'aujourd'hui. L'institut Clay de mathématiques a même promis, depuis 2000, une récompense d'un million de dollars à quiconque le résoudra.

Dans le dernier sondage interrogeant les informaticiens pour savoir s'ils pensaient que $P = NP$ est vrai, 83 % déclaraient que non. Autrement dit, ils pensent qu'il n'existe pas d'algorithme efficace pour résoudre les problèmes NP et qu'il n'y en aura jamais. On a également demandé à des informaticiens par quel vocable il convenait de désigner les problèmes qui sont aussi difficiles à résoudre que ceux de NP, qu'ils soient ou non dans cette classe. Le mot qui a finalement remporté les suffrages est le plutôt prosaïque «NP-difficile». Mais la consultation a également mis en évidence des suggestions plus hautes en couleur telles que NP-impractical (NP-pas pratique), NP-tricky (NP-épineux) et NP-hard-ass (NP-dur à cuire)...

L'idée de la réduction de problème est centrale à la question « $P = NP$? ». Si nous trouvions un algorithme capable de résoudre efficacement un problème NP-difficile, alors nous pourrions aussi résoudre efficacement tous les autres problèmes de la

ELEMENTARY, une série télévisée formant une adaptation moderne de Sherlock Holmes, illustre comment, bien au-delà de Candy Crush, les problèmes NP se sont fait une place dans la culture populaire. Dans l'épisode dont cette image est extraite, deux mathématiciens ont caché à leurs rivaux leurs recherches sur la question « $P = NP ?$ » en faisant leurs calculs avec des marqueurs ultraviolets, comme le découvre Holmes (*ci-dessus*) après leur assassinat lié à leurs résultats pionniers.

BIBLIOGRAPHIE

T. Walsh, **Candy Crush** is NP-hard,
prépublication arXiv du
11 mars 2014 (<http://arxiv.org/abs/1403.1911>).

G. J. Woeginger,
The P-versus-NP page
[[www.win.tue.nl/~ffgwoegi/
P-versus-NP.htm](http://www.win.tue.nl/~ffgwoegi/P-versus-NP.htm)].

J.-P. Delahaye, **Complexités**,
Belin/Pour la Science, 2006.

classe NP. Le monde serait assez différent si ce résultat était un jour atteint.

Du côté des avantages, nous pourrions mener nos vies en gérant plus efficacement notre temps, tout serait magnifiquement optimisé, depuis les tournées de livraison jusqu'aux horaires de vols en passant par les emplois du temps des personnels hospitaliers (et l'on gagnerait régulièrement en jouant à Candy Crush).

**La complexité
calculatoire est parfois
un bienfait**

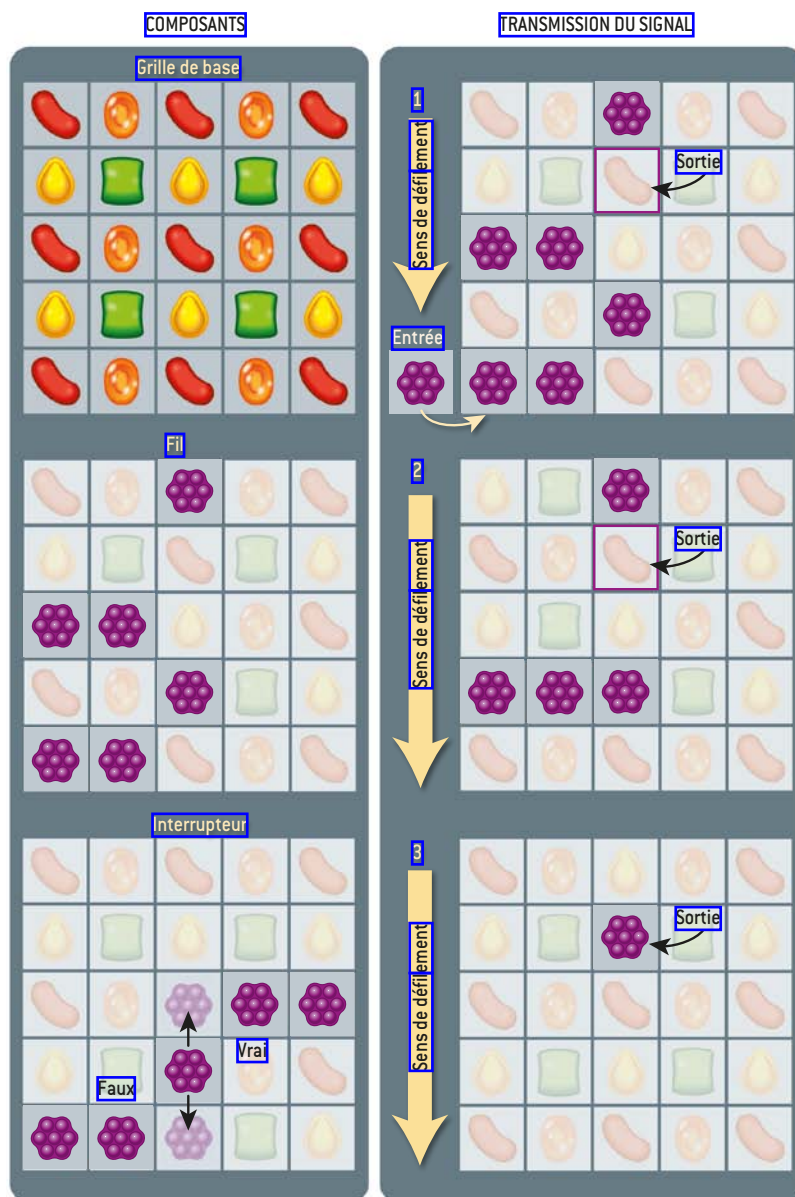
En revanche, il est important que certaines tâches restent difficiles, par exemple le déchiffrement des messages cryptés, si nous voulons que nos mots de passe et nos comptes bancaires restent sûrs. La complexité calculatoire peut être un bienfait autant qu'un fléau. Nous voulons rendre difficile (d'une difficulté prouvable) le décryptage des messages par des pirates informatiques. Et tout autant, nous devons être capables de crypter ces messages facilement. Cet exemple rappelle la définition de la classe NP-difficile : des problèmes dont la solution est facile à vérifier, mais difficile à trouver.

Pour montrer que Candy Crush est un problème mathématiquement difficile, nous pouvons procéder en partant de n'importe quel problème NP-difficile et en le réduisant à Candy Crush. Pour nous simplifier la

IMITER DES CIRCUITS ÉLECTRIQUES AVEC DES BONBONS

Afin de prouver que Candy Crush appartient à la classe des problèmes NP-difficiles, Toby Walsh a traduit ce jeu en un problème de logique appartenant à cette même classe, en concevant un circuit électrique constitué de bonbons. Le principe consiste à partir d'une grille de base (à gauche en haut) appropriée, dans laquelle on place des bonbons violets en fonction du composant électrique que l'on cherche à imiter.

On peut former ainsi un « fil » (à gauche au milieu) qui transmet un signal, un « interrupteur » (à gauche en bas) qui détermine quel fil sera utilisé, etc. Dans le « fil », par exemple, la propagation du signal (dessins de droite) commence par le placement d'un bonbon violet sur une case « Entrée » (1). Cela crée un alignement de trois bonbons identiques, qui est effacé. Les bonbons situés au-dessus se décalent vers le bas, créant un nouvel alignement de trois bonbons (2). Quand cet alignement est effacé, un bonbon violet tombe dans la case de sortie : le signal a été transmis (3).



tranche, mes collègues et moi sommes partis de l'ancêtre de tous les problèmes NP-difficiles, à savoir trouver une solution à une formule logique. C'est ce qu'on appelle le « problème de la satisfaisabilité ».

Vous avez forcément résolu un tel problème si vous vous êtes un jour attaqué à un casse-tête logique. Vous devez décider quelles propositions rendre vraies, et lesquelles rendre fausses, afin de satisfaire un ensemble de formules logiques. Par exemple, sachant que « l'Anglais vit dans la maison rouge », « l'Espagnol possède le chien » et « le Norvégien habite à côté de la maison bleue », la proposition « l'Espagnol possède le zèbre » doit-elle être déclarée vraie ou fausse ?

Traduire Candy Crush en un problème de logique

Pour réduire un casse-tête logique à un problème de Candy Crush, nous exploitons le lien étroit qui existe entre la logique et les circuits électriques. On peut en effet représenter n'importe quelle formule logique par un circuit électrique. Les ordinateurs ne sont, après tout, qu'un grand ensemble de portes logiques (ET, OU, NON, etc.) connectées par des conducteurs électriques. Par conséquent, tout ce que nous avons besoin de faire est de montrer que l'on pourrait construire un circuit électrique dans un jeu de Candy Crush.

Tout d'abord, nous avons besoin d'une grille sur laquelle le circuit va être construit. La grille doit être un motif neutre de bonbons où l'ordre des types de bonbons les uns par rapport aux autres ne change jamais (voir l'encadré ci-contre). La configuration choisie ressemble à des feux de circulation : dans les colonnes paires, nous alternons les bonbons haricots rouges et les bonbons au citron jaunes, alors que dans les colonnes impaires nous alternons les pastilles orange et les gommes vertes. De cette façon, même en déplaçant des colonnes vers le haut ou vers le bas, nous ne créerons jamais une chaîne de trois bonbons identiques.

Dans ce cadre, nous insérons les composants électriques, qui sont constitués de bonbons violets à la mûre. Les bonbons violets décalent les autres bonbons, ils ne les effacent pas. En groupant des bonbons violets, on crée des « fils » qui acheminent le signal dans le circuit (voir l'encadré ci-contre), ou des configurations plus complexes selon les besoins.

Par exemple, lorsqu'on place un bonbon violet sur l'entrée du « fil » en bas à gauche de la grille de départ représentée dans l'encadré, on crée une chaîne de trois bonbons violets. Cette chaîne est effacée, conformément aux principes de base du jeu, ce qui déplace vers le bas les bonbons des deux colonnes concernées. Et ainsi de suite, le signal se propage et est transmis : à la fin, un bonbon violet apparaît dans la case de sortie.

Nous avons également besoin d'interrupteurs que l'utilisateur peut actionner pour décider quels fils sont actifs. Ces interrupteurs représentent le choix des valeurs de vérité (vrai ou faux) d'une proposition logique. L'utilisateur déplace un bonbon violet soit vers le haut, soit vers le bas, ce qui va envoyer un signal soit vers la gauche, soit vers la droite (voir l'encadré).

Enfin, on peut construire des portes logiques telles que ET, OU et NON à partir d'autres bonbons violets en utilisant ces composants de base. Il nous reste alors simplement à connecter les interrupteurs à ces portes logiques avec des fils suffisamment longs pour obtenir un circuit électrique qui simule notre formule logique. Le circuit électrique a alors une sortie qui représente la valeur de vérité de la formule logique.

En termes de circuits logiques électriques, jouer à Candy Crush consiste à décider judicieusement sur quels interrupteurs agir de façon que les portes logiques s'activent convenablement et que la sortie soit « vrai ». De cette manière, le problème consistant à satisfaire une formule logique est réduit à résoudre un problème dans Candy Crush. Et puisque satisfaire une formule logique est un problème difficile, il en va de même de la résolution d'une grille de Candy Crush.

On peut également montrer l'inverse. En d'autres termes, on peut réduire un problème Candy Crush à celui de la satisfaction d'une formule logique. Il faut simplement écrire une séquence de formules qui représentent le jeu sur une grille de Candy Crush. Or pour l'essentiel, une description logique de Candy Crush se trouve dans n'importe quel programme qui y joue. Par conséquent, Candy Crush

n'est pas plus difficile que l'un ou l'autre des problèmes NP-difficiles, et le jeu est exactement aussi difficile qu'il est difficile de résoudre tous les autres problèmes de la classe NP.

Si nous avions une manière efficace de jouer à Candy Crush, nous aurions un moyen efficace (et prouvable) d'organiser les tournées de livraison, de faire les tableaux de service des hôpitaux et les emplois du temps des lycées. Inversement, si nous avions un moyen efficace de préparer les tournées, faire les tableaux de service et les emplois du temps, alors nous disposerions d'un moyen efficace de jouer à Candy Crush. C'est toute la puissance de la réduction de problème.

Pourquoi ?
ne pas profiter de
Candy Crush
pour que les joueurs
effectuent des calculs
longs et utiles ?

La prochaine fois que vous calez pour résoudre une grille de Candy Crush avec le nombre de coups impartis, vous pourrez vous consoler en sachant que c'était un problème mathématiquement difficile à résoudre. De fait, cette caractéristique participe sans doute à l'attrait du jeu et à son caractère addictif. S'il était aussi facile à résoudre que le morpion, par exemple, il ne serait sans doute pas aussi captivant.

Au cœur de tout cela, il y a la belle notion de réduction de problème, qui a permis aux informaticiens de simplifier le labyrinthe des différents problèmes calculatoires en un nombre plus petit de classes fondamentales telles que P et NP, que les informaticiens appellent le zoo

de la complexité. Actuellement, ce zoo contient 500 classes de problèmes.

Dans l'hypothèse improbable où l'on démontrerait que $P = NP$, le nombre de classes distinctes du zoo de la complexité chuterait brutalement. De nombreuses classes se révéleraient être identiques. En revanche, si $P \neq NP$, comme le croient la plupart des informaticiens, alors le zoo contient effectivement de nombreuses classes distinctes de problèmes. En fait, le zoo continue à s'élargir. Les zoologistes de la complexité ont récemment introduit de nouvelles classes pour décrire la complexité des problèmes que pourraient résoudre de futurs ordinateurs quantiques.

L'idée de réduction de problème offre une possibilité intéressante pour les mordus de Candy Crush. Peut-être pourrait-on tirer parti des millions d'heures passées par l'humanité à résoudre des grilles de Candy Crush ? En exploitant l'idée de réduction de problème, nous pourrions dissimuler des problèmes calculatoires utiles dans ces casse-tête.

D'autres problèmes calculatoires bénéficient de telles interactions : chaque fois que vous prouvez à un site web que vous êtes une personne et non un robot en résolvant un Captcha (acronyme de *Completely Automated Public Turing test to tell Computers and Humans Apart*, « test de Turing complètement automatisé pour distinguer les ordinateurs des humains » – un tel test vous demande de taper une séquence de lettres et chiffres apparaissant déformés à l'écran), la réponse aide Google à numériser les anciens ouvrages et journaux. Peut-être devrions-nous atteler les casse-tête de Candy Crush à des tâches non moins importantes !

Nos études de Candy Crush nous ont inspiré un profond respect pour ce passe-temps apparemment anodin. Il offre un éclairage original sur l'une des questions ouvertes les plus importantes des mathématiques d'aujourd'hui, et les implications de cette question s'étendent à de nombreuses applications telles que les algorithmes de chiffrement utilisés pour garantir la sécurité des comptes bancaires. Vous pourrez ainsi expliquer ces enjeux supérieurs à votre patron la prochaine fois qu'il vous surprend à essayer de vous hisser un niveau plus haut ! ■

Changement

Les mauvaises

La montée du niveau des mers menace à long terme les populations des îles coralliennes. Mais l'aide précipitée qu'on leur apporte menace de leur faire plus de mal que de bien. Le cas des îles Kiribati, dans le Pacifique, illustre bien cette situation.

climatique

solutions de Kiribati

Simon Donner

L'ESSENTIEL

■ À long terme, l'habitat des petites nations des îles coralliennes risque d'être réduit par la montée du niveau de la mer.

■ Nombre d'organisations et d'États investissent de façon précipitée pour sauver ces nations pauvres de la menace, ce qui crée des problèmes inattendus.

■ Pour l'heure, la sédimentation a agrandi certaines îles, tandis qu'aucun lieu habité n'a été submergé.

■ L'accompagnement international de ces nations insulaires devrait être repensé à plus long terme.

LA MOITIÉ DE LA POPULATION des Kiribati vit dans l'atoll de Tarawa, formé d'étroites et luxuriantes îles.

Centre mondial d'histoire

Une fois de plus, j'ai atterri en serrant les dents pendant que l'avion roulait vite, bien trop vite, sur l'unique piste de l'aéroport de Tarawa-Sud. J'étais à trois jours de la fin d'un périple de trois semaines dans l'archipel de Kiribati et j'ai enfin vu ce que j'étais venu voir : l'océan en train de noyer une île corallienne.

Aidé par les grandes marées annuelles, le vent de nord-ouest poussait les vagues par-dessus les digues, de sorte que la mer envahissait les routes et les maisons de l'atoll surpeuplé, qui est aussi la capitale de l'État-archipel de Kiribati. Pour la première fois depuis qu'il y avait un marégraphe à Kiribati, la marée est montée ce jour-là trois mètres au-dessus de son niveau de référence... Persuadé que l'impact du réchauffement climatique serait évident dans ce pays en développement et manquant de

L'AUTEUR



Simon DONNER est maître de conférences en climatologie au département de géographie de l'université de la Colombie-Britannique, à Vancouver au Canada.

savoir-faire technique, j'étais venu constater le phénomène sur place. J'étais servi : nous étions alors en 2005 et le futur était arrivé !

Nous sommes aujourd'hui en 2015 et aucune des îles coralliennes de l'archipel de Kiribati n'est noyée. Je suis par ailleurs revenu dix fois étudier l'adaptation de la petite nation kiribatienne aux effets du réchauffement climatique, et jamais le marégraphe n'est remonté au niveau de 2005... Pour autant, la menace que la montée des océans fait peser sur les îles basses, telles Tuvalu, les îles Marshall, les Maldives ou encore les Kiribati est bien réelle... mais à long terme. À court terme, les efforts précipités et les nombreuses bonnes intentions de la communauté internationale pourraient faire plus de mal que de bien. Il n'est pas urgent de réparer les îles, ni de les évacuer, comme je vais l'expliquer ici.

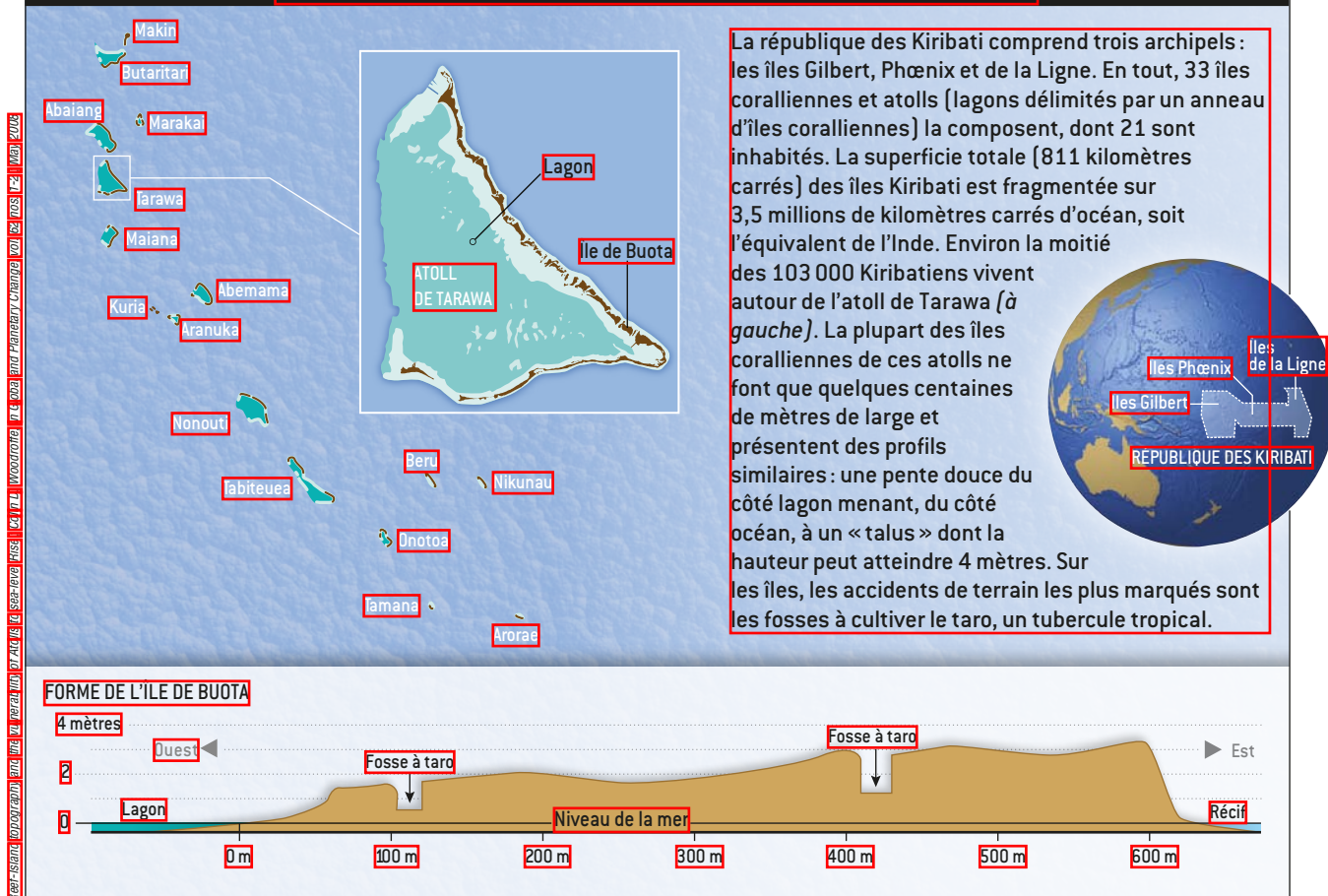
Au cours des dix années passées à étudier le climat et le régime des marées de Kiribati, j'ai aussi étudié leurs habitants et ils m'ont étudié. Ils m'ont par exemple testé en m'invitant à m'asseoir pendant des heures en tailleur dans leurs assemblées ; ils m'ont demandé des miracles pour réparer sans outils leur matériel de plongée, m'ont soigné de la dengue et fait aussi bénir par leurs anciens... Infiniment plus instructive que tout ce que j'aurais pu faire depuis mon bureau, cette expérience de terrain m'a ouvert les yeux : non, les Kiribatiens ne sont pas de pauvres victimes sans défense face à la mer ; il est clair qu'actuellement, ils n'ont pas besoin d'ériger des murs ou d'évacuer des habitants ; ce dont ils ont besoin, c'est d'élaborer des



LES KIRIBATIENS disposent de mille moyens d'agir contre la menace océanique. Ci-dessus, une femme et son fils sont en train d'entretenir la digue qui les protège. Ci-contre, un homme a choisi de vivre dans une maison sur pilotis.



DES ÎLES PLATES ET DISTANTES LES UNES DES AUTRES



plans de défenses à long terme réalistes et d'une aide internationale durable pour les concevoir et les mettre en œuvre.

En kiribatien, Kiribati se prononce *Ki-ra-bass*, un nom devenu emblématique des effets de la montée du niveau des mers pour les populations. De fait, la situation de cette petite nation perdue au milieu du Pacifique est étonnante : le vaste archipel qui lui sert de pays est le seul à être traversé à la fois par l'équateur et par la ligne de changement de date ; si l'on pouvait rassembler les îles kiribatiennes, leur superficie ne couvrirait que huit fois celle de Paris (105,4 km²), alors qu'elles sont dispersées sur une région grande comme l'Inde...

Les Kiribati comportent trois archipels : les îles Gilbert, les îles Phoenix et les îles de la Ligne. La plupart des 103 000 Kiribatiens habitent sur les îles Gilbert, dont les deux tiers de la surface se trouvent à moins de deux mètres au-dessus du niveau moyen de la mer. Les bandes de terre constituant ces îles sont si étroites que, debout sur la rive du lagon, on entend les vagues se briser

sur la rive maritime. De fait, si l'homme le plus rapide du monde décidait de sprinter à travers Tarawa-Sud, 20 secondes lui suffiraient, si du moins il parvenait à éviter les fosses creusées pour cultiver le taro (un tubercule tropical) ; il devrait aussi prendre garde aux mini-fourgons des années 1990 faisant office de bus et roulant à toute allure, et éviter d'entrer en collision avec un Kiribatien faisant ses besoins dans l'estran...

Un si charmant modèle de catastrophe climatique

Tarawa-Sud est un groupe d'îles gilbertiennes, où se trouve le siège du gouvernement. La moitié de la population de l'État-archipel s'y est installée. L'endroit est couvert d'habitations, d'immeubles gouvernementaux, de débris de construction, de tas d'ordures et d'épaves datant de la Seconde Guerre mondiale, et manque de canalisations et de toilettes en bon état.

Dès lors, il n'est pas étonnant que lorsqu'elle a recherché la nation insulaire

la plus vulnérable aux effets du réchauffement climatique, la Banque mondiale ait arrêté son choix sur les Kiribati, où elle a implanté une agence. Conséquence : chaque semaine, la présidence des Kiribati reçoit jusqu'à cinq demandes de reportage de médias étrangers sur un petit pays pauvre qui se bat seul contre la montée de la mer, à en croire l'attaché de presse de la présidence.

La réalité est que les Kiribatiens perdent du terrain à la mer, mais... en gagnent aussi. Si l'érosion et les inondations marines grignotent de la surface insulaire, la sédimentation en produit ailleurs. Ce bilan entre pertes et gains de terre a toujours existé. De plus, une partie des submersions ne peut être imputée à la montée des océans, du moins pas encore...

Les îles coralliennes sont des formations géologiques parmi les plus jeunes de la Terre, à tel point que certains séquoias de Californie (des conifères géants pouvant vivre plusieurs milliers d'années) sont plus anciens que la plupart des atolls de

Kiribati... Notre compréhension des atolls est aussi relativement récente, puisqu'elle date de Charles Darwin qui, au cours de son voyage sur le *Beagle*, fut le premier à comprendre que les atolls étaient édifiés par les coraux poussant sur les pentes de volcans en train de s'enfoncer. On a longtemps ignoré à quel point la théorie de Darwin était juste, puis, dans les années 1950, des forages dans les îles Marshall, en préparation d'essais nucléaires de l'armée américaine, l'ont démontrée.

En fait, les coraux sont des organismes symbiotiques, dont l'un des partenaires est une micro-algue (organisme pratiquant la photosynthèse), tandis que l'autre est un polype (organisme du groupe des

cnidaires, auquel appartiennent aussi les méduses) qui a la particularité de sécréter un exosquelette de calcaire. Pour profiter le plus possible de la lumière, les coraux se rapprochent de la surface en poussant les uns sur les autres et finissent à la longue par édifier de grands récifs autour des volcans océaniques en voie d'érosion (voir l'encadré ci-dessous).

Des îles nées de récifs coralliens morts

Généralement, les socles calcaires sur lesquels reposent les récifs coralliens se sont construits au cours du dernier âge glaciaire, quand le niveau marin était bien plus bas

qu'aujourd'hui. Puis la mer a monté, a envahi et submergé les anneaux récifaux, ce qui a déclenché leur croissance, laquelle s'est poursuivie jusqu'à atteindre ou dépasser la surface. Les coraux qui la dépassent meurent, mais les anneaux qu'ils forment piègent le sable et les sédiments produits par l'érosion d'autres coraux. Des plages se forment puis s'étendent. Le vent y dispersant les graines, la végétation envahit peu à peu les terres ainsi formées, ce qui favorise de nouvelles accumulations sédimentaires, et ainsi de suite jusqu'à la formation de véritables îles constituées de débris déposés sur des récifs coralliens morts.

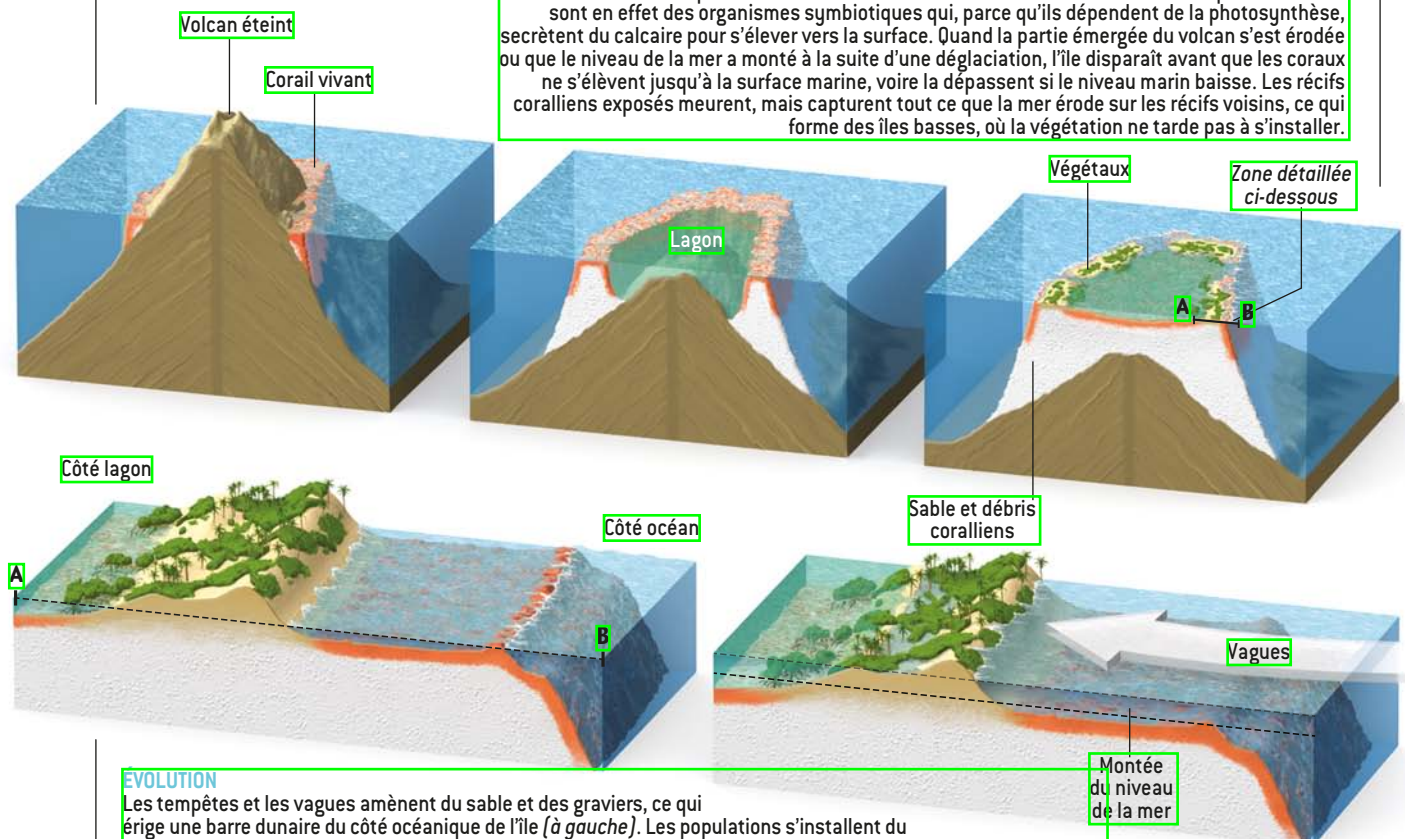
Encore récemment, les chercheurs supposaient que ces accumulations

LA MONTÉE ET LA CHUTE DES ATOLLS

Les îles d'un atoll évoluent avec le temps, de sorte qu'elles peuvent considérablement en quelques siècles seulement. Lorsque la mer monte, l'évolution des îles est variable : parfois, les courants marins contribuent à édifier une île en lui apportant des sédiments tout en érodant sa voisine, à qui ils en enlèvent. Sans qu'on l'ait toujours prévu, même l'édification d'une jetée ou d'un débarcadère peut altérer l'équilibre d'une île.

FORMATION

L'anneau corallien qui formera le futur atoll se construit autour d'une île volcanique. Les coraux sont en effet des organismes symbiotiques qui, parce qu'ils dépendent de la photosynthèse, sécrètent du calcaire pour s'élever vers la surface. Quand la partie émergée du volcan s'est érodée ou que le niveau de la mer a monté à la suite d'une déglaciation, l'île disparaît avant que les coraux ne s'élèvent jusqu'à la surface marine, voire la dépassent si le niveau marin baisse. Les récifs coralliens exposés meurent, mais capturent tout ce que la mer érode sur les récifs voisins, ce qui forme des îles basses, où la végétation ne tarde pas à s'installer.



EVOLUTION

Les tempêtes et les vagues amènent du sable et des graviers, ce qui érige une barre dunaire du côté océanique de l'île (à gauche). Les populations s'installent du côté lagon où le terrain est plat et laissent les terres fertiles de l'intérieur de l'île disponibles pour l'agroforesterie. Quand la mer monte (à droite), les vagues peuvent éroder le bandeau dunaire, et il arrive qu'elles inondent le lagon, salinisent l'eau du sol, ce qui tue la végétation. Si la montée du niveau de la mer est lente, du sable et du gravier peuvent s'accumuler assez vite pour maintenir le cordon dunaire ; en revanche, quand la montée est rapide, il arrive que des inondations marines découpent les anciennes terres émergées en morceaux.

sédimentaires s'étaient produites peu après la dernière débâcle glaciaire, quand le niveau marin a fini de s'élever puis commencé une lente baisse. Toutefois, au cours des deux dernières décennies, des géologues, tel Paul Kench de l'université d'Auckland en Nouvelle-Zélande, ont montré que certains atolls ont poussé au-dessus de la surface alors que la mer montait encore. Comme l'ont souligné Conrad Neumann de l'université de Caroline du Nord et Ian MacIntyre de la Smithsonian Institution, les îles coralliennes « n'abandonnent pas » forcément face à la mer, et pourraient même être capables de « se maintenir » à la surface ou de la « rattraper ». Tout dépend de l'équilibre entre la montée du niveau marin et le rythme d'accumulation des sédiments.

Plusieurs facteurs qui influencent le trait côtier

C'est là précisément le point qui complique la prévision du futur kiribatien. La trajectoire des courants océaniques, la forme des récifs environnants, les angles côtiers, voire les infrastructures empiétant sur l'eau, tout cela influence l'évolution du trait côtier, qui reculera ici et avancera là bas... Et tous les phénomènes complexes à prendre en compte varient d'une année sur l'autre, comme d'ailleurs le niveau océanique. Résultat : aux Kiribati, certaines îles s'étendent tandis que d'autres se réduisent.

Toutefois, le fait que certaines îles puissent s'agrandir n'est pas la seule raison de ne pas céder à la panique pour les Kiribati. Malgré l'impression créée par les médias, aux Kiribati, à Tuvalu et dans d'autres archipels comparables, les invasions marines ne sont pas quotidiennes. Certes, le changement climatique rend les attaques de la mer plus probables, mais pour autant, le niveau océanique local continue de dépendre avant tout du régime des marées, de la météorologie marine et de la dynamique des océans à grande échelle.

Cette variabilité n'est nulle part ailleurs plus visible qu'aux Kiribati. L'archipel subit en effet le phénomène El Niño, une interaction entre l'océan Pacifique et l'atmosphère si puissante qu'elle perturbe régulièrement le climat terrestre. L'influence d'El Niño sur les vents équatoriaux et les courants fait régulièrement monter le niveau de la mer

aux Kiribati. Ainsi, à Tarawa, la différence entre le niveau marin durant l'épisode d'El Niño en 1997 et l'épisode de La Niña, le mécanisme climatique contraire, l'année suivante, a atteint 45 centimètres... Pour des terres aussi plates et basses que celles des Kiribati, cela représente la hauteur d'une colline !

L'invasion marine de 2005 n'était en fait rien d'autre qu'un épisode d'El Niño : une vaste dépression avait poussé un renflement d'eau vers Tarawa au moment même des grandes marées annuelles. L'inondation était donc le produit de la conjonction de phénomènes naturels normaux, et non pas la manifestation de quelque chose de nouveau : l'élévation du niveau des mers. Les effets conjoints d'El Niño, des facteurs météorologiques et des marées rendent l'influence de la montée du niveau marin difficile à appréhender.

Cela n'empêchera sans doute pas d'évoquer systématiquement la montée du niveau marin quand on cherchera à analyser les séquelles de l'invasion marine de 2005. Le désir de trouver des exemples de lieux et de populations affectés par le changement climatique est si grand que la ligne de séparation entre ce qui *ressemble* à une montée du niveau marin et ce qui *est* vraiment devient floue.

Si tout le monde a l'impression que les Kiribati sont en train de se noyer, c'est seulement parce que leur situation n'a pas été décrite correctement. De fait, la plupart des reportages sur la situation des Kiribati montrent Bikenikoura, un village implanté sur un banc de sable bordé par une mangrove, toujours partiellement inondé durant les grandes marées.

Les autorités des Kiribati sont submergées de demandes de visites de sites menacés. Pour y faire face, elles dirigent les journalistes et les dignitaires, comme le secrétaire général de l'ONU Ban Ki Moon, vers Bikenikoura. « C'est en quelque sorte notre cas d'école », explique Rimon Rimon, le chargé des relations publiques de la présidence. Les visiteurs sont tout contents d'observer la marée envahir la *maneaba*, la maison commune servant aux rassemblements de la communauté. Ils rentrent ensuite dans leurs pays raconter l'histoire d'un pays que la mer engloutit.

En réalité, Bikenikoura, la « plage dorée », n'est en rien caractéristique de ce qui se passe dans cet archipel surpeuplé. Ce village a en effet été créé de toutes

Le corail, animal ou algue ?

Le corail est formé par des colonies d'un animal du même embranchement que les méduses : les cnidaires. Nommés polypes, les individus ont la particularité de sécréter un exosquelette à leur base. Suivant les espèces, cet exosquelette est mou ou dur et, dans ce cas, à base de carbonate de calcium. De nombreuses espèces de corail vivent en symbiose avec des végétaux unicellulaires, dont, dans les mers chaudes, la xanthelle, une micro-algue pratiquant la photosynthèse.

BIBLIOGRAPHIE

E. Longépée, *Les atolls, des territoires menacés par le changement climatique global ? L'exemple de Kiribati* (Pacifique Sud), *Géococonfluences*, en ligne le 16 avril 2015 (<http://bit.ly/1FD1xgA>).

S. Donner et S. Webber, *Obstacles to climate change adaptation decisions: A case study of sea-level rise and coastal protection measures in Kiribati*, *Sustainability Science*, vol. 9(3), pp. 331-345, 2014.

E. Longépée, *La résilience des systèmes socio-écologiques des États atolliens dans le contexte du changement climatique. Le cas de Kiribati* (Pacifique Sud), thèse, université de La Rochelle, 2014.

E. Rankey, *Nature and stability of atoll island shorelines: Gilbert island chain, Kiribati, equatorial Pacific*, *Sedimentology*, vol. 58(?), pp. 1831-1859, 2011.

pièces par Les assemblées de Dieu, un mouvement évangélique qui cherchait à loger des immigrés issus d'autres îles de l'archipel venus chercher du travail à Tarawa-Sud. C'est par manque de terrain disponible que l'association religieuse a investi cette plage, ce qui n'a rien d'étonnant, puisqu'aux Kiribati, comme dans de nombreux pays du monde, la surpopulation et la pression économique créent un exode rural. En ville, les nouveaux arrivants s'installent en périphérie sur les seuls terrains disponibles, souvent peu sûrs. La côte du lagon de Tarawa-Sud est pour cette raison parsemée de digues détruites et de marais envahis par la mer, qui témoignent des nombreuses tentatives ratées de repousser la mer.

Pour les touristes du réchauffement climatique, l'autre village emblématique de la montée des eaux est Tebunginako. Toutefois, voir dans sa situation le résultat du réchauffement climatique est aussi de l'ordre du malentendu. Le caractère inondable de Tebunginako résulte d'un événement fortuit : l'obstruction par une tempête du canal naturel qui reliait la mer au lagon. C'est en tout cas l'interprétation donnée dans un rapport de la

SOPAC (*South Pacific Applied Geoscience Commission* ou Commission pour les géosciences appliquées dans le Pacifique Sud, dont fait partie la France). L'ancien nom du lieu jouxtant le village est d'ailleurs Terawabono, qui signifie « canal bouché ».

La mer monte. Et le niveau du débat ?

L'invasion par les eaux marines d'endroits comme Bikenikoura et Tebunginako n'est donc pas due au réchauffement climatique. Mais se rendre aux Kiribati pendant une semaine dans le but explicite d'être témoin des impacts de la montée du niveau marin crée une boucle de rétroaction interculturelle, qui ne fait que renforcer l'idée que ces îles tropicales sont des microcosmes vulnérables qui souffrent dès à présent du réchauffement climatique.

Cette vision naïve, combinée avec le caractère réservé des Kiribatiens et le manque de scientifiques locaux capables de vérifier les affirmations qui circulent, fait que tout village subissant une inondation marine devient une victime évidente du réchauffement climatique. Ajoutez à cela un peu de géopolitique et le fait qu'une

Kiribati dans le catastrophisme des discours

Dans cet article, Simon Donner dénonce les récits journalistiques ou officiels erronés, selon lesquels les Kiribati seraient déjà fortement atteintes par le changement climatique. Il a raison : le catastrophisme des discours politiques et médiatiques est très loin de la réalité du terrain. Pour autant, tout ne va pas bien : le changement climatique est une menace réelle sur les Kiribati.

La science a ses limites, et les chercheurs ne sont pas encore en mesure de se prononcer précisément à propos de l'impact climatique sur les atolls. Ce qui est sûr, c'est qu'à Kiribati, la mer monte de 2,5 millimètres par an depuis 1950 et on estime qu'en 2090 le niveau marin sera plus haut de 40 à 61 centimètres par rapport au niveau actuel, ce qui ne sera pas sans conséquences.

Les travaux d'Arthur Webb et de Paul Kench publiés en 2010 ont montré que des îles coralliennes situées dans les secteurs où la

mer monte conservaient leur superficie ou même s'agrandissaient. Mais Simon Donner n'insiste pas suffisamment ici sur le rôle joué par l'homme dans ces expansions. Par exemple, à Tarawa, un remblai de 3,4 km² a été construit. Ce n'est pas rien pour un atoll dont la superficie de terre émergée est de 31 km² ! Afin de mieux appréhender l'impact de l'élévation du niveau de la mer sur ces territoires, il faudrait faire ce type d'étude sur des îles coralliennes inhabitées. Cela n'a pas encore été fait. S'agissant du rôle protecteur

des coraux pour les îles, il est vrai que si la mer ne monte pas trop vite pour eux, ils pourraient contribuer au maintien des îles coralliennes. Mais un autre problème se pose : le blanchissement corallien, c'est-à-dire la mortalité des algues des coraux en raison de températures extrêmes des eaux océaniques, de fortes salinités ou de polluants, que le changement climatique amplifie, sans oublier les effets nocifs des activités humaines et l'acidification des océans. Seuls des coraux vivants et en bonne santé pourront suivre l'élévation du niveau de la mer autour d'une île. La question est donc comment s'adapter face à une menace climatique mal comprise. Simon Donner dénonce la dangerosité des aides dispensées dans l'urgence et inadaptées aux besoins locaux. Dans ces pays

sous intraveineuses financières, de nombreuses actions aberrantes sont entreprises pour remédier « aux problèmes de développement » et l'atténuation tend à se développer chez les populations. Il est donc primordial de prendre le temps de comprendre ces milieux atolliens et les communautés insulaires pour mener des actions de développement utile. Il s'agit notamment de s'intéresser aux connaissances et aux techniques locales sans pour autant les surestimer. Il est malin de construire une maison sur pilotis en zone submersible, il est beaucoup moins de construire un mur de protection en pierres coralliennes qui contrarie des processus naturels aidant à se défendre contre l'élévation du niveau de la mer.

- Esméralda Longépée
Géographe, UMR PRODIG 8586, CNRS

QUAND DE L'EAU MARINE PÉNÈTRE DANS LES TERRES, elle infiltre le sol sableux, ce qui peut tuer les cocotiers (*ci-dessous*), rendre les puits saumâtres (*ci-contre*) et endommager les cultures, par exemple les plants de taro, végétal aux racines comestibles que les insulaires cultivent dans des fosses (*en bas*).



© JUSTIN MCHAMUS CARO / IMAGES



DAVID GREY/COMPTON



© JUSTIN MCHAMUS CARO / IMAGES

petite nation ne peut que légitimement aspirer à ce que les menaces pesant sur son avenir soient reconnues, et les exagérations kiribatiennes de l'impact du réchauffement sur l'archipel paraîtront intentionnelles, qu'elles le soient ou pas.

Pour certaines îles, la superficie augmente

Une exagération, quelle que soit sa motivation, provoque inévitablement une réaction. Ce retour de bâton a commencé en 2010 par un article de Paul Kench et de son collègue Arthur Webb, un spécialiste de géologie côtière, à l'époque à la SOPAC. Ces deux chercheurs ont étudié 27 îles coralliennes des Kiribati, de Tuvalu et des États fédérés de Micronésie pour lesquelles on dispose d'anciennes photographies aériennes. Ils ont trouvé que 23 d'entre elles

avaient augmenté en superficie ou étaient restées stables pendant les décennies qui viennent de s'écouler. Même si l'on n'en dispose pas pour l'ensemble des nations du Pacifique, ces données indiquent une tendance. Des résultats similaires ont du reste été rapportés pour des atolls de la Polynésie française.

Ces constatations signifient que, pour le moment, les courants dominants, le développement côtier et d'autres facteurs naturels ont davantage influencé les surfaces insulaires que la montée du niveau de la mer. Paul Kench et Arthur Webb notent par exemple que le renforcement naturel de la côte du lagon a augmenté la surface de l'île non urbanisée de Buariki de 2 % depuis 1943. Sur les îles urbanisées, l'activité humaine s'est souvent traduite, par inadvertance, par une bien plus grande augmentation de

la superficie. Ainsi, les chaussées que l'on a construites des années durant pour relier les différentes îles de Tarawa-Sud ont bloqué le passage de l'eau, ce qui a dirigé le sable du lagon vers des îlots bondés, tel celui de Bairiki, où se trouve le centre gouvernemental : depuis 1969, sa superficie a augmenté de 16 % !

Ces études ne nous disent pas si les îles se sont élevées, si elles continueront à croître et à stocker de l'eau douce en quantité suffisante pour les hommes et les plantes. Bien entendu, elles peuvent s'éroder aussi, ce qui est évident pour n'importe quel touriste qui regarde à partir de la côte animée de Bairiki vers le lagon vide de l'îlot de Bikeman. Privé de son sable par la construction de la même chaussée qui a élargi Bairiki, Bikeman, ancienne tache verte sur les cartes coloniales britanniques, n'est plus qu'un banc de sable à peine visible à marée haute.



JUSTIN MCINTOSH/CC BY/REUTERS

CETTE ROUTE RELIANT LES ÎLES DE BELIO ET BAIRIKI a été construite il y a plusieurs décennies. Depuis, elle a bloqué le flux d'eau et de sédiments qui circulait entre l'océan et le lagon, ce qui a modifié la forme des îles voisines. De même, les mesures d'urgence ont souvent des effets indirects, voire empirent le problème d'érosion qu'elles étaient censées régler.

en arguant du fait que le changement climatique menacerait sa maison... En réalité, il souhaitait surtout rester dans ce pays. De même, récemment, l'achat de terres aux îles Fidji par le gouvernement des Kiribati, en réalité à des fins alimentaires ou autres, a été présenté comme la préparation d'une solution de repli pour les groupes insulaires les plus menacés, et les opposants politiques du président Tong n'y ont vu qu'une comédie publicitaire.

Pour autant, il est vrai qu'au cours des prochaines décennies, les îles coralliennes basses devront relever un grand défi, celui de s'adapter aux nouvelles conditions climatiques. Pour cela, il ne suffira pas d'acheter des terres hors d'eau ou de recevoir des aides limitées : il faudra des années de travail et un investissement à long terme de la communauté internationale.

Faire face au défi climatique requiert une ingénierie spécifique

Le discours politisé sur le changement climatique est moins nuancé que la science des îles coralliennes. Après la publication de l'article de Paul Kench et d'Arthur Webb, les gros titres se sont remplis de moqueries relatives aux affirmations passées que les Kiribati et d'autres nations insulaires étaient menacées par la montée du niveau des mers. La question de l'impact actuel de ce phénomène est devenue une sorte de match entre le président Anote Tong, soutenu par certains activistes, et les sceptiques, tant parmi les Kiribatiens qu'à l'extérieur, qui soupçonnent la présidence d'exploiter le débat sur la montée des eaux pour attirer l'attention et des fonds internationaux.

Trop de rumeurs médiatiques

Qu'en est-il en fait ? La bonne nouvelle qu'apportent les recherches est que les îles coralliennes évoluent, ce qui peut donner du temps – plusieurs décennies sans doute – pour que des endroits comme Kiribati s'adaptent. Pas pour qu'ils soient évacués ! La mauvaise nouvelle est que les rumeurs médiatiques annonçant la submersion des îles compliquent le travail d'adaptation à accomplir, alors que cette tâche est déjà si difficile...

Les Kiribati sont, il est vrai, en danger à long terme. Toutefois, souligner

exagérément leur vulnérabilité nuit aux intérêts des insulaires. En voici un exemple. Les habitants des îles du sud de l'archipel des Gilbert, où la sécheresse règne souvent, sont réputés aux Kiribati pour leur dureté au travail et leur esprit communautaire. Or, quand l'eau du puits de l'une de ces îles est devenue saumâtre, il y a quelques années, ils ont curieusement baissé les bras et blâmé le réchauffement climatique. Ils n'avaient pas soupçonné les pompes à énergie solaire qu'on leur avait fournies en remplacement de leurs anciennes pompes à essence. Appelé à la rescousse, un consultant a découvert que ces pompes, qui ne cessaient jamais de fonctionner, avaient drainé toute l'eau douce... Le problème a été corrigé depuis, mais cet incident illustre les effets pervers produits quand des étrangers bien intentionnés accourent sauver les insulaires... Le discours ambiant sur la menace climatique peut conduire les gens les plus autonomes à blâmer le monde pour leurs problèmes, au lieu d'agir.

L'insistance sur la vulnérabilité pousse les médias et même le gouvernement des Kiribati à des mises en scène qui entraînent plus de trafic internet que de progrès concrets sur le terrain. Il pousse aussi les insulaires à se prétendre victimes : ainsi, un citoyen des Kiribati a demandé un statut de réfugié en Nouvelle-Zélande,

L'un des projets, le *Programme d'adaptation des Kiribati* financé par la Banque mondiale, a déjà montré à quel point l'adaptation de l'archipel est une tâche difficile. Pas moins de huit ans de consultation, de formation, de développement de politique et d'identification des priorités ont été nécessaires pour que le projet aboutisse en 2011 à du concret : quelques digues, notamment au bout de la piste d'un aéroport, et des parties de deux chaussées. Sous la pression des donateurs, du gouvernement de Kiribati et du public, les chefs de projets et les entreprises se sont unis autour d'un concept simple, susceptible d'être réutilisé à l'avenir. Hélas, la solution résultant de tous les compromis ne comprenait aucune des mesures coûteuses de réduction de l'énergie des vagues et de l'érosion qui avaient été recommandées par les experts.

Résultat : en quelques mois, les extrémités de digues tout juste construites furent endommagées par les vagues et l'érosion des plages adjacentes, ce qui dans un cas mit à nu le tuyau d'acheminement de l'eau potable à Tarawa-Sud. On montra du doigt la Banque mondiale et les donateurs internationaux pour la lenteur et la rigidité de leurs procédures. Quant aux chefs de projets et au gouvernement des Kiribati, ils furent vertement critiqués pour ne pas

avoir mieux évalué les éventuels impacts négatifs des digues.

Cet échec pourrait encore être transformé en succès : on restaure actuellement les digues en leur donnant un profil plus incliné et en les couvrant de végétation afin d'absorber une partie de l'énergie des vagues. Les chefs de projets ont aussi changé leurs méthodes afin de tenir compte de l'expérience acquise. Manifestement, dans les Kiribati, faire face au défi climatique implique d'apprendre des erreurs du passé afin de développer les bonnes techniques de résistance face à la mer.

Se préparer aux changements à venir

La redécouverte du fait que les îles coralliennes évoluent, et pas toujours pour s'amenuiser, ne sauvera pas les Kiribati si l'humanité échoue à réduire ses émissions de gaz à effet de serre. Les projections des modèles climatiques montrent que si nous restons sur la trajectoire actuelle d'émission, le niveau de la mer augmentera cinq fois plus vite qu'aujourd'hui d'ici la fin du

siècle. Même dans l'hypothèse favorable où nombre d'îles coralliennes continueront à accumuler des sédiments comme aujourd'hui, leurs superficies se réduiront, de sorte que leurs côtes deviendront abruptes et qu'elles stockeront moins d'eau douce, ce qui les rendrait moins habitables.

Il serait pratique que Tarawa ou Malé, l'île-capitale des Maldives, puissent s'élever à mesure que la mer monte. Toutefois, nous ne sommes plus à l'époque où les maisons insulaires, toutes couvertes de chaume, ne duraient en moyenne que sept ans : les îles sont aujourd'hui couvertes de routes, de maisons en dur, d'hôpitaux, d'aéroports, etc., ce qui gêne le dépôt naturel de sédiments. Ainsi, soit l'infrastructure empêche la sédimentation naturelle, soit l'évolution des îles pourrait obliger à la déplacer, ce qui est coûteux ou irréaliste. Quant au déplacement de populations entières sur les îles moins peuplées, comme le vaste et sec atoll de Kiritimati situé à des milliers de kilomètres à l'est de Tarawa, il serait insensé.

Plutôt que de se lancer dans cette voie hasardeuse, Kiribati a lancé le projet

Migration with dignity (« Migration dans la dignité ») à la recherche de pays à la population vieillissante, telle l'Australie, susceptible d'accueillir des travailleurs immigrés issus de la jeunesse kiribatienne. L'idée est que si la population doit quitter un jour l'archipel, elle pourra rejoindre une communauté expatriée déjà intégrée, plutôt que de devenir une population de réfugiés dispersée et soumise à tous les aléas.

Cette initiative doit faire comprendre au reste du monde qu'au lieu de lui faire jouer un rôle narratif dans le débat sur le changement climatique, du genre « Il faut réduire les émissions de gaz à effet de serre afin de sauver ces insulaires de la noyade », ou de faire-valoir d'une aide au développement dispensée en dépit de bon sens, le peuple des Kiribati a besoin qu'on le respecte. Concrètement, cela implique que dans le cadre de relations durables, il faut l'aider à faire face à son futur. En 2005, je me suis rendu aux Kiribati, pensant que trois semaines suffiraient pour comprendre comment le problème du changement climatique s'y pose. Dix ans plus tard, j'essaie toujours de l'appréhender. ■

Toutes les ARCHIVES

- Pour la Science
- Dossier Pour la Science

depuis

1996



maintenant disponibles sur www.pourlascience.fr

* Numéros à lire en ligne ou téléchargeables en PDF, en vente à l'unité ou accessibles par abonnement.



LORS D'HIVERS TRÈS FROIDS
au XVII^e siècle, les fleuves
gelaient, telle la Tamise
en 1677, ici peinte à l'époque
par Abraham de Hondt. Enfin,
les savants pouvaient étudier
le gel de l'eau mouvante.

L'eau qui gèle, une énigme au temps des Lumières

Frédérique Rémy

Aux XVII^e et XVIII^e siècles, de nombreux savants ont tenté de comprendre comment la glace se forme dans l'eau, les fleuves et la mer. Ils se sont longtemps empêtrés, en partie à cause d'un vocabulaire inapproprié.



Comment l'eau gèle-t-elle ? Pourquoi gonfle-t-elle en gelant ? Pourquoi, parfois, l'eau ne gèle-t-elle pas, même par grand froid ? Comment les fleuves gèlent-ils ? Et la mer ? Aux XVII^e et XVIII^e siècles, nombre de savants se penchaient sur ces questions. Toutefois, malgré l'aspect très banal du problème étudié, la théorie a été longue à progresser. Il est vrai que le problème est complexe. L'histoire de cette quête est semée d'embûches ou de freins et de mauvaises intuitions évidentes. L'un de ces freins était sans doute le vocabulaire employé. Le choix des mots était souvent trop diversifié, englobant des notions différentes que les savants essayaient de comprendre ensemble, ou trop général – pas assez précis

- Difficile de comprendre un phénomène quand le vocabulaire qui le décrit prête à confusion.

■ Un terme négligé, bouzin, aurait facilité leur compréhension du gel des fleuves.

- Et parce qu'un seul mot, glaçon, décrivait toutes sortes de glace vues en mer, ils ont cru qu'elles n'avaient qu'une origine.

Double page precedente © Heritage Images/Corbis

Dès 1669, l'Académie des sciences s'attache à comprendre le gel de l'eau. « Il n'appartient pas à tout le monde d'être étonné que le lait se caille. Ce n'est point une expérience curieuse et connue de peu de gens. C'est une chose si ordinaire qu'elle en est presque méprisables » affirme-t-elle. Elle ajoute cependant qu'un philosophe peut y trouver beaucoup de matière à réflexion et qu'il n'est pas indigne de se pencher sur le gel de l'eau, mais aussi du sang, tant veineux qu'artériel, de la sève, de « l'eau trouvée dans le péricarde d'un cheval », de la graisse, du lait...

De cet inventaire à la Prévert, l'Académie demande d'embrasser et de comprendre simultanément les phénomènes de durcissement, congélation, coagulation, solidification, voire fermentation. Dans son ouvrage *La Formation de l'esprit scientifique* (1938), le philosophe Gaston Bachelard donnera cet exemple pour illustrer un des obstacles épistémologiques à la progression des idées : la généralité. De fait, cette généralisation hâtive fait perdre de vue

Jusqu'au XIX^e siècle, un unique mot - glaçon - désignait toutes les sortes de glace : glace de mer, glace de rivières ou icebergs provenant de glaciers. Le marin n'avait qu'un mot pour décrire ce qu'il avait vu. Ainsi, à la fin du XVI^e siècle, l'explorateur néerlandais Wilhem Barentz parle de glaçons qui « flottaient aussi haut que les montagnes à sel que l'on voit en Espagne ».

Au milieu du XVIII^e siècle, le marin français Jean-Baptiste Bouvet de Lozier (1706-1787), à la recherche du continent austral, raconte avoir vu des glaçons... preuve rassurante de la présence d'une terre. Il s'agit vraisemblablement là aussi de glace de mer. À la même

En 1774, dans son *Traité de météorologie*, l'abbé Louis Cotte explique que les glaçons, infiniment petits, s'unissant mal entre eux, ne peuvent composer des flocons fort légers. Il décrit sans doute ici la formation de la neige. Et le *Nouveau dictionnaire universel des arts et*

C'est ainsi que les naturalistes dans leur cabinet n'ont qu'un seul et unique écho de toutes les formes de glace terrestre rencontrées.

GIVRE. *J. f. lat. Pruina. angl. hoar, frost or rime.*
 Sorte de gélée blanche, qui s'attache aux arbres & y
 fait quelquefois des glaçons. Dans le *blason*, serpent
 à queue onnée ou tortillée.

GLAÇON. *f. m. lat. Congelatum frustum. angl. a piece of ice. Morceau de glace.*

les spécificités de tous ces phénomènes complexes et de natures différentes.

Une vingtaine d'articles publiés dans les premiers tomes des *Mémoires et comptes rendus de l'Académie*, couvrant la fin du XVII^e siècle, relatent de très nombreuses expériences sur les « liqueurs » les plus variées – eau, lait, sang, fiel, graisse, sève... L'objectif est de trouver le mécanisme qui explique toute forme de durcissement. À l'époque, la seule solution pour étudier le gel est d'effectuer les expériences durant les nuits les plus froides de certains hivers, tels ceux, particulièrement rigoureux, de 1670, 1682 et 1684. De notoriété publique, les sous-sols de l'Observatoire de Paris sont extrêmement froids et la majorité des expériences y sont effectuées. La plus célèbre reste celle de Christian Huygens.

L'eau, c'est comme la bière

Un soir d'hiver en 1667, le physicien néerlandais remplit d'eau le canon d'un pistolet, le bouche hermétiquement et l'expose au froid... Au matin, le canon avait explosé. L'Académie note avec raison que « quelle que soit la cause d'un effet si violent, elle n'y paraît guère proportionnée ». L'année suivante, le mathématicien Jacques Buot refait l'expérience avec d'autres liquides, notamment de l'huile, et le canon n'explose pas. On en conclut à tort, mais durablement, que ce sont les bulles d'air contenues dans l'eau qui provoquent le surprenant effet.

Des décennies durant, les savants feront bouillir de l'eau pour la purger et constater, ou non, qu'elle gèle plus vite ou qu'elle gonfle moins en gelant. La présence ou non de bulles d'air permet le lien avec la fermentation et on peut encore lire dans l'édition de 1750 de la *Relation du monde de Mercure* du chevalier de Béthune, un officier de la Marine, une singulière comparaison entre la bière et l'eau. Si la bière fermente, explique l'auteur, c'est parce qu'elle contient des bulles d'air et que l'air circule. Il ajoute que c'est ainsi que l'eau purgée de son air se glace sans étendre sa masse, parce qu'elle ne fermente point. Elle se durcit et ne laisse pas voir les bulles habituelles qui causent son extension.

D'autres, tel l'académicien Jacques Dortous de Mairan, cherchent, en vain, un unique mécanisme pour expliquer le gel de l'eau et le durcissement du jaune d'œuf cuit. Il faudra attendre le XX^e siècle pour comprendre le rôle de la liaison hydrogène dans le gel

de l'eau (avec le froid, les molécules d'eau s'interconnectent par de telles liaisons). Et encore, connaissons-nous vraiment tous les mystères de cette liaison aujourd'hui ?

Un vocabulaire trop foisonnant a donc contribué à ralentir la compréhension du gel de l'eau en orientant les savants vers de mauvaises hypothèses. Dans le cas du gel des fleuves ou de la mer, en revanche, c'est plutôt le manque de mots clairs et appropriés qui semble avoir été un lourd handicap.

Déjà, comment de l'eau en mouvement peut-elle geler ? En particulier, comment les fleuves gèlent-ils ? La glace se forme-t-elle par le haut, comme le suggère la raison, ou par le bas, comme le prétendent les marins et bateliers qui affirment voir chaque hiver des corbeilles à anguilles remonter en surface ? La controverse commence en 1580, année où le céramiste et savant Bernard Palissy pense que les fleuves gèlent par la surface – sinon, que deviendraient les poissons ? – et s'achève en 1828, année où François Arago démontre que les fleuves commencent à geler près des aspérités de leur lit. Pendant près de trois siècles, académiciens et gens du fleuve se sont opposés. Pourtant, un mot, éphémère comme tant d'autres – le « bouzin » –, renfermait à lui seul la description et la compréhension

L'AUTEUR



Frédérique RÉMY, directrice de recherche au CNRS, est responsable de l'équipe

« cryosphère » à l'observatoire Midi-Pyrénées, à Toulouse.

Un bouzin éphémère

Un des arguments des marins, meuniers ou bateliers pour affirmer que les fleuves gèlent par le bas est que la partie inférieure de la glace trouvée en surface est un mélange spongieux de glace et de sable, preuve que la glace se forme au fond du lit et remonte en surface.

L'abbé Nollet, physicien du XVIII^e siècle (*ci-contre*), se moque de ceux qui « soutiennent opiniâtrement que la glace se forme par le fond » et dénomme bouzin ce curieux mélange.

Dans le *Nouveau dictionnaire universel des arts et des sciences* de 1756, le bouzin, bousin ou boursin est une croûte de terre mélangée à de la pierre friable. Par exemple, il faut ébouziner les pierres avant de les tailler. Pour l'abbé, il suffit

donc de démontrer que le bouzin ne vient pas du bas du fleuve mais de l'amont.



Il attend que la Seine gèle, fait placer un tonneau au milieu du fleuve, laisse la glace l'emprisonner peu à peu et surveille... Le bouzin ne vient pas. C'est bien qu'il ne remonte pas du fond !

En 1819, quatre colonnes sont encore consacrées au bouzin et aux travaux de Nollet dans le tome III de l'*Encyclopédie méthodique* du mathématicien Gaspard Monge, lorsque le thème du gel des fleuves est abordé au sein de l'article « glace ». Mais le mot disparaît ensuite très vite et ne semble pas connu des autres physiciens. Pourtant, ce qu'il désignait constituait bien une preuve que les gens du fleuve disaient la vérité...



LORS DES EXPLORATIONS POLAIRES, les marins traversaient toutes sortes de paysages glacés, telle cette couche de glace sur une mer d'huile où l'expédition de l'amiral britannique William Parry se fraye un passage en 1821, avec des icebergs et des calottes glaciaires au loin. À l'époque, cependant, on pensait que toutes ces sortes de glace n'avaient qu'une seule origine.

physique»...). Certains admettent que la mer puisse geler, mais près des embouchures des fleuves, là où la salinité est plus faible. Pourtant, de nombreux explorateurs polaires assurent avoir vu se former en pleine mer, loin des côtes, des glaçons d'une étendue considérable. Mais cela reste inconvenable pour les naturalistes, car comment expliquer ainsi l'existence de glaçons de plusieurs dizaines de mètres de haut ? Il faut attendre quelques décennies avant que deux hommes, l'un chez lui, Théodore Mann à la fin du XVIII^e siècle, l'autre en mer, William Scoresby au tout début du XIX^e, démontrent que la mer peut geler.

Le premier, un abbé belge, se fait apporter un tonneau d'eau de mer prélevée à mi-chemin des côtes de la Hollande et de l'Angleterre, au plus loin des embouchures de la Tamise, de la Meuse ou de l'Escaut. Il attend les grandes gelées qui arrivent en janvier 1776. Il expose au gel un vase rempli d'eau de mer et un autre plein d'eau douce. Cette dernière prend assez vite alors que l'eau salée perd de sa liquidité, mais pas de sa fluidité... En goûtant les glaçons qui se forment ainsi que l'eau restante, il déduit qu'ils sont moins salés. Hélas, le froid ne dure pas assez pour que l'expérience arrive à terme.

Quelques jours plus tard, par un froid plus vif, Mann recommence et observe que des glaçons se forment aussi vite dans les deux vases, mais qu'une couche de glace homogène est plus longue à se former pour l'eau salée. Il constate que la glace de mer est plus légère, moins transparente et moins solide. Il confirme qu'elle reste légèrement salée, conviant même des amis pour leur faire goûter ses glaçons salés.

Scoresby, lui, est le fils d'un pêcheur de baleine ayant fait fortune. Il partage sa jeunesse entre des cours de philosophie naturelle et le baleinier paternel, ce qui fait de lui un explorateur polaire hors pair et un scientifique. À partir de mai 1817, l'Académie des sciences reçoit ses rapports et le marin anglais se lie d'amitié avec l'astronome François Arago, qui le fait nommer membre étranger. Scoresby connaît très bien toutes les sortes de glace et les énumère : *field*, *pancake*, *studge*, *hummock*, *calf*... Le traducteur reprendra ses termes et aucune traduction ne sera jamais proposée.

du phénomène (voir l'encadré page 71). Sa disparition et, avec elle, celle de la version des gens du fleuve, a retardé l'explication.

Plus délicat : comment la mer, salée et en perpétuel mouvement, peut-elle geler ? L'un des obstacles les plus forts est probablement dans l'usage unique du mot glaçon pour désigner toutes sortes de glace, qu'elle soit issue d'eau douce ou d'eau salée, en provenance des fleuves, de la mer ou des glaciers (voir l'encadré page 70). En conséquence, le savant cherche un unique procédé pour fabriquer toutes sortes de glace flottante.

Les glaçons salés de l'abbé Mann

Pour le naturaliste Georges-Louis Leclerc, comte de Buffon, l'un des premiers savants à s'attacher à ce problème, la mer ne peut pas geler. Les glaçons que rencontrent les marins sont donc charriés par les fleuves. Le froid n'est pas assez vif pour faire geler la mer. Même si l'on accepte l'idée, « contre toute apparence », que le froid au pôle est suffisamment fort pour glacer la mer en surface, les glaçons ne pourraient se former sans appui.

Tous les physiciens de l'époque reprennent les idées du naturaliste, notamment dans divers articles de l'*Encyclopédie* (« glacial », « mer », « géographie

BIBLIOGRAPHIE

C. Le Lay et F. Rémy, Mairan, le traité de la glace, 1747, *Revue d'Histoire des Sciences*, sous presse.

A. Metzger et F. Rémy (dir.), Neiges et glaces. Faire l'expérience du froid (XVII^e-XIX^e siècles), Hermann, 2015.

F. Rémy, Histoire des pôles : Mythes et réalités polaires, XVII^e-XVIII^e siècles, Desjonquères, 2009.

Scoresby dit avoir vu loin des côtes les progrès de la congélation et décrit l'arrivée des premiers cristaux qui ont pour effet de calmer la mer comme une couche d'huile. Ces cristaux forment des plaques qui s'entrechoquent, se brisent, se ressouident et, au fur et à mesure, croissent en superficie. Pour lui, rien n'est plus sublime et plus effrayant à la fois. Néanmoins, même s'il distingue la glace d'eau salée, la glace d'eau douce et les montagnes de glace, il n'en perçoit pas pour autant les différentes origines. Il pense que si la glace venant de la mer est moins salée que l'océan, c'est parce qu'il neige par-dessus et que la neige fond au printemps, puis gèle. Pour lui, ce processus saisonnier permet d'atteindre des épaisseurs de glace très importantes. C'est ainsi qu'il explique les montagnes de glace. La confusion entre glace de mer et icebergs, ces blocs de glace provenant d'un glacier, est toujours présente, renforcée par la crédibilité de son hypothèse. Toutefois, nommer les montagnes de glace l'a peut-être aidé à se lancer dans la recherche d'une explication propre du phénomène.

L'explorateur polaire Jean-Baptiste Charcot fut le premier à définir en français, au début du XX^e siècle, non seulement les différentes glaces, mais aussi leurs différents états. Pourtant, de nos jours, la pauvreté et l'ambiguïté du vocabulaire posent toujours problème. Les mots de glaciologie sont souvent mal utilisés et il existe une claire confusion entre glace

Certains admettent que la mer puisse geler, mais près des embouchures des fleuves, là où la salinité est plus faible.

de mer, banquise et calotte... On entend encore souvent que la banquise arctique fond et fait monter le niveau de la mer ou que la calotte arctique fond, ce qui désoriente le grand public. La banquise est la glace de mer qui flotte déjà sur l'océan et ne fait pas varier le niveau de la mer en fondant; une calotte est un gros glacier qui, en effet, joue sur le niveau de la mer en fondant. Mais il n'existe pas de

calotte arctique à proprement parler. La principale calotte dans la région est celle du Groenland.

Les scientifiques se sont affranchis de la pauvreté du vocabulaire en utilisant les mots anglais, tel *multi year ice* – la glace de mer pérenne, qui perdure d'une saison à l'autre. Pourtant, les écrivains tels que Jules Verne ou Louis Bousсенard ainsi que les journalistes et vulgarisateurs du XIX^e siècle employaient à ce sujet le terme autrement plus joli de mer paléocrystique. Et de nombreux autres mots avaient fleuri à l'époque.

Dans sa préface du livre *Quinze mois dans l'Antarctique* (1901) du Belge Adrien de Gerlache de Gomery, le géographe Élisée Reclus écrit: « Les naturalistes de l'expédition ont étudié avec ardeur les divers phénomènes des neiges et des glaces, banquises, rondelles, flardes et dalles, bourguignons, toroses, masses tabulaires d'arrachement, blocs irréguliers. » On perd la trace de ces jolis mots évocateurs, un par un, au cours du XX^e siècle... ■

Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques

une collection complète d'instruments de travail pour la recherche en sciences humaines



Produire et échanger au Néolithique
Vincent Ard

373 pages
21 x 27 cm
2015



Ethnographies plurielles

Sous la direction de Iphaine Barthelemy, Philippe Combessie, Laurent Sébastien Fournier et Anne Monjaret

304 pages
17 x 22 cm
2015

Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques • ventes@cths.fr • vente en librairie ou sur notre site : www.cths.fr • Distribution Sodus

Plongez dans un bain de science avec **POUR LA SCIENCE**



+ En CADEAU de bienvenue :

A la rencontre des Comètes, de Halley à Rosetta.

Par Thérèse Encrenaz et James Lequeux

« En novembre 2014, la sonde européenne Rosetta s'est approchée d'une comète lointaine. La mission était à haut risque technologique : pour la première fois, un robot s'est posé à la surface d'un noyau cométaire. Tout comme la pierre de Rosette a aidé Champollion à décrypter les hiéroglyphes égyptiens, Rosetta, en dévoilant quelques mystères qui entourent encore les comètes, aidera les scientifiques à mieux comprendre l'histoire du Système solaire. Pourquoi leur apparition dans le ciel, interprétée comme un mauvais présage dans l'Antiquité, a-t-elle toujours un tel impact médiatique ? Comment les scientifiques ont-ils finalement découvert le secret de leur trajectoire ? Et que savons-nous de leur origine ? C'est à ces questions et bien d'autres que répond ce livre abondamment illustré. »

Éditions Belin - Paru le 23 mars 2015 - 144 pages - Prix unitaire : 22.90 €

OFFRE SPÉCIALE D'ABONNEMENT

POUR LA
SCIENCE

A découper ou à photocopier et à retourner accompagné de votre règlement dans une enveloppe **non affranchie** à :
Groupe Pour la Science - Service Abonnements - Libre réponse 90 382 - 75 281 Paris cedex 06

1. MA FORMULE

☒ **OUI**, je m'abonne à l'offre « Passion » à 6,50€ par mois.

Je reçois le magazine *Pour la Science* (12 n°s/an)
+ son hors-série *Dossier Pour la Science* (4 n°s/an)
+ mon cadeau. Je bénéficie aussi des versions numériques
aux numéros reçus sur www.pourlascience.fr.



Mon e-mail obligatoire pour l'accès aux contenus numériques (à remplir en majuscules)

À réception de votre bulletin, comptez 5 semaines pour recevoir votre n° d'abonné. Passé ce délai, merci d'en faire la demande à abonnements@pourlascience.fr

2. MES COORDONNÉES

Nom : _____
Prénom : _____
Adresse : _____

Code postal : _____ Ville : _____
Pays : _____ Tél. : _____
Pour le suivi client (facultatif)

3. MON MODE DE RÈGLEMENT

☒ Je règle par prélèvement **6,50€ par mois** et reçois en cadeau

le livre *À la rencontre des comètes*. Je remplis l'autorisation ci-dessous
en joignant impérativement un IBAN/BIC.

*Pour la France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'Europe (pays de la zone SEPA) : 7,90€ par mois. Abonnement en reconduction tacite
dénonçable à tout moment auprès du service abonnement avec un préavis de 3 mois. Conditions complètes sur www.pourlascience.fr

**AUTORISATION
DE PRÉLÈVEMENT PAR
MANDAT 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.

1 - COORDONNÉES DU TITULAIRE DU COMPTE

Nom, prénom _____
Adresse _____
Numéro et nom de la rue

Code postal _____ Ville _____ Pays _____

2 - COORDONNÉES BANCAIRES

IBAN _____
Numéro d'identification international du compte bancaire - IBAN (International Bank Account Number)

BIC _____
Code international d'identification de votre banque - BIC (Bank Identifier Code)

Type de paiement **Paiement récurrent/répétitif**

POUR LA
SCIENCE

3 - Date et signature obligatoires

A _____
Date _____
Signature : _____

NOM DU CRÉANCIER
Pour la Science - 8 rue Férou - 75006 Paris

ICS N° FR92ZZZ426900

N° de référence unique de mandat (RUM)

Partie réservée au service abonnement. Ne rien inscrire

☒ Je préfère régler mon abonnement d'un an en **une seule fois 79€****
sans bénéficier du cadeau.

** Offre valable en France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter : Europe 16€ - autres pays 35€

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

☒ Par carte bancaire N° _____
Date d'expiration _____ Clé _____

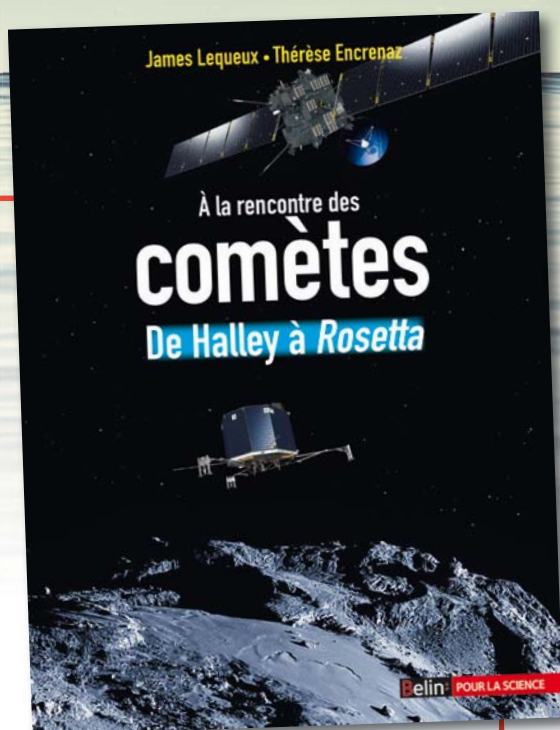
Signature obligatoire

In application de l'article 27 de la loi du 6 janvier 1978, les informations ci-dessus sont indispensables au traitement de votre commande.
Elles peuvent donner lieu à l'exercice du droit d'accès et de rectification auprès du groupe Pour la Science. Par notre intermédiaire, vous pouvez
être amené à recevoir des propositions d'organismes partenaires. En cas de refus de votre part, merci de cocher cette case ☐.

Votre abonnement
PASSION

6,50€
par mois
seulement

le magazine
+ le hors-série chez vous
+ les versions numériques offertes
sur www.pourlascience.fr



LOGIQUE & CALCUL

Tous les chemins mènent au rond

Le rotor-router est un mécanisme déterministe de cheminement fondé sur des règles simples. Il forme cependant des structures aux propriétés étonnantes et, à certains égards, plus performantes que celles des parcours aléatoires.

Jean-Paul DELAHAYE et Philippe MATHIEU

Laissée à elle-même, la matière dans l'espace se met en boule. La forme ronde apparaît spontanément même si au départ rien n'est rond. En mathématiques, il existe aussi des situations où se forment des ronds alors qu'on ne les attend pas. La situation de ce type la plus extraordinaire est le « rotor-router ». Il a déjà été évoqué dans cette rubrique [voir Mathématiques expérimentales, *Pour la Science* n° 331, mai 2005], mais il est intéressant d'y revenir, car un énorme travail de recherche a été mené à son sujet depuis dix ans et a dévoilé les propriétés de ce mécanisme de déplacement sur un graphe.

Girouettes déterministes

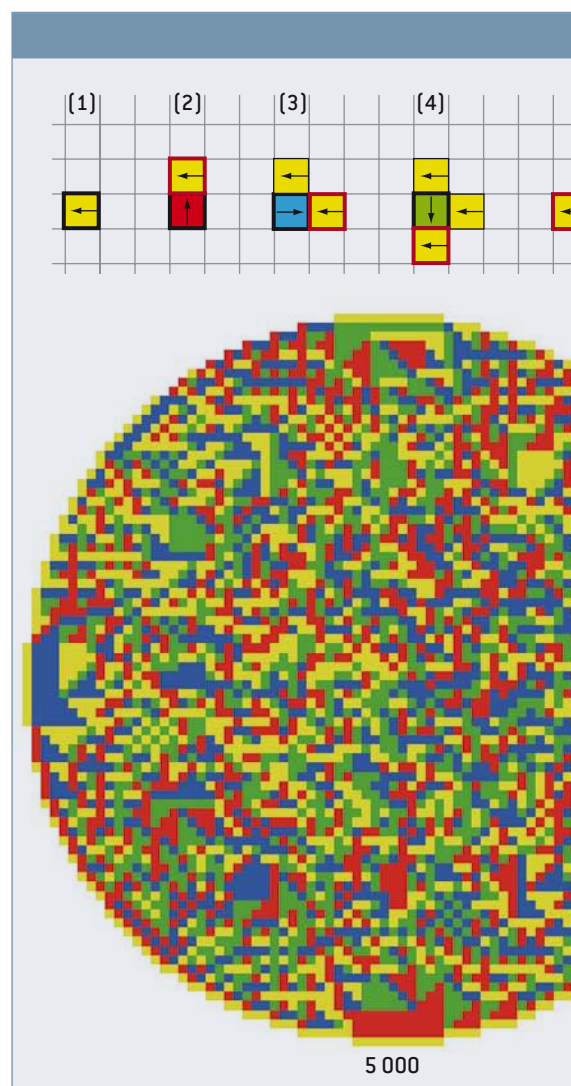
Imaginons un terrain semé de poteaux munis chacun d'une flèche à leur sommet et pointant vers un autre poteau du même type. Un agent mobile, par exemple un personnage, se place en un point O où est planté un poteau, et procède ainsi : il fait tourner la flèche du poteau où il se trouve, puis se déplace vers le poteau qu'elle indique alors ; arrivé à ce deuxième poteau, il en fait tourner la flèche et la suit, etc. L'agent continue alors sa promenade qui peut-être le conduira à revenir en O, une ou plusieurs fois.

Ce mécanisme élémentaire est celui du rotor-router : chaque flèche tournante, nous dirons rotor, indique la route à l'agent

mobile qui n'a aucune mémoire propre et se fie pour son chemin aux indications des rotors qui pivotent à chaque passage. Dans certains cas, plusieurs agents se déplaceront simultanément et interagiront donc par la rotation des rotors. Ce type de communication sans mémoire propre des agents porte le nom de stigmergie. Dans la nature, il est utilisé par certains insectes, fourmis ou termites, qui, en déposant des phéromones là où ils passent, organisent ainsi des comportements collectifs d'où émergent des activités cohérentes, telle la construction d'un nid.

Si l'on se donne un graphe quelconque – des nœuds reliés par des arêtes (dont on supposera qu'elles n'ont pas d'orientation) –, il est possible de l'équiper de rotors et d'envisager de le parcourir selon le mécanisme décrit. Pour qu'aucun nœud du graphe ne soit oublié, on imposera que le rotor de chaque nœud pointe successivement, de manière cyclique, vers tous les nœuds voisins. Si, par exemple, le nœud N a trois nœuds voisins A, B et C, le rotor placé en N pointera vers A, puis B, puis C au cours des passages successifs, puis recommencera : A, B, C, A, B, C, ...

Le modèle du mécanisme général du rotor-router a été proposé la première fois en 1996 par le Russe Viatcheslav Priezzhev et les Indiens Deplap Dhar, Abhishek Dhar, et Supriya Krishnamurthy sous le nom de « promeneur eulérien » (nous verrons plus loin pourquoi). Le modèle a été redécouvert



par James Propp, du MIT, qui l'a nommé « rotor-router » en 2005. Plusieurs dizaines d'articles scientifiques et plusieurs thèses lui ont été consacrées.

Commençons par le miracle des cercles parfaits avec la version du rotor-router sur un plan quadrillé. Chaque case du quadrillage est reliée à ses voisins nord, sud, est et ouest, ce qui définit un graphe infini où chaque nœud a quatre voisins.

Initialement, il n'y a aucun rotor, et on dépose les uns après les autres des agents sur une case fixe du plan, dénommée case centrale. Dès qu'un agent trouve une case vide, il y dépose un rotor pointant vers l'ouest, lequel occupe la case. Quand la case

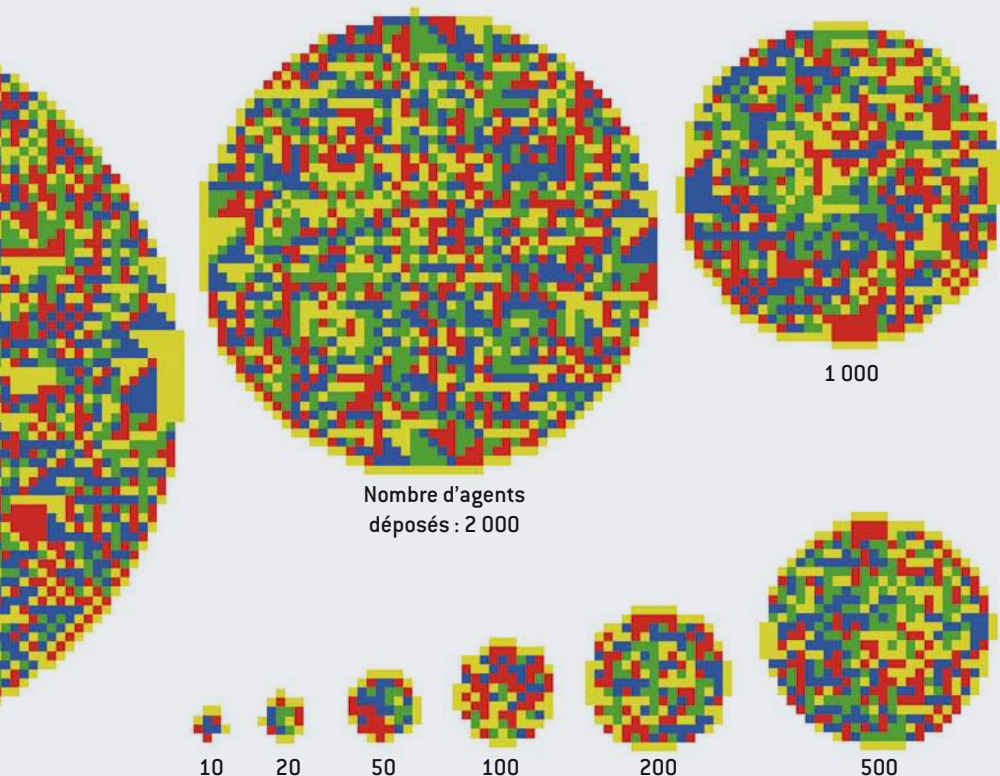
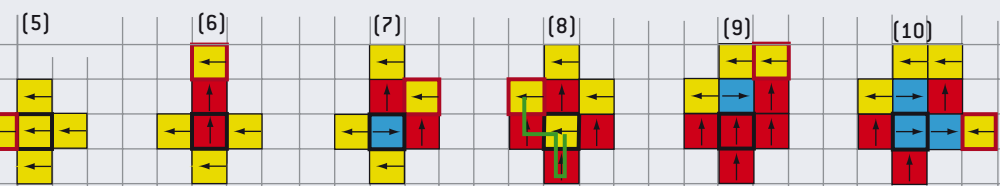
où arrive un agent est occupée (par un agent et le rotor qu'il a déposé), l'agent fait tourner le rotor et suit la direction alors indiquée. Le premier agent déposé s'arrête donc sur la case centrale, le second sur la case au nord de la case centrale, etc. (voir l'encadré ci-dessous). Petit à petit, des cases du plan sont occupées.

D'un étonnement à l'autre

Ce qu'on voit alors se dérouler suscite de nombreuses surprises (on trouve des programmes pour observer ce processus sur www.cs.uml.edu/~ffjpropp/rotor-router-model/#01 ou <http://rotor-router.mpi-inf.mpg.de/applet/>).

Premier étonnement : jamais un agent ne tourne en rond indéfiniment, tous finissent par trouver une case vide où s'arrêter. La propriété se démontre en effectuant un raisonnement par l'absurde. Supposons qu'un agent se mette à repasser toujours par le même chemin et parcoure donc indéfiniment et périodiquement le même ensemble de cases. L'ensemble des cases de ce circuit est fini et a donc un bord (des cases du circuit adjacentes à des cases n'appartenant pas au circuit). En passant plusieurs fois sur une telle case, l'agent finit par faire pointer le rotor de la

Le rotor-router sur le plan



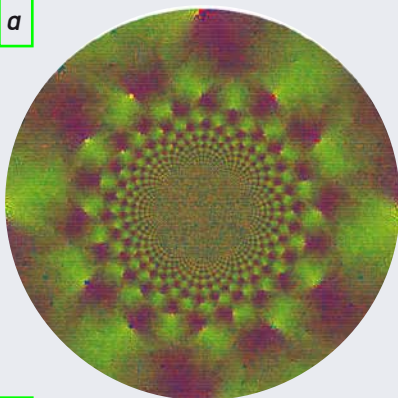
On pose successivement des agents mobiles sur la case centrale (entourée d'un cadre noir) d'un quadrillage infini du plan. Quand un agent arrive sur une case vide, il y dépose un rotor (une flèche

tournante) en l'orientant vers l'ouest et reste sur la case. Ainsi, le premier agent déposé occupe la case centrale (1). Quand la case sur laquelle arrive un agent est occupée, il fait tourner le rotor de 90° dans le sens horaire et suit la direction alors indiquée en se déplaçant d'une case, où le processus recommence (la dernière cellule créée est encadrée de rouge). Le jaune indique que le rotor pointe vers l'ouest, le rouge vers le nord, le bleu vers l'est, le vert vers le sud. Ainsi, l'agent 2 trouve une case centrale occupée, fait tourner son rotor de 90° qui pointe alors vers le nord et y dépose un rotor jaune (2). L'agent 3 trouve la case centrale occupée par un rotor rouge, le fait tourner pour qu'il devienne bleu et se déplace vers l'est, où il dépose un rotor jaune (3). Etc.

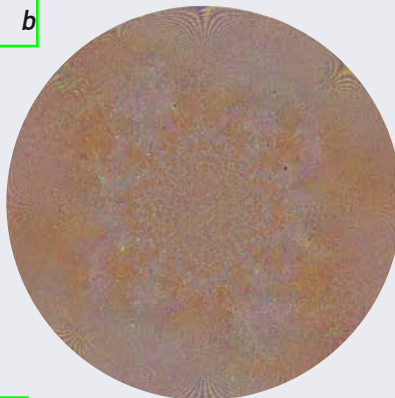
Avec ces règles, l'agent revient parfois sur ses pas et fait tourner un rotor plusieurs fois (trajet vert de l'étape (8)). La zone occupée par des agents arrêtés s'étend, mais est de plus en plus arrondie.

Les moirages

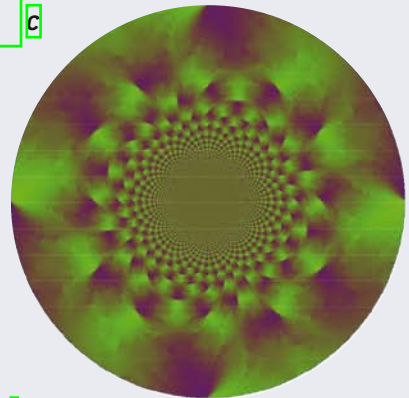
a



b

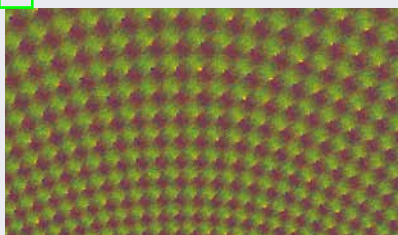


c



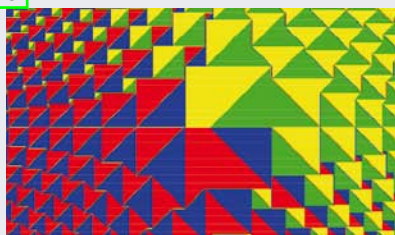
d

Rotor-router à quatre directions,
pour 3,14 millions d'agents



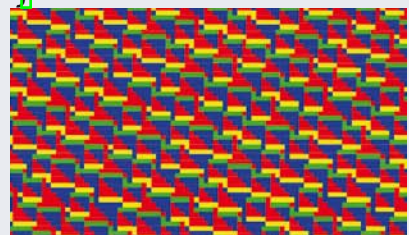
e

Rotor-router à huit directions,
pour 3,14 millions d'agents



f

Rotor-router à quatre directions,
pour 10 milliards d'agents



Agrandissements de l'image c

case vers une case n'appartenant pas au circuit, et sort donc du circuit... ce qui est une contradiction.

Deuxième étonnement : jamais aucune case n'est oubliée. Tout le plan se couvre d'agents arrêtés sans qu'il y ait de trou. Cela se démontre encore assez simplement. La case centrale enverra des agents sur ses quatre voisines une infinité de fois, car son rotor tourne à chaque nouvel agent déposé. Chaque case adjacente à la case centrale (nous les nommerons *cases de second niveau*) sera donc visitée une infinité de fois, et donc les rotors qui s'y trouvent tourneront une infinité de fois. Toutes les cases adjacentes à ces cases (*cases de troisième niveau*) seront donc visitées elles aussi une infinité de fois. Il en va de même pour les cases adjacentes à ces cases (*cases de quatrième niveau*), etc. De proche en proche, toute case du plan est concernée et voit donc passer une infinité d'agents.

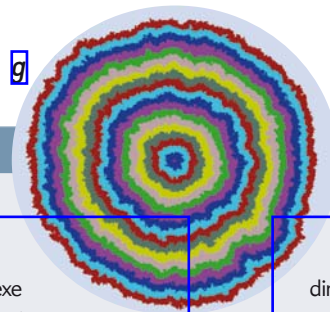
Troisième étonnement : le dessin formé par les cases occupées est étonnamment rond. Le quadrillage du plan n'est pas du tout isotrope, puisque l'horizontale et la verticale y jouent des rôles privilégiés ; il est donc inattendu de voir apparaître la forme isotrope d'un disque !

Des disques de plus en plus parfaits

Certains affirment cependant que ce rond n'est pas une surprise. Pour eux, les agents qui partent de l'origine suivent des chemins qui changent toujours (à cause des rotors) et qui traitent donc uniformément toutes les directions possibles, ce qui dessine nécessairement un rond. Sous cette forme, l'argument est assez vague, et d'ailleurs d'autres mécanismes proches de celui du rotor-router ne dessinent que des cercles imparfaits, alors qu'on pourrait argumenter de la même façon. En mesurant leur

rotondité par un procédé mathématique (le rapport des rayons des cercles inscrit et circonscrit à toutes les cases occupées), on reconnaît que ce qui se passe pour le rotor-router est un rond bien plus précis que ceux dessinés par ses concurrents. À trois dimensions ou plus, le mécanisme du rotor-router engendre des sphères, elles aussi presque parfaites.

Les mathématiciens se sont mis au travail et on dispose aujourd'hui de démonstrations que le rotor-router produit les ronds observés ! Les résultats les plus fins sont dus à Lionel Levine, de l'université de Californie à Berkeley, et à Yuval Peres, des laboratoires de Microsoft à Redmond. En 2009, ils ont établi que l'ensemble des cases occupées par les agents quand n agents se sont arrêtés contient un disque de rayon r_n (disque inscrit), et est contenu dans un disque de rayon r'_n (disque circonscrit) et que le rapport r_n/r'_n tend vers 1 quand n tend vers l'infini. Leurs



Quand on dépose successivement des agents dans la case centrale et qu'ils se déplacent jusqu'à trouver une case vide (règles indiquées dans l'encadré page 77), ils occupent une zone circulaire de plus en plus parfaite. Si les cases sont coloriées en fonction de l'orientation du rotor qui s'y trouve, on observe alors des motifs complexes dont on ne sait pas clairement expliquer la présence, ni même décrire la structure.

Le dessin (a) montre ce coloriage pour le rotor-router à quatre directions. Le dessin (b) montre le coloriage pour un rotor-router à huit directions (chaque flèche tourne d'un huitième de tour à chaque passage d'agent, ce qui désigne une des huit cases entourant la case).

Les dessins (a) et (b) ont été réalisés en faisant circuler 3,14 millions d'agents. Le dessin (c) a été réalisé avec

10 milliards d'agents (à partir de la page <http://rotor-router.mpi-inf.mpg.de/>). Il semble mystérieusement être une version plus lisse, mais identique, du dessin (a) à 3,14 millions d'agents.

Lorsqu'on grossit le dessin (c) obtenu avec 10 milliards d'agents, on observe toutes sortes de structures géométriques aussi régulières qu'inexpliquées (d, e, f).

Quand un graphe infini connexe est donné, qu'on munit chaque nœud d'un rotor et qu'on y dépose un agent, le mécanisme du rotor-router fait qu'il n'existe que deux possibilités : soit l'agent passe une infinité de fois par chaque nœud (cas récurrent), soit il ne passe qu'un nombre fini de fois à chaque nœud (cas transitoire). On montre que pour tout graphe infini connexe, il existe une façon de fixer les positions initiales des rotors de manière à avoir une configuration récurrente.

Pour le dessin (g), on a déposé un rotor dans chaque case du quadrillage du plan au hasard

uniformément dans les quatre directions. La figure représente l'ensemble des

emplacements par lesquels l'agent est passé quand il s'est déplacé 2 milliards de fois. La couleur d'une case a été choisie en fonction du nombre de fois que l'agent a visité la case : plus la case est éloignée du point de départ, plus ce nombre est petit. On conjecture que la forme de la surface occupée devient de plus en plus ronde (comme dans le cas où des agents sont déposés les uns après les autres au centre et qu'ils s'arrêtent quand ils trouvent une case vide). Mais cette conjecture est considérée très difficile et on ignore comment l'aborder aujourd'hui.

résultats donnent des précisions sur la vitesse avec laquelle le rapport converge vers 1 (voir l'article de L. Levine et Y. Peres dans la bibliographie).

La preuve mathématique justifie et témoigne de l'extraordinaire rotondité observée, pourtant, comme elle est compliquée, il est difficile de formuler en quelques mots des arguments qui éclairent vraiment le mystère de la rotondité. Les mathématiques démontrent que ce que l'on voit est réel, mais ne nous persuadent pas qu'il n'y a rien d'étonnant !

Des motifs incompréhensibles

Un quatrième étonnement saisit l'observateur de la figure obtenue après un grand nombre d'étapes. Si l'on colorie les cases en choisissant une couleur par direction possible du rotor, on observe alors des motifs de moirages complexes, évoquant

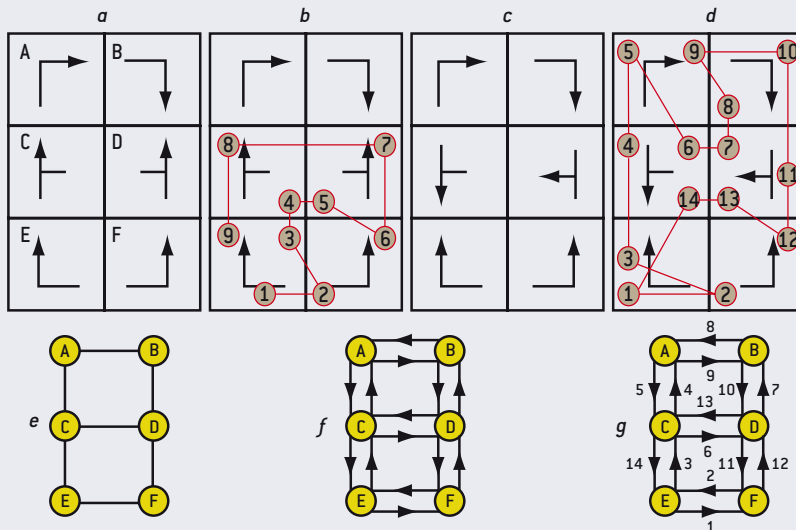
des fractales qui structurent l'intérieur du disque rempli (voir l'encadré ci-dessus). Aucune explication claire de ce phénomène n'a été proposée, et d'ailleurs il est difficile d'imaginer ce que pourrait être une telle explication, puisqu'on ne sait pas formuler précisément ce qui est à expliquer !

Le comportement observé provoque un cinquième étonnement un peu plus subtil, mais peut-être encore plus puissant. Il provient de la découverte que le mécanisme du rotor-router est « abélien » (on dit aussi « commutatif »). Cela signifie qu'il a la propriété suivante : si une configuration de rotors et d'agents arrêtés est donnée, que l'on fait partir un agent d'un point A jusqu'à ce qu'il s'arrête sur une case vide, puis qu'on fait partir un agent d'un point B jusqu'à ce qu'il s'arrête sur une case vide, alors on obtient la même configuration finale que si on avait fait partir d'abord l'agent du point B, puis l'agent du point A.

Une conséquence remarquable de cette commutativité est que si l'on dépose N agents progressivement au point de départ 0 et qu'on les fait avancer jusqu'à trouver une case vide qu'ils occupent, à chaque fois en attendant que le dernier agent lancé soit arrivé pour faire partir le suivant (procédé conduisant à un disque presque parfait), on arrive exactement à la même configuration que si l'on fait avancer N agents partant de l'origine dans un ordre quelconque sans attendre que chaque agent se soit installé dans une case vide avant d'en faire partir un nouveau.

La raison de s'intéresser au mécanisme du rotor-router sur le plan est qu'il constitue un modèle déterministe de la diffusion centrale : l'étalement à partir d'un point donné d'une série d'effets ou de particules. Si l'on dépose successivement des agents au centre du plan et qu'on leur demande de suivre un chemin aléatoire jusqu'à trouver une case vide, on définit le modèle le

Le miracle des circuits eulériens



Un circuit eulérien sur un graphe orienté (où chaque arête est dotée d'un sens de parcours) est un chemin qui revient à son point de départ en ayant parcouru chaque arête du graphe une fois exactement. Un chemin eulérien passe donc aussi par chaque nœud du graphe.

De façon presque magique, le rotor-router découvre automatiquement et rapidement de tels circuits eulériens. Considérons par exemple six cases d'un quadrillage formant un rectangle 2×3 (a). Chaque case est reliée à ses voisins quand elles existent. Cela détermine un graphe non orienté (e) auquel on associe un graphe orienté (f) en dédoublant chaque arête. D'après le théorème d'Euler, un tel graphe possède des circuits eulériens. Nous allons utiliser un rotor-router pour en découvrir un.

Posons un rotor dans chaque case. La case A est par exemple munie d'un rotor à deux positions,

puisque'elle est reliée à deux autres cases (B et C). Orientons les rotors en prenant la première direction disponible à partir de la position nord en tournant dans le sens horaire. Les six rotors et leurs directions initiales sont dessinés en (a). On pose un agent dans la case E, et on le laisse faire selon la règle de fonctionnement des rotor-routers : l'agent fait tourner le rotor de la case dans lequel il se trouve, et suit la direction qu'il indique alors, et recommence dans la nouvelle case. Le parcours de l'agent suit le chemin indiqué en (b) : EFECDFDCE.

Il revient donc dans la case E sans être passé partout. C'est la phase d'ini-

tialisation. Les rotors ont changé de direction et sont maintenant dans les orientations indiquées par le dessin (c). L'agent reprend son cheminement et, cette fois en 14 étapes, revient en E après avoir parcouru un chemin eulérien. À l'issue de ce parcours, il a remis tous les rotors comme ils l'étaient en (c) : il reprendra donc indéfiniment le chemin eulérien découvert (représenté en (d) et en (g)).

Ce qui se produit ici est général. Quel que soit le graphe non orienté initial, un agent sans mémoire, grâce au système des rotors, finit toujours par découvrir un circuit eulérien du graphe orienté associé, qu'il parcourt alors indéfiniment. Cette méthode permet à un amnésique de sortir d'un labyrinthe quelle que soit sa complexité, pourvu qu'il dispose d'une craie pour dessiner l'équivalent des rotors à chaque carrefour.

plus classique de diffusion centrale nommé IDLA (*Internal Diffusion-Limited Aggregation*, ou agrégation interne limitée par la diffusion) introduit en 1992. Les chemins aléatoires peuvent être conçus de plusieurs façons, mais la plus simple consiste pour chaque pas fait par l'agent à lancer un dé à quatre faces et, selon le résultat, à faire se déplacer l'agent d'une case vers le nord, le sud, l'est ou l'ouest.

James Propp présente le rotor-router comme une « dérandomisation » du modèle classique de diffusion centrale, c'est-à-dire comme un modèle aussi proche que possible du modèle IDLA, mais ne dépendant plus du hasard. Bien que déterministe, le modèle du rotor-router a de nombreuses propriétés communes avec le modèle aléatoire, et sous une forme plus nette. Par exemple, dans le modèle aléatoire IDLA, on observe temporairement des trous dans la forme circulaire construite par les agents arrêtés. Ce n'est jamais le cas avec le rotor-router. Autre exemple : la frontière de l'ensemble des cases occupées, dont on démontre aussi qu'elle devient de plus en plus ronde dans le modèle aléatoire, est bien plus lisse avec le rotor-router.

Patrouilles sur un graphe

Le mécanisme du rotor-router a une capacité étonnante à parcourir efficacement un graphe quelconque. On se donne un graphe G non orienté (on ne précise aucun sens de parcours pour les arêtes) à nombre fini de nœuds et d'arêtes. Chaque nœud est muni d'un rotor. On suppose que le graphe est connexe : quels que soient les nœuds A et B du graphe, il existe un chemin allant de A à B. En un nœud quelconque, on pose un agent unique qui se met à suivre les indications des rotors sans jamais s'arrêter, en les faisant tourner à chaque fois qu'il passe. Ce qui se produit est là encore tout à fait remarquable.

Quels que soient le graphe, la position initiale des rotors et l'endroit d'où part l'agent, il visitera chaque nœud une infinité de fois sans en oublier aucun. Pour le démontrer, on note qu'il existe nécessairement un nœud N du graphe qui est

visité une infinité de fois. On raisonne alors comme pour notre « premier étonnement » à propos du rotor-router sur le plan : les nœuds voisins de N voient aussi passer l'agent une infinité de fois, de même que les voisins des voisins de N , etc.

Plus étonnant et même franchement miraculeux : après une période d'errance, l'agent entre dans un parcours cyclique qui est un parcours eulérien du graphe orienté G' associé à G . Précisons ici ce que sont les parcours eulériens de G' . Le graphe que nous avons considéré a des arêtes non orientées. Si l'on remplace chacune des arêtes de G par deux arêtes orientées, une pour chaque sens de parcours, cela donne un graphe G' orienté associé à G . Un parcours eulérien du graphe G' est alors un chemin qui emprunte chaque arête orientée une fois exactement. Ce chemin empruntera donc chaque arête du graphe G deux fois exactement.

Un parcours eulérien pour sortir de tout labyrinthe

Le théorème d'Euler indique que si un graphe orienté connexe est tel que chaque nœud a autant d'arcs arrivant sur lui que d'arcs qui en sortent, alors il existe nécessairement un parcours eulérien du graphe. Ici, le graphe G' a la propriété demandée (car chaque arc non orienté de G a donné deux arcs orientés opposés dans G'). Il n'y a donc pas de surprise à ce qu'un tel parcours eulérien de G' existe. En revanche, que l'agent posé n'importe où en trouve un tout seul, simplement parce qu'il utilise les rotors du graphe, est inattendu. L'agent n'a aucune mémoire propre, et pourtant il réalise une tâche qui semble exiger de se souvenir de ce que l'on fait et d'avoir une vision globale du graphe (voir l'encadré page précédente) !

Ce résultat fournit à un agent sans aucune mémoire une méthode sûre pour parcourir entièrement un graphe. Concrètement, cela vous indique un procédé pour sortir d'un labyrinthe, aussi compliqué soit-il... si vous disposez d'une craie. En effet :

– À chaque fois que vous passez dans un carrefour du labyrinthe, vous dessinez au centre du carrefour une flèche que vous faites tourner à chaque passage (vous effacez la précédente, et vous dessinez une nouvelle flèche pointant vers la branche suivante du carrefour dont, lors du premier passage, vous avez numéroté les branches). Cette flèche joue le rôle d'un rotor. Même si vous êtes totalement amnésique, vous serez assuré de parcourir tout le labyrinthe et donc d'en trouver la sortie... ou le trésor.

Terminons en mentionnant quelques jolis résultats obtenus sur le problème de la patrouille sur un graphe infini connexe.

Supposons un graphe (non orienté) infini et connexe (par exemple celui associé au quadrillage infini du plan). On a fixé des rotors en chaque nœud (ou case) et déposé un agent en un nœud N . L'agent se déplace indéfiniment sur le graphe en faisant tourner les rotors. Deux cas seulement sont possibles : soit chaque nœud est visité une infinité de fois (cas dit récurrent), soit aucun nœud n'est visité une infinité de fois (cas transitoire).

La démonstration s'appuie à nouveau sur l'idée que si un nœud est visité une infinité de fois, il en est de même de ses voisins, donc des voisins de ses voisins, etc. Plus inattendus sont les résultats suivants :

– Si un graphe infini connexe est donné ainsi qu'une configuration des rotors, et qu'en déposant un agent en un nœud N , on se trouve dans le cas récurrent, alors en déposant l'agent n'importe où, on se trouvera aussi dans le cas récurrent.

– Quand on considère le graphe du quadrillage (chaque case est reliée à ses quatre voisines nord, sud, est et ouest) ou sa généralisation en dimension k ($k > 2$), il existe des configurations initiales des rotors qui produisent le cas récurrent.

– Pour tout graphe infini connexe, il existe une façon de fixer les positions initiales des rotors de manière à avoir une configuration récurrente.

Le simplissime mécanisme du rotor-router n'a pas encore livré tous ses secrets. Il occupera encore un bon moment mathématiciens et informaticiens.

LES AUTEURS



Jean-Paul DELAHAYE et Philippe MATHIEU sont professeurs à l'université de Lille et chercheurs au laboratoire CRISTAL (Centre de recherche en informatique, signal et automatique de Lille).

BIBLIOGRAPHIE

A. Kosowski et D. Pajak, *Does adding more agents make a difference ? A case study of cover time for the rotor-router*, *Automata, Languages and Programming*, LNCS 8573, Springer, pp. 544-555, 2014.

D. Dereniowski *et al.*, *Bounds on the cover time of parallel rotor walks*, *STACS 2014*, pp. 263-275, 2014.

L. Florescu *et al.*, *The range of a rotor walk*, prépublication arXiv:1408.5533, 2014.

O. Angel et A. Holroyd, *Rotor walks on general trees*, *SIAM Journal on Discrete Mathematics*, vol. 25(1), pp. 423-446, 2011.

Références supplémentaires sur www.pourlascience.fr



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

SCIENCE & FICTION

L'art de fabriquer des monstres

À quoi ressembleraient les animaux dans 10 millions d'années ? Avec quelques notions de biologie et de paléontologie, il est possible de l'imaginer.

Jean-Sébastien Steyer, Marc Boulay et Roland Lehoucq

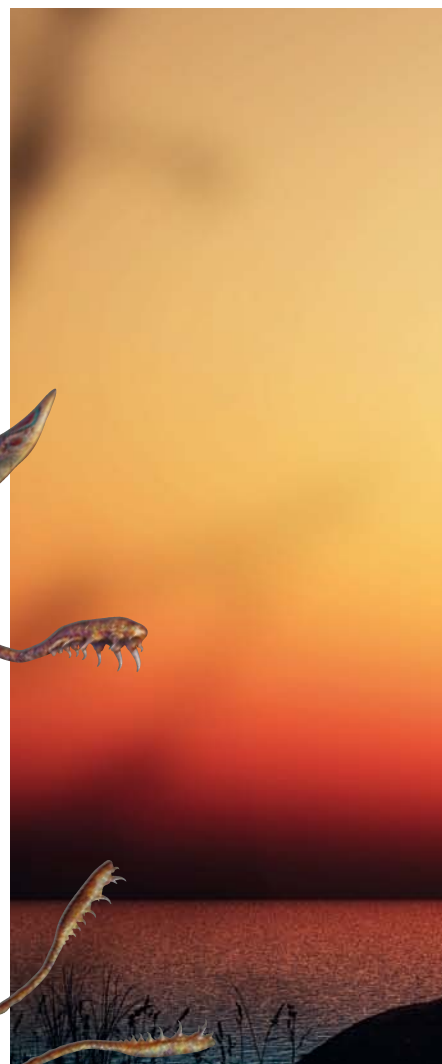
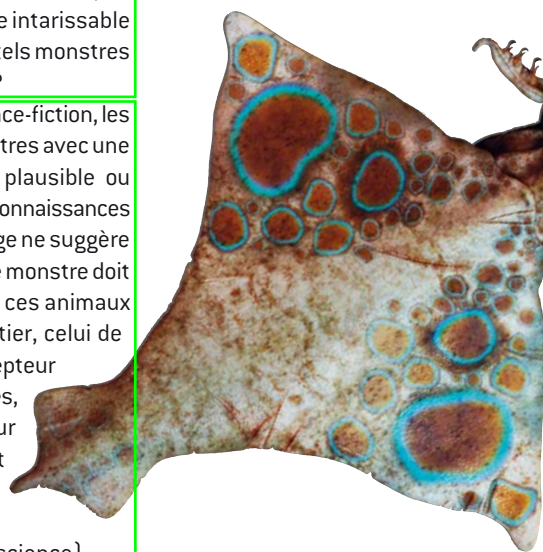
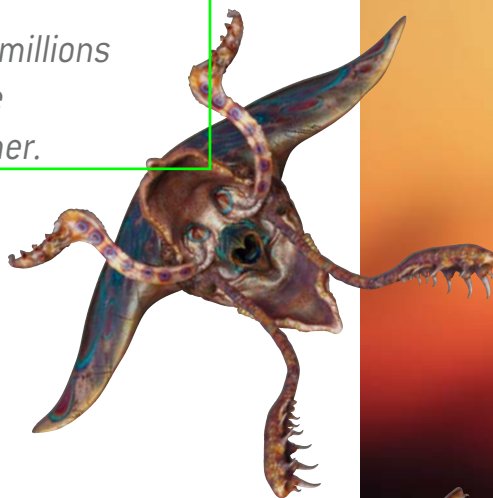
Vers géants, krakens tentaculaires, farouches quadrupèdes ou insectoïdes de l'espace, les monstres de la science-fiction constituent ce que nous pourrions nommer une étonnante « exobiodiversité » ! Face à ce foisonnement d'espèces fictives, on se demande : d'où vient cette intarissable imagination et comment de tels monstres peuvent-ils être plausibles ?

Dans les romans de science-fiction, les auteurs imaginent des monstres avec une description plus ou moins plausible ou originale en fonction de leurs connaissances en biologie. Au cinéma, l'image ne suggère plus mais montre. Dès lors, le monstre doit être crédible à l'écran. Créer ces animaux est devenu un véritable métier, celui de *creature designer* ou « concepteur de bestiaire ». Ces spécialistes, qui s'attachent à ce que leur bestiaire soit réaliste, sont souvent des artistes naturalistes jouissant donc d'une double compétence (art et science).

Ils doivent alors considérer de nombreux aspects de leurs animaux : sont-ils adaptés à leur environnement ? Leurs mouvements, leur attitude sont-ils crédibles ? Ces questions sont une étape indispensable pour que les personnages que l'on rencontre dans la saga *Star Wars* (George Lucas, 1977 pour le premier opus), dans *Avatar* (James Cameron, 2009), etc. soient le plus « authentiques » possible.

LES DESCENDANTS DES SEICHES
ressembleront-ils à ces animaux ? C'est le genre de réflexions que propose l'évolution spéculative, où l'on imagine des mutations aléatoires et les conséquences de la pression de sélection exercée par l'environnement.

Inventer des monstres – ou plus généralement des êtres fantastiques – est une activité ancienne : dans de nombreuses cultures, certaines divinités sont représentées par des hommes ou des femmes affublés de têtes d'animaux. En Égypte antique, la plupart des divinités (plus d'un millier !) sont zoomorphes. En Grèce antique, les auteurs peuplaient leurs récits héroïques (*l'Illiade*, *l'Odyssée*, etc.) de chimères telles que le minotaure (homme à tête de taureau), Pégase (cheval ailé) ou l'hippogriffe (cheval à tête et membres antérieurs d'aigle), pour ne citer qu'eux. L'exercice de création de chimères est simple et consiste alors à assembler une espèce réelle (un cheval, par exemple) et des éléments d'une autre espèce existante (des grandes ailes de cygne) afin de créer l'exotisme et l'étonnement. Cette ancienne « fabrique de monstres », même si elle est encore parfois





LOUIS : LE 11.12.2015. SON DE MARC BOULAY. MARCBOULAY.FR POSSIBLE PRODUCTIONS.COM

CE DESCENDANT IMAGINAIRE DU COLIBRI est fièrement perché sur une branche. Il a certes perdu ses ailes et presque toutes les plumes qu'arborait son ancêtre, mais il en conserve le bec, long et fin.

utilisée, est un peu désuète. En effet, les avancées en sciences naturelles en général, et en génétique en particulier, nous ont montré que la construction et la formation d'un organisme ne sont pas un simple jeu de Lego.

Pour éviter que leurs espèces fantastiques ne deviennent donc fantasques, les concepteurs de bestiaire d'aujourd'hui pratiquent la biologie spéculative. Ce n'est pas une science, dans la mesure où elle n'est pas testable dans un cadre hypothético-déductif, mais plutôt une sorte de jeu intellectuel dont les règles sont celles des sciences. Il s'agit d'imaginer des formes de vie plausibles, que ce soit dans l'univers réel (exobiologie spéculative), sur une Terre du futur (évolution spéculative) ou dans des histoires parallèles (uchronie biologique). L'exercice se doit d'être rigoureux et de prendre en compte des données bien réelles, comme celles relatives à la sélection naturelle ou aux contraintes



DANS DEMAIN, LES ANIMAUX DU FUTUR, le sculpteur Marc Boulay et le paléontologue Jean-Sébastien Steyer imaginent des animaux dans 10 millions d'années.

physiques du lieu où est censée se dérouler l'action (gravité de la planète, composition atmosphérique, climat, environnement, etc.). Elle n'en reste pas moins spéculative, l'évolution étant imprévisible.

Un précédent sous forme de canular

En 1962, les zoologistes Gerolf Steiner, sous le pseudonyme d'Harald Stümpke, et Pierre-Paul Grassé, faisant office de préfacier, signent *Anatomie et biologie des Rhinogrades*. Ce croustillant ouvrage présente d'une façon rigoureuse et institutionnelle une faune imaginaire, ou plutôt un groupe de mammifères fictifs caractérisés par un appendice nasal très développé – d'où leur nom vernaculaire de « nasins ». Si Grassé nous avertissait du caractère fictif de l'œuvre, « biologiste, mon bon ami, souviens-toi que

les faits les mieux décrits ne sont pas toujours les plus vrais », ce pavé dans la mare, pour l'époque, posait déjà les jalons de la biologie spéculative.

Cependant, à cause d'un contexte académique peut-être trop rigide, cette discipline ne sera en vogue qu'à partir des années 1980, surtout grâce au paléontologue américano-canadien Dale Russell.

En 1981, intrigué par la boîte crânienne volumineuse du dinosaure qu'il est en train de décrire (théropode mieux connu aujourd'hui sous le nom de *Troodon*), Dale Russell fait appel à son collègue et artiste taxidermiste Ron Seguin pour imaginer un

dinosaure uchronique et intelligent qui aurait survécu à l'extinction Crétacé-Tertiaire ! On retrouve cette idée dans *Dinotopia* (1992), un monde inventé par James Gurney où cohabitent les humains et les dinosaures.

L'évolution spéculative, qui invente des espèces futuristes, a aussi le vent en poupe. La même année, le géologue Dougal Dixon signe *After Man : A Zoology of the Future* (« Après l'Homme, les animaux du futur »), dans lequel il imagine diverses formes de vie sur Terre dans 50 millions d'années. Il intègre les modèles de la tectonique des plaques ainsi que des réflexions sur l'évolution du climat à sa démarche.

Neuf ans plus tard, dans une sorte d'anthropologie spéculative illustrée (*Man After Man : An Anthropology of the Future*, 1990), le même Dougal Dixon se penche sur le cas du genre *Homo*. Certains de ses « humains » sont largement inspirés de stéréotypes (hommes à grosses têtes, hommes aquatiques, etc.) des grands classiques d'anticipation tels ceux de Herbert G. Wells ou encore de René Barjavel. Le géologue créatif devient ensuite consultant pour une série documentaire : *The Future is Wild* (« Le Futur sera sauvage », 2002) qui donne vie à des écosystèmes complexes imaginés sur Terre dans le futur.

Donner vie aux animaux du futur

J'Kraken, future océan. L'histoire était écrite par Dougal Dixon, un paléontologue écossais, qui a imaginé un monde 50 millions d'années après la disparition de l'humanité.

Je sculptais les animaux à partir d'esquisses de l'auteur de façon à les rendre crédibles d'un point de vue biomécanique. Les sculptures étaient ensuite scannées pour les besoins du film.

En 2000, j'ai créé le projet *Demain, les animaux du futur*. Pour conceptualiser et créer ces environnements et ces animaux du futur, j'ai demandé de l'aide à Jean-Sébastien Steyer, fort de son expertise

scientifique en matière d'évolution.

Le point de départ de ce projet est que, pour moi, il n'y a pas plus d'inexactitudes à reconstituer un dinosaure en partant d'éléments fossiles que de constituer un animal du futur en partant de matériel contemporain. Tous deux font appel aux mêmes disciplines scientifiques : l'anatomie comparée, la biomécanique, les

processus de l'évolution et la paléontologie.

La naissance de chaque

animal se fait en plusieurs étapes. Avant d'imaginer le futur, j'étudie le passé et le présent, je me familiarise avec la physiologie des animaux actuels, leur façon de se déplacer et leur posture grâce à des documentaires animaliers, l'observation en terrarium, en aquarium et sur le terrain. J' imagine alors un animal (parfois Jean-Sébastien me suggère une idée) dont je crée une esquisse. Le résultat est envoyé à Jean-Sébastien qui l'analyse d'un point de vue scientifique. Nos nombreux échanges permettent d'affiner le concept.

Commence alors le travail de sculpture. J'ai opté pour la puissance d'un outil de sculpture numérique et organique utilisé pour de nombreux films, tel *Avatar* (James Cameron, 2009). Je commence par le squelette de l'animal, puis les muscles et enfin la structure globale. L'animal est ensuite placé dans un environnement tridimensionnel. Le rendu doit être généré, ce qui peut prendre plusieurs jours sur un ordinateur puissant. Il reste alors à ajuster la composition pour obtenir l'image finale en haute définition.

Marc Boulay

Sculpteur numérique et animalier

DES MUTATIONS ALEATOIRES et la sélection naturelle auraient conféré au descendant de la scolopendre la capacité de planer longuement lors de sauts dans les canopées tropicales. Les segments de son corps se sont élargis et forment une sorte d'aile qui augmente la portance de l'animal. Ses antennes, plus courtes que celles de son ancêtre, ne la gênent pas pour voler.



L'exobiologie spéculative n'a pas été en reste ; elle a envahi les écrans avec *Alien Planet* (2005), une autre série, orchestrée par le concepteur de bestiaire et illustrateur Wayne Barlowe qui imagine un monde plausible sur une autre planète. Citons aussi *Alien World* (2005) où, à la demande de la chaîne National Geographic, des scientifiques ont « construit » deux planètes (Aurelia et Blue Moon) sur lesquelles ils imaginent ensuite des formes de vie plausibles. Ces documentaires dépeignent de nouveaux astres, climats, écosystèmes, espèces etc. et nous ont donc fait passer de la planétologie à l'écologie spéculative : la spéculation est devenue multidisciplinaire !

Avec l'archéologue Jean-Paul Demoule et l'auteur de science-fiction Pierre Bordage, deux d'entre nous (R. Lehoucq et J.-S. Steyer) avons fait un pas de plus dans ce genre d'exercice en ajoutant une « histoire spéculative ». En effet, dans notre ouvrage *Exquise Planète* (2014), une espèce extraterrestre devient fortuitement assez intelligente pour créer sa propre histoire.

Cet ouvrage est proche de la catégorie « hard science fiction », un courant dans lequel les auteurs s'attachent à raconter des histoires tout en étant soucieux de respecter les connaissances scientifiques du moment – que ce soit en sciences physiques, naturelles ou humaines. C'est aussi un formidable moyen de diffusion du savoir auprès du grand public, puisque l'on met en scène les grandes avancées scientifiques récentes telles que la découverte d'exoplanètes, de plus en plus nombreuses, mais aussi celle,



CE PERROQUET SUPERPRÉDATEUR est le fruit d'une évolution spéculative. Pour l'imaginer, Marc Boulay et Jean-Sébastien Steyer se fondent notamment sur le processus de sélection naturelle. Ils ont imaginé l'extinction de certains grands mammifères terrestres, et la réoccupation de certaines niches écologiques au sol par les oiseaux. Une mutation, chez le perroquet, a réactivé des gènes qu'il a hérités de ses cousins, les dinosaures. L'oiseau exhibe des pseudo-dents acérées, un avantage certain pour ce prédateur du futur.

sur Terre, d'espèces extrémophiles ou présentant des morphologies « hors norme » (pour ne pas dire « extraterrestres »), qu'elles soient actuelles ou fossiles.

Imaginer des écosystèmes complets

Paléontologie et biologie spéculative se rejoignent sur certains aspects : si la paléontologie est bien une discipline scientifique (elle met en œuvre des méthodes testables, la phylogénie par exemple), le paléontologue souhaitant reconstruire un dinosaure (ou autre espèce disparue) doit faire preuve d'un minimum d'imagination, ne serait-ce que pour se faire une idée de sa couleur par exemple. Cette imagination est d'autant plus importante que le fossile est fragmentaire.

Pour redonner vie à une espèce, une solution consiste à travailler avec un « paléo-artiste », c'est-à-dire un artiste spécialisé dans les reconstitutions paléontologiques. Deux d'entre nous, le sculpteur (M. Boulay) et le paléontologue (J.-S. Steyer), ont combiné leurs domaines d'expertise pour transposer cette démarche appliquée aux animaux du passé à des espèces plausibles – aquatiques, amphibiens, terrestres ou volantes – qui pourraient exister sur Terre dans 10 millions d'années, à la façon de Dougal Dixon. Le livre *Demain, les animaux du futur* est le fruit de cette coopération de quinze années.

Quel type de réflexions peut-on ainsi avoir en évolution spéculative ? Nous sommes partis de l'idée que la plupart des grands mammifères terrestres disparaissent à la suite d'une extinction massive comparable à celle qu'ont connue les dinosaures non-aviens. De nombreuses niches écologiques sont alors vacantes sur la terre ferme. Les oiseaux, jusque-là souvent menacés par des prédateurs au sol, pourraient bien investir ces nouveaux territoires. Certains pourraient perdre leurs ailes au profit de puissantes pattes arrières (tels les descendants du perroquet, *ci-dessus*, ou du colibri, *page 83*). Ils gagneraient en agilité et pourraient bien être retenus par la sélection naturelle.

En outre, en faisant le choix de ne pas faire apparaître l'humanité dans ce scénario, ce livre est aussi une invitation à considérer notre impact sur la planète.

La biologie spéculative, loin d'être un exercice futile réservé à quelques adeptes, peut donc être utile pour mieux appréhender le réel. Elle est une fabrique de faux qui questionne le vrai, et l'évolution spéculative invente un futur plausible pour mieux comprendre le présent. ■

J.-S. STEYER est paléontologue au CNRS-MNHN, à Paris. M. BOULAY est sculpteur animalier et sculpteur numérique. R. LEHOUCQ est astrophysicien au CEA, à Saclay.



ART & SCIENCE

Les paréïdolies artificielles

Les algorithmes de Google, lorsqu'ils sont livrés à eux-mêmes, font surgir d'une image des éléments (oiseaux, chiens, pagodes...) qui n'existent pas. Ce phénomène est semblable à celui qui vous fait distinguer des visages dans les nuages.

Loïc MANGIN

Connaissiez-vous la paréïdolie ? Sans doute, même si le nom vous avait échappé, car ce phénomène consiste à distinguer des formes connues dans des images où elles sont pourtant absentes. Vous avez tous vu des visages ou des animaux « apparaître » dans les nuages, dans la mousse d'un café, dans un rocher... La paréïdolie expliquerait les visions de figures iconiques ou religieuses, telle cette Vierge Marie perçue sur un toast, lequel a été vendu 28 000 dollars en 2004. Ces cas extrêmes ne doivent pas faire oublier que cette tendance à créer du sens à partir de formes aléatoires est utile au cerveau qui cherche sans cesse à structurer son environnement.

La paréïdolie serait donc l'apanage des humains, ou au moins des animaux dotés d'un cerveau suffisamment complexe ? Pas nécessairement. Les ingénieurs de Google ont découvert que les machines qu'ils mettent au point pour la reconnaissance d'images identifient aussi des formes qui n'existent pas. Ils ont nommé ce phénomène « inceptionnisme », en référence au film *Inception* de Christopher Nolan dans lequel les héros modifient le subconscient d'individus *via* des rêves partagés.

Chez Google, l'histoire commence quand les spécialistes se penchent sur le fonctionnement interne des « réseaux de neurones » qu'ils développent pour classer les images. Les réseaux de neurones sont des algorithmes, calqués sur le fonctionnement des neurones biologiques, où des neurones

formels reçoivent des informations (venues d'autres neurones) et en émettent (vers d'autres neurones) selon des paramètres prédéfinis. Par exemple, et de façon très simplifiée, un neurone peut collecter plusieurs nombres transmis par des neurones en amont et transférer en aval la somme de ces nombres lorsqu'elle dépasse un certain seuil. Les neurones formels sont souvent agencés en couches intercalées (de 10 à 30 le plus souvent) entre les neurones d'entrée et ceux de sortie.

Les ingénieurs de Google ont entraîné leurs réseaux de neurones avec des millions d'images et en ajustant les paramètres de chaque neurone de façon à obtenir une classification correcte des images. Dans le mille-feuille du réseau, à mesure que l'on s'approche de la décision finale (ce que représente l'image soumise) par la dernière couche, les neurones extraient des caractéristiques toujours plus fines de l'image. Ainsi, une première couche peut repérer les coins et les bords, la suivante s'intéressera aux motifs, etc.

Pour en savoir plus sur ce qui se passe à l'intérieur du réseau, on peut le prendre à l'envers et se demander quelles images conduisent à une réponse prédéfinie, par exemple une banane. Pour répondre, on commence avec une image pleine de bruit aléatoire, puis on la modifie progressivement jusqu'à ce que le réseau y identifie une banane. On obtient en quelque sorte des images que le réseau de neurones a créées lui-même. Cette démarche renseigne

sur les caractéristiques essentielles que le réseau de neurones extrait de l'objet en question (ici la banane).

Une autre fenêtre sur le fonctionnement interne du réseau consiste à ne pas lui indiquer les caractéristiques qu'il doit repérer et amplifier pour reconnaître une image. À partir d'une image quelconque, on regarde alors ce que les couches du réseau ont détecté et retenu, puis on demande à l'algorithme d'insister sur les éléments identifiés. En d'autres termes, l'idée consiste à demander au réseau : « Quoi que tu vois, rends-le encore plus visible. » Ainsi, dès qu'un

a Un paysage naturel rempli de sérénité (a) devient une cité lacustre onirique (b) quand il est scruté par les algorithmes de Google.



Rendez-vous

élément d'une image ressemble à un oiseau, le réseau renforcera la ressemblance dans une sorte de boucle de rétroaction d'où sortira un oiseau très détaillé. Or le volatile n'existe pas : l'algorithme est victime de paréidolie.

Les exemples de ce nouveau courant artistique (l'inceptionnisme ?) sont déroutants et spectaculaires. Ici, un paysage naturel (a) se hérisse soudain de tours et se peuple d'organismes inédits (b)... Là, avec

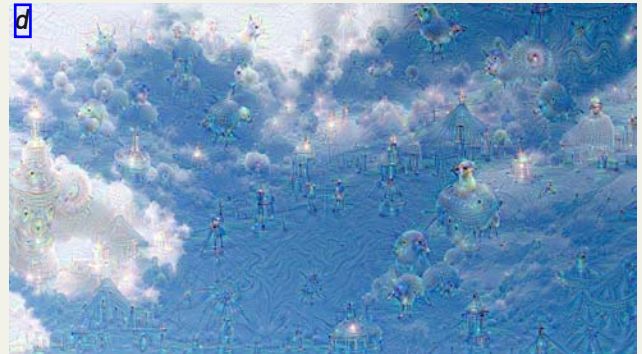
un algorithme entraîné avec des images d'animaux, des créatures chimériques surgissent d'un ciel nuageux (c et d) : un chien-amiral (e), un cochon-escargot (f), un oiseau-dromadaire (g), un poisson-chien (h)... Là encore, le personnage du *Cri* d'Edvard Munch devient un chien...

Plus étonnant, lorsque le réseau de neurones part d'une image totalement bruitée (un ensemble de pixels aléatoires), il

identifie peu à peu des éléments et construit des images oniriques.

Isaac Asimov avait publié en 1986 une nouvelle intitulée *Le Robot qui rêvait*. On sait désormais que le cerveau (un réseau de neurones) de cette machine a été fourni par Google.

Inceptionism : Going deeper into neural networks, Google Research Blog, 2015.
<http://bit.ly/PLS-Incep>



Chien-amiral



Cochon-escargot

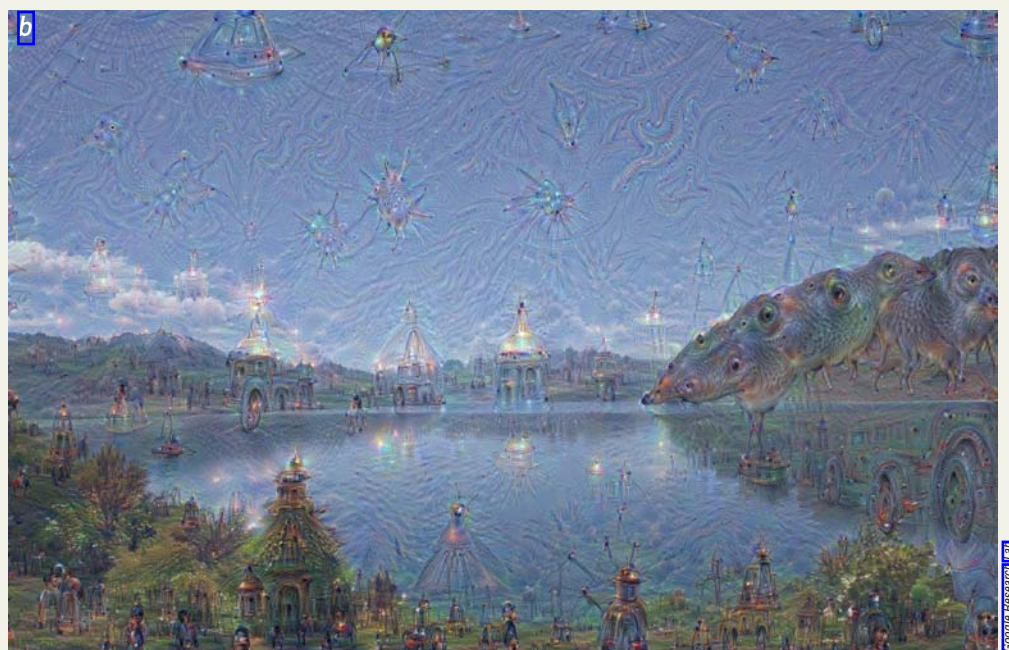


Oiseau-dromadaire



Poisson-chien

Quand, au mieux, vous ne distinguez que visages et lapins dans un ciel nuageux banal (c), les algorithmes de Google y voient un bestiaire psychédélique (d) de créatures chimériques (e à h).



© 2015 Google

DOSSIER POUR LA SCIENCE

POMPÉI, CITÉ DES PLAISIRS

Fresques, accessoires,
graffitis... révèlent une
sexualité différente
de la nôtre



Actuellement
en kiosque

DOSSIER POUR LA SCIENCE - SOCIOLOGIE - ÉCONOMIE - ART DE VIVRE - ARCHÉOLOGIE

ROME

une civilisation
qui se pensait
éternelle



M 01930 68 F 7.50 € - RD

ARCHÉOLOGIE D'UN EFFONDREMENT

Le rôle des inégalités, des déficits
commerciaux et des épidémies
dans la chute de l'Empire romain.

N° 88 Juillet-Septembre 2015

pouirlascience.fr

Belgique : 8,90 € - Canada : 12,50 \$ - CA - Guadeloupe / Martinique / Guyane / Réunion / St Martin / St : 12,50 \$ - France : 7,50 € - Italie : 12,50 € - Luxembourg : 12,50 € - Maroc : 100 DH - Mexique : 12,50 \$ - Nouvelle-Calédonie : 12,50 \$ - Pays-Bas : 12,50 € - Portugal : 8,50 € - Royaume-Uni : 7,50 £ - Suisse : 12,50 CHF - Tunisie : 12,50 TND - USA : 12,50 \$

N° 88 - 120 pages - prix de vente 7,50 €

www.pouirlascience.fr

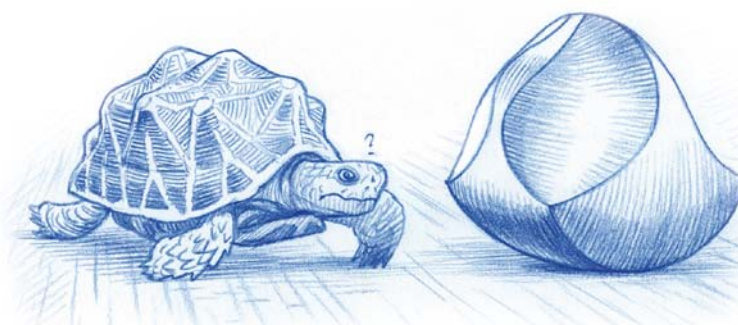
Le site de référence de l'actualité scientifique internationale

IDÉES DE PHYSIQUE

Le culbuto, la gömböc et la tortue

Retrouver son équilibre aussi facilement qu'un culbuto ? Ce serait l'idéal pour les tortues, dont certaines ont une carapace de forme avantageuse, proche de la gömböc.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK



Posés sur le dos, de nombreux animaux à carapace, insectes ou tortues, ont toutes les peines du monde à se redresser sur leurs pattes. Ce n'est pas le cas de la tortue étoilée d'Inde (*Geochelone elegans*), qui se redresse sans trop d'effort grâce à la forme particulière de sa carapace. Elle ressemble à la gömböc, un objet remarquable construit par deux scientifiques hongrois en 2007 : il a la particularité d'être de densité homogène et de n'avoir qu'une seule position d'équilibre stable lorsqu'il est placé sur un plan horizontal [voir la figure ci-dessus]. Cet objet fascinant, popularisé notamment par le mathématicien Cédric Villani, nous permet de (re)découvrir avec un œil neuf les lois de l'équilibre.

LA PARTICULARITÉ DE LA GÖMBÖC est d'être un solide homogène qui, posé sur un plan horizontal, n'a qu'une seule position d'équilibre stable. La carapace de la tortue étoilée d'Inde a une forme similaire, ce qui est un avantage lorsque l'animal se retrouve sur le dos : il parvient à se redresser sans trop d'efforts.



LE PORTE-BOUTEILLE ne peut pas tenir tout seul en équilibre dans cette position. En revanche, avec la bouteille enfoncée de façon appropriée, l'ensemble est en équilibre : le centre de gravité du système se trouve au-dessus du « polygone de sustentation » défini par les points de contact avec le support. Quant au polyèdre représenté, il est homogène et ne peut reposer en équilibre que sur une face bien déterminée. Les mathématiciens ont prouvé que le nombre minimal de faces pour que cette propriété soit vérifiée est 19.

et la réaction du sol. Les forces de gravité s'exercent sur l'ensemble des parties de notre corps, mais tout se passe comme si leur somme, c'est-à-dire le poids, s'appliquait en un point unique : le centre de gravité (ou centre de masse).

Quant à la réaction du sol, elle est la résultante de toutes les petites forces verticales que le sol exerce sur notre semelle, et son point d'application est le barycentre de tous ces points de contact, chacun pondéré par l'intensité de la force qui s'y exerce. Il se situe donc dans le « polygone de sustentation », la plus petite surface convexe du plan qui contient tous les points de contact avec le sol.

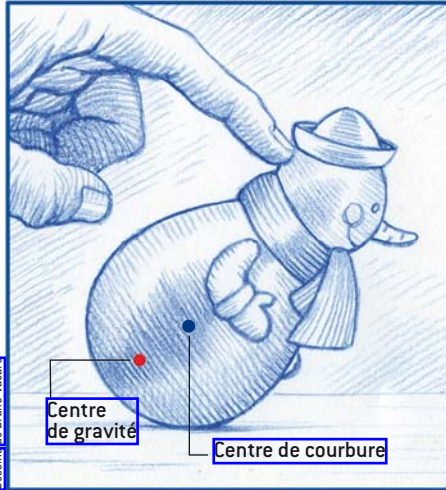
Pour que nous ne basculions pas, il faut que le couple (moment dû à deux forces de même intensité) créé par le poids et la réaction du sol soit nul. Ces deux forces opposées doivent donc être alignées, c'est-à-dire que le poids doit être à la verticale du point d'application de la réaction du sol. Si ce n'est pas le cas, nous perdons l'équilibre et basculons.

Une illustration saisissante de ce principe est le « porte-bouteille magique » [voir

Trouver son équilibre... et le garder

Lorsque nous cherchons à tenir debout sur un seul pied, nous sentons bien ce que signifie « être à l'équilibre » : c'est rester immobile sans basculer. À cette fin, l'ensemble des forces qui s'exercent sur le corps doivent se compenser, et il doit en être de même pour l'ensemble des moments associés à ces forces (le moment d'une force par rapport à un point est, en grandeur, le produit de l'intensité de la force par la distance entre le point et la droite qui porte la force).

La situation est ici simple à analyser, car seules deux forces entrent en jeu : le poids



soulever l'objet. Dès que cette action cesse, il retombe dans sa position basse : l'équilibre est alors stable. Si, au contraire, le centre de gravité s'abaisse, notre action revient à faire descendre l'objet, et il ne remontera pas de lui-même : l'équilibre est instable.

Le culbuto, un rêve de tortue

Bien souvent, la stabilité est obtenue lorsque l'objet n'est pas homogène et que sa masse est concentrée près du point de contact avec le sol, comme dans le culbuto (voir la figure ci-contre). Ce jouet d'enfant sous forme de personnage se caractérise par une assise (généralement une demi-sphère) assez large et lestée, surmontée par un corps creux qui s'affine. Son centre de gravité est ainsi très bas, et il s'élève lorsqu'on incline le culbuto, même fortement. Aussi, quand on le lâche à partir d'une position inclinée, le culbuto se redresse et oscille avant de s'immobiliser tout droit.

Cette stabilité, qui porte ici sur un seul point de contact, serait avantageuse pour certains animaux – notamment les tortues et les coléoptères, animaux à carapace que les circonstances conduisent parfois à finir sur le dos, pattes en l'air. Si cette position inconfortable et, à terme, mortelle était trop stable, il leur serait impossible de se redresser en contorsionnant leurs pattes et leur cou. L'idéal ne serait-il pas que les positions d'équilibre sur le dos soient toutes instables et que la position sur le ventre soit stable, c'est-à-dire que l'animal soit une sorte de culbuto vivant ?

La tortue est approximativement de symétrie cylindrique (les coupes de sa carapace le long de son axe longitudinal qui va de la tête à la queue sont grossièrement identiques, en dehors de ses extrémités). Contrairement au culbuto, le reptile est à peu près homogène (on estime négligeables les variations de densité entre chair, carapace et os). Peut-on alors avoir une seule position d'équilibre stable ? En 1995, le mathématicien russe Vladimir Arnold a répondu à la question par la négative : un objet homogène

LE CULBUTO est un objet de densité non homogène, construit de telle sorte que son centre de gravité (en rouge) soit bas, et au-dessous du centre de courbure de la partie roulante du jouet. Lorsqu'on incline le culbuto, le centre de gravité s'élève : si on lâche alors le culbuto, il revient à la position verticale en oscillant de part et d'autre de cette dernière, qui est une position d'équilibre stable.

la figure page 89). Il s'agit d'une planchette percée d'un trou. Si vous tentez de la poser sur sa tranche la plus petite, qui est taillée de biais, elle bascule, car la projection de son centre de gravité est hors de la surface de contact. En revanche, en enfonçant le goulot d'une bouteille dans la perce, vous pouvez ajuster la position du centre de gravité de l'ensemble bouteille/porte-bouteille de telle façon qu'il soit situé à la verticale de la tranche en contact avec le support. La bouteille semble alors suspendue comme par magie.

Avec le polygone de sustentation, l'équilibre d'un objet plat ou à pattes est donc relativement simple à analyser. Qu'en est-il des objets ronds, qui n'ont qu'un seul point de contact avec le plan qui les supporte ? Pour que le couple exercé par le poids et la réaction soit nul, le centre de masse doit se trouver à la verticale du point de contact. Mais si l'on pense à un crayon en équilibre sur sa pointe, on comprend que ce n'est pas suffisant : l'équilibre que nous pouvons trouver avec patience est instable. Dès que l'on s'écarte légèrement de la position d'équilibre, le basculement est immédiat.

Pour déterminer facilement la stabilité ou instabilité de l'équilibre, il suffit de déterminer ce que devient la position du centre de gravité lorsqu'on fait bouger légèrement l'objet. Si le centre de gravité s'élève, c'est que notre action revient à

LES AUTEURS



Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'université Pierre-et-Marie Curie, à Paris. Leur blog : <http://blog.idphys.fr>



Retrouvez la rubrique
idées de physique sur
www.pourlascience.fr

à symétrie cylindrique a au minimum deux positions d'équilibre stable !

Que se passe-t-il si l'on oublie la symétrie cylindrique ? Les mathématiciens ont, à ce jour, apporté deux types de réponses à cette question. D'une part, le Britannique John Conway et ses collègues ont montré en 1969 qu'un polyèdre homogène doit avoir au minimum 19 facettes pour être « monostatique » (stable sur une seule facette) : cela signifie que pour 18 de ses facettes de contact possibles, la projection de son centre de gravité est en dehors du polygone de sustentation et qu'il va basculer d'une facette à l'autre jusqu'à atteindre la facette stable (voir la figure page 89, en bas).

D'autre part, deux chercheurs hongrois, Gábor Domokos et Péter Várkonyi, ont démontré en 2006 l'existence de solides homogènes

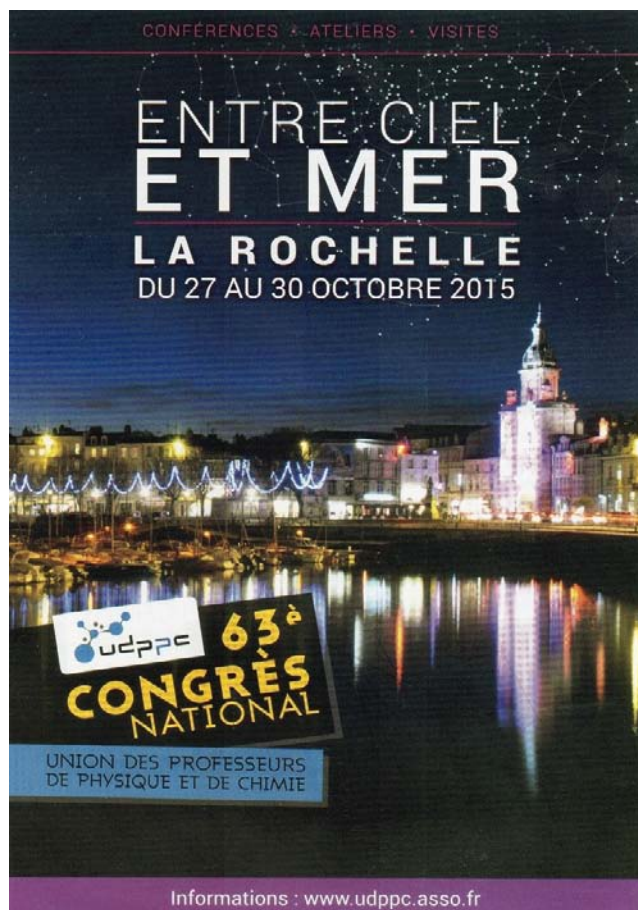
ayant une seule position d'équilibre stable sur un point de contact unique. Tel est le cas de leur « gömböc », (terme dérivé de *gömb*, qui signifie sphère en hongrois) construit par impression 3D l'année suivante et qui a acquis une belle renommée.

La gömböc est un objet délicat à fabriquer tant le moindre petit défaut est susceptible de se transformer en point d'équilibre stable. Cela explique sans doute pourquoi on ne trouve pas exactement ces formes dans la nature, même si l'on peut noter une forte ressemblance avec certaines carapaces, en particulier celle de la tortue étoilée d'Inde. Probablement en raison de cette similarité, les autres positions d'équilibre différentes de la position ventrale peuvent être facilement déséquilibrées. Pas tout à fait un culbuto, mais presque. ■

BIBLIOGRAPHIE

G. Domokos et P. L. Várkonyi, **Geometry and self-righting of turtles**, *Proceedings of the Royal Society B*, vol. 275, pp. 11-17, 2008.

P. L. Várkonyi et G. Domokos, **Mono-monostatic bodies : The answer to Arnold's question**, *The Mathematical Intelligencer*, vol. 28(4), pp. 34-38, 2006.



CONFÉRENCES • ATELIERS • VISITES

ENTRE CIEL ET MER

LA ROCHELLE

DU 27 AU 30 OCTOBRE 2015

udppc 63^e CONGRÈS NATIONAL

UNION DES PROFESSEURS DE PHYSIQUE ET DE CHIMIE

Informations : www.udppc.asso.fr

Avec la participation de

Jean DALIBARD

Les atomes froids :
un outil pour explorer le monde quantique

Serge DOUADY

Danse et chant des dunes

Serge ABITEBOUL

Des données à l'information
et aux connaissances : le Web de demain

Jean-Pierre LUMINET

Un siècle de Relativité Générale

Anny CAZENAVE

Océans, glaces, niveau de la mer et climat :
apport de l'observation spatiale

Etienne KLEIN

Ettore Majorana :
la résurrection d'un jeune physicien

et **25 autres conférenciers**

QUESTION AUX EXPERTS

L'argent fait-il le bonheur ?

Le bonheur augmente avec la richesse, mais seulement jusqu'à un certain seuil. Au-delà, on ne constate plus d'effet global : tout dépend de la façon d'utiliser son argent.

Rébecca SHANKLAND



« **S**i l'argent ne fait pas le bonheur, rendez-le », conseillait l'écrivain français Jules Renard. Alors, pour être heureux, faut-il refuser son salaire ou dilapider son héritage ? Ce n'est pas aussi simple. Les études indiquent que dans une certaine mesure, le bonheur dépend de l'argent.

On le quantifie en demandant aux personnes sondées d'évaluer leur vie sur une échelle de 1 (« la pire possible ») à 10 (« la meilleure possible »). Ainsi, les habitants des pays riches se déclarent en moyenne plus heureux que ceux des pays pauvres. Et dans un même pays, plus le revenu augmente, plus le sentiment de bonheur est élevé... jusqu'à un certain seuil.

Edward Diener, de l'université de l'Illinois, a montré qu'une fois le seuil de pauvreté dépassé (un peu moins de 1 000 euros par mois en France aujourd'hui), le bonheur augmente bien moins vite avec la richesse. La psychologue canadienne Lara Aknin et ses collègues ont estimé cette augmentation à environ 9 % pour un doublement des revenus. Au-delà d'une certaine richesse (environ 5 500 euros par mois d'après une étude américaine), il n'y a plus aucun effet.

Inutile, donc, d'espérer le nirvana en jouant au loto : une victoire vous procurerait une décharge d'émotions positives, mais votre niveau de bonheur reviendrait à la normale après quelques mois, selon des résultats obtenus par le psychologue américain Philip Brickman et ses collaborateurs. De

même, à l'échelle des sociétés, on constate que le niveau de bonheur moyen stagne depuis les années 1970 dans les pays développés, tandis que le PIB a beaucoup progressé. C'est ce qu'on appelle le paradoxe d'Easterlin. Comment l'expliquer ?

Le responsable serait un phénomène qualifié d'adaptation hédonique. La richesse semble réduire la capacité à savourer, car les choses devenant plus accessibles, on y accorde moins d'attention et de valeur ; *in fine*, on doit en avoir plus pour un même plaisir. En outre, le bonheur dépend de l'écart entre ses attentes et ses réalisations effectives... et la richesse pousse à réévaluer ses attentes à la hausse ! Jordi Quoidbach, de l'université Pompeu Fabra, et ses collègues ont ainsi montré que des vacanciers perdent le goût des destinations ordinaires après avoir effectué des voyages plus exotiques.

L'effet de la comparaison

Le niveau de bonheur n'augmente donc pas indéfiniment avec la richesse. Une fois satisfaits les besoins essentiels, ce qui importe n'est pas tant la quantité d'argent que la façon dont on l'utilise et... le fait d'en gagner plus que son voisin ! Dans une étude réalisée en 1998, Sara Solnick, de l'université de Miami, et son collègue ont demandé à des étudiants s'ils préféreraient gagner 50 000 dollars par an tandis que la population gagnerait en moyenne deux fois moins, ou 100 000 dollars alors que le revenu moyen serait deux fois et demie

plus élevé. La plupart des étudiants ont choisi la première option.

Comment bien dépenser pour être heureux ? Selon plusieurs études, l'acquisition de biens matériels n'est pas la panacée. Il est plus profitable de vivre de nouvelles expériences et de satisfaire les « besoins psychologiques fondamentaux » décrits par Edward Deci et Richard Ryan, de l'université de Rochester. Ces besoins sont les sentiments de compétence (qu'on peut augmenter par exemple en apprenant à jouer d'un instrument de musique), d'autonomie (se sentir maître de son destin) et de connexion sociale. Dans une expérience menée en 2008, Elizabeth Dunn, de l'université de la Colombie-Britannique, et ses collègues ont donné quelques dollars à dépenser aux participants, soit pour eux-mêmes soit pour autrui. Ceux qui se sont montrés altruistes ont ensuite rapporté un niveau de bonheur plus élevé.

À partir d'un certain seuil, mieux vaut donc modifier la façon de dépenser son argent que de tenter d'en gagner davantage. En particulier, l'utiliser avec altruisme permet d'augmenter durablement son niveau de bonheur, qui sera encore accru par un effet de contagion émotionnelle : plus ceux que vous côtoyez seront heureux, plus vous aurez de chances de l'être à votre tour. ■

Rébecca SHANKLAND est maître de conférences en psychologie à l'université Grenoble Alpes. Elle est auteure de *La psychologie positive* (Dunod, 2014).

Complétez votre collection!



Retrouvez tous les numéros depuis 1996 !

Commandez vos numéros sur
www.pourlascience.fr

POUR LA
SCIENCE ARCHIVES



Flashez ce QR code
et accédez
directement à
toutes les archives !

SCIENCE & GASTRONOMIE

Légumes artificiels à foison

En jouant avec des gels et des liquides, on peut produire des fruits ou légumes artificiels bien plus vite que par des cultures in vitro.

Hervé THIS



Des oranges artificielles ? Ce furent, en 2001, les « conglo-mères ». Aujourd'hui, on sait obtenir mieux : des tissus végétaux artificiels dont les compartiments contiennent, au choix, un gel ou un liquide.

Commençons par observer une orange : sans entrer dans les détails de sa structure, il y a la peau, qui protège l'ensemble des « poils endocarpiques » emplis de jus. L'utilisation d'alginate de sodium, un gélifiant extrait d'algues, permet de reproduire ces derniers : soit on dissout du lactate de calcium dans du jus d'orange et on laisse tomber des gouttes de ce liquide dans une solution d'alginate de sodium, soit on dissout de l'alginate de sodium dans le jus d'orange et on dépose des gouttes de ce liquide dans une solution de lactate de calcium.

Dans les deux cas, une peau gélifiée se forme, les ions calcium Ca^{2+} venant ponter les molécules d'alginate, ce qui forme une mince couche de gel à la surface des gouttes. La conglo-mère s'obtient alors simplement en déposant les perles formées dans un bol, puis en versant une solution de gélatine, qui les solidarise. Avec deux demi-sphères recollées, on forme une sphère, puis on peut, si l'on veut, ajouter une « peau d'orange » en trempant la sphère refroidie dans une solution de gélatine colorée en orange (avec du bêta-carotène, pigment des carottes et vendu sous le code E160a) à la limite de la prise.

On le voit, cette reproduction n'est guère difficile, mais qu'en est-il pour les tissus végétaux formés de cellules dont la taille est de

l'ordre du micromètre ? La technique des perles évoquée plus haut n'est pas utilisable, car les perles ont un diamètre limité par la taille de gouttes que l'on peut produire. Une autre technique consiste à diviser finement un matériau gélifié, puis à solidariser les « particules » formées.

Par exemple, si l'on part de jus d'orange que l'on fait prendre en gel à l'aide d'agar-agar (un polysaccharide, cousin de l'amidon, donc, mais extrait des algues) et si l'on passe le gel dans un moulin électrique, on produira des particules de gel que l'on pourra ensuite solidariser à l'aide d'un gélifiant différent (par exemple une solution de gélatine), afin de former une dispersion de microgels dans un gel. Dans ce système, la gélatine reproduit la paroi végétale, et l'agar-agar reproduit la gélification du cytosol, le liquide à l'intérieur des cellules.

Voudrait-on une reproduction de paroi plus réaliste, avec de la cellulose ? Utilisons alors une centrifugeuse de cuisine, pour y mettre des carottes, par exemple. Le résidu de centrifugation, souvent jeté, est fait de cellulose quasi pure, que l'on peut laver, puis sécher, avant de l'incorporer à la préparation que l'on fait gélifier.

On préférerait un pseudo-cytosol liquide, et non gélifié ? Une première solution consiste à emplir de liquide un matériau poreux. Pensons au baba au rhum : selon le type de « gâteau » ou de « pain », on peut obtenir soit des porosités connectées, soit des porosités isolées. Pour le baba, l'existence d'un réseau connecté permet au rhum de se répartir dans tout le gâteau.

Toutefois, cette solution reproduit mal le tissu végétal, où les cellules communiquent peu : il vaut mieux les reproduire par des poches de liquide. On les obtient, par exemple, en commençant par faire un gel de gélatine. Mixons-le, afin d'obtenir de petits fragments de gel qu'on solidarise ensuite à l'aide d'un gélifiant qui ne soit pas une protéine et d'un liquide contenant du jus d'ananas frais. Une fois la gélification faite, l'enzyme du jus d'ananas, la broméline, diffusera vers le gel de gélatine et dégradera son réseau solide. Des poches liquides se formeront alors dans la matrice solide.

Et c'est ainsi que d'innombrables solutions se présentent à qui veut faire des fruits ou des légumes artificiels, dont la consistance rappellera celle des végétaux, mais dont le goût sera exactement celui qu'on aura décidé d'avoir, soit parce que l'on aura dissous des solutés dans l'eau qui forme les divers gels, soit parce que l'on aura émulsionné de la matière grasse, où seront dissous des composés odorants. ■



Hervé THIS, physico-chimiste, est directeur du Centre international de gastronomie moléculaire AgroParisTech-Inra et directeur scientifique de la Fondation science & culture alimentaire (Académie des sciences).



Retrouvez la rubrique
Science & gastronomie sur
www.pourlascience.fr

MATHÉMATIQUES

Dans le secret des nombres

Marianne Freiberger et Rachel Thomas

Dunod, 2015

[320 pages, 18,90 euros].

Ce livre est un voyage initiatique dans le monde mathématique. Les auteurs nous proposent un itinéraire foisonnant à travers les prolongements actuels de nombreux problèmes mathématiques classiques ou récents. Il est doux, lors de la lecture, de revisiter des sites connus, puis de découvrir



de nouveaux aperçus. La pédagogie des guides nous conforte : leur discours nous intéresse par la beauté des structures mathématiques évoquées et par leur utilité pratique. Cette bivalence est ici miraculeuse et enchanteuse.

Ces vaticinations ne sont pas erratiques, les objets disparates des mathématiques s'unissent souvent dans une théorie supérieure ou par des analogies « incroyables » entre deux domaines qui éclairent leur résolution. La balade suit toutefois plus les traces du génie prolifique d'Euler qu'elle n'est inspirée par la rigueur de Bourbaki. Par moments, il reste des ambiguïtés. C'est peut-être inévitable.

Donc, certaines itinérances sont superbes par leur fertilité incongrue d'un nouveau sujet, comme le chapitre brillantissime

« Des abeilles et des hommes » où l'on visite des « petits mondes » inattendus. D'autres excursions dans des domaines austères peuvent être moins exaltantes, comme le calcul de π .

Lors du voyage, des bouquets de compréhension surgissent : à propos de l'équation de Navier-Stokes régissant les comportements des fluides, la réflexion selon laquelle la difficulté de sa résolution est liée à l'immense variété des phénomènes observés est pertinente, c'est la Némésis mathématique ! Les auteurs s'attachent aussi à nous montrer les impasses, les voies aujourd'hui sans issue visible, ce qui nous console de nos incapacités passées et nous stimule pour nos efforts futurs. Il y a en effet encore beaucoup de choses à démontrer en mathématiques. Ainsi, certaines questions très simples sont irrésolues : grandeur et limite de la pensée mathématique ! Henri Poincaré, qui avait mieux que personne percé certains secrets et ce faisant buté contre des frontières mathématiques qu'il avait délimitées, écrivait : « La pensée n'est qu'un éclair au milieu de la nuit. Mais c'est cet éclair qui est tout. » Laissez-vous guider dans cette exploration du monde avec pour unique bagage votre cerveau.

Philippe Boulanger



HISTOIRE DES SCIENCES

Histoire des théories scientifiques de l'extinction des espèces

Cédric Grimoult

Ellipses, 2014

[640 pages, 45 euros].

L'extinction des espèces

est pour nous un concept acquis : beaucoup d'êtres aujourd'hui éteints, qu'il s'agisse des dinosaures, des mammouths ou des hommes de Néandertal, nous sont plus familiers que bien des espèces actuelles, et nous savons fort bien, hélas, que nombre de plantes et d'animaux disparaissent pratiquement sous nos yeux. Mais il n'en a pas toujours été ainsi. Longtemps, l'idée même qu'une espèce pût disparaître a paru inacceptable, pour des raisons religieuses (la création divine n'avait pu produire d'êtres assez imparfaits pour qu'ils soient frappés d'extinction) ou philosophiques (la « grande chaîne du vivant » ne pouvait souffrir de lacunes).

C'est qu'à l'extrême fin du XVIII^e siècle que l'ampleur du phénomène d'extinction des espèces a fini par être reconnue par la science, grâce en particulier aux études de Georges Cuvier sur les fossiles. Mais une fois le concept accepté, encore fallait-il trouver des causes à ces disparitions d'espèces – et cette recherche des processus qui peuvent amener des espèces à disparaître, parfois en grand nombre (on parle alors d'extinctions en masse), continue aujourd'hui à nourrir les controverses au sein de la communauté scientifique.

Dans ce gros livre, Cédric Grimoult examine en détail l'évolution des idées au sujet des extinctions, depuis l'Antiquité jusqu'à aujourd'hui. Il le fait avec une

érudition et une précision remarquables (la bibliographie ne comporte pas moins de 125 pages !), et nous livre une histoire assez exhaustive des débats sur le sujet, qui ont mobilisé et mobilisent encore nombre de paléontologues, biologistes, géologues et même astronomes, depuis que des causes extraterrestres sont invoquées pour expliquer certaines grandes extinctions.

Le livre est dense et, pour l'apprécier, il n'est pas inutile d'avoir quelques bases en histoire des sciences, car l'auteur, occupé avant tout par l'histoire des idées, n'a guère l'occasion ni la place de présenter le contexte plus large dans lequel les débats se sont déroulés. Il faut voir dans cet ouvrage une source très utile d'informations détaillées sur une question scientifique dont on s'aperçoit, à la lecture, qu'elle est depuis plusieurs siècles au cœur des sciences géologiques et biologiques.

Eric Buffetaut

CNRS et laboratoire de géologie de l'ENS, Paris

SCIENCES DE L'ÉVOLUTION

L'histoire du corps humain

Daniel E. Lieberman

JC Lattès, 2015

[500 pages, 24,50 euros].

Professeur de biologie humaine à Harvard, l'auteur réfléchit ici à l'évolution du corps humain. Réponse *a priori* adaptée aux contraintes environnementales, celui-ci devrait être gage de la survie de l'espèce, mais son inadaptation relative d'aujourd'hui donne le sentiment d'une régression.

Durant plus de six millions d'années, plusieurs étapes clés ont marqué cette évolution : posture érigée, gros cerveau, diversification alimentaire, émergence

du langage, de l'aptitude à la coopération et constitution de cultures transmissibles... sont autant de traits acquis par *Homo sapiens*, qui en ont fait la seule espèce d'hominidés survivante et dont les membres vivent aussi longtemps. L'apparition de l'agriculture puis la révolution industrielle ont parachevé cette évolution. Toutefois, une régression est en cours, car, en modifiant l'environnement, *Homo sapiens* a créé les conditions d'une inadaptation majeure, responsable de l'émergence de maladies nouvelles...



Parmi toutes les transformations qui ont produit *Homo sapiens*, la plus adaptative a sans aucun doute été notre capacité à créer un patrimoine culturel transmissible. Face à la sélection naturelle, les cultures humaines sont devenues la force essentielle du changement agissant sur le corps humain. *Homo sapiens* est devenu à la fois acteur et victime de son devenir : il doit utiliser son corps plus conformément à l'usage pour lequel l'évolution l'a formé, tout en ouvrant largement le champ de l'intelligence collective afin de parvenir à éviter ou à corriger les nouvelles maladies. L'enjeu de ce livre est de le dire.

Bernard Schmitt
CERNh, Lorient

■ PRÉHISTOIRE

Chauvet-Pont d'Arc : le premier chef-d'œuvre de l'humanité

Pedro Lima

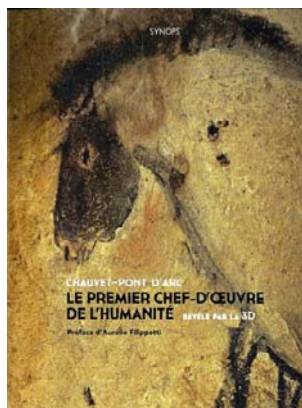
Synops, 2014
(208 pages, 34,90 euros).

La découverte de la grotte Chauvet, en 1994, ne dévoilait pas seulement l'un des sommets de l'art paléolithique, elle apportait par ses datations une révision sensationnelle de la chronologie de l'art de la préhistoire : elle précède de plus de 15 000 ans Lascaux !

Afin d'éviter les désastres qu'ont connus d'autres grottes ornées, il a été décidé, dès le moment de la trouvaille, de préserver de façon optimale ce site exceptionnel des dégradations liées à son exploration, à son étude et à sa visite par le public. C'est pourquoi un fac-similé de cette étincelante cavité a été réalisé par le cabinet Perazio. Sans dommage pour la grotte authentique, il permettra au grand public de pénétrer dans cet extraordinaire univers artistique.

Destiné aux visiteurs, le présent livre propose une présentation à grands traits de la grotte, de sa découverte, du site monumental où elle est située, de ses caractéristiques archéologiques et artistiques, et des études scientifiques qui y ont été réalisées.

En outre, il est aussi une introduction au fac-similé lui-même, qui décrit les techniques élaborées mises en œuvre pour reproduire à l'identique le support et les peintures pariétales :



scanner permettant d'enregistrer en trois dimensions les volumes souterrains avec une résolution de l'ordre du dixième de millimètre ; photographies numériques livrant, également en trois dimensions, les images des figures dessinées et peintes.

Ces techniques ne font pas que reproduire à l'identique ce qu'on connaissait déjà. Grâce à elles, il est possible de s'affranchir des contraintes physiques imposées jusque-là aux photographes par les nécessités de la sauvegarde de la grotte : par exemple d'approcher au plus près les parois peintes pour en relever les détails, de choisir des angles et des points de vue jusque-là inaccessibles, de porter sur ces images de vifs éclairages, impossibles à l'intérieur de la grotte sous peine d'endommager les précieuses peintures...

Il en résulte un somptueux dossier photographique, qui renouvelle en effet la vision déjà habituelle que nous avons de la grotte Chauvet à travers les photographies réalisées depuis vingt ans dans la cavité.

Claudine Cohen
EPHE, EHESS, Paris



L'Europe celtique à l'âge du Fer

Olivier Buchsenschutz (dir.)
PUF, 2015
(512 pages, 42 euros).

Les Gaulois et *tutti quanti* sont mythiques. Plus concrètement, des gens vivaient en Europe tempérée pendant l'âge du Fer et la plupart appartenait à une civilisation que l'on qualifie de celtique. Les auteurs, tous archéologues de haute volée, passent en revue les données essentielles disponibles sur ce puissant phénomène archéologique : des traces similaires depuis l'Angleterre jusqu'à la Turquie. Il en ressort que les Celtes sont avant tout un grand groupe linguistique, qui a dominé l'Europe pendant huit siècles.



Analyse des réseaux sociaux appliqués à l'éthologie et à l'écologie

Cédric Sueur (dir.)
Matérialogiques, 2015
(514 pages, 35 euros).

Les animaux et les plantes forment des sociétés et à toutes les échelles. L'étude de ces interactions entreprise ici est non seulement intéressante en elle-même, mais fournit aussi des modèles applicables aux sociétés humaines. En effet, les individus vivant dans un réseau écologique ont des liens de compétition, d'exclusion, de prédation, de coopération... La façon dont ils agissent et interagissent influe sur le réseau, dont la structure exerce à son tour une influence sur les individus. C'est cette boucle fondamentale de rétroaction qui est étudiée ici sous mille formes.



Atlas de la vigne et du vin

F. Legouy et S. Boulanger (dir.)
Armand Colin, 2015
(176 pages, 25 euros).

Cet ouvrage décrit en images, en graphiques et par des textes les grands vignobles mondiaux, leur origine, leur nature et leur économie. Cartes et schémas sont clairs et les textes documentés, de sorte que l'ensemble constitue un excellent moyen de se faire une religion sur le vin - ce breuvage qui, dans la balance commerciale française pèse 7,6 milliards d'euros, tandis que la France consomme 14 % du vin de la planète tout en en produisant 16 %. Des chiffres à s'enivrer !

Retrouvez l'intégralité de votre magazine et plus d'informations sur www.pourlascience.fr



OCCULTE GRAVITATION

Le Dictionnaire de l'impossible de Didier van Cauwelaert (rééd. J'ai lu, 2014) présente les récits de nombreux témoins d'événements paranormaux : délocalisations, dialogues avec des morts, prémonitions, voyances, apparitions, etc. Jeter la suspicion sur ces récits ne suffit pas à dissiper le malaise né de leur lecture. Car ils ne défient pas plus notre raison que la gravitation ! Si notre raison interdit de croire aux premiers, elle interdit de croire à la seconde...

En fait, nous sommes peu rationnels. A force de voir les objets tomber, ce phénomène n'éveille aucun malaise en nous. Il devrait au contraire déstabiliser d'autant plus qu'il est plus familier : on a beau y réfléchir



depuis longtemps, il garde maints secrets. Chaque fois qu'un objet tombe, la frayeur métaphysique devrait nous saisir. Une force occulte est à l'œuvre, et produit un effet étrange : l'attraction de l'objet par le sol, auquel rien ne semble le relier. Comme tout ce qui s'obstine à nous échapper, ce mystère recèle de la menace.

Que nous n'ayons pas l'expérience personnelle des faits relatés par Cauwelaert ne suffit pas pour voir en eux des falsifications. Le boson de Higgs s'est manifesté moins souvent, et devant moins de gens, que la Vierge. Faut-il en déduire : « Ce truc-là, moi, je n'y crois pas ! » ? Pour la plupart, nous ne connaissons que vaguement la démarche permettant de détecter ce boson, nous ne côtoyons ni les physiciens qui l'ont suivie ni les témoins cités par Cauwelaert. Accorder notre confiance aux uns, la refuser aux autres, n'est-il pas un préjugé ?

Qu'importe, au fond. Le normal est aussi intrigant, et pas moins inquiétant, que le paranormal. En cela, les opposer est peu pertinent. « Le spiritisme ne m'a jamais paru plus extraordinaire que de voir le Soleil tourner autour de la Terre » (Henry James, « Le Professeur Fargo », Il, *Nouvelles complètes*, Pléiade, T. I, p. 1085).

HYPOTHÈSE SUR HYPOTHÈSE

En mathématiques, le mot « hypothèse » sert à décrire une situation. Exemple : on fait l'hypothèse que tel triangle a deux côtés égaux. Suite à quoi on précise la description en démontrant que ce triangle a aussi deux angles égaux.

En sociologie, une hypothèse s'apparente à une conjecture. Ainsi, on fait l'hypothèse qu'existe une corrélation entre deux phénomènes, et on la teste par une enquête. Si elle est confirmée, l'hypothèse ne se transforme pas en explication. Expliquer la corrélation consiste à trouver ce qui la cause.

En physique, une hypothèse a plutôt le statut de théorie en cours de discussion. Si elle se confirme et unifie un vaste champ, elle joue le rôle d'une explication.

En préhistoire, une hypothèse reste toujours... hypothétique, puisqu'elle attribue à une population éteinte une conception défendue par un chercheur actuel.

En droit, une hypothèse n'est pas un moyen de cerner une vérité. Quand la loi donne le droit de vote à tous les citoyens, elle fait l'hypothèse que tous sont également éclairés, ce qui est une fiction juridique.

Bref, le mot « hypothèse » a autant d'acceptions qu'il y a de spécialités. Bien entendu, pareille conclusion n'est qu'une hypothèse...

5 mars 1827 : mort du marquis de Laplace.



UNE THÉORIE DE L'ESPRIT DU JEUNE ENFANT

Très jeune, paraît-il, l'enfant acquiert une « théorie de l'esprit » : il comprend qu'autrui ne ressent et ne pense pas comme lui.

Mais rares sont les adultes qui, en présence d'un jeune enfant, ont une théorie de l'esprit !



L'enfant donne aux adultes un immense plaisir, enchante leur vie. Donc, se figurent-ils, lui-même éprouve plaisir à être, sa vie est enchantement. Le bonheur qu'il apporte a pour source un bonheur qui est en lui. Symétrie en reflet exprimée par Victor Hugo : « Son doux regard qui brille/Fait briller tous les yeux. »

Cette illusion a été souvent dénoncée, mais les adultes peinent à s'en défaire. Quand un chagrin d'enfant est provoqué par ce qui leur apparaît comme un rien, ils rechignent à voir que ce chagrin n'est pas rien et est aussi douloureux que si sa cause était « sérieuse ». Et quand s'achève la séquence classique larmes-consolation-sourire retrouvé, ils croient que le sourire efface les larmes. Ils oublient combien le temps de l'enfant diffère du leur. Même si, dans leur perception d'adultes, les larmes ont peu duré, elles peuvent, dans celle de l'enfant, avoir représenté une éternité.

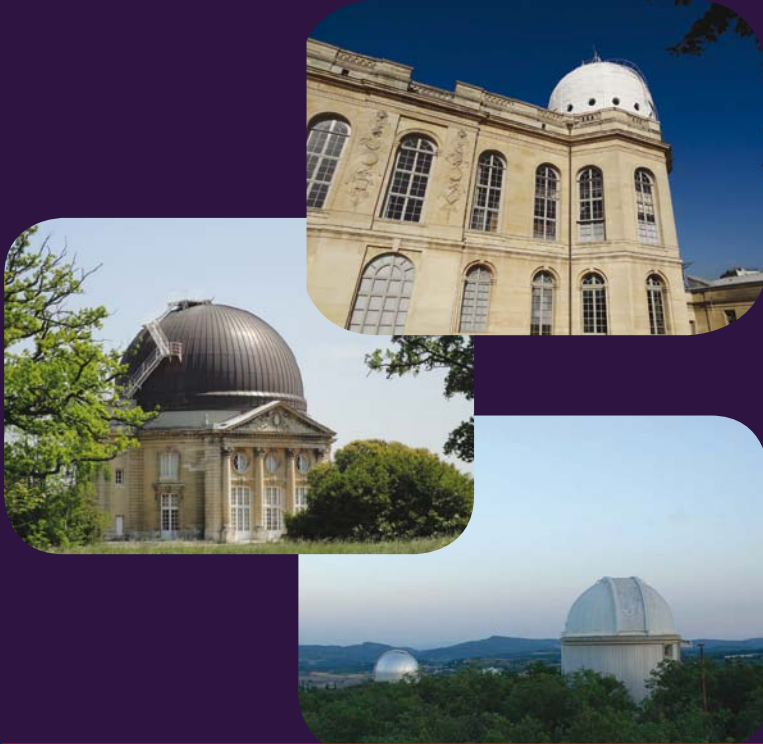
Entouré d'adultes qui le comprennent si mal, l'enfant sent qu'ils ne perçoivent pas ce qu'il perçoit. C'est parce que, en sa présence, les adultes abdiquent toute théorie de l'esprit qu'il est amené à en élaborer une.

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. Possibilité d'inscription dans le cadre de la formation permanente.

Contenu

Cette formation, de niveau L1-L2, 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.

Un stage facultatif de 4 nuits d'observation a lieu l'été à l'Observatoire de Haute-Provence.

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
- ▶ Observations



Inscriptions

Dossiers à déposer avant le 15 septembre sur le site d'inscription en ligne : https://ufe.obspm.fr/candidatures_ufe

Renseignements

<http://duop.obspm.fr/-DU-Explorer-et-Comprendre-l-Univers->

contact.duecu@obspm.fr
Téléphone : 01.45.07.78.87



Votre vocation fait votre fierté, la nôtre est de vous assurer.

En tant qu'agent du service public, vous vous engagez pour les autres, alors GMF s'engage pour vous en vous proposant, par exemple, d'assurer votre véhicule même lorsque vous l'utilisez pour des déplacements professionnels, sans supplément de cotisation. Et pour aller plus loin, GMF propose des garanties spécifiques liées à votre fonction : une garantie perte de revenu (traitement et primes) en cas d'arrêt de travail, des solutions d'épargne sûres et disponibles pour commencer à préparer votre retraite.

Rejoignez GMF - 1^{er} assureur des agents des services publics.

Pour en savoir plus rendez-vous sur www.gmf.fr

* 50 € pour l'assurance Auto Pass et 50 € pour l'assurance Santé Pass. Offre réservée aux jeunes agents des services publics de moins de 30 ans, la 1^{ère} année, à la souscription d'un contrat d'assurance auto. Offre valable jusqu'au 31/12/2015.

LA GARANTIE MUTUELLE DES FONCTIONNAIRES et employés de l'État et des services publics et assimilés - Société d'assurance mutuelle - Entreprise régie par le Code des assurances - R.C.S. Paris 775 691 140 - Siège social : 76, rue de Prony - 75857 Paris Cedex 17 et sa filiale GMF Assurances. Adresse postale : 45930 Orléans Cedex 9.