

# POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American



JUILLET 2018  
N° 489

COSMOLOGIE  
**LES SURSAUTS GAMMA,  
OBSTACLE À LA VIE  
EXTRATERRESTRE ?**

ARCHÉOLOGIE  
**SUR LES TRACES  
DES CAVALIERS  
SCYTHES**

MATHÉMATIQUES  
**LOI DE BENFORD :  
ENFIN UNE  
EXPLICATION !**

Personnalité, émotions, communication...

# L'INTELLIGENCE SOCIALE DES DAUPHINS



# CARNETS DE SCIENCE

La revue du CNRS #4



Entrez dans les coulisses  
de la recherche

**#4** en vente en librairie  
et Relay le **3 mai**

200 pages / **12,50 €**



[www.carnetsdescience-larevue.fr](http://www.carnetsdescience-larevue.fr)



**CNRS EDITIONS**

**POUR LA SCIENCE**

**Rédacteur en chef:** Maurice Mashaal  
**Rédactrice en chef adjointe:** Marie-Neige Cordonnier  
**Rédacteurs:** François Savatier, Sean Bailly  
**Stagiaires:** Claire Heitz et Coraline Madec

**HORS-SÉRIE POUR LA SCIENCE**

**Rédacteur en chef adjoint:** Loïc Mangin  
**Développement numérique:** Philippe Ribeau-Gésippe  
**Community manager:** Jonathan Morin

**Conception graphique:** William Londiche  
**Directrice artistique:** Céline Lapert  
**Maquette:** Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy

**Révisseuse:** Anne-Rozenn Jouble  
**Marketing & diffusion:** Arthur Peys  
**Chef de produit:** Charline Buché  
**Direction du personnel:** Olivia Le Prévost  
**Direction financière:** Cécile André  
**Fabrication:** Marianne Sigogne et Olivier Lacam  
**Directeur de la publication et gérant:** Frédéric Mériot  
**Anciens directeurs de la rédaction:** Françoise Pétry et Philippe Boulanger  
**Conseiller scientifique:** Hervé This  
**Ont également participé à ce numéro:** Vincent Bourrier, Maud Bruguère, Adrien Coffinet, René Cuillierier, Frédéric Delsuc, Olivier Dutour, François Forget, Frédéric Gambino, Sylvain Guiriec, Jean-Louis Hartenberger, David Louapre, Aurélien Miralles, Xavier Müller, Hélène Perrin, Sezin Topçu

**PRESSE ET COMMUNICATION**

Susan Mackie  
[susan.mackie@pourlascience.fr](mailto:susan.mackie@pourlascience.fr) • Tél. 01 55 42 85 05

**PUBLICITÉ France**

[stephanie.jullien@pourlascience.fr](mailto:stephanie.jullien@pourlascience.fr)

**ABONNEMENTS**

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

**Courriel:** [pourlascience@abopress.fr](mailto:pourlascience@abopress.fr)

**Tél.:** 03 67 07 98 17

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

**Tarifs d'abonnement 1 an (12 numéros)**

**France métropolitaine:** 59 euros – Europe: 71 euros

**Reste du monde:** 85,25 euros

**DIFFUSION**

**Contact kiosques:** À Juste Titres ; Benjamin Boutonnet  
Tél. 04 88 15 12 41

**Information/modification de service/réassort:**  
[www.direct-editeurs.fr](http://www.direct-editeurs.fr)

**SCIENTIFIC AMERICAN**

**Editor in chief:** Mariette DiChristina

**President:** Dean Sanderson

**Executive Vice President:** Michael Florek

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

**Origine du papier:** Autriche

**Taux de fibres recyclées:** 30 %  
**«Eutrophisation» ou «Impact sur l'eau»:** P<sub>tot</sub> 0,007 kg/tonne



**MAURICE MASHAAL**  
Rédacteur en chef

## QUEL EFFET CELA FAIT-IL D'ÊTRE UN DAUPHIN?

**E**n 1974, le philosophe américain Thomas Nagel publia un article dont le titre, repris d'une question formulée par Timothy Sprigge, un confrère britannique, deviendra célèbre: « Quel effet cela fait-il d'être une chauve-souris? » (« *What it is like to be a bat?* »). Cet article discutait du problème corps-esprit et affirmait que, quelle que soit la compréhension scientifique, objective, que nous aurions d'une chauve-souris, nous ne pourrions jamais savoir ni éprouver ce qu'elle ressent. La chauve-souris n'était bien sûr qu'un exemple, et Thomas Nagel aurait tout aussi bien pu choisir le dauphin, autre animal pour lequel l'univers acoustique joue un rôle crucial.

Même si nous ne pourrions jamais être dans la peau d'un dauphin, cela ne signifie pas que nous ne pourrions pas comprendre comment cet animal perçoit le monde qui l'entoure et comment il interagit avec lui, en particulier avec ses congénères. Ainsi, l'éthologue Fabienne Delfour explique dans ce numéro ce que les chercheurs ont découvert sur ces mammifères marins, dont des groupes en liberté sont suivis depuis plus de trente ans (*voir pages 28 à 38*). Ces recherches ont notamment précisé les étonnantes capacités cognitives des dauphins, révélé l'existence de personnalités – par exemple, certains individus sont plutôt optimistes, d'autres pessimistes –, décrit certains comportements sociaux... Et grâce à de nouvelles techniques d'observation, on en saura bientôt beaucoup plus sur la vie sociale de ces animaux.

À l'aboutissement de ces recherches, nul doute que l'on disposera d'une réponse, certes partielle mais tout de même intéressante, à la question posée en titre. Une réponse qui, ajoutée à celles relatives à d'autres espèces animales, nous permettra par exemple de nous forger une vision moins anthropocentrique, plus complète et plus juste du monde – de la même façon que connaître les différents regards de nos congénères est nécessaire si nous voulons avoir de la réalité une vue pas trop déformée. ■

# S OMMAIRE

N° 489 /  
Juillet 2018

## ACTUALITÉS

P. 6

### ÉCHOS DES LABOS

- Premières greffes de la trachée avec une aorte
- Neutrino stérile: l'hypothèse relancée?
- Le blé en Chine, un cadeau des steppes?
- Dessalement amélioré
- Des dunes de méthane sur Pluton
- L'hépatite B, une vieille compagne
- Un gaz d'atomes froids pour simuler l'Univers
- Aux origines d'un supergène du mimétisme
- Dernières trouvailles à Pompéi

P. 20

### LES LIVRES DU MOIS

P. 22

### AGENDA

P. 24

### HOMO SAPIENS INFORMATICS

Nous sommes tous des handicapés

Gilles Dowek

P. 26

### CABINET DE CURIOSITÉS SOCIOLOGIQUES

Premières impressions sur Internet

Gérald Bronner



En couverture:  
© Willyam Bradberry/Shutterstock.com

Les portraits des contributeurs sont de Seb Jarnot

## GRANDS FORMATS



P. 40

### COSMOLOGIE

#### LES SURSAUTS GAMMA EXPLIQUENT-ILS LE PARADOXE DE FERMI ?

Raúl Jiménez

Nous n'avons, à ce jour, détecté aucune civilisation extraterrestre. Pourquoi? Peut-être parce que des explosions stellaires puissantes, les sursauts gamma, anéantiraient toute vie complexe présente dans leur voisinage.



P. 50

### PSYCHOLOGIE SOCIALE

#### DÉBATS: VAINCRE OU APPRENDRE

M. Fisher, J. Knobe,  
B. Strickland et F. C. Keil

Dans les débats que nous avons les uns avec les autres, la posture peut être d'argumenter pour marquer des points ou d'argumenter pour apprendre. Des expériences montrent que le mode choisi influe sur notre conception de la vérité elle-même.



P. 56

### ARCHÉOLOGIE

#### SUR LES TRACES DES CAVALIERS DES STEPPES

A. Gass, E. Kaiser et H. Parzinger

Les cavaliers de la steppe eurasienne ont laissé très peu de vestiges. Mais leurs édifices funéraires ont fourni aux archéologues assez d'indices pour retracer l'évolution du mode de vie de ces populations, passées d'une culture de chasseurs-cueilleurs au nomadisme.



P. 64

### HISTOIRE DES SCIENCES

#### GUERRE FROIDE: LA COURSE À L'URANIUM MAROCAIN

Matthew Adamson

Dans les années 1950, la France et les États-Unis conclurent un pacte secret visant à s'approprier les réserves d'uranium du Maroc. Mais rien ne se passa comme prévu...



POUR LA  
**SCIENCE.FR**

LETTRE D'INFORMATION

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

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



Inscrivez-vous  
[www.pourlascience.fr](http://www.pourlascience.fr)



P. 28  
ÉTHOLOGIE

## L'INTELLIGENCE SOCIALE DES DAUPHINS

Fabienne Delfour

Si les études en delphinarium ont révélé les étonnantes capacités cognitives des dauphins, celles en milieu naturel, menées auprès de groupes de dauphins suivis depuis plus de trente ans, commencent à dévoiler toute la complexité de leur société.

### RENDEZ-VOUS

P. 74  
LOGIQUE & CALCUL

#### UNE EXPLICATION POUR LA LOI DE BENFORD

Jean-Paul Delahaye

La loi de Benford, qui porte sur le premier chiffre significatif des nombres, a perdu de son mystère. Parallèlement, elle a été généralisée et, ainsi, a gagné en efficacité pour détecter des données frauduleuses.

P. 80  
ART & SCIENCE  
Comme en cage dans un lion  
Loïc Mangin

P. 82  
IDÉES DE PHYSIQUE  
La voiture, un sport... de glisse!  
Jean-Michel Courty  
et Édouard Kierlik

P. 86  
SCIENCE & FICTION  
Les dragons de chair, d'os et de feu  
Roland Lehoucq  
et Jean-Sébastien Steyer

P. 92  
CHRONIQUES DE L'ÉVOLUTION  
Comment le tétra a perdu la vue  
Hervé Le Guyader

P. 96  
SCIENCE & GASTRONOMIE  
Des bonbons pour tous les goûts  
Hervé This

P. 98  
À PICORER

# A

## CTUALITÉS

P. 6 Échos des labos

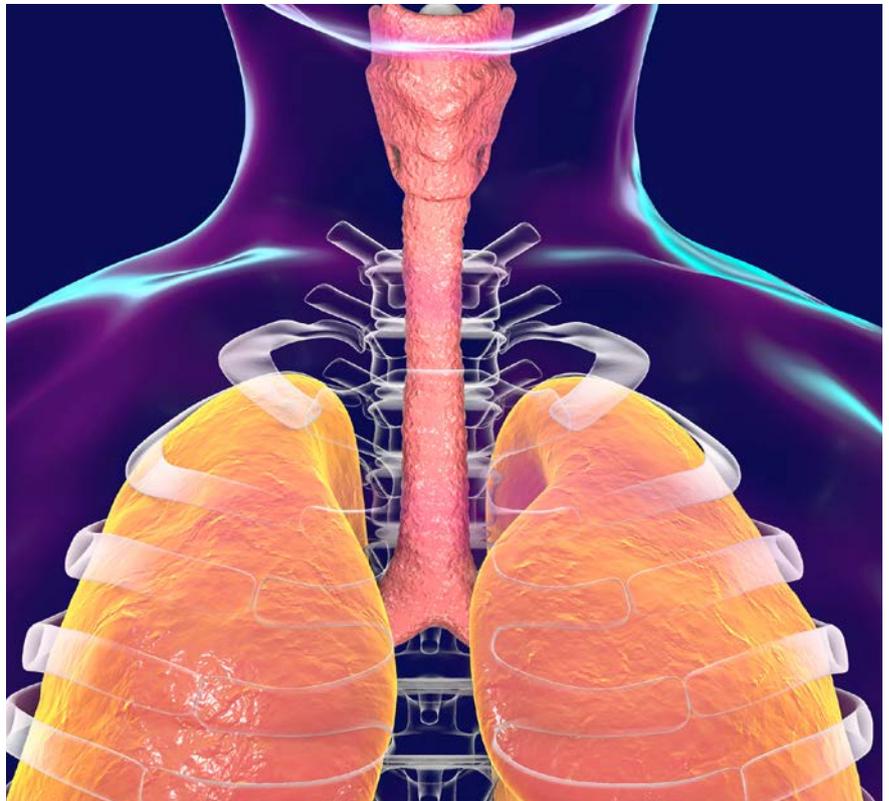
P.20 Livres du mois

P.22 Agenda

P.24 Homo sapiens informaticus

P.26 Cabinet de curiosités  
sociologiques

# PREMIÈRES GREFFES DE LA TRACHÉE AVEC UNE AORTE



La trachée relie le larynx, en haut, aux bronches. L'ablation d'une partie de ce conduit, à la suite d'une pathologie, compromet les capacités respiratoires du patient. La greffe de la trachée est donc un enjeu important.

**Une équipe française a réalisé les premières greffes de la trachée avec une section d'aorte. Une technique prometteuse.**

**L'**équipe d'Emmanuel Martinod, professeur à l'hôpital Avicenne de Bobigny et à l'université Paris 13, a réalisé une avancée spectaculaire dans le domaine de la greffe de la trachée. Elle a rétabli la circulation de l'air en substituant à une portion du conduit une section d'aorte prélevée chez un donneur, le plus gros vaisseau sanguin du corps humain. Cette annonce est le résultat d'un suivi minutieux de treize patients opérés entre 2009 et 2017. Les résultats sont prometteurs: non seulement le greffon aortique est bien toléré par l'organisme,

mais il stimule aussi la production chez les patients de nouvelles cellules qui prennent possession de l'organe greffé.

L'enjeu est de taille car de nombreuses pathologies, entraînant des lésions ou des tumeurs dans les voies respiratoires, nécessitent le retrait d'une portion importante (plus de cinq centimètres) de la trachée et compromettent ainsi les capacités respiratoires du patient.

Les premières greffes, réalisées avec d'autres trachées, datent de la fin des années 1970. Mais remplacer une trachée est une gageure: le conduit doit être à la fois rigide et déformable pour assurer une

circulation optimale de l'air tout en permettant au cou de se mouvoir. De plus, la greffe d'un substitut pose le problème du rejet. En particulier, les immunosuppresseurs qui empêchent le rejet du greffon par l'organisme ne sont pas utilisables en cas de cancer. Or avec ses fibres de collagène et ses rares cellules, l'aorte est souple, mais aussi peu immunogène (elle déclenche une très faible réaction immunitaire): c'est un substitut idéal.

«Au début, nous avons choisi l'aorte pour son côté inerte vis-à-vis de l'hôte», explique Emmanuel Martinod, «mais nous nous sommes très vite rendu compte qu'elle permettait beaucoup plus.» En effet, l'équipe, qui a commencé son étude sur l'animal, s'est vite aperçue que l'aorte, bien tolérée par l'organisme, provoquait chez les moutons greffés la production de

certaines tissus typiques des voies respiratoires, comme des anneaux de cartilage et des cellules épithéliales (des couches cellulaires superficielles tapissant l'intérieur de la trachée). Ces travaux ont montré que l'aorte intervient dans cette régénération. D'une part, elle produit des facteurs de croissance qui favoriseraient la prolifération des cellules de la trachée de l'hôte situées de part et d'autre du greffon. D'autre part, elle libère des messagers chimiques (des cytokines) et des molécules chimioattractives qui entraînent la migration de cellules souches de la moelle osseuse et la production de cartilage. Forts de ces résultats encourageants, Emmanuel Martinod et son équipe ont voulu tester la méthode chez l'homme.

À partir de 2009, après trois ans de demandes d'autorisation, le chirurgien thoracique a effectué les premières greffes d'aorte humaine. Sur les treize patients volontaires, un seul patient est décédé – à la suite d'un AVC –, mais aucun lien n'a pu être établi avec l'opération. Chez les autres patients, du cartilage s'est formé en quelques mois et, au bout de dix-huit mois, le stent, un petit grillage tubulaire en silicone placé à l'intérieur de l'aorte pour éviter son écrasement, a pu être retiré. Huit patients ont ainsi recouvré une respiration normale grâce à l'aorte greffée.

Une biopsie réalisée sur une patiente ayant reçu l'aorte d'un donneur masculin a mis en évidence un autre résultat surprenant. Environ trente-neuf mois après l'opération, aucun gène *SRY* (présent uniquement chez l'homme) n'a été détecté. L'explication avancée est que les cellules masculines du greffon auraient progressivement disparu au profit des cellules féminines de l'hôte. Ces dernières auraient colonisé le milieu, s'appropriant complètement l'organe greffé.

Les résultats de l'équipe d'Emmanuel Martinod ont été accueillis avec beaucoup d'enthousiasme dans la communauté médicale, laquelle en souligne d'autant plus la rigueur scientifique que le souvenir de la fraude de Paolo Macchiaroni est encore dans tous les esprits. Dans les années 2010, ce médecin italien avait en effet annoncé avoir transplanté avec succès une trachée bioartificielle chez plusieurs patients, mais ses résultats s'étaient révélés une vaste escroquerie. ■

#### CORALINE MADEC

E. Martinod *et al.*, *JAMA*, en ligne le 20 mai 2018

## Neutrino stérile : l'hypothèse relancée ?

L'expérience américaine *MiniBooNE* confirmerait des résultats obtenus dans les années 1990, qui suggéraient l'existence d'un quatrième type de neutrino. Mais d'autres expériences excluent cette conclusion. Thierry Lasserre, spécialiste des neutrinos, nous présente son analyse de la situation.



Propos recueillis par SEAN BAILLY

THIERRY LASSERRE  
physicien du CEA  
à Saclay

### Quel est le principe de l'expérience *MiniBooNE* ?

Dans la plupart des expériences sur les neutrinos, l'objectif est d'étudier leurs « oscillations ». En effet, il existe trois types (ou saveurs) de neutrinos – électronique, muonique et tauique – et ces particules passent spontanément de l'un à l'autre. Dans le cas de *MiniBooNE*, installée au Fermilab, près de Chicago, les chercheurs étudient depuis 2002 la transformation de neutrinos muoniques en neutrinos électroniques.

Récemment, la collaboration *MiniBooNE* a publié de nouveaux résultats. Elle a trouvé un excès important (d'environ 380 neutrinos électroniques) par rapport à ce qui était attendu dans le cadre du modèle standard de la physique des particules. Une explication possible serait l'existence d'un quatrième type de neutrino, dit stérile, qui interagit encore moins avec la matière ordinaire que les autres neutrinos. Les neutrinos initiaux oscilleraient entre les types muonique et stérile, et se transformeraient en neutrinos électroniques juste avant d'arriver dans le détecteur.

### Ce résultat confirmerait donc celui de l'expérience *LSND*...

C'était un des objectifs de *MiniBooNE*. Dans les années 1990, l'expérience *LSND* avait obtenu des résultats qui suggéraient l'existence de neutrinos stériles. Mais aucune autre expérience de neutrinos n'avait obtenu un indice équivalent. Les physiciens ont donc conçu *MiniBooNE* spécifiquement pour mettre à l'épreuve cette hypothèse. Les premiers résultats de *MiniBooNE* semblaient contredire *LSND*, mais maintenant, ses récentes données renforcent cette piste. D'un point de vue statistique, la mesure est solide. L'excès de neutrinos électroniques est bien réel. Il reste donc à examiner si la cause en est

une nouvelle particule non prévue dans le cadre du modèle standard ou s'il s'agit d'autre chose, par exemple une mauvaise maîtrise du bruit de fond. Il faut bien voir que ces mesures sont difficiles et que de nombreux phénomènes naturels perturbent l'expérience et sont compliqués à modéliser.

### Quelle est la situation par rapport aux autres expériences de neutrinos ?

Si l'on suppose qu'il existe bien un neutrino stérile, il est caractérisé par deux paramètres : sa masse et son angle de mélange qui détermine comment il oscille vers les trois autres types de neutrinos. Les physiciens établissent alors les valeurs de ces paramètres qui sont compatibles ou exclues par les expériences. Et ce qu'on voit, c'est que certaines grandes expériences de neutrinos, notamment *IceCube*, excluent les paramètres des neutrinos stériles de *MiniBooNE* avec un très fort niveau de confiance statistique.

Mais par ailleurs, les expériences menées auprès de réacteurs nucléaires présentent aussi une anomalie qu'il est possible d'interpréter comme l'effet d'un neutrino stérile. Quand on compare les données de *LSND* et celles des expériences en réacteur, les masses autorisées pour le neutrino stérile étaient compatibles. Avec *MiniBooNE*, ce n'est plus le cas. Or l'anomalie dans les réacteurs est elle-même sujette à débat : neutrino stérile ou incertitude dans les processus nucléaires de fission de l'uranium et du plutonium qui produisent les neutrinos ? La question reste ouverte.

### Que faut-il donc penser de ce résultat ?

La situation est confuse. Mais le point positif est qu'il suscitera des idées, des discussions. Malheureusement, il faudra probablement attendre au-delà de 2020 pour en savoir plus, avec par exemple le programme *SBN*, prévu à Fermilab, qui sera composé de plusieurs détecteurs. ■

A. A. Aguilar-Arevalo *et al.*, en ligne le 31 mai 2018  
<https://arxiv.org/abs/1805.12028>

## ARCHÉOLOGIE

# LE BLÉ EN CHINE, UN CADEAU DES STEPPES?

Les datations de grains de blé calcinés découverts au sein du noyau historique chinois suggèrent que des nomades d'Eurasie auraient apporté le blé en Chine.

**D**epuis quand cultive-t-on du blé en Chine? Si l'on se fonde sur la date que propose une équipe internationale dirigée par Pavel Tarasov, de l'université libre de Berlin, l'exploitation de cette céréale aurait commencé vers le milieu du III<sup>e</sup> millénaire avant notre ère.

Beaucoup plus facile à exploiter que le riz, le blé a été cultivé très tôt en Chine, mais bien plus tardivement que sa domestication au Proche-Orient, qui remonte au moins à 8500 avant notre ère. Comme il a été introduit directement sous la forme déjà domestiquée du froment (*Triticum aestivum*), l'idée a été émise que la culture de cette céréale se serait diffusée progressivement du Proche-Orient jusqu'en Extrême-Orient, de la même façon qu'elle s'est diffusée du Proche-Orient à l'Europe.

Des partisans de cette théorie ont soutenu, sur la base de l'étude de quelques vestiges anciens de blé chinois, qu'à mesure de la diffusion, la taille des grains a diminué au long du chemin. Pour tester cette affirmation, Pavel Tarasov et ses collègues ont étudié dix grains de blé calcinés anciens provenant de la région du bas cours du fleuve Jaune. Ils ont comparé leurs largeurs et longueurs aux dimensions moyennes des grains actuels de plusieurs régions d'Asie centrale et occidentale. Au moins cinq de ces grains sont bien plus longs que des grains actuels plus occidentaux, ce qui contredit l'idée qu'une propagation depuis l'Ouest de l'Eurasie aurait produit du blé à grains de plus en plus courts.

Par ailleurs, l'équipe de Pavel Tarasov soutient que le blé aurait été introduit en Chine par le biais d'échanges avec des cultures géographiquement distantes. Pour trouver des arguments en faveur de cette hypothèse, elle a daté au radiocarbone six des dix grains calcinés provenant du bas cours du fleuve Jaune. Trois d'entre eux remontent à plus de deux mille ans avant notre ère, ce qui en fait les plus anciens grains de blé chinois. Cela suggère que cette région est le foyer à partir duquel le blé a diffusé en Chine.

Afin de le confirmer, l'équipe de Pavel Tarasov a cherché à retracer la progression du blé en Chine. Sur la base des grains anciens qu'elle a datés et de soixante-dix autres grains anciens dont les âges avaient déjà été



Contrairement aux idées reçues, la Chine est le pays qui consomme le plus de blé au monde; elle en produit aussi énormément, et cela depuis l'âge du Bronze.

## 1/6

DE LA PRODUCTION MONDIALE LORS DES BONNES ANNÉES : LA CHINE EST LE PLUS GRAND PRODUCTEUR DE BLÉ DU MONDE. CE PAYS STOCKE À PEU PRÈS LA MOITIÉ DE SA RÉCOLTE CHAQUE ANNÉE.

déterminés, elle a échafaudé un modèle probabiliste de l'arrivée du blé dans cinq grandes régions de la Chine. Il en ressort que le blé est probablement apparu dans le bas cours du fleuve Jaune vers 2600 avant notre ère, puis quelque sept cents ans plus tard dans le Xinjiang (donc à l'ouest) et mille ans plus tard dans le cours moyen du fleuve Jaune et au Tibet.

Les chercheurs proposent une interprétation de ce schéma de diffusion. Des nomades des steppes (pas encore cavaliers) seraient très tôt venus du nord échanger avec les élites du Nord-Est de la Chine et auraient ainsi introduit le blé, mais aussi le cheval, le mouton, la chèvre et la métallurgie du bronze, dans laquelle ils excellaient. L'arrivée du blé serait donc l'un des marqueurs de l'entrée de la Chine dans l'âge du Bronze. Comme en Mésopotamie et autour de la Méditerranée, le développement de la métallurgie en Chine traduit l'émergence des élites guerrières à l'origine des premiers États. Accompagnée, comme partout ailleurs dans le monde, d'une intensification de la guerre, l'entrée du Nord-Est de la Chine dans l'âge du Bronze a été à l'origine, au III<sup>e</sup> millénaire avant notre ère, des premières confédérations de tribus huaxia, qui ont donné le noyau han. ■

FRANÇOIS SAVATIER

T. Long et al., *Nature Plants*, vol. 4, pp. 272-279, 2018

## L'ÉRUPTION À HAWAII

Au milieu du quartier résidentiel de Leilani (1 560 habitants) dans le district de Puna, à Hawaï, une fissure s'est ouverte le 3 mai 2018 d'où a bientôt jailli une fontaine de lave de 50 mètres de haut. Depuis, 14 événements répartis tout au long de la fissure ne cessent d'émettre des laves. Celles-ci, après avoir détruit des dizaines de maisons, ont atteint la mer, au contact de laquelle elles créent de dangereuses vapeurs acides. À la date du 5 juin, les laves émises couvraient 21,2 kilomètres carrés.

## DES ÉTOILES DANS L'UNIVERS JUVÉNILE

Grâce à l'observatoire ALMA et au VLT, Nicolas Laporte, de l'University College de Londres, et ses collègues ont étudié la galaxie MACS1149-JD1 telle qu'elle était 500 millions d'années après le Big Bang. La présence d'oxygène ionisé dans cette galaxie suggère qu'une génération d'étoiles y avait déjà produit cet élément et a disparu en rejetant l'oxygène dans le milieu interstellaire. D'après des modèles stellaires, ces étoiles existaient déjà 250 millions d'années après le Big Bang.

## LE PARASITE QUI S'ADAPTE AU CLIMAT

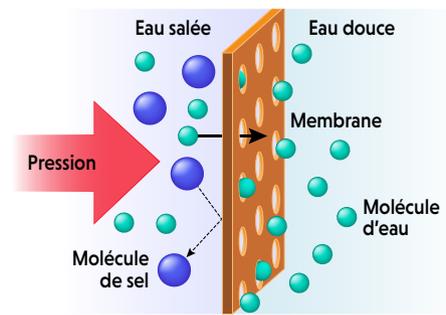
Le champignon *Ophiocordyceps unilateralis* parasite des fourmis. Il manipule sa proie de telle sorte qu'elle se fixe à des feuilles ou à des brindilles, d'où il dissémine ses spores. Raquel Loreto, de l'université d'État de Pennsylvanie, et ses collègues suggèrent que le parasite serait apparu en Asie il y a environ 50 millions d'années. La proie se fixait alors aux feuilles d'arbres tropicaux. Un refroidissement climatique, il y a 47 millions d'années, et l'arrivée d'arbres de régions tempérées ont conduit le parasite à s'adapter et à privilégier la fixation aux brindilles plutôt qu'aux feuilles, qui tombent.

## DESSALEMENT AMÉLIORÉ

En 1952, le mathématicien anglais Alan Turing a proposé une théorie de la morphogenèse, susceptible d'expliquer par exemple la formation des taches de la fourrure du guépard. Cette théorie et les «structures de Turing» qu'elle décrit ont inspiré Zhe Tan et son équipe de l'université Zhejiang, en Chine, pour développer des dispositifs améliorés de dessalement de l'eau de mer.

Une telle production d'eau douce est un enjeu majeur, en particulier dans des zones arides, et une technique répandue de dessalement repose sur l'osmose inverse, système de filtrage à travers une membrane qui ne laisse passer que les molécules d'eau (voir la figure).

Comment concevoir des membranes plus performantes que celles disponibles? Zhe Tan et ses collègues ont fait appel au principe des structures de Turing, qui est d'utiliser un mélange contenant un activateur et un inhibiteur de réactions chimiques particulières. Si l'inhibiteur diffuse plus rapidement que l'activateur, des structures de Turing peuvent apparaître: d'infimes perturbations de l'homogénéité du mélange s'amplifient et conduisent à la formation de motifs répartis presque périodiquement, tel un pelage présentant des taches ou des bandes colorées.



Dans la technique d'osmose inverse, une membrane filtre l'eau salée en bloquant les ions sodium et chlorure du sel.

L'équipe de Zhe Tan a ainsi synthétisé des membranes de type polyamide à l'interface de deux liquides, l'un contenant un activateur et l'autre un inhibiteur. Les membranes formées présentent alors des structures de Turing – dont la taille est de quelques dizaines de nanomètres – correspondant à des zones d'épaisseurs (donc de perméabilités) différentes, alors que les membranes polyamides classiques sont lisses et homogènes.

La perméabilité des nouvelles membranes vis-à-vis de l'eau est augmentée, sans que cela vienne au détriment de la sélectivité des ions du sel, qui restent, à perméabilité comparable, dix fois mieux arrêtés qu'avec les membranes existantes. ■

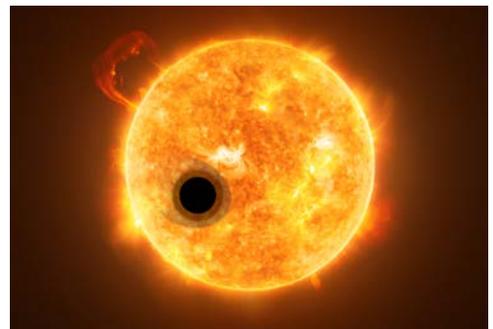
MARTIN TIANO

Z. Tan *et al.*, *Science*, vol. 360, pp. 518-521, 2018

## HÉLIUM SUR EXOPLANÈTE

Lors d'un transit, une planète passe devant son étoile et occulte une partie de sa lumière. Si la planète est dotée d'une atmosphère, la lumière stellaire qui traverse le gaz est partiellement absorbée. En utilisant ce phénomène, l'équipe de Jessica Spake, de l'université d'Exeter, au Royaume-Uni, a identifié pour la première fois la présence d'hélium dans l'atmosphère d'une exoplanète, WASP-107b, grâce aux observations dans l'infrarouge du télescope spatial *Hubble*.

L'exoplanète WASP-107b est presque aussi grosse que Jupiter, mais de masse environ huit fois plus faible. Sa gravité retiendrait donc mal l'atmosphère, qui s'échapperait dans l'espace. En combinant les données de *Hubble* avec un modèle radiatif de la haute atmosphère de WASP-107b, les chercheurs concluent que la



La lumière de l'étoile traversant l'atmosphère de la planète WASP-107b a permis d'y détecter la présence d'hélium.

planète perdrait son atmosphère à un rythme compris entre 0,1 et 4% de sa masse totale par milliard d'années. Une étude qui permet de mieux comprendre la dynamique des atmosphères et le phénomène d'échappement. ■

LAMBERT BARAUT-GUINET

J. J. Spake *et al.*, *Nature*, vol. 557, pp. 68-70, 2018

## EN IMAGE

# DES DUNES DE MÉTHANE SUR PLUTON

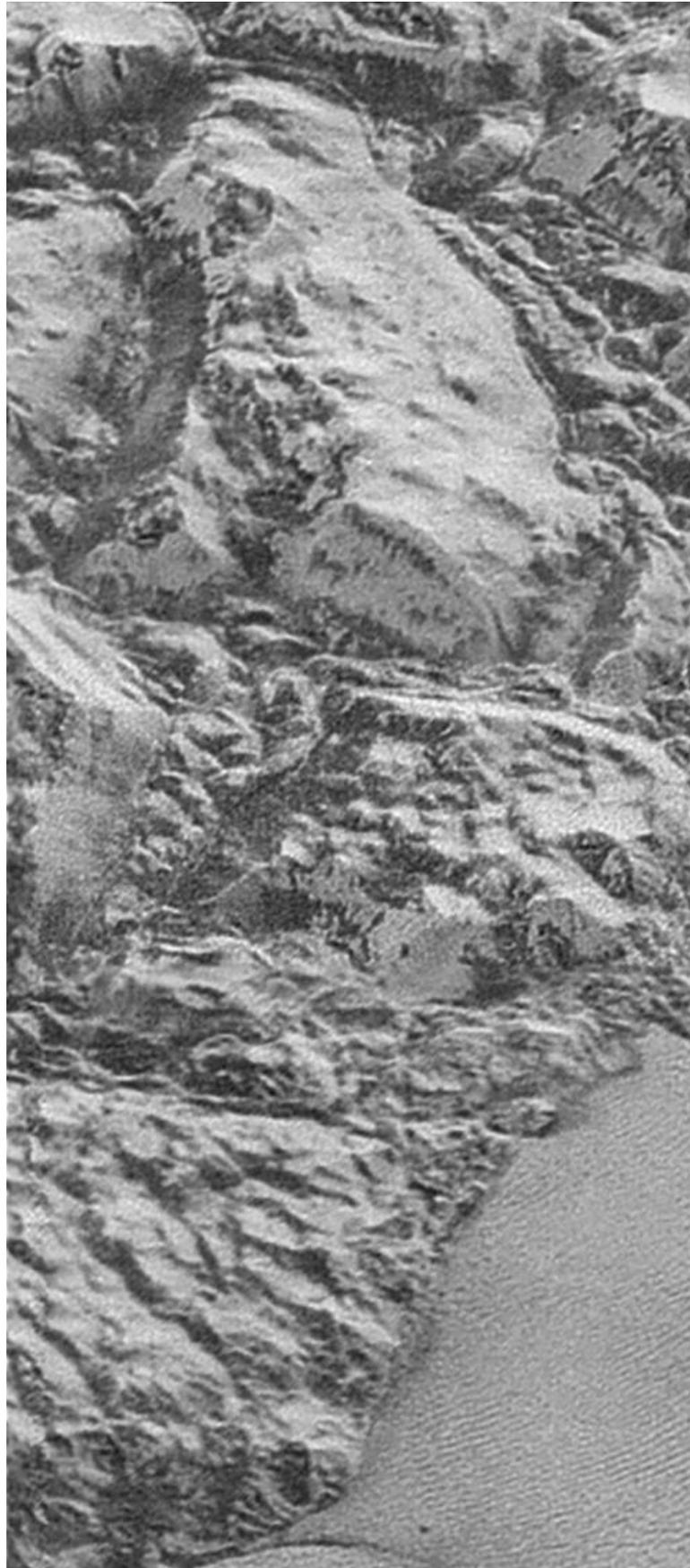
**E**n juillet 2015, la sonde américaine *New Horizons* communiquait ses premiers clichés de Pluton. Si cette mission avait pour objectif de mieux connaître cette lointaine planète naine, jamais explorée auparavant, elle a aussi apporté son lot de questions. Comment expliquer, par exemple, la présence de dunes sur une planète quasiment dépourvue d'atmosphère (avec une pression atmosphérique 100 000 fois plus faible que sur Terre)? Matt Telfer, de l'université de Plymouth, au Royaume-Uni, et ses collègues ont proposé un scénario pour la formation de ces édifices géologiques.

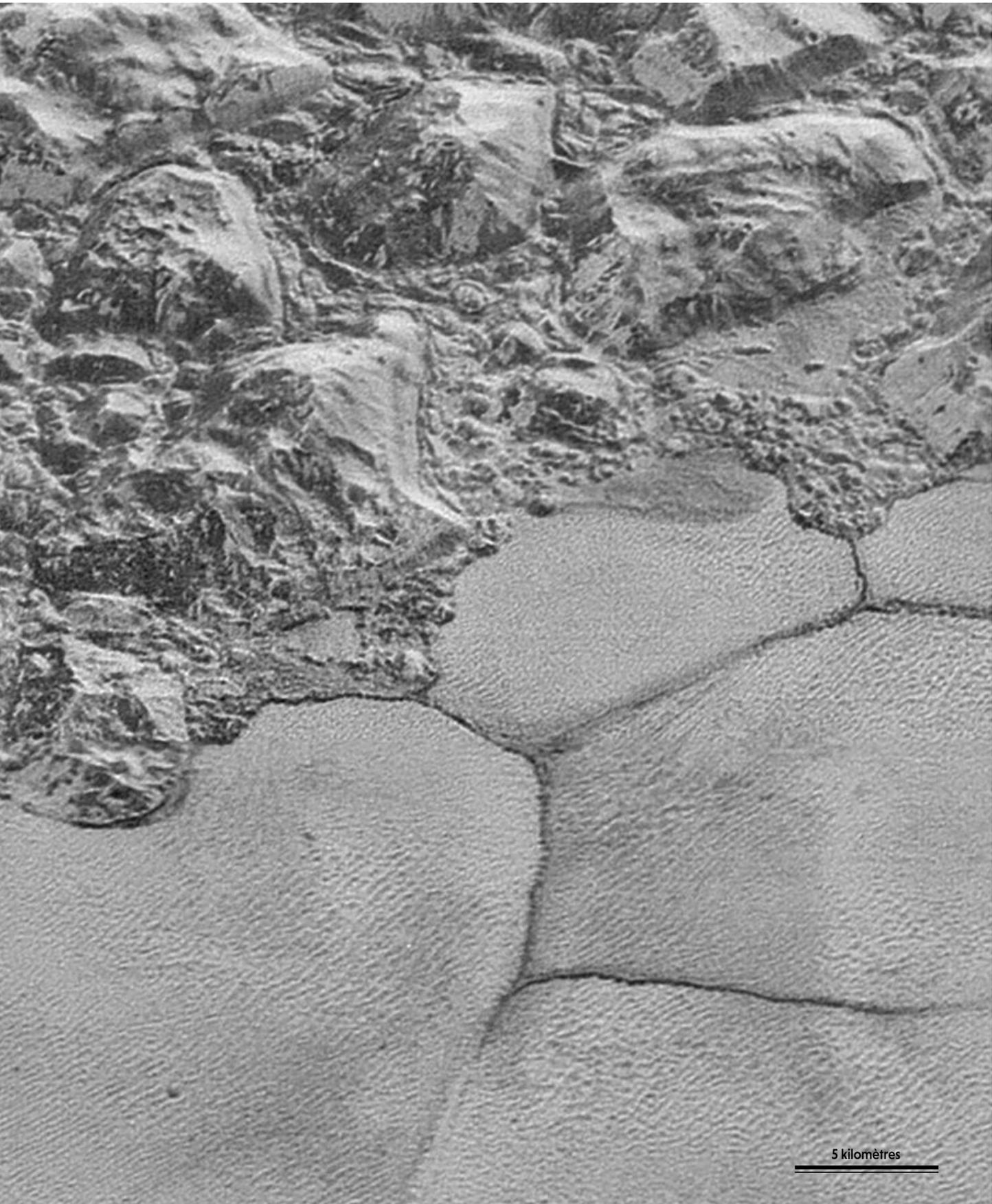
Dans la plaine gelée de Sputnik, au pied des montagnes, les chercheurs ont identifié 357 dunes (*les petites rides sur la plaine en bas à droite de l'image*). Grâce au spectromètre de la sonde *New Horizons*, ils ont précisé leur nature: elles seraient constituées de cristaux de méthane ( $\text{CH}_4$ ) de 200 à 300 micromètres. Ils ont de plus montré que ces cristaux se trouvent aussi dans les glaces de diazote ( $\text{N}_2$ ) des terrains environnants.

D'après les chercheurs, lorsque le Soleil éclaire les glaces de diazote, ces dernières se subliment (passant de l'état solide à l'état gazeux) et expulseraient les cristaux de méthane, lesquels seraient ensuite transportés par les vents plutoniens. En effet, Matt Telfer et ses collègues ont montré que, malgré la faible pression atmosphérique, ces vents sont suffisants pour véhiculer des particules en suspension. La raison: la faible gravité de Pluton ( $1/12^{\text{e}}$  de celle de la Terre). ■

C. M.

M. W. Telfer *et al.*, *Science*, vol. 360, pp. 992-997, 2018





5 kilomètres

© Nasa/Université Johns Hopkins/Laboratoire de physique appliquée/Institut de recherche du Sud-Ouest

## VIROLOGIE

## L'HÉPATITE B, UNE VIEILLE COMPAGNE

D'après l'Organisation mondiale de la santé, environ 257 millions de personnes sont porteuses chroniques du virus de l'hépatite B. Cela les expose à un risque élevé de décès par cirrhose ou cancer du foie. On sait désormais que ce virus est un compagnon de longue date de l'espèce humaine. Eske Willerslev, de l'université de Cambridge, au Royaume-Uni, et ses collègues ont retrouvé sa trace dans des squelettes humains vieux de 800 à 4500 ans environ.

Pour ce faire, les chercheurs ont extrait et séquencé l'ADN viral contenu dans des squelettes qui proviennent de sites d'Europe de l'Est et d'Asie centrale. «C'est la première fois que l'on identifie le génome d'un virus à ADN dans des restes aussi anciens. Cela montre aussi que dès l'âge du Bronze ancien, les populations étaient très infectées par ce virus en Europe», explique Olivier Dutour, anthropologue à l'université Paris-Sciences-Lettres.

Les chercheurs ont tenté de reconstruire l'arbre phylogénétique du virus. Il s'est révélé bien plus complexe qu'on ne le pensait. En analysant les échantillons anciens et en les comparant avec d'autres actuels, l'équipe a découvert une souche désormais éteinte, ainsi que des souches virales archaïques, proches de celles



Des traces du virus de l'hépatite B ont été retrouvées dans ce crâne daté du Néolithique et mis au jour en Allemagne.

qui infectent les chimpanzés et les gorilles. Selon un scénario simple, un virus infectant les singes serait passé à l'homme avant son expansion hors d'Afrique, il y a 60000 à 100000 ans. Cependant, l'équipe a aussi retrouvé plusieurs souches proches de celles de l'homme moderne, ce qui rend les choses moins claires. L'histoire est donc loin d'être terminée, d'autant qu'une autre étude menée par des chercheurs de l'université de Kiel, en Allemagne, vient de trouver des traces du virus dans des squelettes de l'âge de pierre, vieux de 7000 ans. ■

ALINE GERSTNER

P. de Barros Damgaard *et al.*, *Nature*, vol. 557, pp. 369-374, 2018 ; B. Mühlemann *et al.*, *ibid.*, pp. 418-423

## ENVIRONNEMENT

## L'INVASION DES VERS GÉANTS

En France, depuis une vingtaine d'années, on observe l'arrivée, en provenance de Nouvelle-Guinée, de nouvelles espèces de vers plats géants pouvant mesurer jusqu'à 40 cm. En 2013, l'équipe de Jean-Lou Justine, du Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, a lancé un projet pour étudier la répartition de ces vers et décrire les espèces présentes sur le sol français, de métropole et d'outre-mer. L'équipe a ainsi fait appel aux personnes confrontées à ces animaux (agriculteurs, jardiniers...) en leur demandant de photographier les spécimens qu'ils rencontraient.

Grâce à plus de 700 témoignages, les scientifiques ont recensé cinq espèces de vers plats provenant d'Asie du Sud-Est, principalement dans les Pyrénées-Atlantiques et les territoires d'Outre-mer. Ces animaux sont soupçonnés



Le ver plat *Bipalium kewense* (à droite), originaire d'Asie, est arrivé en France. C'est un prédateur des vers de terre.

de causer des dégâts importants sur la faune locale des sols, notamment en s'attaquant aux vers de terre. De plus, ils ont un mode de reproduction très rapide, par division de leur corps pour former des clones. L'invasion ne fait que commencer, et le problème est encore très sous-estimé. ■

CLAIRE HEITZ

J.-L. Justine *et al.*, *PeerJ*, vol. 6, e4672, 2018

## EN BREF

## COMMENT «VOLENT» LES PHASMES

Connus pour leur capacité de mimétisme, les phasmes sont des insectes peu mobiles. Charles Darwin, qui les a observés sur plusieurs îles éloignées les unes des autres, s'était demandé comment ces insectes dépourvus d'ailes s'étaient propagés. L'équipe de Kenji Suetsugu, de l'université de Kobe, au Japon, suggère que les oiseaux insectivores ont été leur vecteur de migration. Elle a montré que 5 % à 20 % des œufs de phasmes ingérés par des bulbuls à oreillons bruns étaient libérés intacts dans les déjections.

## EMPOISONNEMENT À LONGUE PORTÉE

En Antarctique, la population de skuas, ou grands labbes, diminue à vue d'œil... Aurélie Goutte, de l'université de La Rochelle, et ses collègues ont montré que le mirex, un pesticide interdit depuis plus de quarante ans, a atteint les côtes de la terre Adélie, où il se serait accumulé tout au long de la chaîne alimentaire. Présent en forte concentration dans le sang des oiseaux, le mirex agit sur le cerveau et diminue l'agressivité des skuas, qui défendent alors moins bien leurs nids contre les prédateurs.

## CURE DE VITAMINES CHEZ LES TIQUES

La vitamine B joue un rôle essentiel dans le métabolisme des cellules. Le sang en contient très peu. Dès lors, comment la tique, exclusivement hématophage, fait-elle pour vivre avec une telle carence ? Des bactéries synthétisent la vitamine pour elle ! Olivier Duron, de l'institut des sciences de l'évolution de Montpellier, et ses collègues ont en effet montré que sans l'aide de ces bactéries symbiotiques, les tiques sont incapables d'atteindre l'âge adulte et de se reproduire. Les microorganismes seraient transmis par la mère (qui en a dans ses ovaires) lors de la fabrication des œufs.

## UN CERVEAU QUASI HUMAIN

**H**omo *naledi*, une espèce humaine archaïque datée de 236 000 à 335 000 ans et découverte en Afrique du Sud, avait une toute petite tête. Avec des collègues, Ralph Holloway, de l'université Columbia, à New-York, a moulé l'intérieur de son crâne. L'endocaste obtenu montre que, comme celui des grands singes et des australopithèques, le cerveau d'*H. naledi* ne présentait pas de sillon fronto-orbital. En revanche, il comportait bien un opercule frontal – un repli du lobe frontal présent chez les humains, mais absent chez les grands singes. Les chercheurs notent en outre une certaine asymétrie de son lobe occipital et une morphologie du sillon lunaire (un sillon dans le lobe occipital) similaires à ce que l'on observe chez *H. sapiens*. *Homo naledi* partage donc certains traits du cerveau avec *H. sapiens* et d'autres fossiles du genre *Homo*, ce qui suggère, selon les chercheurs, que ces traits sont antérieurs au genre *Homo*. ■

F. S.

R. Holloway et al., PNAS, en ligne le 14 mai 2018

## DES AIRES PAS SI PROTÉGÉES

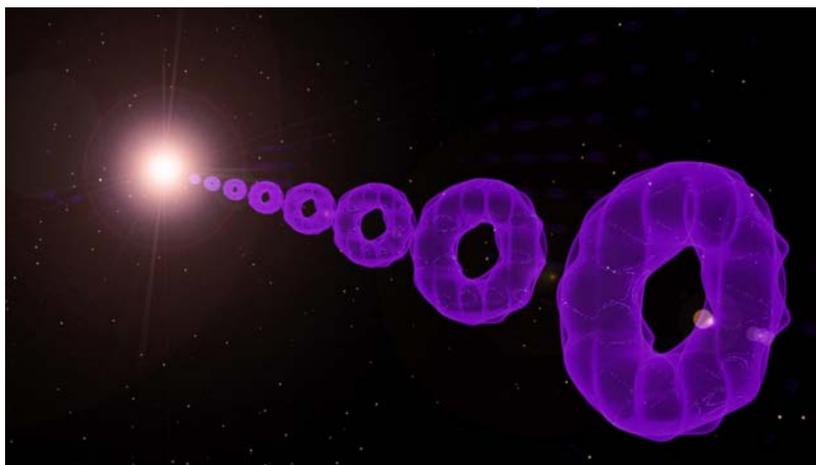
**P**our préserver la biodiversité, la superficie des aires protégées, définies par la Convention sur la diversité biologique, a doublé depuis 1992. Elle représente 19 millions de kilomètres carrés (14,7% des terres de la planète). Cependant, Kendall Jones, de l'université du Queensland, en Australie, et ses collègues ont montré que l'activité humaine a augmenté dans 55% des aires et qu'elle en a gravement dégradé 32,8%. Seuls 10% des aires sont restés bien préservés.

Les chercheurs constatent que la protection est surtout efficace dans les aires de grande superficie et ayant un niveau strict de protection. En effet, certaines catégories d'aires protégées autorisent une exploitation des ressources locales. Pour Kendall Jones et ses collègues, le succès du programme de protection de la biodiversité passerait par un investissement accru des pays dans la gestion des aires et par des restrictions plus sévères des activités humaines que l'on y autorise. ■

C. H.

K. R. Jones et al., Science, vol. 360, pp. 788-791, 2018

## UN GAZ D'ATOMES FROIDS POUR SIMULER L'UNIVERS



Des physiciens proposent d'étudier les premiers instants de l'Univers en utilisant un nuage d'atomes froids en forme d'anneau mis en expansion rapide (en violet sur cette vue d'artiste).

**U**ne piste pour étudier les débuts de l'Univers consiste à trouver des systèmes analogues. Gretchen Campbell, de l'université du Maryland, et ses collègues proposent d'utiliser un condensat de Bose-Einstein – un gaz d'atomes refroidis à une température proche du zéro absolu, qui présente un comportement collectif quantique particulier. Ces physiciens ont procédé sur des atomes de sodium ( $^{23}\text{Na}$ ). Au moyen de lasers, ils les ont piégés sous la forme d'un anneau et ont mis celui-ci en expansion rapide (le rayon étant multiplié par quatre en quelques dizaines de millisecondes pour simuler l'expansion de l'Univers).

Gretchen Campbell et ses collègues se sont en particulier intéressés aux modes de vibration au sein du condensat, nommés phonons, qu'ils ont considérés comme analogues aux photons de l'Univers. Ils ont observé trois propriétés dont ils proposent une correspondance avec l'Univers primordial. Lors de l'expansion de l'anneau, la fréquence des phonons diminue, ce qui correspond au décalage vers le rouge des photons se propageant dans l'Univers. Par ailleurs, la dynamique des phonons suggère la présence d'un amortissement, ce qu'on retrouve dans les modèles d'expansion cosmique sous la forme d'un terme nommé «amortissement de Hubble». Enfin, les physiciens observent un transfert d'énergie: les phonons dont les modes suivent une direction radiale perdent progressivement de l'énergie au profit de la formation de vortex dans le condensat. Ce transfert d'énergie serait comparable à la phase de «réchauffage» dans l'Univers primordial. De quoi s'agit-il? Au tout début de l'Univers, ce dernier aurait connu une phase d'expansion exponentielle qui a duré une fraction de seconde, l'inflation. À la fin de cette phase, de grandes quantités d'énergie ont été libérées dans le cosmos sous la forme de photons, conduisant à une élévation de la température globale: c'est la phase de réchauffage.

Les chercheurs tentent à présent d'étudier en laboratoire certains modèles d'inflation. Reste à savoir à quel point ces expériences avec des condensats sont une analogie raisonnable des débuts de l'Univers. ■

S. B.

S. Eckel et al., Phys. Rev. X, vol. 8, article 021021, 2018

## GÉNÉTIQUE

# AUX ORIGINES D'UN SUPERGÈNE DU MIMÉTISME

Le papillon *Heliconius numata* doit les motifs de ses ailes à une séquence indissociable de gènes qu'il aurait acquise d'un cousin éloigné il y a plusieurs millions d'années.

**A**u cours de l'évolution, certains papillons ont développé une toxicité qui les rend impropres à la consommation. Les prédateurs les reconnaissent d'après les motifs de leurs ailes et évitent ainsi de les manger. D'autres papillons, toxiques ou non, présentent des motifs similaires à ceux de papillons toxiques, une ruse efficace contre les prédateurs. Les mécanismes génétiques de ce mimétisme sont encore mal compris, mais Mathieu Joron, chercheur du CNRS au Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive, à Montpellier, et ses collègues ont apporté un éclairage important en identifiant l'origine d'un « supergène » chez des papillons tropicaux de l'espèce *Heliconius numata*.

Un supergène est une séquence continue et indissociable de plusieurs gènes. La stabilité de cette structure permet la coexistence, au fil des générations, de multiples motifs portés par différents individus d'une même région sans que ces motifs se mélangent par recombinaison génétique. Habituellement, lors de la fécondation, les chromosomes du futur individu subissent un brassage génétique : chaque chromosome résultant est un assemblage composite des chromosomes maternels et paternels. Dès lors, les motifs des ailes devraient se modifier au fil des générations et les caractères mimétiques se perdre. Ce n'est pourtant pas ce qui est observé chez les papillons mimétiques, grâce au biais introduit par des supergènes.

Cependant, si le rôle des supergènes dans le mimétisme est bien connu, les mécanismes qui gouvernent leur formation restent mal compris. Mathieu Joron et ses collègues ont donc recherché l'origine d'un supergène qu'ils avaient identifié quelques années plus tôt chez *H. numata*. Ils ont étudié la partie du génome impliquée dans l'élaboration des motifs des ailes chez un groupe (un clade) de dix espèces de papillons incluant *H. numata*. Ils ont d'abord retrouvé l'arrangement des gènes tel qu'il était chez l'ancêtre commun de ces différentes espèces. Ils ont alors montré que cette structure a subi une inversion au cours du temps : un segment d'ADN portant une vingtaine de gènes s'est retourné lors d'une mutation, inversant l'ordre de ces gènes par rapport à la version ancestrale. L'équipe suggère que



Le papillon *Heliconius numata* présente plusieurs motifs sur ses ailes comparables à ceux de papillons toxiques. Ces motifs sont contrôlés par un supergène hérité il y a 2,3 millions d'années.

la coexistence des séquences ancestrale et inversée de ces gènes chez différents individus de l'espèce *H. numata* bloque leur brassage et transforme de fait la vingtaine de gènes en un supergène insécable. Mathieu Joron et ses collègues ont donc recherché quand l'inversion est apparue parmi les espèces du clade.

Cette inversion se retrouve uniquement chez *Heliconius pardalinus*, une espèce génétiquement assez distante de *H. numata*. L'analyse de la généalogie des séquences montre que l'inversion apparue chez *H. pardalinus* aurait ensuite été transmise, par hybridation, à *H. numata* (les deux espèces sont interfécondes). Chez ce dernier coexistent désormais les deux versions, inversée et non inversée, du segment d'ADN concerné. Ce polymorphisme d'inversion, associé à des colorations distinctes, scelle ainsi un supergène à deux allèles (versions) principaux, chacun contrôlant un motif de coloration similaire à celui d'une espèce toxique.

Les chercheurs estiment que l'apparition de l'inversion a eu lieu il y a environ 2,4 millions d'années et que la transmission à *H. numata* s'est produite près de 100 000 ans plus tard, époque où le supergène s'est formé. ■

S. B.

P. Jay et al., *Current Biology*, vol. 28, pp. 1-7, 2018

### NAGER EN BANC EST PLUS FACILE

Les bancs de poissons sont souvent modélisés en partant du principe qu'un individu adapte son mouvement à celui de ses proches voisins. Mais le rôle de l'eau, que l'on suspecte d'avoir une influence sur le comportement du banc, n'est pas intégré. Pour y remédier, Christophe Eloy, de l'université Aix-Marseille, et ses collègues ont simulé un banc en prenant en compte les effets hydrodynamiques. Résultat : un poisson dépense moins d'énergie en banc grâce à un effet d'aspiration lié aux interactions du groupe avec le fluide.

### LA DISPARITION DES BAOBABS

Adrian Patrut, de l'université de Babeş-Bolyai, en Roumanie, et ses collègues se sont intéressés à la structure des baobabs. En datant au radiocarbone les différentes parties de divers arbres, ils ont montré que le tronc est composé de plusieurs pousses fusionnées. Ils ont aussi constaté que parmi les 15 baobabs les plus vieux et les plus larges d'Afrique australe, 10 sont morts durant ces douze dernières années. Les causes de cette mortalité massive restent inexplicables.

### UN PROTON SOUS PRESSION

François-Xavier Girod, du Jefferson Lab (JLab), aux États-Unis, et ses collègues ont déterminé la pression qui s'exerce au sein du proton, composant fondamental des atomes. Les chercheurs ont utilisé des données d'expériences du JLab menées en 2005 et 2009. Ils ont montré qu'au cœur du proton, des forces dirigées vers l'extérieur créent une pression gigantesque de l'ordre de  $10^{35}$  pascals, soit dix fois plus que celle qui s'exerce au sein d'une étoile à neutrons. Ces forces sont compensées par celles des parties externes du proton, orientées vers le cœur.

## LE FIL À PLOMB DES PLANTES

Comment les plantes déterminent-elles la direction verticale pour pousser ? La réponse est dans les statocytes, des cellules spécialisées qui contiennent de petits grains d'amidon, les statolithes. Plus denses que le milieu cellulaire, ces derniers se déposent dans la partie la plus basse des statocytes. La compréhension du phénomène, notamment la dynamique des statolithes quand l'inclinaison est faible, reste limitée. Antoine Bérut et ses collègues, des universités d'Aix-Marseille et de Clermont-Ferrand, proposent un nouveau modèle pour décrire le comportement de ces grains.

L'approche la plus simple est de comparer les statolithes à des grains de sable. Lorsque la plante penche, une avalanche se produit : les statolithes se repositionnent, ce qui entraîne un ajustement de l'angle de croissance de la plante. Mais cette analogie ne fonctionne pas si l'angle d'inclinaison est faible. Pour Antoine Bérut et ses collègues, les statolithes s'écoulent comme un liquide dans le fond des statocytes du fait de l'agitation qui les anime. Il en résulte une détection de l'inclinaison sans angle minimal.

Les physiiciens ont observé *in vivo* qu'avec une faible inclinaison, de l'ordre de 10 degrés, les statolithes s'écoulent et s'empilent, formant une surface horizontale en quelques minutes.



Les plantes détectent la direction verticale grâce à des cellules spécialisées contenant des grains d'amidon.

Ils ont ensuite reproduit un système de cellules artificielles contenant de l'eau et des particules de silice. Dans ce modèle, l'agitation des statolithes artificiels est assurée par un simple mouvement brownien, d'autant plus important que les particules sont petites.

Reste néanmoins à expliquer les raisons de l'agitation des statolithes *in vivo*. D'après les physiiciens, elles sont sans doute à chercher dans les interactions de ces grains avec le cytosquelette des cellules, constitué de filaments d'actine ou microtubules, mais des études, biologiques cette fois, sont nécessaires pour le confirmer. ■

M. T.

A. Bérut et al., *PNAS*, vol. 115(20), pp. 5123-5128, 2018

## NOTRE PASSÉ INSECTIVORE

Les premiers mammifères étaient relativement petits et mangeaient essentiellement des insectes. Christopher Emerling, de l'université de Californie à Berkeley et de l'Institut des sciences de l'évolution, à Montpellier, et deux collègues ont montré que le génome des mammifères placentaires actuels porte encore les traces de ce passé insectivore.

Chez les mangeurs d'insectes, des enzymes, les chitinases, assurent la digestion de l'exosquelette riche en chitine des insectes. Christopher Emerling et ses collègues se sont intéressés à un gène codant une chitinase, le gène *CHIA*. On savait déjà que le génome humain comporte un gène fonctionnel de chitinase et trois pseudo-gènes *CHIA*, devenus non fonctionnels par accumulation de mutations au cours de l'évolution. L'équipe a étendu l'analyse à 107 espèces de



Chez le tarsier spectre, insectivore, les cinq gènes ancestraux liés à la chitinase sont opérationnels.

mammifères placentaires et elle a découvert cinq gènes *CHIA* dans leurs génomes. Elle observe de plus une corrélation entre le nombre de gènes fonctionnels et la diversité d'insectes dans le régime alimentaire des animaux. ■

A. G.

C. Emerling et al., *Science Advances*, vol. 4(5), eaar6478, 2018

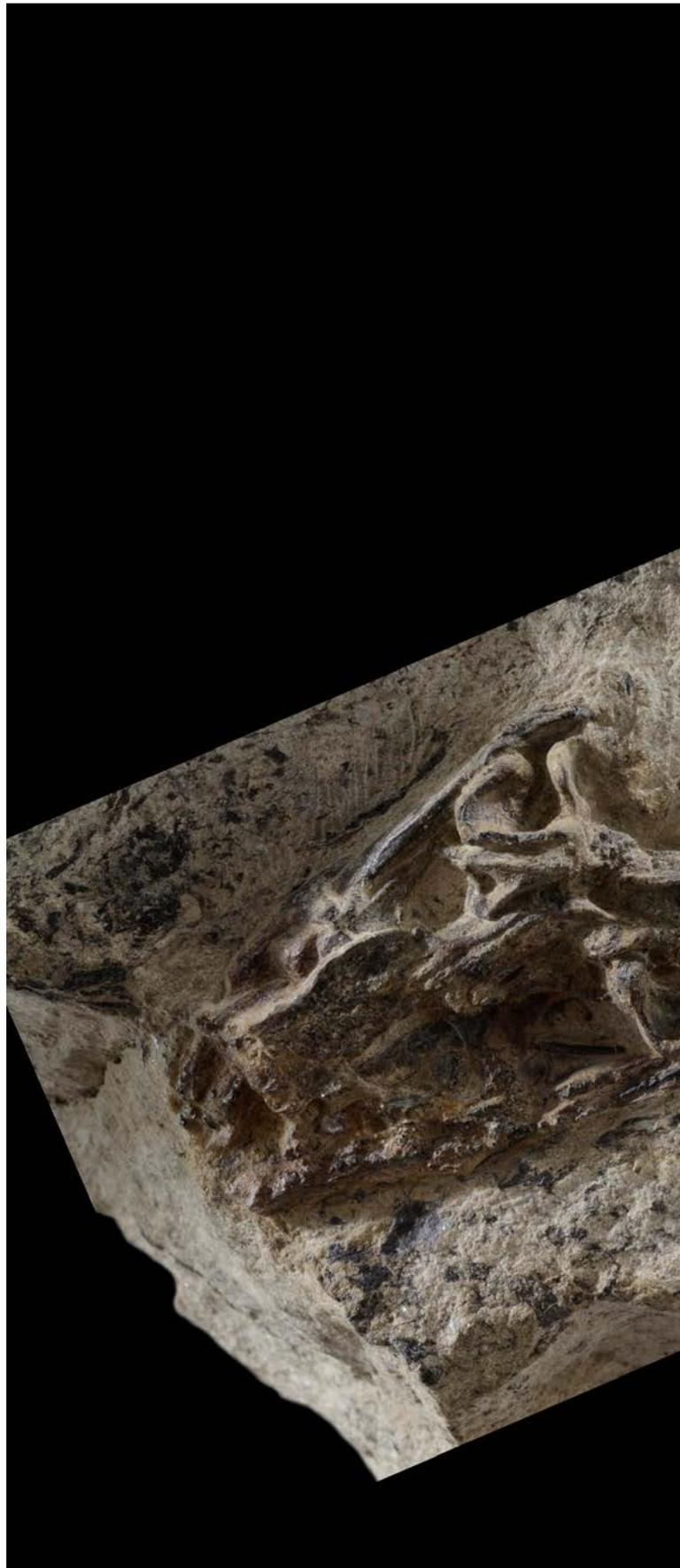
## EN IMAGE

# LE PLUS ANCIEN SQUAMATE ENFIN ÉTUDIÉ

**A**u début des années 2000, des paléontologues ont tiré le reptile *Megachirella wachtleri* d'un long repos de 240 millions d'années dans les montagnes du Nord de l'Italie. Autour de Massimo Bernardi, du Musée des sciences de Trente, en Italie, une équipe vient de tomographier aux rayons X ce fossile. La sélection soigneuse d'un jeu de traits morphologiques chez cent cinquante espèces de lézards anciens et modernes, et leur détection chez *M. wachtleri* prouvent qu'il s'agit bien d'un squamate, et c'est donc le plus ancien connu. Les « animaux à écailles » ou Squamata, qui incluent les lézards, les serpents et les amphisbènes (des squamates sans pattes nettement différents des autres), forment le groupe de tétrapodes le plus diversifié, ce qui suggère une grande ancienneté. L'âge de *M. wachtleri* et l'étude à travers le temps des traits choisis par les chercheurs les amènent à resituer l'époque de l'apparition de la lignée des squamates il y a quelque 257 millions d'années, soit 75 millions d'années plus tôt qu'on ne le pensait. Ce groupe aurait donc émergé au Permien, peu avant l'extinction massive d'espèces lors de la transition entre le Permien et le Trias, il y a quelque 252 millions d'années. Il s'est ensuite fortement diversifié au Trias (252 à 201,3 millions d'années), profitant des niches écologiques libérées par l'extinction. ■

F. S.

T. R. Simões *et al.*, *Nature*, vol. 557, pp 706-709, 2018





## ÉTHOLOGIE

LE BÉNÉFICE  
DU GUETTEUR

**L**es mangoustes, petits mammifères carnivores, sont des proies faciles pour les rapaces. Au sein d'une meute de 5 à 30 individus, il est donc fréquent d'observer durant la journée quelques-uns de ses membres monter la garde. Or occuper ce poste n'est pas sans risque: une mangouste qui surveille ne se nourrit pas et constitue une cible privilégiée. Cependant, Julie Kern et Andrew Radford, de l'université de Bristol, au Royaume-Uni, ont montré que la sentinelle obtient des compensations.

La mangouste sentinelle informe régulièrement ses congénères de sa présence par des cris de surveillance ou d'un éventuel danger par des cris d'alerte. Chaque individu a une signature vocale qui lui est propre. Les chercheurs ont observé que, en échange de ce service public, les sentinelles reçoivent une récompense prodiguée le soir même par les autres membres de la communauté: un toilettage. En diffusant des cris enregistrés d'une mangouste, Julie Kern et Andrew Radford ont montré que l'individu bénéficiait de davantage de toilettages si



La mangouste naine du Sud qui contribue à la surveillance du groupe reçoit un bénéfice... plus tard.

l'enregistrement contenait des cris de surveillance, et non des cris de positionnement (cris non spécifiques aux sentinelles).

Ces travaux ont mis en évidence l'existence d'interactions sociales à long terme (et donc des capacités de mémorisation) chez des non-primates, ce qui était jusqu'ici controversé. ■

C. M.

J. Kern et A. Radford, PNAS, en ligne le 29 mai 2018

## EN BREF

UNE IDÉE DU ZÉRO  
CHEZ LES ABEILLES

**M**ême si le concept de zéro en tant que nombre est arrivé tardivement dans l'histoire des mathématiques, on sait que certains animaux vertébrés en ont une notion. Adrian Dyer, de l'institut royal de technologie de Melbourne, et ses collègues ont voulu savoir ce qu'il en était des abeilles. Grâce à un système de récompense, ils ont appris aux insectes à comparer des quantités numériques, « plus que » et « moins que », en leur présentant des panneaux blancs marqués de 2 à 5 taches noires. Une fois le principe acquis, les abeilles ont été confrontées à des panneaux comportant 0 ou 1 tache. Elles ont, de la même façon, agi comme si elles comprenaient que 0 était inférieur à 1 et aux autres nombres.

Direction de l'innovation et des relations avec les entreprises

**cnrs**  
formation  
entreprises

Organisme  
de formation continue

→ 230 formations technologiques courtes proposées par le CNRS dans ses laboratoires de recherche pour les chercheurs, ingénieurs et techniciens

→ Domaines de formation

Big data, sciences de l'ingénieur, matériaux, biologie, microscopie, spectrométrie, urbanisme... et plus encore

+ de 1300 stagiaires formés chaque année



Découvrez nos stages sur  
**cnrsformation.cnrs.fr**



contact : [cfe.contact@cnrs.fr](mailto:cfe.contact@cnrs.fr) ou +33 (0)1 69 82 44 55 @CNRS\_CFE

## DES LÉZARDS AU SANG VERT

**E**n Nouvelle-Guinée, certaines espèces de lézards ont le sang vert en raison de l'accumulation d'une substance nommée biliverdine, un pigment que l'on trouve dans la bile. Selon des études phylogénétiques réalisées par l'équipe de Zachary Rodriguez, du Muséum de sciences naturelles de Baton Rouge, aux États-Unis, ce caractère serait apparu quatre fois indépendamment au cours de l'évolution chez ces lézards. La biliverdine étant nocive pour la plupart des espèces (elle provoque des jaunisses), cela suggère que le sang vert présente un intérêt adaptatif. Mais lequel? Sachant que la biliverdine est toxique pour le parasite du paludisme, Zachary Rodriguez suggère que cette molécule pourrait avoir chez le lézard un effet protecteur contre certaines maladies. ■

G. H.

Z. Rodriguez et al., *Science Advances*, vol. 4, article eaao5017, 2018

## FILMER L'ACTIVITÉ CÉRÉBRALE

**I**l est assez simple de suivre l'activité neuronale chez un animal immobilisé, mais cela ne permet pas de répondre à certaines questions: par exemple, quels neurones et quelles connexions neuronales sont à l'œuvre quand l'animal s'oriente? L'équipe d'Alipasha Vaziri, de l'université Rockefeller, à New-York, a développé un dispositif pour observer l'activité neuronale dans une région de l'hippocampe chez des souris en mouvement.

Pour ce faire, les chercheurs ont introduit dans le génome de la souris un gène codant une protéine fluorescente capable de se lier au calcium, de telle façon que plus un neurone est actif, plus il est fluorescent. Ils ont ensuite conçu un microscope miniature pouvant être introduit dans le crâne des rongeurs. Ce dispositif est très fin (0,2 millimètre de large) et ne provoque donc pas de dégâts dans le cerveau. Et il est très léger, ce qui permet à l'animal de se déplacer librement. La source lumineuse du microscope éclaire les neurones et provoque la fluorescence de ceux qui s'activent. ■

DONOVAN THIEBAUD

O. Skocek et al., *Nature Methods*, en ligne le 7 mai 2018

## DERNIÈRES TROUVAILLES À POMPÉI



Il avait la trentaine, était blessé à la jambe et n'était pas pauvre. Il n'a pu fuir à temps l'éruption du Vésuve. Deux mille ans plus tard, une fouille a révélé cet événement tragique.

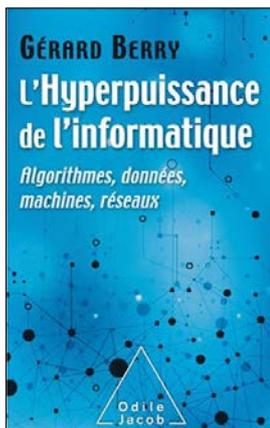
**À** Pompéi, ville romaine brutalement ensevelie par l'éruption du Vésuve en 79 de notre ère (et de ce fait remarquablement conservée), on excave actuellement le secteur V dans le cadre d'une consolidation générale des chantiers de fouilles. C'est lors de ces travaux qu'une victime de l'éruption vient d'être retrouvée à l'intersection de la rue des Nocces-d'Argent (*vicolo delle Nozze d'Argento*) et de la rue des Balcons (*vicolo dei Balconi*). L'image de son squelette absurdement écrasé par un énorme bloc rectangulaire ressemble à une mise en scène de bande dessinée: le corps semble orienté par la tentative désespérée de son propriétaire de fuir la fureur éruptive en cours, juste avant que ne s'abatte sur lui l'imposant bloc – peut-être un jambage de porte. Ce bloc de pierre écrasa la tête et le torse de l'infortuné Pompéien, qui fut instantanément enterré dans les lapilli brûlants...

Quelque deux mille ans plus tard, Sophie Hay, de l'université de Southampton, en Angleterre, le retrouvera à proximité d'une maison, où il s'était probablement réfugié. Selon les premières études, il s'agirait d'un homme d'une trentaine d'années. L'un de ses tibias porte les traces d'une infection osseuse, qui a dû lui rendre la marche extrêmement pénible. L'homme n'avait donc pas pu ou voulu fuir dès les premiers signes d'aggravation de l'éruption, contrairement à ce que firent la plupart des 30 000 habitants de la ville.

Ironie du sort, cet homme blessé a tenté d'assurer son avenir en emportant avec lui sa bourse. Elle contenait, d'après les premières observations, vingt pièces d'argent et deux de bronze, datant principalement du II<sup>e</sup> siècle avant notre ère, ainsi qu'un denier de Marc Antoine, un denier d'Auguste et deux deniers de Vespasien. ■

F. S.

Communiqué du Parco archeologico di Pompei, en ligne le 29 mai 2018 ([www.pompeisites.org](http://www.pompeisites.org))



INFORMATIQUE

L'HYPERPUISSANCE DE L'INFORMATIQUE

Gérard Berry

Odile Jacob, 2017  
512 pages, 35 euros

Parler de l'informatique en général et réussir à mentionner et à expliquer tout ce qui est important aujourd'hui, tel est le défi que s'est fixé Gérard Berry, professeur au Collège de France. Et il y est parvenu!

Il faut voir ce livre magnifique à la fois comme une introduction et un rigoureux traité sur le sujet. L'expérience de l'auteur, qui a travaillé aux développements de logiciels sûrs tels ceux requis en aéronautique, lui permet d'avoir une vision concrète de ce qu'est devenue cette science dans la vie de chacun et dans l'industrie. Selon lui, nous devons prendre conscience qu'elle est puissante et que cette puissance qui s'accroît rapidement la rend utile et indispensable, mais aussi dangereuse.

Gérard Berry défend l'idée que, pour maîtriser les problèmes auxquels elle nous confronte, nous devons nous construire un «nouveau schéma mental» dont il fournit les clés: la pensée algorithmique. Il traite dans son livre de l'Internet que chacun croit à tort bien connaître, de la photographie dont il est un passionné, du rôle de plus en plus important de l'informatique en médecine, et des bouleversements qu'elle introduit dans toutes les sciences. Les bugs et les trous de sécurité le préoccupent particulièrement. Fin connaisseur de ces questions, et en particulier du «bug qui a tué Ariane 5, lors du vol 501», il nous met en garde contre une sous-estimation des dangers qu'un traitement trop peu rigoureux des risques logiciels nous fait prendre. Sa compréhension profonde de l'informatique corrige les jugements souvent illusoire que nous portons sur elle pour nous instruire de sa vraie nature, merveilleuse et risquée. Il termine le livre en présentant une vision du monde que l'informatique nous prépare.

JEAN-PAUL DELAHAYE  
UNIVERSITÉ DE LILLE



ARCHÉOLOGIE

TOUT SUR L'ARCHÉOLOGIE

Paul Bahn (dir.)

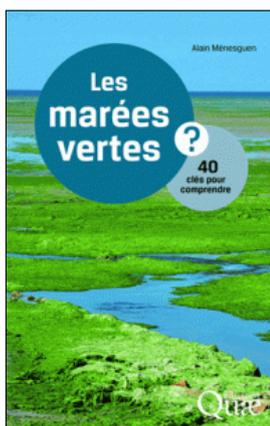
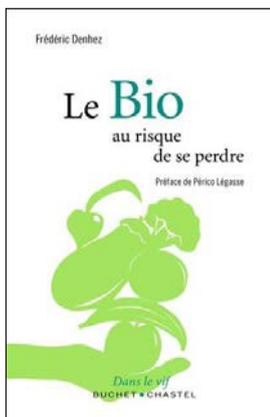
Flammarion, 2018  
578 pages, 35 euros

Ce très bel ouvrage, qui rassemble une pléiade d'auteurs spécialistes, apparaît d'abord comme une gageure tant son titre sonne comme un défi. Comment en effet tout dire sur l'archéologie, de l'âge des glaces à nos jours, et par là prétendre embrasser un champ si vaste dans l'espace comme dans le temps?

L'avant-propos en précise l'intention: dresser un panorama le plus complet possible, mais, surtout, raconter l'histoire de l'archéologie, depuis la chasse au trésor, les découvertes fortuites, jusqu'à l'utilisation de méthodes scientifiques complexes et variées. Celles-ci occupent la dernière partie, consacrée au fonctionnement de l'archéologie.

Dans la partie qui précède, l'ouvrage se déroule à travers les moments clés de l'humanité, en six grandes périodes, de la Préhistoire à la période moderne. Pour chacune d'elles, on a retenu les sites majeurs, qui constituent autant d'étapes. Certains sont bien connus, comme les mégalithes, la Mésopotamie des premières cités, les pyramides d'Égypte, la Chine des Tang... D'autres moins, comme la cité antique de Motyé, petite île près de la Sicile, ou la culture de Nok, au Nigeria. Ce ne sont que quelques exemples glanés au hasard, pour dire que chacun, au gré de sa curiosité, peut lire ce livre selon son envie ou ses besoins, même si l'ouvrage a été conçu selon une perspective historique. L'intérêt majeur en reste cependant la juxtaposition des cultures contemporaines dans le temps, mais très éloignées dans l'espace. Ajoutons aux qualités de ce livre une très riche et très abondante illustration, souvent nouvelle et originale, et la mise à jour qui tient compte des avancées les plus récentes de la recherche.

NADINE GUILHOU  
UNIVERSITÉ PAUL-VALÉRY, MONTPELLIER



**LE BIO AU RISQUE DE SE PERDRE**

Frédéric Denhez

Buchet-Chastel, 2018

128 pages, 12 euros

**L**e bio s'est imposé dans l'imaginaire collectif comme LA solution la plus écologique et adaptée à un développement durable. Il est en outre censé être le garant d'une meilleure santé des consommateurs. Mais est-il aussi vertueux qu'on veut bien le dire? Ou s'agit-il plutôt d'une croyance, d'une nouvelle religion, d'une mode? Telle est la question abordée par l'auteur, journaliste spécialisé en environnement et chroniqueur de l'émission de radio *CO<sub>2</sub> mon amour*, sur France Inter.

Comment peut-on être sûr en effet que le bio préserve la qualité du sol, la biodiversité, ou tout simplement la qualité nutritionnelle des produits? Nouveau marché opportuniste pour les grandes surfaces, sa démocratisation va de pair avec l'élargissement des circuits de production, de transformation et de distribution et la perte d'une partie de ses fondamentaux. Le tout est noyé dans un dédale d'autant plus opaque que le cahier des charges du bio varie d'un continent à l'autre et ne comprend aucune obligation de résultats. Faut-il alors jeter le bébé avec l'eau du bain? Si l'auteur, peu avare de critiques, démonte avec pertinence le mythe et les dérives du tout-bio, il montre aussi qu'au-delà du simple label, adhérer à sa philosophie, avec ses valeurs et son éthique (ce qu'il nomme «LA Bio») est une démarche nécessaire et salutaire, à la fois personnelle et sociétale... Mais cette démarche implique de s'affranchir de tous les dogmes qui pervertissent sa perception et de réconcilier parallèlement l'ensemble des acteurs – quelles que soient leurs sensibilités – autour d'un projet cohérent, vertueux et humaniste.

Tout cela est dit avec plein de bon sens et en langage simple: salutaire!

**BERNARD SCHMITT**

CERNH, LORIENT

**LES MARÉES VERTES**

Alain Ménesguen

Quae, 2018

128 pages, 19 euros

**L**es marées vertes ne sont pas un phénomène nouveau. Pour autant, leur recrudescence sur nos côtes et plans d'eau, ainsi que sur toute la planète ces dernières décennies, nécessite la mobilisation de tous pour enrayer un fléau dû aux apports excessifs d'azote et de phosphore dans les eaux.

Pour bien agir, nous devons cependant être informés des multiples causes et mécanismes en jeu. L'océanographe Alain Ménesguen nous offre à cet égard un ouvrage indispensable pour mieux appréhender l'eutrophisation des eaux, c'est-à-dire l'accumulation excessive de nutriments, qui est à l'origine des marées vertes.

Le texte est articulé autour de réponses concises, pédagogiques et bien illustrées à quarante questions fréquemment posées à propos de ce processus. Chercheur à l'Ifremer de renommée internationale, l'auteur a passé de nombreuses années à décortiquer les mécanismes responsables de ce phénomène et à les modéliser, afin de développer des outils de prévision et de gestion. Il n'élude aucune question ni controverse, qu'elle soit scientifique, à propos par exemple des rôles respectifs de l'azote et du phosphore dans le déclenchement de l'eutrophisation, ou sociétale, qu'il s'agisse des désinformations véhiculées par tel ou tel lobby, ou des enjeux socioéconomiques et politiques autour de l'élaboration de normes de qualité de l'eau.

Bref, un ouvrage éclairant sur l'eutrophisation, processus qui nous concerne tous et dont nous sommes tous, d'une certaine manière, responsables.

**GILLES PINAY**

IRSTEA, LYON

**MORDUS DE SERPENTS**

Xavier Bonnet et Maxime Briola

Regard du Vivant, 2018

232 pages, 45 euros

**É**crit par le spécialiste des serpents Xavier Bonnet, ce livre vaut déjà par ses textes. Après les mythologies concernant le serpent, ce chercheur au CNRS traite de l'animal et de notre relation avec ces fascinants reptiles. Suivent plus de cent pages de beaux portraits de quelques espèces (des photographies de Maxime Briola), que Xavier Bonnet commente savamment. On y apprend beaucoup, notamment à distinguer la pupille ronde de la couleuvre de la pupille de chat (rétrécie en une barre) de la vipère, ou encore à compter les rangées d'écailles entre œil et bouche (trois chez la vipère, une seule chez la couleuvre).

**POLLOCK, TURNER, VAN GOGH, VERMEER ET LA SCIENCE**

Loïc Mangin

Belin, 2018

224 pages, 23 euros

**D**ans l'un de ses tableaux, Edvard Munch semble avoir oublié le reflet de la Lune... Une erreur? Non, c'est bien conforme aux lois de l'optique! L'auteur de la rubrique « Art & science » de *Pour la Science* s'est proposé de partir systématiquement d'une œuvre d'art et d'en extirper la... science, qui sans doute vous a échappé, mais pourtant s'offre à vos yeux. Cela l'amène, tour à tour, à faire des mathématiques, de la climatologie, de l'astronomie, de la zoologie, de l'optique... bref, à nous faire faire de la science avec de l'art et vice-versa.

**MATHÉMATIQUES ET ÉCONOMIE**

Daniel Justens (dir.)

Éditions Pole, 2018

168 pages, 22 euros

**L'**économie classique est née au XVIII<sup>e</sup> siècle, mais c'est du XIX<sup>e</sup> siècle que date la mathématisation des explications économiques. Ce petit livre, dans la collection « Bibliothèque Tangente », passe en revue la rencontre entre économie et mathématiques. Sont abordés tant les concepts de la macroéconomie et de la microéconomie que nombre d'aspects des mathématiques usuelles souvent employés en sciences économiques. Parmi eux, le rôle toujours plus grand que jouent les statistiques à une époque où les systèmes d'information collectent automatiquement et en masse des données.

## NICE

JUSQU'AU 16 SEPTEMBRE 2018

Musée national du sport  
www.museedusport.fr

## Corps sportifs

Le sport est un concept récent, qui date de la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, rappelle cette exposition. On parlait jadis de jeux, voire de gymnastique, mais c'est seulement à cette époque que la participation aux pratiques sportives est devenue ouverte à tous, que des règlements et des institutions internationaux se sont mis à gérer ces pratiques et leurs compétitions. Simultanément, le rapport au corps s'est modifié: au-delà de la gymnastique utilisée dans le cadre militaire pour former les soldats, le corps fait désormais l'objet d'une attention renouvelée: on l'entraîne, on le spécialise, on le mesure, on le perfectionne à l'aide de vêtements, instruments et autres auxiliaires conçus à ces fins.

C'est cette évolution du rapport au corps dans le contexte sportif qui est expliquée aux visiteurs. Pour ce faire, l'exposition présente de nombreuses photographies, historiques ou actuelles, des vidéos, des objets archéologiques (par exemple des casques ou des cuirasses de la Grèce ancienne) ou plus modernes et technologiques (par exemple des combinaisons de natation), ainsi que diverses œuvres d'art (sculptures, tableaux, affiches...). Le centre de l'espace d'exposition propose des dispositifs multimédias, en particulier un système de projection holographique qui calque les mouvements du visiteur sur un avatar holographique. ■



## AVIGNON

DU 16 AU 20 JUILLET 2018

Université d'Avignon - Cour minérale  
binome.resa@gmail.com / Tél. 07 83 59 42 66

## Binôme



Dans le cadre du Festival d'Avignon, la compagnie Les sens des mots présente de courtes pièces pour trois voix issues d'une rencontre entre un auteur de théâtre et un chercheur. Lors de chaque représentation, des extraits de la rencontre sont diffusés, la pièce est jouée, puis on montre la réaction filmée du scientifique lorsqu'il a découvert la pièce. Enfin, une discussion avec le public, en présence des protagonistes. ■

## BOUGON (DEUX-SÈVRES)

JUSQU'AU 4 NOVEMBRE 2018

Musée des tumulus de Bougon  
tumulus-de-bougon.fr/musee/

## Pierres &amp; puzzles



Dans cette exposition entre art et science, Dominique Robin, plasticien originaire du Poitou et vivant à New York, présente des œuvres qui entrent en résonance avec des pierres taillées de la Préhistoire, elles aussi exposées. Ces œuvres sont construites à partir de pierres ramassées dans la nature et qui ont été naturellement fragmentées, offrant à l'artiste des sortes de puzzles 3D. ■

## ET AUSSI

Samedi 21 juillet à 23 h 10

Sur la chaîne Arte  
arte.tvCÉDRIC VILLANI,  
UN MATHÉMATICIEN  
AUX MÉTALLOS

Une conférence filmée où le mathématicien et talentueux orateur (ainsi que député, depuis l'année dernière) part d'un exemple à peu près arbitraire, la chauve-souris, pour montrer à quel point les mathématiques pénètrent toutes les sphères de la connaissance.

Samedi 28 juillet à 22 h 30

Sur la chaîne Arte  
arte.tvDERNIER VOYAGE  
VERS SATURNE

Le récit de la fin de la mission Cassini, où la sonde a exploré pendant treize ans le système saturnien, en récoltant une moisson extraordinaire de clichés et de découvertes. Cassini a achevé son parcours en plongeant dans l'atmosphère de Saturne le 15 septembre 2017 ; ce documentaire a été réalisé un peu avant.

Jusqu'au 2 septembre 2018

Aquarium tropical  
de la Porte Dorée, à Paris  
VOYAGE AU CŒUR  
DES RÉCIFS CORALLIENS

Au moyen de 22 panneaux illustratifs aux textes courts, cette exposition présente les diverses facettes du monde corallien : sa beauté, sa biologie, sa diversité, son rôle protecteur pour les côtes, les menaces qui pèsent sur ces milieux...

Jusqu'en mars 2019

Grilles du Jardin  
des Plantes, à Paris  
SECRETS DÉVOILÉS :  
VOIR L'IMPERCEPTIBLE

Présentées sur de grands et beaux panneaux explicatifs, des images portant sur une sélection de thèmes montrent ce que l'œil ne peut pas voir. Qu'il s'agisse de tomographie aux rayons X, de microscopie électronique à balayage ou d'une autre technique, ces images sont à la fois esthétiques et informatives.

## PARIS

**JUSQU'AU 5 AOÛT 2018**  
Institut du monde arabe  
[imarabe.org](http://imarabe.org)

# L'épopée du canal de Suez



**P**haraonique, l'entreprise qu'a représentée le Canal de Suez l'était au sens figuré comme au sens propre, puisque c'est Sésostri III, vers 1850 avant notre ère, qui a pris l'initiative de creuser une voie navigable reliant la Méditerranée à la mer Rouge. Discontinue et souvent ensablée, cette voie s'est maintenue cahin-caha jusqu'à sa fermeture définitive au VIII<sup>e</sup> siècle de notre ère... avant de ressusciter au XIX<sup>e</sup> sous l'impulsion de Ferdinand de Lesseps. L'exposition raconte cette riche histoire géographique, politique et technique, qui va jusqu'à nos jours (et au-delà) et qui a impliqué beaucoup de personnages marquants. ■

## TOULOUSE

**DU 7 AU 15 JUILLET 2018**  
En divers lieux de la métropole toulousaine  
[toulousscience2018.eu/science-in-the-city/](http://toulousscience2018.eu/science-in-the-city/)

# Science in the city

**C**ette année, la ville de Toulouse devient un épiscentre scientifique en accueillant, du 9 au 14 juillet, la huitième édition de l'Euroscience Open Forum: une manifestation internationale à laquelle participent plusieurs milliers de chercheurs et d'acteurs socioculturels, économiques ou politiques liés à la science. C'est la première fois que cet événement se déroule en France.

Si l'Euroscience Open Forum est destiné aux professionnels, le grand public n'est pas en reste. Son volet nommé Science in the city est un festival qui propose des conférences, des



démonstrations, des ateliers, des expositions et d'autres animations en rapport avec la science. En quelque 55 lieux de Toulouse et de sa métropole, se tiennent ainsi plus de 120 événements qui offrent au grand public l'occasion de découvrir les grandes avancées scientifiques de notre époque, de comprendre leurs impacts dans des domaines comme ceux de la santé ou de l'agriculture, de rencontrer des chercheurs... ■

## DIJON

**JUSQU'AU 6 JANVIER 2019**  
Jardin des sciences  
[ma-nature.dijon.fr](http://ma-nature.dijon.fr)



# Graines

**O**mniprésentes dans notre quotidien, les graines n'attirent que rarement notre attention. Pourtant, elles représentent une innovation majeure dans l'évolution de la vie végétale, rappelle et explique cette exposition. Maquettes botaniques, fossiles, graines actuelles courantes ou exotiques, photographies et autres dispositifs muséaux aident le visiteur à comprendre la biologie des graines, leur dispersion, l'importance qu'elles ont pour l'alimentation humaine et animale, les enjeux liés à leur production et leur consommation. ■

## SORTIES DE TERRAIN

**Dimanche 1<sup>er</sup> juillet**  
**Chamrousse (Isère)**  
[www.frapna-38.org](http://www.frapna-38.org)  
**FÊTE DE LA MONTAGNE**  
Un dimanche en « portes ouvertes » pour découvrir le lac Achard et ses environs à travers balades, randonnées et autres activités organisées par les associations de protection de la nature, les clubs de montagne et la commune de Chamrousse.

**Jeudi 5 juillet, 18 h**  
**Migné (Indre)**  
**Tél. 02 54 28 12 13**  
**GUIFETTES MOUSTACS À L'ÉTANG EX-CHÈVRES**  
Un début de soirée à la rencontre des richesses ornithologiques de l'étang Ex-Chèvres, lieu privilégié de reproduction de la guifette moustac, une espèce de sterne protégée. Cet étang, l'un des plus anciens de la Brenne, est d'ordinaire inaccessible au public.

**Samedi 7 juillet, 10 h**  
**Saint-Maurice Étusson (79) et Cléré-sur-Layon (49)**  
**Tél. 02 41 71 77 30**  
**LA FLORE DE L'ÉTANG DE BEAUREPAIRE**  
Cette sortie a pour objectif de s'initier aux joies de la botanique sur un site d'une grande richesse, des saulaies des berges aux plantes aquatiques.

**Mardi 10 juillet**  
**Saint-Julien (Côtes-d'Armor)**  
**Tél. 07 83 93 25 32**  
**LES CHAOS DU GOUËT**  
D'une durée d'environ 2 h 30, une balade familiale qui permet de découvrir la faune et la flore autour d'une rivière bretonne évoluant dans la forêt parmi des blocs de granit.

**Lundi 23 juillet, 9 h 30**  
**Urbes (Haut-Rhin)**  
**Tél. 06 47 29 16 20**  
**CIMES DU CHAUVELIN**  
Une journée de randonnée, avec commentaires géologiques, dans la montagne du Chauvelin, qui surplombe une tourbière et dont les abords témoignent de glaciers anciens.



LA CHRONIQUE DE  
**GILLES DOWEK**

# NOUS SOMMES TOUS DES HANDICAPÉS

**Que nous soyons handicapés ou valides, nous utilisons les dispositifs informatiques pour compenser un organe défaillant ou améliorer une performance limitée.**



Les exosquelettes sont utilisés dans l'industrie pour soulager les employés qui exercent une activité physique, comme ici avec le prototype EksoVest de Ford.

**L**es différents objets informatiques qui servent à pallier un handicap – par exemple, les logiciels de synthèse vocale qui offrent une capacité de lecture aux aveugles, les implants cochléaires qui permettent à certains sourds d'entendre, les exosquelettes qui aident certains handicapés moteurs à marcher – sont conçus sur le même principe : ils simulent, pas toujours de manière parfaite, le fonctionnement « normal » de l'organe « défaillant ».

De tels objets améliorent souvent la vie des personnes qui les utilisent, à condition, bien entendu, que ce soient elles qui les contrôlent. Mais ils nous rappellent aussi que nous sommes capables de simuler le fonctionnement de nombre de nos organes avec un ordinateur et donc que ces organes ne font que transformer de l'information : l'œil transforme de l'information lumineuse en impulsions nerveuses, l'oreille fait de même avec de l'information sonore, etc. Seuls les muscles transforment des impulsions nerveuses en mouvement. C'est pourquoi

les exosquelettes ne sont pas de simples ordinateurs, mais des ordinateurs qui activent des moteurs : des robots.

Cette utilisation des ordinateurs par les personnes handicapées n'est ainsi pas très différente de celle qu'en font les personnes « valides » qui, elles aussi, se servent des ordinateurs pour leur faire faire ce qu'elles ne parviennent pas à faire

La différence entre  
une personne handicapée  
et une personne valide  
est statistique

elles-mêmes : effectuer sans se tromper une multiplication de deux nombres de douze chiffres, mémoriser des textes et les restituer des années plus tard, piloter un véhicule pendant des heures sans se déconcentrer, répéter une même action mille fois sans se lasser, etc. D'ailleurs, les

ordinateurs partagent cette propriété avec nombre des objets techniques que nous avons inventés : nous n'utilisons un marteau que parce que nous ne parvenons pas à enfoncer des clous avec le poing, une lunette parce que nous ne parvenons pas à voir les satellites de Jupiter à l'œil nu, etc.

La comparaison avec les ordinateurs montre à quel point nos capacités de calcul, de mémorisation, de concentration ou d'endurance sont faibles, y compris pour ceux qui excellent dans ces activités. Par exemple, la mémoire des aèdes, qui savaient par cœur l'Iliade et l'Odyssée, nous impressionne. Pourtant, ces épopées ne sont pas si longues, puisqu'un disque de un téraoctet permet d'en mémoriser quelques millions.

De ce fait, nous pouvons nous demander si nos incapacités à mémoriser une liste de quelques dizaines de mots, à effectuer de tête une multiplication de deux nombres de trois chiffres, à rester vigilants quand nous conduisons un véhicule, à répéter une même action sans nous lasser, etc. ne devraient pas, elles aussi, être qualifiées de « handicaps ». Il y a ainsi peu de différences entre l'usage que les personnes handicapées et les personnes valides font des ordinateurs : les unes comme les autres les utilisent pour pallier leurs handicaps. Les ordinateurs ont même été inventés pour cela.

La seule différence entre une personne handicapée et une personne valide est donc statistique : nous ne voyons pas notre incapacité à mémoriser un téraoctet et à le restituer une année plus tard comme un handicap, car c'est un handicap très courant.

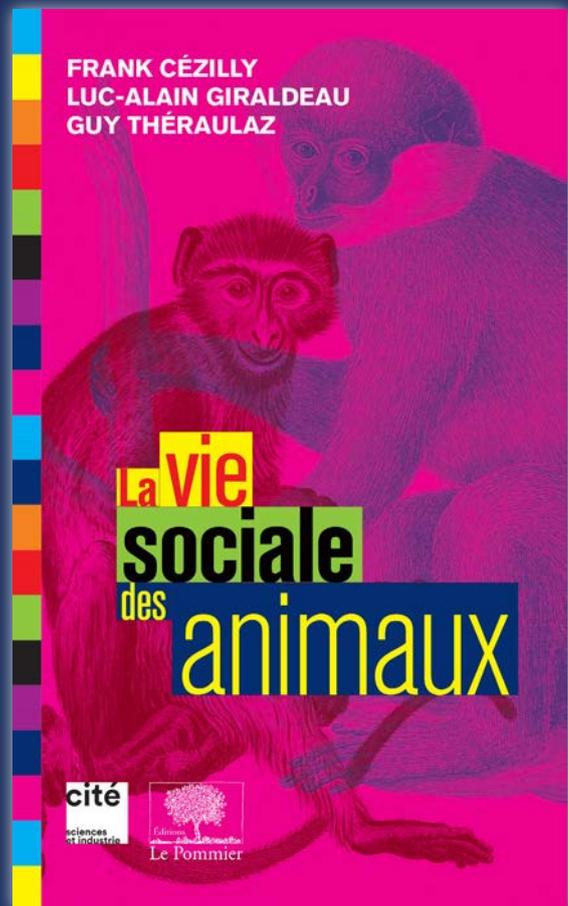
L'utilisation des ordinateurs est l'occasion de changer le regard que nous portons sur les handicaps des autres, en changeant d'abord celui que nous portons sur les nôtres. Alors que l'humanisme nous avait menés à nous voir, à de rares exceptions, comme parfaits, c'est un effet secondaire, sans doute positif, de la construction de ces objets. ■

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



# Le point commun entre lions, fourmis et ouistitis ? Chacune de ces espèces vit en société

Une vie sociale qui n'a rien à envier à celle des humains !  
Bienvenue en éthologie, la science sociale du vivant.



192 p. – 10 €



Retrouvez toutes nos nouveautés sur notre site  
[www.editions-lepommier.fr](http://www.editions-lepommier.fr)



LA CHRONIQUE DE  
**GÉRALD BRONNER**

# PREMIÈRES IMPRESSIONS SUR INTERNET

**En matière de mésinformation et de désinformation, l'ordre dans lequel les moteurs de recherche sur Internet affichent leurs résultats est loin d'être anodin.**



**C**es quinze dernières années, il s'est enregistré plus d'informations que depuis l'invention de l'imprimerie. Celles-ci étant beaucoup moins sélectionnées qu'auparavant, on peut parler d'une forme de dérégulation du marché de l'information d'une ampleur jamais connue par l'humanité. Nous le savons   présent, cette dérégulation confère des avantages concurrentiels à certaines formes de crédulité. Il n'y a donc rien d'étonnant à ce que, à l'heure de la «société de la post-vérité», une loi sur les *fake news* soit en préparation en France.

Beaucoup réclament que cette régulation s'opère par un retrait de certains contenus problématiques, c'est-à-dire par censure. Mais cela comporte une charge liberticide et n'a guère été couronné de succès jusqu'à présent, les flux d'informations s'affranchissant aisément de la géographie et des lois nationales.

En revanche, il est légitime de s'interroger sur la visibilité de certains contenus, par exemple l'ordre dans lequel l'information nous est proposée par un moteur de recherche. Est-il normal que, sur des questions de santé publique

sensibles et complexes, on trouve prioritairement des contenus qui contredisent le consensus scientifique?

«La première impression est toujours la bonne, surtout quand elle est mauvaise», affirmait avec humour l'écrivain et critique Henri Jeanson. Cette idée qu'une première impression nous dit quelque chose de la vérité d'un individu ou d'une idée que nous rencontrons n'est peut-être pas toujours fausse, mais elle peut aussi

**Un effet dit de primauté  
ou de préambule  
que nous connaissons tous**

nous tromper souvent. Elle est donc particulièrement problématique lorsque nous effectuons sur Internet une recherche sur un sujet que nous ne connaissons pas. Les premiers arguments que nous y rencontrons nous font prendre le risque d'inscrire en nous une impression durable et éventuellement fausse.

Cet effet de la première impression fautive a été mis en relief par de nombreuses expériences de psychologie. La plus connue, réalisée à la fin des années 1940, consistait à présenter à deux groupes d'individus la description, en une phrase, d'une même personne, avec les mêmes qualités et les mêmes défauts.   un groupe, les défauts étaient présentés en premier, et, à l'autre groupe, en dernier.

La première description était la suivante: «Steve est intelligent, travailleur, sanguin, critique, t tu et envieux.» La seconde description disait: «Steve est envieux, t tu, critique, sanguin, travailleur et intelligent.» Solomon Asch, le psychologue qui conduisit cette expérience, constata que lorsque les qualités de Steve étaient présentées avant ses défauts, on avait une meilleure opinion de lui.

Cet effet dit de primauté ou de préambule, nous le connaissons tous. C'est lui, par exemple, qui est à l'œuvre lorsque nous nous remémorons plus aisément notre premier baiser que notre trentième. Or les premières impressions qui découlent des premières informations que nous récoltons sur un sujet ne nous conduisent pas toujours à avoir un point de vue rationnel sur les choses, surtout lorsque le marché de l'information sur Internet, par exemple, attire facilement notre attention sur des histoires douteuses que nous pouvons croire vraies en première instance.

Ces informations seront mieux mémorisées parce qu'elles bénéficieront de l'effet de primauté et serviront en quelque sorte de socle à notre vision d'un sujet. L'ordre dans lequel nous allons rencontrer certains arguments sur une question sensible est donc essentiel. Ce socle n'a rien d'inamovible et nous pouvons évidemment revenir sur une première impression: il suffit pour cela de se souvenir que le privil ge d'être rencontrée la première ne devrait pas accorder à une idée plus d'impression de vraisemblance qu'elle n'en mérite. ■

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

Tous les papiers se recyclent,  
alors trions-les tous.

**C'est aussi  
simple à faire  
qu'à lire.**

La presse écrite s'engage pour le recyclage  
des papiers avec Ecofolio.



**L'ESSENTIEL**

- > Depuis une trentaine d'années, des cétologues suivent les mêmes groupes de dauphins en liberté, enregistrant nombre d'informations sur leur vie et les comportements de chaque individu.
- > Les données amassées en milieu naturel et en delphinarium commencent

à offrir un recul suffisant pour comprendre plus finement la vie sociale des dauphins, mais aussi leur personnalité et leurs émotions.

> De nouvelles techniques non intrusives permettent aussi d'acquérir des données plus précises encore, notamment de déterminer quel dauphin du groupe émet un son.

**L'AUTEURE**



**FABIENNE DELFOUR**  
chercheuse associée au laboratoire d'éthologie expérimentale et comparée de l'université Paris 13, responsable des programmes scientifiques au delphinarium du parc Astérix et associée au Wild Dolphin Project

# L'intelligence sociale des dauphins

Si les études en delphinarium ont révélé les étonnantes capacités cognitives des dauphins, celles en milieu naturel, menées auprès de groupes de dauphins suivis depuis plus de trente ans, commencent à dévoiler toute la complexité de leur société.



Dans la nature, les dauphins vivent en groupes où les individus s'associent selon leurs affinités, leur sexe et leur âge à différents moments de leur vie.

**I**l est bientôt 20 heures. Notre bateau est ancré dans les eaux turquoises des Bahamas. L'équipe du Wild Dolphin Project prépare doucement sa fin de journée lorsque la personne de quart annonce l'arrivée de dauphins tachetés (*Stenella frontalis*) que nous étudions. Un petit groupe s'approche du bateau. Il s'agit de deux femelles adultes avec quatre petits. Elles sont donc accompagnées de leur progéniture et de deux jeunes qu'elles gardent. Nous décidons de nous mettre à l'eau pour les filmer et documenter leurs comportements. Après quelques minutes, les deux mères, bien identifiées grâce à leurs marques et aux motifs de leurs taches, s'éloignent, nous laissant seuls avec les jeunes dauphins. Elles ne reviendront que quelques dizaines de minutes plus tard pour les récupérer calmement et sans doute rejoindre le groupe au loin.

Cet épisode a eu lieu il y a déjà plusieurs années, mais je m'en souviens encore très bien. J'avais trouvé très étrange que des animaux sauvages placent leurs jeunes sous la responsabilité d'humains. Ces femelles ont cependant très probablement pensé que leurs petits n'en courraient pas de gros risques. En effet, sous la houlette de Denise Herzing, les scientifiques du Wild Dolphin Project étudient ce groupe de dauphins tachetés depuis une trentaine d'années, si bien que chercheurs et animaux se connaissent et se reconnaissent.

## PLUS DE TRENTE ANS DE RENCONTRES RÉGULIÈRES

Depuis 1985, Denise Herzing et son équipe suivent non seulement ce groupe, mais aussi des grands dauphins (*Tursiops truncatus*, l'espèce la plus communément hébergée dans les delphinariums comme celui du parc Astérix), à raison de missions d'une centaine de jours chaque année. La somme des données récoltées sur la vie de ces groupes est considérable. Les chercheurs ont identifié plusieurs centaines d'individus à partir des marques corporelles telles que les cicatrices et l'agencement des taches colorées. Les dauphins vivant parfois plus de quarante ans, certains côtoient l'équipe depuis le début de l'étude.

Celle-ci connaît par ailleurs la généalogie des individus, grâce à des analyses d'ADN effectuées à partir de leurs fèces, mais aussi leur coefficient d'association (qui s'associe avec qui), leur taux de reproduction, la répartition des rôles au sein de la communauté. Les chercheurs esquissent même des profils de personnalité des dauphins à partir des vidéos de leurs comportements, distinguant par exemple des individus curieux et joueurs d'autres plus timides ou peureux. Enfin, grâce aux enregistrements acoustiques, ils corrélient comportement et productions vocales, ce qui

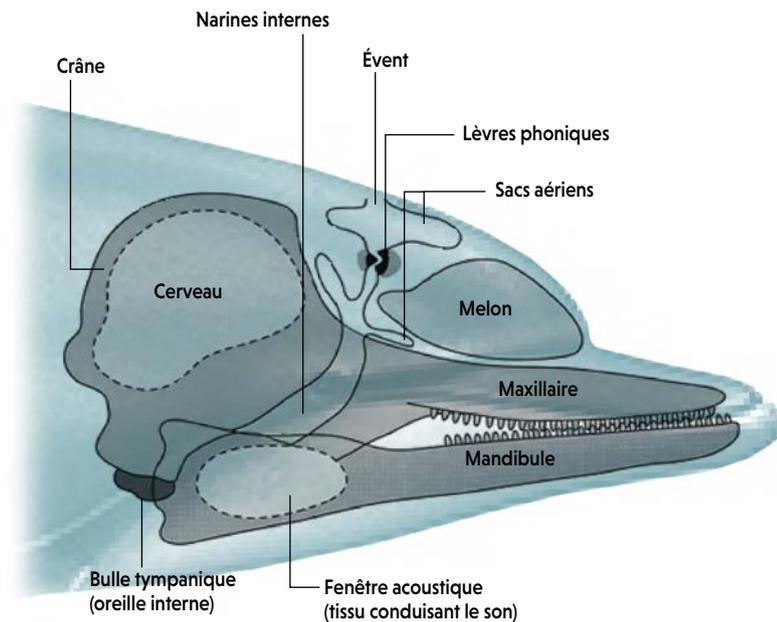
contribue à éclairer la communication sociale des dauphins.

Le Wild Dolphin Project n'est pas la seule équipe à étudier des dauphins sur le long terme. Deux autres projets suivent des populations de grands dauphins depuis plusieurs décennies aux États-Unis et en Australie, l'un dirigé par Bernd Würsig, de l'université A&M du Texas, l'autre par Richard Connor, de l'université du Massachusetts à Dartmouth. L'immense base de données que ces trois équipes ont amassée commence à offrir le recul suffisant pour réexaminer et préciser certaines connaissances sur la vie sociale des dauphins, notamment sur leur organisation sociale et leurs apprentissages.

Parallèlement, depuis les années 1960, de nombreuses études se sont aussi intéressées au comportement, à la biologie et à l'écologie de ces mammifères marins, tant en milieu naturel qu'en delphinarium. En particulier, des études sur les capacités cognitives de ces animaux se sont tenues dans des delphinariums, où il est plus facile de monter un protocole expérimental dans des conditions contrôlées: des problèmes ont été soumis aux dauphins, renseignant sur leur compétence langagière ou sur leur notion de quantité, par exemple. Les travaux en milieu naturel et en delphinarium sont complémentaires, car les premiers sont généralement à l'échelle du groupe alors que les seconds visent les individus. De plus, l'essor récent de nouvelles techniques permet d'acquies des données plus précises encore et de manière non intrusive, par exemple en suivant et en enregistrant à distance les déplacements d'individus ou leurs productions sonores en milieu sauvage. Il devient ainsi possible de conjuguer les mêmes hypothèses en milieu naturel et en delphinarium, c'est-à-dire d'adapter non seulement les questions au milieu, mais aussi le choix des outils et des populations. Grâce à ces deux faisceaux de recherches de

Les dauphins adoptent une posture en forme de S lors des conflits avec leurs congénères, ou quand ils courtisent une femelle, signe que la communication visuelle joue un rôle important dans leur société.





Les dauphins produisent des sons à l'aide de deux paires de lèvres phoniques situées le long du conduit nasal. Celui-ci s'ouvre sur plusieurs cavités, appelées sacs aériens, et débouche sur l'évent situé au sommet de leur tête. Ils reçoivent les sons par leur mâchoire inférieure.

plus en plus interconnectés, une nouvelle compréhension de l'intelligence sociale des dauphins se dessine.

L'ensemble des études menées depuis la fin des années 1970 sur les dauphins en liberté ont montré que les delphinidés – une trentaine d'espèces de cétacés à dents dont les grands dauphins et les dauphins tachetés (*voir l'encadré ci-contre*) – vivent pour la grande majorité dans des sociétés polygynandres, où des mâles s'associent et s'accouplent avec plusieurs femelles. On les qualifie de sociétés de type fusion-fission, où les associations entre individus dépendent du sexe, de l'âge, du statut reproducteur et de l'activité. De manière générale, dès leur préadolescence, les jeunes mâles trouvent un partenaire de jeu avec qui ils forment un duo pour la vie. Ces deux camarades traverseront les aléas de la vie côte à côte; il est rare qu'un troisième dauphin mâle rejoigne cette paire. Les femelles, quant à elles, sont beaucoup plus libres... ou opportunistes. Des femelles gestantes auront tendance à s'associer, de même que des femelles avec leur petit. Si l'une d'elles perd son jeune, elle réintègre alors le groupe des femelles sans petit. C'est une société fluide.

Les recherches en delphinarium ont quant à elles permis de découvrir les étonnantes capacités cognitives des dauphins, c'est-à-dire leurs facultés à acquérir, traiter et transmettre des informations de leur environnement physique et social.

Outre une ouïe très fine, capable de distinguer les faibles variations de fréquence ou de durée caractéristiques des sifflements d'un

dauphin, ces animaux ont une bonne vision tant dans l'eau que dans l'air, équivalente à celle des chats et des chiens; elle est adaptée à la faible luminosité et au spectre bleuté de l'océan, avec une meilleure acuité dans l'air pour les objets éloignés et dans l'eau pour les objets proches. Ils combinent d'ailleurs l'ouïe, l'écholocalisation (la détection d'obstacles par émission d'un son et écoute de son écho) et la vision pour reconnaître un objet dans l'eau.

Leur mémoire à court terme, tant auditive que visuelle, est comparable à la mémoire visuelle d'un singe. Ils sont par exemple capables de mémoriser un son et de le reconnaître ensuite, voire de mémoriser une suite de plusieurs sons et de déterminer si un nouveau signal fait partie de la liste ou non. Leur capacité d'apprentissage est elle aussi exceptionnelle, qu'il s'agisse de comprendre des séquences de consignes données dans un langage composé de signes gestuels ou sonores, de suivre les gestes de pointage des entraîneurs ou la direction du regard des humains, ou encore d'imiter les sons et les gestes d'autres dauphins ou d'humains. Enfin, les dauphins ont non seulement conscience des autres, mais aussi d'eux-mêmes, des parties de leur corps et du fait qu'ils sont les auteurs de leurs mouvements.

## LES DAUPHINS PASSENT L'ÉPONGE

Aujourd'hui, les chercheurs s'accordent à dire que ces animaux intelligents vivent dans une société complexe, comme en témoignent les comportements de coopération, d'apprentissage par observation, mais aussi, par exemple, l'existence de cultures locales comme l'utilisation d'outils. En 2011, en effet, une équipe de l'université de Georgetown, aux États-Unis, a observé sur les côtes australiennes des grands dauphins femelles placer une éponge sur leur rostre et débusquer des poissons cachés dans les anfractuosités rocheuses.

Toutefois, nous ne savons encore que très peu de choses sur l'intelligence sociale des dauphins. Les études en delphinarium offrent un regard limité sur les interactions des dauphins et, par ailleurs, le milieu naturel de vie de ces animaux impose de nombreuses contraintes aux cétologues, d'autant que l'appareillage sensoriel particulier des dauphins et leur mode de communication compliquent encore la tâche. Néanmoins, grâce au suivi de populations de ces animaux sur le long terme et à l'utilisation de nouvelles techniques pour repérer, par exemple, quel animal émet un son, on commence à obtenir des renseignements précis sur le comportement de chaque individu au sein d'une population et à mieux comprendre comment leur société fonctionne. Voici un petit tour d'horizon de ces travaux.

### MON COUSIN L'HIPPOTAME

**Les dauphins sont des odontocètes, des cétacés à dents comme les cachalots et les marsouins, contrairement aux mysticètes, les cétacés à fanons comme les baleines franches ou à bosse et le rorqual. L'ordre des odontocètes compte 69 espèces réparties en 9 familles distinctes. Parmi elles on trouve les delphinidés, qui regroupent plus d'une trentaine d'espèces dont les grands dauphins, les dauphins tachetés ou encore les orques. Les cétacés sont des mammifères qui ont évolué d'une façon assez spectaculaire. Leur ancêtre était un mammifère placentaire terrestre, dont les descendants se sont progressivement adaptés à la vie aquatique il y a plusieurs dizaines de millions d'années. Leurs plus proches parents actuels sont... les hippopotames !**

➤ Les cétacés sont les plus proches cousins actuels des hippopotames (*voir l'encadré page précédente*). Leur retour à la vie aquatique a requis de nombreuses adaptations anatomiques et physiologiques. Le système auditif montre sans doute le plus de transformations. Il faut savoir que les sons se propagent environ cinq fois plus vite dans l'eau que dans l'air et que les fréquences basses – entre 20 et 40 hertz (Hz), par exemple – parcourent des kilomètres, contrairement aux hautes fréquences (entre 2 et 15 kHz, par exemple). Les cétacés ont perdu le pavillon externe de l'oreille. Il ne demeure qu'un petit orifice en lien avec l'oreille interne. La particularité des cétacés est qu'ils reçoivent les sons par leur mâchoire inférieure.

La communication acoustique est très certainement celle que les dauphins utilisent le plus. Sa fonction serait de maintenir la cohésion du groupe, de coordonner leurs mouvements ou leurs activités sociales. À l'aide des lèvres phoniques de leur conduit nasal (*voir la figure page précédente*), les dauphins émettent trois types de sons: des clics d'écholocation, des sons pulsés en rafales et des sifflements. Ces derniers sont les plus étudiés, car il est facile de les distinguer et de les classer à partir des sonogrammes. Les cétologues les utilisent notamment pour identifier les espèces de delphinidés. Composés d'une fréquence fondamentale et de plusieurs harmoniques, les sifflements vont de 2 à quelque 20 kHz. Pour les grands dauphins, les fréquences des sifflements enregistrés varient entre 800 Hz et 28,5 kHz, et leurs durées entre 0,1 et 4 secondes.

## UNE IDENTITÉ SIFFLÉE

Individuellement, les dauphins produisent un sifflement qui leur est propre, nommé sifflement signature. Non seulement il intervient dans la cohésion du groupe, mais il présenterait des caractéristiques sonores uniques, propres au dauphin qui l'émet, constituant ainsi une sorte de carte d'identité. L'écholocation, utilisée majoritairement pour naviguer et rechercher de la nourriture, correspond à des clics de haute fréquence (chaque clic est un son de fréquence comprise entre 110 kHz et 130 kHz) dont la durée va de 40 à 70 microsecondes. Les dauphins sont capables de produire simultanément clics et sifflements. Les sons pulsés en rafale englobent quant à eux l'ensemble des autres productions sonores: couinements, grincements... Ces vocalises sont généralement associées à des situations de cour, des jeux sexuels, des comportements agressifs ou des manifestations d'anxiété.

Les petits delphinidés, à la fois prédateurs (ils chassent de nombreuses espèces de poissons) et proies (des requins et des orques),



Lors d'un test sur les biais cognitifs, les dauphins les plus optimistes touchent une cible et reviennent rapidement vers leur soigneur pour recevoir une récompense, contrairement aux dauphins plus pessimistes qui prennent plus de temps.

ont développé un sonar actif et passif. Le sonar actif se résume à l'écholocation: le dauphin émet un son et utilise l'écho reçu pour cibler précisément une proie ou obtenir des précisions sur un signal détecté. Le sonar passif correspond à une écoute sans émission de son: les dauphins espionnent ce qui se passe dans leur environnement en recevant les échos des clics produits par leurs congénères. La découverte de ce fait remonte à 2007 et, depuis, les bioacousticiens continuent d'enregistrer les productions acoustiques des animaux en milieu naturel et en delphinarium. En les corrélant aux situations observées, ils espèrent déterminer quel type de message est produit dans tel ou tel contexte, et ainsi décrypter la communication intraspécifique de ces animaux.

Toutefois, jusqu'à récemment, il était impossible de localiser quel dauphin vocalisait. En effet, ces animaux n'ont pas besoin d'ouvrir la bouche pour émettre des sons: ceux-ci transitent *via* la partie frontale de leur tête, le melon. Or la base de toute étude de communication animale est d'identifier l'émetteur du signal, le type de signal et le récepteur.

Il y a cinq ans, afin de relever le défi, notre équipe a construit un dispositif qui filme les mammifères marins à 360 degrés et qui, grâce à quatre hydrophones (des micros supportant l'immersion), enregistre les vocalises dans cet

espace tridimensionnel (voir l'encadré ci-dessous). Un logiciel permet *a posteriori* d'identifier sur les vidéos un dauphin qui émet des clics. Grâce à ce système, nous observons et analysons les postures ou le comportement du dauphin qui écholocalise, ainsi que les réactions de ses congénères. Contrairement aux caméras classiques utilisées jusque-là, qui exigent une focalisation sur un dauphin ou un petit groupe d'individus, le système en 360° saisit la totalité de la scène et donc l'ensemble du groupe: pour la première fois, on filme et enregistre tout ce qui se produit dans un environnement tridimensionnel.

## UN DAUPHIN SILENCIEUX EN ÉCLAIREUR

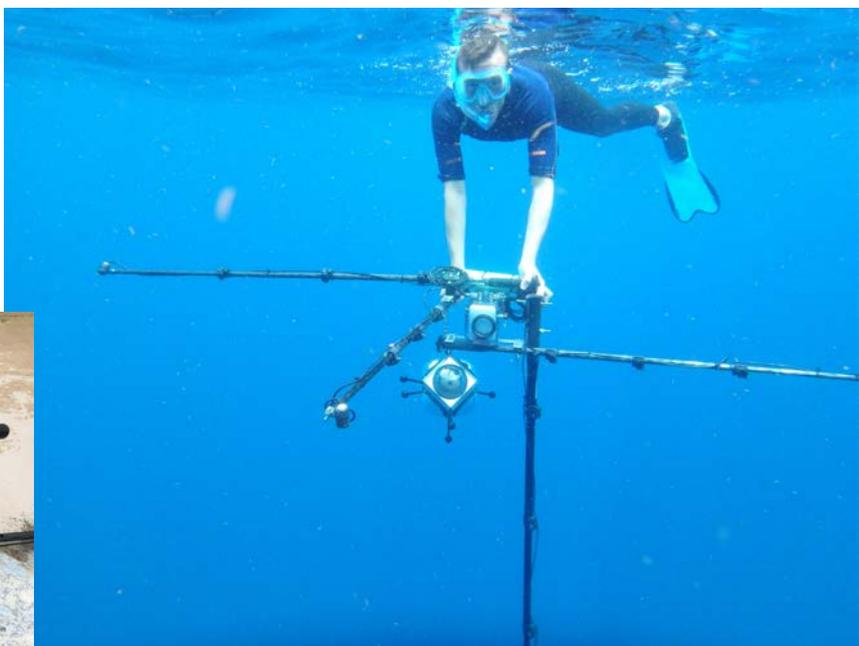
Nous avons ainsi récemment découvert un étonnant comportement: lorsqu'un groupe de dauphins s'approche de nageurs humains

statiques en surface, un premier dauphin arrive en éclaircur, totalement silencieux. C'est le dauphin suivant qui produit les clics d'écholocalisation. Tout se passe donc comme si le premier avançait *incognito*, recevant les échos des signaux du second. Une utilisation de l'écholocalisation passive que nous ne soupçonnions pas...

Notre système, nommé Babel pour «Bio-acoustique, bien-être et langage», est relativement facile à déployer depuis un bateau et correspond tout à fait à notre philosophie – être le moins intrusif possible. Ce sont les dauphins qui décident de se rapprocher ou non, ce sont aussi eux qui débudent et terminent une interaction. Certes, le dispositif ne permet pas encore de localiser les dauphins émetteurs de sifflements et de sons pulsés. En effet, ces signaux sont plus difficiles à détecter de manière automatique, car leurs formes et leurs fréquences sont >

### QUEL EST LE DAUPHIN QUI VOCALISE ?

**P**our repérer quel dauphin émet un son, Fabienne Delfour et ses collègues ont mis au point un système de caméra sous-marine à 360° avec prise de son : quatre hydrophones fixés sur des bras extensibles et reliés à un enregistreur enfermé dans un caisson étanche recueillent toutes les productions vocales des dauphins, tandis qu'une caméra, attachée à ce dispositif, filme les animaux dans un environnement en 360° (ci-dessous et ci-contre en bas). Un logiciel permet *a posteriori* de localiser et donc d'identifier un dauphin qui produit des clics d'écholocalisation sur les vidéos. La croix rouge indique le dauphin qui produit les clics visibles sur le sonogramme défilant en bas de l'image (ci-contre en haut).



> extrêmement variables, contrairement aux clics, dont la structure est plus fixe. Mais nous espérons y parvenir bientôt.

La communication tactile joue aussi un rôle très important chez les delphinidés. Les dauphins aiment se frotter doucement les uns aux autres lors d'interactions positives et agréables. Ces contacts, frottements et caresses sont observés en delphinarium et en milieu naturel. Encore récemment, en 2017, Kathleen Dudzinski, du Dolphin Communication Project, en Floride, et Christine Ribic, de l'université du Wisconsin, ont analysé finement les contacts nageoire pectorale contre nageoire pectorale chez des grands dauphins de l'Indo-Pacifique (*Tursiops aduncus*) autour de Mikura, au Japon, des dauphins tachetés aux Bahamas et des grands dauphins vivant à l'institut Roatán pour les sciences marines, au Honduras.

Leurs travaux montrent des similarités dans l'utilisation de ce comportement chez les trois espèces de delphinidés. Il semble qu'il soit modulé par des pressions sociales et que sa fonction soit proche de celle du comportement de toilettage observé chez les primates (affiliation, renforcement des liens sociaux, réconciliation, par exemple). Les femelles adultes développent ce comportement préférentiellement entre elles, alors que les mâles le font entre mâles adultes ou jeunes. Les deux chercheuses avancent l'hypothèse que les mâles utilisent ce comportement comme un outil servant à établir un lien social, à maintenir ou gérer des relations interindividuelles. Lors de conflits, il arrive qu'ils se frappent à l'aide de la nageoire caudale, voire qu'ils se mordent.

La communication visuelle est elle aussi très utilisée, en témoignant par exemple les sauts aériens, ou l'ouverture de la gueule et l'adoption d'une posture en forme de S lors d'un conflit – posture aussi utilisée pour courtoiser (voir la photo page 30). Les bulles émises par l'événement sont aussi de bons signaux visuels indiquant une excitation positive ou négative.

## UNE COMMUNICATION ÉGALEMENT CHIMIQUE

On a longtemps cru que les dauphins utilisaient uniquement l'ouïe, la vision et le toucher pour communiquer. Ce ne sont cependant pas les seuls sens sur lesquels ils s'appuient. On savait que ces animaux étaient capables de déceler les quatre saveurs primaires : le sucré, l'acide, le salé et l'amertume. Mais ces dernières années, on s'est aperçu que la chimie joue aussi un rôle important dans leur communication. Chez les delphinidés, le système olfactif semble obsolète : même si des structures olfactives sont présentes à des stades embryonnaires du développement, elles régressent par la suite ; cependant, des découvertes récentes posent de nouvelles questions.



# J'ai vu des mères coller au sol plusieurs secondes leur petit un peu trop remuant



En 2016 notamment, sous la houlette d'Aurélien Célerier, du Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive, à l'université de Montpellier, une équipe montpelliéraine et rennaise a mis en évidence que les dauphins étaient capables de détecter et de discriminer des signaux olfactifs et gustatifs.

Dans un delphinarium près de Nantes, les chercheurs ont placé, sur le bord du bassin des grands dauphins, un bidon troué contenant divers poissons et céphalopodes et un récipient identique, mais vide. Ils ont constaté que les dauphins passaient plus de temps près du premier bidon, signe qu'ils avaient perçu l'odeur qu'il dégageait. Pour étudier la gustation chez les dauphins, ils ont fabriqué des glaçons contenant du hareng (un aliment connu des dauphins), du saumon ou des crevettes (aliments inconnus) et un glaçon sans poisson. Ils ont ensuite observé le comportement des dauphins lorsque les soigneurs leur jetaient les glaçons. Les résultats de cette étude montrent que les dauphins préfèrent les glaçons contenant du hareng et du saumon, puis ceux avec des crevettes par rapport aux glaçons neutres.

Ainsi, même si à ce jour on ne sait pas comment ils perçoivent les signaux olfactifs et gustatifs, ces mammifères marins ne sont pas totalement dépourvus d'une telle perception. En milieu naturel, il est d'ailleurs fréquent d'observer un dauphin suivre bouche ouverte un congénère qui urine. L'urine, riche en éléments chimiques, et donc en hormones, renseignerait peut-être les mâles sur le statut reproducteur des femelles. Un mâle déterminerait ainsi si une femelle est dans la période réceptive de son cycle.

Les dauphins ont une identité sonore, mais ont-ils une personnalité, comme cela a été mis en évidence chez des chiens, certains primates et même des poules, des amphibiens et des poissons ? Pour le savoir, nous avons analysé, au début des années 2010, les comportements de ceux du delphinarium du parc Astérix, à Plailly, dans l'Oise. Nous avons construit des profils



© Fabienne Deifour

selon les cinq grands facteurs classiquement utilisés en psychologie pour déterminer les personnalités, rassemblés sous le sigle OCEAN: O pour ouverture à l'expérience, C pour conscience en termes de contrôle, minutie, discipline, E pour extraversion (énergie, enthousiasme), A pour agréabilité (amabilité, altruisme) et enfin N pour névrosisme (regroupant les émotions négatives).

## DES JEUNES EXTRAVERTIS

De manière générale, nous avons montré que les jeunes dauphins étaient de type O, E et A: joueurs, extravertis et pleins d'énergie, contrairement aux animaux plus âgés qui étaient plus C, c'est-à-dire attentifs à ce qui se passait autour d'eux et capables de discipliner les jeunes si besoin. Ensuite, dans le détail, chaque dauphin a bien sûr un profil qui lui est propre. En étudiant la dynamique sociale du groupe, nous avons aussi observé que les individus aux personnalités proches apprécient de passer du temps ensemble et s'associent de manière privilégiée.

Parallèlement, des études menées aux États-Unis par l'équipe de Stan Kuczaj, de l'université du Mississippi du Sud, ont aussi révélé l'existence de personnalités chez ces mammifères marins en delphinarium, notamment des profils de mère plus ou moins permissive ou directive et protectrice: certaines avaient tendance à laisser leur progéniture explorer librement l'environnement ou prendre des initiatives, tandis que d'autres, au contraire, distribuaient des punitions en cas de désobéissance. En milieu

## UN SIXIÈME SENS

**Certains dauphins seraient dotés d'un sixième sens. En 2012, Nicole Czech-Damal, de l'université de Hambourg, et ses collègues ont mis en évidence un sens électrique chez le dauphin de Guyane (*Sotalia guianensis*). Le long du rostre, de petites cavités (qui correspondent aux points d'implantation et de contrôle des vibrisses chez d'autres mammifères comme les chats) abritent des capteurs électriques qui permettent à ces dauphins de détecter les variations du champ électrique environnant, dues par exemple à la présence d'une proie – un avantage certain dans les eaux troubles de l'estuaire où ils vivent. Deux ans plus tard, en 2014, Juliana López-Marulanda, de l'université de Rennes 1, a démontré que les grands dauphins étaient capables de distinguer les objets en fonction de leurs propriétés magnétiques, ce qui pourrait leur servir à naviguer par magnétoréception.**

naturel, j'ai vu des mères coller au sol pendant plusieurs secondes leur petit un peu trop remuant ou encore des femelles se mettre sur le dos et prendre leur progéniture sur le ventre. Ainsi échoué et contrôlé par sa mère, le petit était incapable de s'échapper, malgré ses vigoureux coups de nageoire caudale.

En milieu naturel, seules les études menées sur le long terme offrent la possibilité de dresser des profils comportementaux ou de trouver des personnalités chez les individus suivis. L'équipe de Denise Herzing a entrepris ce travail sur le groupe de dauphins tachetés qu'elle suit depuis une trentaine d'années. Notamment, un étudiant de l'équipe, Nate Skrzypczak, essaye de déterminer si les affinités sociales des dauphins riment avec des personnalités. Dans ce groupe de dauphins sauvages, l'équipe étudie depuis longtemps les préférences entre partenaires.

Parmi les vidéos récoltées, Nate Skrzypczak a sélectionné la centaine de dauphins observés au moins quinze fois et, à partir de là, il a recherché trois traits de caractère: la sociabilité, la curiosité et l'audace, calculés par la proportion de temps passé avec respectivement leurs congénères, leur mère et les chercheurs. Ses premiers résultats ne montrent pas de différence significative entre les mâles et les femelles. En revanche, Nate Skrzypczak observe un lien entre les caractères curieux et audacieux: les individus qui, petits, quittaient souvent leur mère pour explorer les alentours ont tendance à passer plus de temps avec les chercheurs. Par ailleurs, sans surprise, les individus les plus audacieux expriment peu de néophobie: ils n'ont pas peur devant des situations nouvelles. L'étude est toujours en cours.

## DES DAUPHINS ÉMOTIFS

Les dauphins ont donc une vie sociale riche, un monde sensoriel non moins riche, des traits de personnalité différents, mais qu'en est-il de leurs émotions? Ce n'est que récemment que la science a décidé d'aborder l'étude des émotions chez les animaux. L'émotion, «un état mental ponctuel que l'humain ou l'animal ressent dans une situation donnée», dépend «de l'événement extérieur (soudaineté, nouveauté, possibilité pour l'animal d'anticiper ou de contrôler l'événement), mais aussi de l'individu, de sa génétique, de son expérience», selon la définition récemment proposée par Alain Boissy, éthologue de l'Inra spécialiste du bien-être des animaux d'élevage. Les émotions positives et négatives influent aussi sur la manière dont un individu perçoit une situation: en général, les individus optimistes voient le verre à moitié plein, alors que les pessimistes le voient plutôt à moitié vide. Ce phénomène, nommé biais cognitif car il modifie le jugement que l'individu porte sur la situation qu'il vit, est >



Les femelles s'occupent de leur petit jusqu'au sevrage, comme ici Beauty avec sa fille Bélize, âgée d'environ trois semaines, au delphinarium du parc Astérix.

> aussi observé chez certains animaux lors de tests conçus pour l'étudier. En 2016 et 2017, notre équipe a adapté un tel test aux dauphins du delphinarium du parc Astérix.

Dans un premier temps, les soigneurs animaliers ont appris aux dauphins à se diriger vers une cible placée alternativement à deux emplacements distants correspondant à deux récompenses différentes (*voir la photo page 32*). Lorsque les dauphins atteignaient la cible placée à l'endroit 1, les soigneurs les regardaient et applaudissaient; lorsqu'ils atteignaient la cible placée à l'endroit 2, ils recevaient un gros hareng: le jackpot! En général, les dauphins allaient plus vite à la cible lorsqu'elle occupait la position 2 plutôt que 1, ce qui est logique, le poisson étant très appétant pour ces animaux. Lors de la phase de test, la cible était disposée à un nouvel emplacement à mi-chemin entre les positions 1 et 2, une position qui était ambiguë pour les animaux. Nous avons enregistré

le temps mis par les dauphins pour atteindre la cible et pour revenir vers leur soigneur animalier. Un déplacement rapide vers la cible témoignait d'une tendance à être optimiste: les dauphins espéraient y recevoir du poisson. Un déplacement lent, au contraire, révélait une tendance au pessimisme.

Nous avons par ailleurs observé que les dauphins « optimistes » étaient aussi ceux qui passaient le plus de temps dans un comportement social consistant à nager de manière synchronisée entre congénères et que cette tendance perdurait. La nage synchronisée resserrerait le lien entre les dauphins et serait liée à des émotions positives (*voir la photo ci-dessous*). Chez les humains, des études ont montré qu'avoir des activités sociales rend plus positif. Cela semble aussi vrai pour les dauphins. En milieu naturel, leur sphère émotionnelle reste cependant encore mystérieuse, car difficilement accessible. Par exemple, le comportement de deuil,



Les dauphins optimistes sont ceux qui passent le plus de temps à nager de façon synchronisée, comme ici.

au cours duquel une femelle va nager en portant son petit mort a été observé en mer, et l'on conçoit aisément les émotions sous-jacentes. Toutefois, leur étude précise est une tout autre affaire.

De fait, les protocoles que l'on utilise en bassin doivent être modifiés et adaptés au milieu naturel. Nous nous en sommes encore aperçus il y a quelques années avec les expériences du miroir, utilisées en éthologie pour appréhender la conscience de soi chez les humains et les animaux. Si la forme la plus simple de conscience est la sensation pure sans représentation d'un objet ou de soi, la conscience de soi advient dans une réflexion où la conscience se rapporte à elle-même de façon intentionnelle: on prend conscience de ses états de conscience. Démontrer alors qu'un individu est capable de se reconnaître à partir de la représentation visuelle de son corps – son image dans un miroir – illustre l'existence, chez ce sujet, d'un savoir sur sa propre apparence. Cette reconnaissance a des implications majeures: elle signifie que le sujet s'identifie par rapport aux autres et s'en distingue.

## UN MIROIR DANS L'OcéAN

La procédure expérimentale consiste à placer un individu face à un miroir et à observer s'il traite son image dans le miroir comme le reflet de lui-même ou comme un congénère. Dans une seconde étape, les expérimentateurs placent une marque colorée sur l'individu à son insu et observent s'il frotte la marque en s'aidant du miroir pour guider ses mouvements ou s'il ne comprend pas. Chez l'humain, l'enfant reconnaît son image dans le miroir vers 18 mois. Entre 12 et 15 mois, il dirige des comportements vers lui-même (porter la main à son visage, se gratter...) et entre 18 et 24 mois, il réussit le test de la marque colorée apposée à son insu. Des éthologues et primatologues ont reproduit cette expérience du miroir sur plusieurs espèces animales. À ce jour, les études révèlent que les chimpanzés, les éléphants, les orques, les dauphins et les pies reconnaissent leur image spéculaire. En moyenne, les chimpanzés y parviennent à un âge compris entre 2 ans et 4 mois et 3 ans et 9 mois.

En 2018, Rachel Morrison et Diana Reiss, de l'université de la ville de New York, ont étudié le développement de cette capacité chez deux jeunes dauphins sur une période de trois ans dans un delphinarium new-yorkais. Elles ont montré que les dauphins ont très tôt émis des comportements autodirigés vers le miroir, tels qu'ouvrir la gueule face au miroir ou bouger verticalement la tête avec le corps en position inversée. L'un d'eux n'avait que sept mois quand il a commencé. C'est la première fois que cette faculté est mise en évidence à un

# Il n'avait que sept mois quand il a commencé à interagir avec son image dans un miroir

## LE CHAT ET LA SARGASSE

**Décoder le langage des dauphins est l'un des grands objectifs du Wild Dolphin Project. En 2013, Denise Herzing, Fabienne Delfour et leurs collègues ont franchi une première étape. À l'aide d'un ordinateur submersible, nommé Chat (Cetacean hearing and telemetry), muni de micros, ils ont reconnu en mer un sifflement qu'ils avaient créé (hors du répertoire naturel des dauphins) pour désigner une sargasse, une algue avec laquelle jouent les dauphins : un jour d'août 2013 où Denise Herzing avait plongé avec le Chat, celui-ci reconnut ce sifflement : un dauphin avait imité le signal. Rien n'indiquait, cependant, qu'il l'utilisait dans le contexte adéquat. Depuis, l'équipe prépare une version améliorée du dispositif visant aussi à classer et décoder les sons des dauphins.**

stade si précoce dans le développement d'un jeune animal. Les chercheuses concluent que la vie aquatique exigeante et riche de défis a probablement sélectionné la mise en place d'un développement proprioceptif et sensorimoteur rapidement efficace.

Cependant, quand, en 2013, nous avons voulu utiliser le miroir sur des individus sauvages, en l'occurrence des dauphins tachetés de l'Atlantique vivant aux Bahamas, les réactions ont été tout autres. À quatorze reprises, nous avons observé le comportement des dauphins autour d'un miroir immergé. Les réponses étaient très hétérogènes. Les premières réactions des groupes de mères avec leur petit ont été de nager autour du miroir et de maintenir une proximité physique. Certains individus ont ignoré le miroir, ou ont nagé autour ou en dessous. Un seul mâle est devenu stationnaire et a adopté une posture agressive en S face au miroir.

Ces premiers résultats suggèrent que les animaux donnent des significations différentes à un miroir dans la nature et en captivité. Cela n'implique pas que les dauphins tachetés ne se reconnaissent pas dans un miroir, mais qu'un seul et même objet n'a pas la même signification en fonction de la situation. Ces cétacés sont des experts en traitements de signaux acoustiques. L'utilisation d'un miroir n'est peut-être pas la manière la plus pertinente de tester la reconnaissance de soi chez cette espèce. C'est un des défis des scientifiques: construire un protocole en suivant une démarche scientifique rigoureuse qui permet de révéler le plus justement possible le monde des animaux.

## DES BALISES POUR ÉCOUTER LE CHANT DES BALEINEAUX

Les nouvelles technologies, parce qu'elles sont aujourd'hui miniaturisées et donc moins intrusives, sont autant d'outils à explorer. Des capteurs placés sur des animaux ont déjà donné >



Les dauphins chassent parfois en groupe, enserrant à plusieurs un banc de poissons. Au Brésil, des grands dauphins coopèrent même avec des pêcheurs, rabattant les poissons vers leurs filets.

> de très bons résultats, révélant les trajets suivis, les vitesses de déplacement, les temps de repos ou encore les profondeurs atteintes. Des balises acoustiques munies de ventouse et posées sur le dos des baleines à bosse offrent aussi la possibilité d'enregistrer les sons sociaux des couples mère-jeune. Entre 2013 et 2014, avec l'aide de l'association malgache Cétamada, l'équipe d'Olivier Adam, chercheur bioacousticien à l'institut des neurosciences de Paris-Saclay, a déployé 16 balises – 9 sur des baleineaux et 7 sur des mères. Elle a ainsi obtenu plus de 46 heures d'enregistrements comprenant des sons harmoniques (des cris de courte durée), des sons pulsés de basse fréquence et de courte durée et des sons de très basse fréquence (certaines inférieures à 60 Hz). Leur analyse est en cours.

## DES ÉCHANTILLONS DE SOUFFLE DE BALEINE

De nombreuses études utilisent aussi des drones pour observer les déplacements et les regroupements des animaux. Cette technique a récemment été déployée pour des mammifères marins : sous la direction d'Amy Apprill, des chercheurs de l'institut océanique de Woods Hole, dans le Massachusetts, et de l'agence américaine d'observation océanique et atmosphérique (la NOAA) ont étudié avec son aide la santé des baleines franches de l'Atlantique Nord en danger critique d'extinction. Ils ont utilisé un hexacoptère à six rotors contrôlé à distance pour prendre des

photographies aériennes détaillées des baleines et recueillir des échantillons de leur souffle. Au cours d'une mission de trois semaines, les chercheurs ont effectué 67 vols de drones, photographié environ 35 baleines différentes et recueilli 16 échantillons de souffle. En séquençant le matériel génétique contenu dans ces échantillons, ils seront en mesure de déterminer quels types de bactéries, de virus et de champignons constituent leur microbiote.

De notre côté, nous espérons améliorer les performances de notre dispositif Babel pour saisir la dense communication des dauphins et d'autres espèces de cétacés. Notre objectif n'est pas de pouvoir un jour dialoguer avec ces animaux, mais de comprendre ce qu'ils se disent, quelles informations ils partagent et comment ils les communiquent, comment sont encodés messages et émotions dans leurs comportements et dans leurs productions sonores. Pour cela, nous devons constituer une base consistante de données vidéos et acoustiques importantes, afin de distinguer dans quels contextes comportements et émissions sonores se produisent.

Nous espérons partir prochainement en mission dans les Caraïbes pour suivre avec notre dispositif plusieurs espèces de cétacés (des grands dauphins et des dauphins tachetés pantropicaux, notamment). Si tout fonctionne, nous devrions obtenir nos premiers résultats d'ici à trois ans. Avec peut-être enfin, à la clé, un accès à l'intimité sociale des dauphins... ■

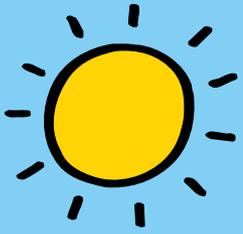
## BIBLIOGRAPHIE

R. Morrison et D. Reiss, **Precocious development of self-awareness in dolphins**, *Plos One*, vol. 13(1), article e0189813, 2018.

J. Lopez-Marulanda et al., **First results of an underwater 360° HD audio-video device for etho-acoustical studies on bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*)**, *Aquatic Mammals*, vol. 43(2), pp. 162-176, 2017.

I. L. Clegg et al., **Bottlenose dolphins engaging in more social affiliative behaviour judge ambiguous cues more optimistically**, *Behavioural Brain Research*, vol. 322, pp. 115-122, 2017.

S. Birgersson et al., **Dolphin Personality Study Based on Ethology and Social Network Theory**, Lambert Academic Publishing, 2014.

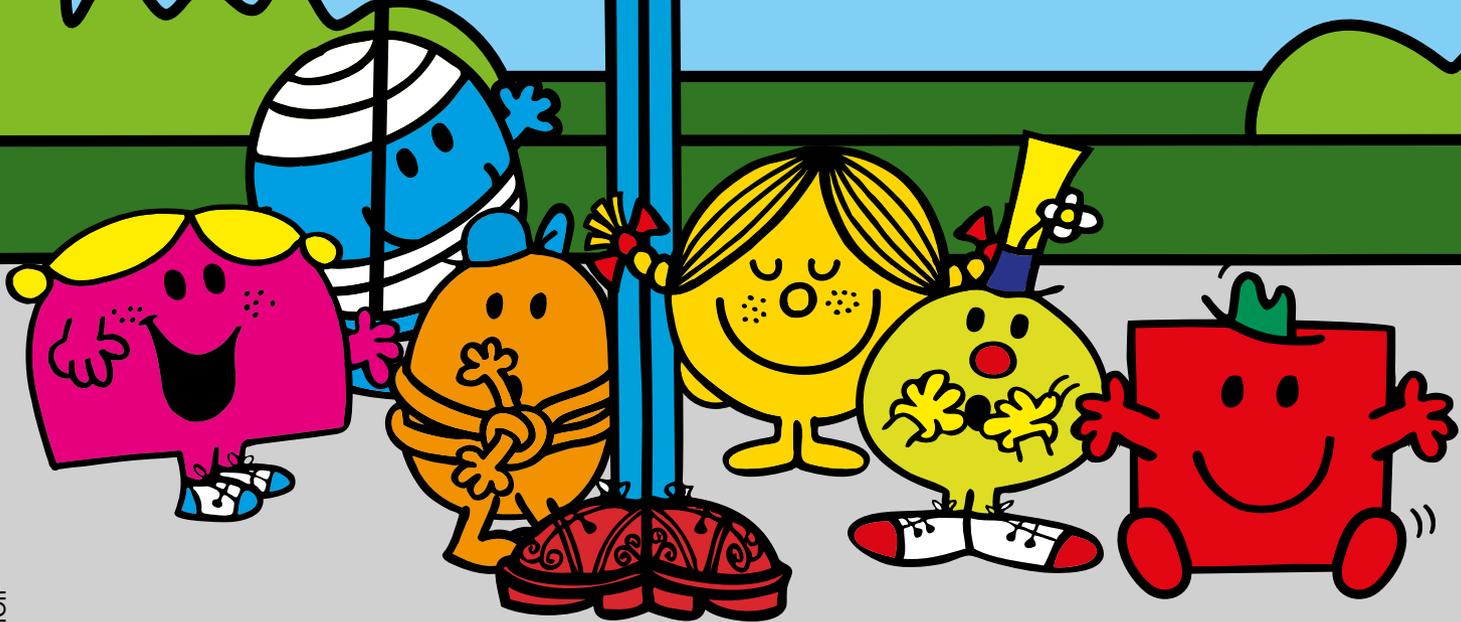
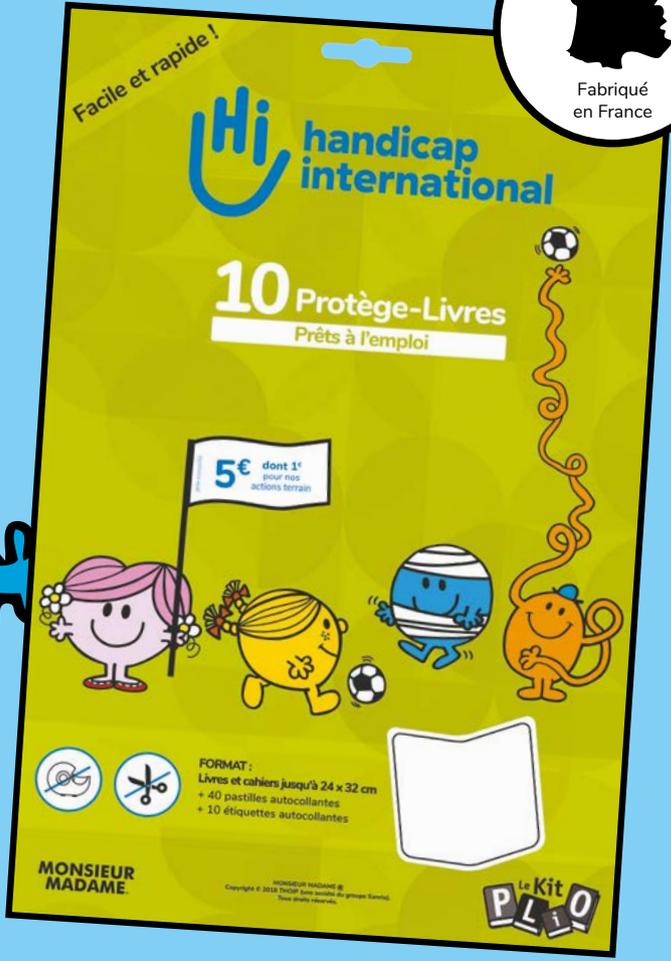


**PROTÈGE LIVRES  
ASTUCIEUX**

   
**SANS CISEAUX  
NI RUBAN  
ADHÉSIF**

**UN GESTE  
SOLIDAIRE  
ET GÉNÉREUX**

prix conseillé  
**5€** dont 1€  
pour nos  
actions terrain



# Les sursauts gamma expliquent-ils le paradoxe de Fermi?

En dépit de la multitude de mondes présents dans le cosmos, nous n'avons pas, à ce jour, détecté de civilisations extraterrestres. Pourquoi? C'est la question que se posait le physicien italien Enrico Fermi. La raison tient peut-être à certaines explosions stellaires puissantes, les sursauts gamma, qui anéantiraient toute vie complexe présente dans leur voisinage.

## L'ESSENTIEL

> Si la vie est un phénomène fréquent dans l'Univers, nous devrions détecter des indices de civilisations extraterrestres. Or ce n'est pas le cas : c'est le paradoxe dit de Fermi.

> Les sursauts gamma, explosions stellaires très puissantes, sont capables de détruire la vie complexe sur une planète trop proche.

> Les régions périphériques des galaxies géantes, moins peuplées en étoiles, sont moins exposées à ces dangers.

> L'influence des sursauts gamma sur les chances d'apparition d'une vie complexe impose des contraintes sur l'histoire du cosmos, mais aussi sur le scénario du multivers.

## L'AUTEUR



**RAÚL JIMÉNEZ**  
enseignant-chercheur  
à l'Institut de sciences  
du cosmos de l'université  
de Barcelone, en Espagne



En explosant, certaines étoiles massives émettent un puissant rayonnement, un sursaut gamma, qui détruirait la vie présente sur une planète proche.

**E**n 1950, le physicien italien Enrico Fermi s'est posé la question suivante. Si la Voie lactée contient plus de 100 milliards d'étoiles et que le Système solaire n'y constitue pas une exception, le nombre de planètes où la vie se serait développée devrait être gigantesque. Dans ce cas, une vie intelligente aurait dû se développer sur certaines d'entre elles et, tôt ou tard, se serait répandue dans toute la galaxie. Mais alors, pourquoi n'avons-nous détecté aucune civilisation extraterrestre? Pourquoi les extraterrestres ne nous ont-ils pas contactés? Où sont-ils tous?

Ce raisonnement est connu sous le nom de paradoxe de Fermi et, bien qu'il ait donné lieu à une foule d'hypothèses, nous ne disposons à l'heure actuelle d'aucune explication vraiment satisfaisante. Pourtant, depuis quelques années, l'étude d'un certain type de catastrophes cosmiques – les sursauts gamma – suggère que la vie complexe est peut-être beaucoup moins fréquente qu'on ne le pensait. Ces explosions d'étoiles comptent parmi les phénomènes les plus violents de l'Univers et leurs effets dévastateurs s'exercent à des milliers d'années-lumière de distance. Bien qu'on les observe depuis les années 1960, nous ne commençons qu'aujourd'hui à prendre la mesure de leurs effets «stérilisateurs». Ces événements, s'ils sont nombreux, pourraient en effet compromettre l'existence même de la vie complexe au sein des galaxies.

## LES SURSAUTS GAMMA, DESTRUCTEURS DE VIE

Les sursauts gamma expliqueraient le paradoxe de Fermi, mais leur influence sur l'Univers s'étend bien au-delà. Une analyse détaillée montre que la répartition et le nombre de ces événements dans les galaxies sont intimement liés aux lois les plus fondamentales de l'Univers. Avec des conditions initiales légèrement différentes, le cosmos aurait pu être dénué de galaxies (et donc n'hébergerait pas la vie) ou en aurait produit en grande quantité avec de nombreux sursauts gamma (et la vie complexe y aurait été impossible).

Ce constat suggère que les conditions de l'Univers dans lequel nous vivons se situent dans une étroite fenêtre, définies par des principes physiques encore inconnus, qui autorisent l'existence d'une vie complexe, du moins de la vie telle que nous la connaissons sur Terre. En considérant quelques arguments supplémentaires d'ordre statistique, cet «ajustement fin» soutient peut-être l'une des idées les plus controversées de la science actuelle: l'hypothèse du multivers.

Le raisonnement qui nous amène à relier la présence de la vie dans le cosmos aux sursauts

# Les effets dévastateurs des sursauts gamma se manifestent sur des milliers d'années-lumière

gamma et à l'existence de nombreux univers parallèles implique toutes les échelles de la physique: depuis les lois quantiques à la chimie en passant par les processus astrophysiques et l'organisation du cosmos dans son ensemble.

Un élément crucial dans cette discussion est la formation des galaxies. Pourquoi l'Univers s'est-il structuré ainsi, en d'innombrables galaxies, au lieu d'être simplement uniforme et homogène? La réponse, surprenante, est une des grandes découvertes de la cosmologie moderne: les grandes structures de l'Univers trouvent leur origine dans les fluctuations quantiques du vide. Cette conséquence du principe d'incertitude de Heisenberg, intimement liée à la nature quantique du monde, implique que, dans les divers points de l'espace, la densité d'énergie varie spontanément pendant d'infimes fractions de seconde.

En 1981, deux physiciens soviétiques, Gennady Chibisov (décédé en 2008) et Viatcheslav Mukhanov, aujourd'hui au centre Arnold-Sommerfeld de physique théorique, à Munich, ont proposé cette idée: de telles fluctuations quantiques dans l'Univers primordial ont été amplifiées durant la phase d'inflation cosmique, un gonflement exponentiel de l'espace. Ce phénomène, qui se serait déroulé au cours de la toute première fraction de seconde de l'histoire cosmique, aurait eu pour conséquence l'apparition d'irrégularités dans la distribution de la matière, avec des zones plus ou moins denses qui, plus tard, ont constitué les grands vides cosmiques et les énormes amas de galaxies que nous observons aujourd'hui.

Depuis une dizaine d'années, grâce aux observations détaillées du fond diffus cosmologique (le premier rayonnement émis dans l'Univers alors âgé de 380 000 ans), réalisées par les sondes WMAP de la Nasa et Planck, de l'ESA, les cosmologistes ont des arguments solides qui soutiennent la théorie de Gennady Chibisov et Viatcheslav Mukhanov. Celle-ci n'en reste pas moins étonnante. Les lois qui gouvernent l'Univers à l'échelle subatomique

seraient donc responsables des structures aux plus grandes échelles.

L'inflation joue un rôle essentiel dans ce qui précède, puisque c'est précisément la colossale expansion primordiale de l'espace qui a porté les fluctuations quantiques initialement microscopiques à des dimensions cosmiques. La théorie de l'inflation a été développée à la fin des années 1970 et au début des années 1980 par Alexei Starobinsky, de l'institut Landau de physique théorique de Moscou, Andrei Linde, aujourd'hui à l'université Stanford, Alan Guth, du MIT (l'institut de technologie du Massachusetts) et Viatcheslav Mukhanov (même s'il est vrai qu'on peut faire remonter les origines de l'inflation aux articles des physiciens Bill McCrea en 1951 et d'Erast Gliner en 1965).

L'inflation est compatible avec toutes les observations actuelles. Elle explique de façon satisfaisante l'origine des grandes structures cosmiques, mais aussi pourquoi, à très grande échelle, l'Univers est plat (sans courbure apparente). Elle rend aussi compte de plusieurs propriétés subtiles du fond diffus cosmologique. Ce rayonnement est désormais mesuré et cartographié avec une grande précision. Nous savons que si sa température est très uniforme à travers tout le ciel, elle présente d'infimes irrégularités, de l'ordre de quelques parties pour 100000. Ces variations reflètent les hétérogénéités primordiales de la

distribution de matière, toujours manifestes à l'époque où le rayonnement a été émis et qui seront les germes d'où allaient croître les galaxies. Jusqu'à présent, les observations confirment cette idée, de même que toutes les autres prédictions de la théorie de l'inflation.

## DES UNIVERS BAYÉSIENS

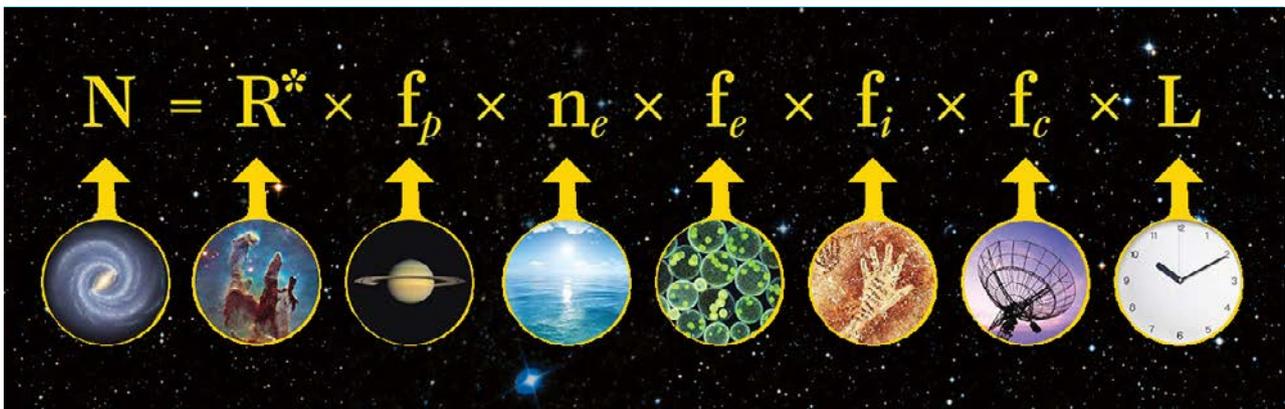
Mais malgré ses succès, la théorie de l'inflation a des implications controversées parmi les scientifiques. Au début des années 1980, Andrei Linde, et d'autres, ont suggéré que l'Univers tout entier était lui-même le produit de fluctuations quantiques! Et l'inflation ne produirait pas un seul univers, mais une infinité d'univers – ce qu'on appelle le multivers.

Tous les modèles inflationnaires postulent l'existence d'un champ quantique, l'inflaton, responsable de la croissance exponentielle de l'espace aux premiers instants du cosmos. La dynamique de l'inflaton peut être représentée comme celle d'une boule qui roule sur une colline. Lorsque la bille se trouve au sommet, elle a une grande énergie potentielle. Dans le cas de l'inflaton, c'est cette énergie qui déclenche l'expansion de l'espace à un rythme vertigineux. Une fois qu'elle a dévalé la pente, la balle a perdu son énergie potentielle. Traduit en termes cosmologiques, ce moment marque la fin de l'inflation. À partir de là, l'Univers continue à s'étendre, mais au rythme beaucoup plus lent prédit par la théorie originelle du Big Bang.

L'inflation a amplifié les fluctuations quantiques du vide, mais le champ quantique qu'est l'inflaton était aussi soumis au principe d'incertitude de Heisenberg. Les fluctuations de ce champ ont influé sur sa dynamique. Pour reprendre l'analogie de la bille sur sa colline, tout se passe comme si, au lieu de simplement rouler vers le bas tout du long, elle pouvait par moments s'arrêter, voire remonter brièvement de façon spontanée. Cela implique qu'en diverses régions de l'espace, la phase d'inflation aurait démarré et se serait arrêtée à des moments différents. Nous vivrions ainsi dans une « bulle » à l'intérieur de laquelle l'inflation s'est arrêtée à >

## L'ÉQUATION DE DRAKE

En 1961, le radioastronome américain Frank Drake a proposé une équation qui évalue le nombre  $N$  de civilisations extraterrestres intelligentes dans la Voie lactée. Cette formule est définie comme le produit de différents facteurs : le taux moyen  $R^*$  de formation d'étoiles dans la Voie lactée, la fraction  $f_p$  de ces étoiles ayant des planètes, le nombre moyen  $n_e$  de planètes potentiellement habitables par étoile, la fraction  $f_e$  de ces planètes où la vie se développe, la fraction  $f_i$  de ces formes de vie qui développent une intelligence et une civilisation, la fraction  $f_c$  de ces civilisations qui construisent des moyens de communication détectables depuis la Terre et la période  $L$  durant laquelle ces civilisations émettent un signal. Dans son estimation initiale, Frank Drake avait estimé à 10 le nombre de ces civilisations extraterrestres dans la Voie lactée. Mais la valeur attribuée à chaque paramètre présente parfois des incertitudes couvrant plusieurs ordres de grandeur, ce qui rend l'estimation très grossière.



## UN ÉVÉNEMENT ASTROPHYSIQUE VIOLENT

La solution au paradoxe de Fermi vient peut-être d'un type d'explosions stellaires : les sursauts gamma. Plusieurs travaux récents suggèrent que, à cause de leurs effets dévastateurs, la vie complexe est peut-être beaucoup moins fréquente dans l'Univers qu'on ne le pensait. Le danger que les sursauts gamma représentent dépend également de la position de la planète abritant la vie au sein de la galaxie.



Sursaut gamma

### DES EXPLOSIONS MORTELLES

Les sursauts gamma comptent parmi les phénomènes les plus violents de l'Univers : en quelques secondes, ils peuvent libérer autant d'énergie que le Soleil durant toute son existence. Ils se produisent essentiellement lors de l'explosion en supernova d'étoiles très massives. Leurs effets sont destructeurs sur des distances de plusieurs milliers d'années-lumière.

### MENACE SUR LA VIE COMPLEXE

Si le rayonnement d'un sursaut gamma proche atteignait une planète comparable à la Terre, la couche d'ozone serait détruite en quelques jours. Les organismes seraient alors soumis au rayonnement ultraviolet de leur étoile, ce qui affecterait les formes de vie dépendant de la photosynthèse.

Sans sursaut gamma

Avec sursaut gamma



Couche d'ozone



Galaxie géante

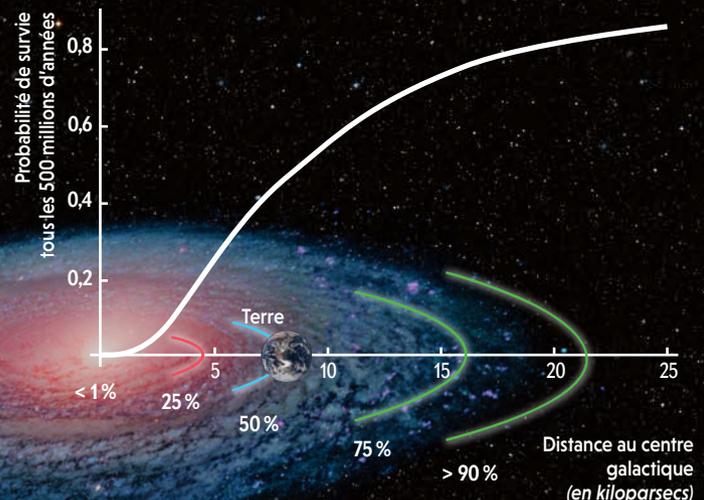
Galaxie naine

### LA RÉPARTITION DES SURSAUTS GAMMA

Les sursauts gamma se produisent plus fréquemment dans les galaxies de petite taille (les galaxies naines, *ci-contre*) où la production d'éléments lourds est faible. Dans les grandes galaxies comme la Voie lactée, on les trouve surtout vers le centre (*en rouge, à gauche*). Les régions plus périphériques (*en bleu*) sont relativement à l'abri, mais on y trouve également moins de planètes.

### PROBABILITÉ DE SURVIE

Au sein d'une galaxie comparable à la Voie lactée, la probabilité de survie de la vie complexe sur une planète dépend de sa distance au centre galactique. Pour un monde comme la Terre situé à bonne distance, la probabilité qu'un sursaut gamma détruise la couche d'ozone est d'environ 50 % tous les 500 millions d'années. La survenue d'un sursaut gamma est l'une des explications possibles de l'extinction massive de l'Ordovicien, qui s'est produite il y a 450 millions d'années.

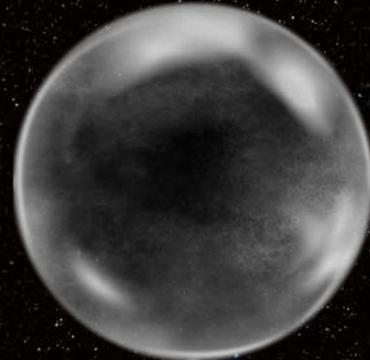


# UN UNIVERS TRÈS IMPROBABLE

Les simulations numériques montrent que la formation de grandes galaxies disposant de zones habitables à l'abri des sursauts gamma dépend fortement d'un paramètre fondamental : la constante cosmologique, souvent notée  $\Lambda$ . Depuis 1998, on sait que ce paramètre est très petit, mais non nul, et que son effet équivaut à une sorte de « gravité répulsive » qui tend à contraindre l'agrégation de la matière en galaxies. La constante cosmologique n'admet ainsi qu'une petite fenêtre de valeurs compatibles avec l'existence de la vie complexe.

## CONSTANTE COSMOLOGIQUE TROP ÉLEVÉE

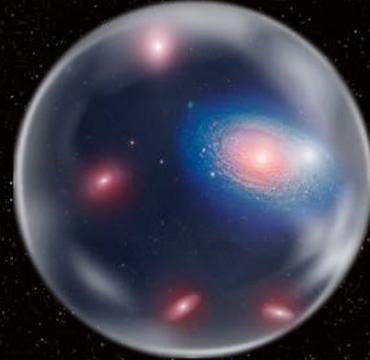
Dans les années 1980, Steven Weinberg, de l'université du Texas à Austin, a remarqué que si la constante cosmologique était trop élevée, ses effets répulsifs sur la matière auraient empêché la formation des galaxies. Un tel univers serait dépourvu de planètes et par conséquent de vie.



Univers sans galaxies

## CONSTANTE COSMOLOGIQUE COMPATIBLE AVEC LA VIE

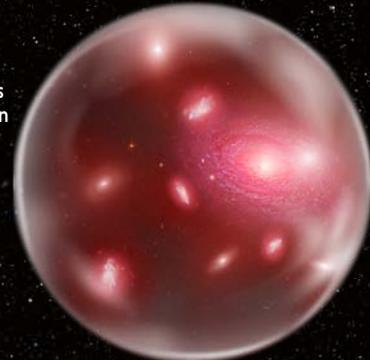
La valeur observée de la constante cosmologique autorise la formation de galaxies comparables à la Voie lactée : de grandes structures entourées d'un faible nombre de galaxies naines satellites et comportant des régions sûres où les sursauts gamma sont rares.



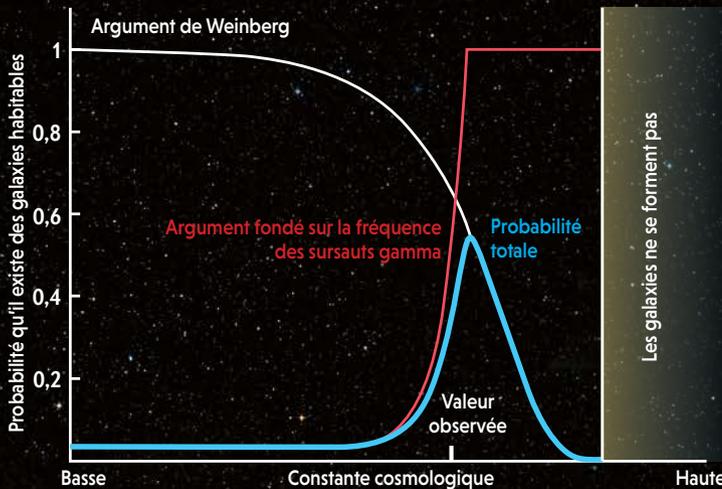
Univers dont les galaxies sont isolées

## CONSTANTE COSMOLOGIQUE TRÈS FAIBLE

Dans un univers où la constante cosmologique serait encore plus faible, les galaxies et les planètes seraient encore plus nombreuses. Toutefois, les grandes galaxies comme la Voie lactée seraient entourées d'un essaim de galaxies naines. Les sursauts gamma, fréquents dans ces dernières, stériliseraient les régions périphériques de la grande galaxie, ne laissant aucune région propice au développement de la vie complexe.



Univers contenant trop de galaxies



## UN PETIT NOMBRE D'UNIVERS HABITABLES

Les arguments précédents permettent de calculer la probabilité (en bleu) qu'un univers abrite une vie intelligente en fonction de la valeur de la constante cosmologique. Seules des valeurs comprises dans un étroit intervalle semblent compatibles avec l'existence d'une vie complexe.

> un certain instant, mais autour de laquelle l'espace a continué de gonfler de façon démesurée et à engendrer d'autres bulles. Dès lors, la théorie de l'inflation implique l'existence d'un nombre infini d'« univers-bulles ».

Ces univers-bulles ne sont pas causalement reliés entre eux, de sorte qu'aucune information ne parviendra jamais à notre Univers en provenance d'un autre. Et c'est là que commence la controverse. Il est impossible d'observer ces autres univers ou de réaliser des expériences démontrant leur existence. Ils pourraient tout aussi bien ne pas exister du tout. Certains, tel Paul Steinhardt, de l'université de Princeton, pensent que l'idée de multivers ne relève plus de la méthode scientifique, mais à la rigueur de la philosophie. Pour autant, certaines considérations statistiques ou probabilistes fondées sur des observations de notre Univers pourraient mettre en lumière des indices de l'existence du multivers.

Mon collègue Fergus Simpson, de l'Institut des sciences du cosmos de l'université de Barcelone, l'explique par l'exemple suivant. Imaginez une table à l'extrême bord de laquelle repose un grain de café. Quelle est l'explication la plus probable de sa présence à cet endroit ? Que quelqu'un en ait décidé ainsi et l'y ait placé avec beaucoup de soin ? Il semble plus économe et naturel d'imaginer qu'une grande quantité de grains ont été renversés et que les autres se trouvent par terre.

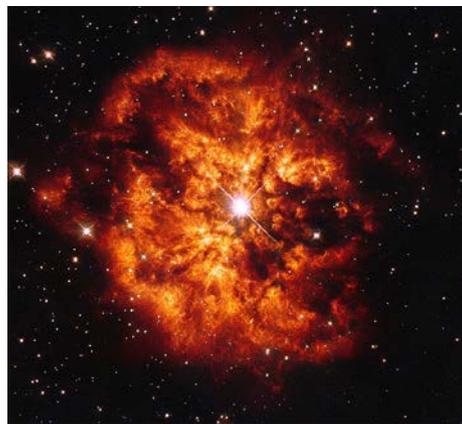
Ce type d'argument statistique s'appelle l'inférence bayésienne. Elle s'oppose à la démarche fondée sur l'étude des fréquences d'occurrence, qui consiste à définir les probabilités à partir du nombre de fois où une caractéristique donnée est observée dans un échantillon très grand. Avec l'inférence bayésienne, les chercheurs sont en mesure de tirer des conclusions à partir d'un nombre restreint de données, voire d'une seule. Dans la suite, nous verrons que par certains côtés, l'Univers observable se trouve dans une situation très similaire à notre grain de café.

## COMBIEN DE TANKS ?

Un exemple historique illustre de façon fascinante les avantages de cette méthode de raisonnement. C'est le célèbre problème des tanks allemands. Vers la fin de la Seconde Guerre mondiale, les Alliés avaient besoin de savoir à quel rythme les nazis étaient en mesure de produire leurs tanks Panzer. D'après les services de renseignement, le chiffre devait tourner autour de 1 400 par mois : une quantité très élevée qui avait des implications inquiétantes pour les Alliés. Les mathématiciens décidèrent quant à eux d'estimer la production à partir des numéros de série des tanks détruits ou capturés. Ces numéros étaient tous peu élevés et leur distribution conduisit les mathématiciens à conclure que les

## L'ORIGINE DES SURSAUTS GAMMA

**C**es signaux correspondent à des bouffées de photons gamma relativement brefs, ayant une durée maximale de quelques minutes. Leur détection isotrope sur la voûte céleste suggère une origine extragalactique.



Les astrophysiciens distinguent deux types de sursauts gamma en fonction de la durée du signal. Les événements de moins de 2 secondes sont nommés sursauts courts. Ils sont produits lors de la fusion de deux étoiles à neutrons ou de la coalescence d'une étoile à neutrons avec un trou noir. Les sursauts gamma longs, de plus de 2 secondes, représentent environ 70 % de sursauts gamma. Ils seraient le résultat de l'explosion d'étoiles supermassives telles que les étoiles de Wolf-Rayet (ci-contre WR124 cachée au cœur d'une nébuleuse de gaz) en supernovæ très puissantes nommées hypernovæ ou collapsars, où le cœur de l'étoile s'effondre d'abord sur lui-même en un trou noir sans expulser les couches externes de l'étoile. Une partie de la matière restante de l'étoile forme alors deux jets relativistes partant depuis les pôles du trou noir. En percutant les couches externes de l'étoile, les jets créent une onde de choc qui se propage vers la surface de l'étoile à une vitesse proche de celle de la lumière. L'onde émerge sous la forme d'un intense rayonnement, le sursaut gamma.

Allemands produisaient plus probablement dans les 200 tanks par mois. La guerre terminée, les archives révélèrent qu'en effet, la production avoisinait les 270 tanks mensuels.

Dans le même ordre d'idées, vous pouvez vous-même jouer aux inférences bayésiennes en prenant l'autobus. Imaginez que vous soyez dans une ville inconnue et que le bus dans lequel vous montez porte le numéro de ligne 27. Combien y a-t-il de lignes dans cette ville ? Il paraît peu probable qu'il y en ait des milliers : un bus pris au hasard aurait alors plus de chances d'avoir un numéro à trois ou quatre chiffres. Si votre autobus appartient à la ligne 27, il paraît raisonnable d'en déduire l'existence d'une centaine de lignes, peut-être 200, mais pas beaucoup plus.

Il est important de souligner que ces raisonnements ne nous contraignent pas à échantillonner toute la population de tanks ou de bus. En fait, il suffit d'une seule information pour estimer certaines propriétés de la population entière. Nous procédons de la même façon pour déterminer certaines propriétés du multivers. Il est exact que, par définition, nous n'avons pas accès aux autres univers et que nous ne

pouvons pas y faire d'expériences. Mais, fort heureusement, nous disposons du nôtre, dont nous pouvons mesurer les propriétés (son «numéro de série» en quelque sorte). L'une de ces propriétés est intimement liée aux sursauts gamma et à leurs effets dévastateurs sur la vie.

Par une froide journée de février 2014, à Berne, mon collègue Tsvi Piran, de l'université hébraïque de Jérusalem, et moi prenions un verre au café *Einstein*. Nous nous sommes demandé si les sursauts gamma étaient assez fréquents pour porter atteinte à la vie sur Terre. Peu de temps auparavant, nous avions achevé un travail démontrant que ces catastrophes cosmiques se produisent de préférence au sein de galaxies beaucoup plus petites que la Voie lactée et dont la métallicité est beaucoup plus basse (pour les astrophysiciens, les «métaux» sont tous les éléments du tableau périodique plus lourds que l'hydrogène et l'hélium). Dès lors, le fait de vivre dans une galaxie géante contenant beaucoup d'éléments «lourds» nous avait-il mis à l'abri des radiations fatales émises par les sursauts gamma?

## MORTELLES EXPLOSIONS

Mais de quoi s'agit-il exactement? Les sursauts gamma ont été découverts à l'époque de la Guerre froide. Dans les années 1960, pour espionner les essais nucléaires soviétiques, les États-Unis lancèrent un satellite capable de détecter les rayons gamma que de telles pratiques ne manqueraient pas d'engendrer. Rapidement, les scientifiques notèrent un grand nombre de flashes gamma provenant de différentes parties du ciel, et non du sol. Ils conclurent rapidement que ces explosions n'étaient pas d'origine soviétique, mais astronomique. Quant à ce qui les produisait, le mystère est resté entier pendant des décennies. On sait aujourd'hui que les sursauts gamma sont d'origine extragalactique. On pense qu'ils résultent de l'explosion en supernova de certaines étoiles très massives (d'au moins 20 à 30 masses solaires) ou de collisions entre étoiles à neutrons (voir l'encadré page ci-contre). Ce qui est indiscutable, c'est qu'ils comptent parmi les phénomènes les plus violents de l'Univers: en quelques secondes, un seul sursaut gamma libère autant d'énergie que le Soleil durant toute sa vie.

Ces sursauts prennent la forme de jets directionnels (voir la figure page 40) et le danger viendrait lorsqu'une planète se trouve dans l'axe de ces jets. Si la Terre était frappée par un tel jet émis lors d'une explosion, à quelques milliers d'années-lumière au sein de la Voie lactée, la première conséquence en serait la destruction de la couche d'ozone ( $O_3$ ). En effet, les rayons gamma ioniseraient les molécules de diazote ( $N_2$ ), lesquelles se combineraient aux atomes d'oxygène de l'ozone pour donner des oxydes nitriques et nitreux. Le phénomène ne prendrait que quelques jours. Sans

la protection de la couche d'ozone, la surface de la Terre serait exposée au rayonnement ultraviolet du Soleil, si nocif pour les protéines en général et pour l'ADN en particulier. Toute forme de vie reposant sur la photosynthèse se verrait atteinte, du plancton aux plantes terrestres, ce qui ferait s'effondrer la chaîne alimentaire à l'échelle mondiale et provoquerait une extinction massive des espèces vivantes.

Reste à déterminer la probabilité qu'une telle catastrophe se produise. Tsvi Piran, David Wanderman, de l'université hébraïque de Jérusalem, et moi avons calculé la fréquence des sursauts gamma dans l'Univers. Nous avons alors estimé la probabilité que l'un d'eux se produise près de la Terre. Ce calcul exige de recourir aux inférences bayésiennes, puisque nous ne pouvons pas répéter l'expérience: nous ne faisons qu'observer le cosmos.

À notre grande surprise, le résultat suggérait que sur 500 millions d'années, la probabilité qu'un sursaut gamma détruise entièrement la couche d'ozone de la Terre est d'environ 50%. Cet ordre de grandeur est très intéressant, car il signifie que les sursauts gamma pourraient expliquer certaines extinctions massives passées. Notez qu'à partir d'ici, nous considérerons en priorité les organismes pluricellulaires complexes. Bien que la vie microbienne existe sur Terre depuis environ 4 milliards d'années, la vie complexe, elle, n'est présente que depuis environ 1 milliard d'années. Selon notre calcul, au

# En quelques secondes, un sursaut gamma libère autant d'énergie que le Soleil durant toute sa vie

cours de cette période, il est très probable qu'un sursaut gamma se soit produit assez près de la planète pour affecter sa biosphère, mais guère plus d'un. D'ailleurs, certains chercheurs ont suggéré que l'extinction de l'Ordovicien, la première des cinq grandes extinctions de l'histoire de la Terre, soit due à un sursaut gamma survenu il y a 450 millions d'années. Si ce scénario est assez exotique et si d'autres explications sont possibles, nos résultats ne le contredisent pas.

Un autre détail est ici important. La Terre se trouve dans une région particulière, pour >

► ainsi dire privilégiée, au sein de la Voie lactée. La partie centrale de la galaxie est très densément peuplée d'étoiles, ce qui implique que les explosions stellaires potentiellement dangereuses pour la vie s'y produisent plus souvent. Mais le Soleil, par chance, se trouve assez loin du centre galactique, dans une région où la densité stellaire est beaucoup plus faible. Il y a donc moins de sursauts gamma catastrophiques.

On en revient ainsi au paradoxe de Fermi. Bien que la Voie lactée contienne plus de 100 milliards d'étoiles, ces astres se trouvent pour une bonne part dans les régions centrales, précisément là où la probabilité de survie d'organismes complexes – et *a fortiori* intelligents – est très réduite. À cause de l'effet dévastateur des sursauts gamma, seules les régions extérieures de la galaxie, beaucoup moins peuplées d'étoiles, sont potentiellement habitées.

En rapportant nos résultats à l'Univers dans son ensemble, nous sommes parvenus à la conclusion que seules 10% des galaxies (les plus massives et celles dont la métallicité est la plus élevée) étaient en mesure d'abriter une vie complexe. De surcroît, comme ces grandes galaxies mettent longtemps à se former, il se pourrait que la vie complexe telle que nous la connaissons ne soit apparue dans le cosmos qu'il y a au mieux 5 milliards d'années (soit durant le dernier tiers de l'histoire de l'Univers).

## UN MULTIVERS HOSTILE

Ma collègue Licia Verde, à l'université de Barcelone, nous a alors suggéré que ce résultat avait un lien avec l'énergie sombre. Depuis 1998, année de la découverte selon laquelle l'Univers est en expansion accélérée, nous savons que le cosmos contient une composante dont l'effet équivaut à celui d'une «gravité répulsive». Sa nature est inconnue, mais la possibilité la plus simple est celle d'une «constante cosmologique» non nulle (dans les équations d'Einstein décrivant le lien entre matière et géométrie de l'espace-temps). Son action tend à disperser la matière et à accélérer la vitesse à laquelle les galaxies s'éloignent les unes des autres. Pourquoi la constante cosmologique a précisément la valeur que nous observons est l'un des grands enjeux de la cosmologie moderne.

Le lien entre la valeur de la constante cosmologique et la formation des galaxies est facile à comprendre. Puisque cette constante agit comme une gravité répulsive, plus elle est élevée, plus elle aurait empêché la formation des grandes structures de l'Univers, les galaxies et les amas de galaxies. L'inverse est bien sûr vrai: des valeurs plus faibles, voire négatives de la constante cosmologique auraient pour effet d'engendrer bien plus de galaxies que l'on en observe en réalité.

Dès les années 1980, avant que ce paramètre ne soit mesuré expérimentalement,



Steven Weinberg, de l'université du Texas à Austin, s'est servi d'un argument désormais célèbre pour estimer sa valeur. Il a démontré que si la constante cosmologique avait une valeur positive et élevée, ses effets répulsifs auraient complètement empêché la formation des galaxies. Dans ce cas, l'Univers ne contiendrait pas non plus de planètes ni, bien sûr, de vie. Steven Weinberg en a déduit que la constante cosmologique ne pouvait pas dépasser une certaine limite. Depuis, grâce à diverses observations astrophysiques et cosmologiques, les chercheurs ont mesuré la valeur de la constante cosmologique, qui se révèle très proche de la limite établie par Steven Weinberg.

L'approche de Steven Weinberg ne permet cependant pas de déterminer une limite inférieure pour la constante cosmologique. On peut juste dire que si elle était inférieure à ce que nous observons – voire négative –, la formation de galaxies aurait été encore plus favorisée. L'Univers contiendrait davantage de galaxies et donc, en principe, de planètes habitables.

C'est ici qu'interviennent les sursauts gamma. Un univers qui contiendrait plus de grandes structures serait aussi peuplé d'un

L'observatoire spatial *Fermi*, de la Nasa, est spécialisé dans l'étude des rayons gamma. Il a été mis en orbite le 11 juin 2008. Il est équipé de deux télescopes, le LAT et le GBM. Le second est dédié à la détection des sursauts gamma. Le 17 août 2017, *Fermi* a contribué à une observation historique: il a détecté le sursaut gamma accompagnant la fusion de deux étoiles à neutrons dont l'émission en ondes gravitationnelles a été enregistrée par les interféromètres géants *Ligo* et *Virgo*. C'était la première détection d'une émission électromagnétique coïncidant avec une détection d'ondes gravitationnelles.

nombre plus important de petites galaxies dans lesquelles, comme on l'a dit, les sursauts gamma sont plus fréquents. Pire, les galaxies naines tendent à s'accumuler au voisinage des plus grandes. Or nous avons vu que pour être à l'abri des sursauts gamma, la vie intelligente doit se développer sur une planète située dans les régions externes d'une galaxie massive. Mais si cette galaxie est entourée d'un essaim de galaxies naines, les explosions stellaires qui s'y produisent affecteront les régions périphériques de la plus grande. Et dans ce cas, on ne serait plus à l'abri nulle part: les régions centrales de la grande galaxie seraient inhabitables à cause de leur population stellaire trop dense, tandis que l'extérieur le serait aussi, cette fois à cause de la proximité des galaxies satellites naines, sources de nombreux sursauts gamma.

De fait, la Voie lactée semble très spéciale de ce point de vue, puisqu'on s'attendrait à ce qu'elle soit, comme d'autres de sa taille, entourée d'un grand nombre de galaxies naines. Les deux Nuages de Magellan comptent parmi les galaxies naines les plus proches, mais ils sont tout de même trop lointains pour que les sursauts gamma qui s'y produisent présentent un quelconque danger. Cela soulève de nouvelles questions. Pourquoi n'y a-t-il pas plus de galaxies naines autour de la Voie lactée? Vivons-nous dans un endroit particulier? Et tout cela a-t-il quelque chose à voir avec la valeur précise de la constante cosmologique?

## UN UNIVERS AUX CONDITIONS RARES

Avec mes collègues, dont Antonio Cuesta, lui aussi à l'université de Barcelone, nous avons essayé d'évaluer l'effet de la constante cosmologique. Pour ce faire, nous avons simulé le processus de formation des galaxies dans différents modèles d'univers caractérisés par des valeurs distinctes de la constante cosmologique. Nous avons ensuite vérifié dans chaque cas la probabilité de trouver des galaxies comparables à la nôtre: des galaxies massives, mais dont les environs ne sont pas encombrés d'un nombre trop important de galaxies naines dangereuses.

Le résultat, c'est qu'effectivement, les valeurs trop faibles de la constante cosmologique sont défavorisées si l'on souhaite maximiser les chances qu'une vie intelligente apparaisse dans l'Univers, tout simplement parce que dans ce cas, il est très difficile de trouver des configurations comparables à celle de notre voisinage galactique. Jusque-là, aucun calcul n'était parvenu à trouver une limite inférieure à la valeur de la constante cosmologique. Or l'encadrement donné par la limite supérieure proposée par Steven Weinberg et notre limite inférieure est très serré. Il en résulte que l'existence de la vie complexe n'est compatible

# La vie est compatible avec une fenêtre étroite de valeurs de la constante cosmologique

qu'avec une marge étroite de valeurs possibles de la constante cosmologique.

La conclusion à laquelle nous parvenons est que les sursauts gamma jouent un rôle fondamental dans la régulation de la vie complexe dans l'Univers (telle que nous la connaissons). Une densité trop grande d'étoiles massives, celles qui produisent les sursauts gamma, empêche l'évolution de la vie complexe aussi bien dans les galaxies naines qu'au centre des galaxies géantes. D'un autre côté, dans les régions les plus externes d'une grande galaxie comparable à la nôtre, il n'y a pas de sursauts gamma, mais pas de planètes non plus. Un environnement galactique comparable à celui du Système solaire constituerait le seul compromis possible: il contient suffisamment d'étoiles pour synthétiser les éléments lourds nécessaires à la formation des planètes, mais pas trop.

Cela expliquerait que les civilisations intelligentes ne soient pas aussi abondantes qu'on aurait pu le penser, comme le suggère le paradoxe de Fermi. Et curieusement, on peut déduire la valeur de la constante cosmologique en cherchant la probabilité maximale de formation d'une galaxie comme la nôtre – une géante dépourvue d'un trop grand nombre de galaxies satellites naines dangereuses.

Les mathématiciens britanniques de la Seconde Guerre mondiale réussirent à estimer correctement la production mensuelle de tanks allemands sans rien faire d'autre qu'examiner quelques numéros de série. De même, il semble que nous puissions inférer certaines propriétés du multivers à partir du seul cas connu: l'univers dans lequel nous vivons. Les univers dont la constante cosmologique est plus élevée ou plus faible ne semblent pas aptes à abriter une vie intelligente, ce qui laisse penser que le nôtre se trouve dans une situation comparable à celle du grain de café mentionné plus haut. Et pour reprendre l'exemple du nombre de lignes d'autobus, le fait de savoir que nous vivons dans «l'univers numéro 27» nous indique qu'il ne peut pas y avoir beaucoup d'univers dans lesquels la vie complexe est possible. ■

## BIBLIOGRAPHIE

T. Piran et al., **Cosmic explosions, life in the universe, and the cosmological constant**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 116, article 081301, 2016.

T. Piran et R. Jimenez, **Possible role of gamma ray bursts on life extinction in the universe**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 113, article 231102, 2014.

A. Melott, **Did a gamma-ray burst initiate the late Ordovician mass extinction?**, *International Journal of Astrobiology*, vol. 3(1), pp. 55-61, 2004.

## L'ESSENTIEL

> L'existence de vérités immuables sur le plan moral ou politique est une question philosophique épineuse. Cette existence va de soi selon une conception objectiviste, contrairement à une conception relativiste.

> Des expériences où les participants débattent de sujets controversés renseignent

sur la conception des gens à cet égard.

> Le style de débat dans lequel les gens s'engagent influe sur leur conception de la vérité : l'argumentation pour gagner favorise une conception objectiviste des vérités morales ou politiques, tandis que l'argumentation pour apprendre favorise une vision relativiste.

## LES AUTEURS

MATTHEW FISHER  
postdoctorant  
en sciences sociales  
et en sciences  
de la décision  
à la Carnegie  
Mellon University,  
aux États-Unis

JOSHUA KNOBE  
professeur à  
l'université Yale,

aux États-Unis,  
dans le programme  
de sciences  
cognitives  
et au département  
de philosophie

BRENT STRICKLAND  
chercheur en  
sciences cognitives  
à l'institut  
Jean-Nicod, à Paris

FRANK C. KEIL  
professeur  
de psychologie,  
de linguistique  
et de sciences  
cognitives  
à l'université Yale

# Débats: vaincre ou apprendre

Dans les débats que nous avons les uns avec les autres, nous adoptons différentes postures : argumenter pour marquer des points ou argumenter pour apprendre. Des expériences montrent que le mode choisi influe sur notre conception de la vérité elle-même.

**L**ors de la campagne pour les élections présidentielles de 2016 aux États-Unis, au cours du dernier débat entre les candidats Donald Trump et Hillary Clinton, une question concernant le président russe Vladimir Poutine fut posée. « Il n'a pas de respect pour elle », déclara Donald Trump, en montrant du doigt Hillary Clinton. « Poutine, d'après tout ce que je vois, n'a pas de respect pour cette personne. »

Les deux candidats essayèrent ensuite d'aller vers une compréhension plus nuancée des difficiles questions politiques en jeu. Hillary Clinton lança :

« Suggérez-vous que l'approche agressive que je propose échouerait à dissuader l'expansionnisme russe ? »

Donald Trump répondit :

« Non, je suis certainement d'accord pour dire que cela dissuaderait l'expansionnisme russe ; c'est juste que cela servirait aussi à désstabiliser le... »

En fait, non, je plaisante. Ce n'est pas du tout ce qui s'est passé. En réalité, chaque camp visait

à attaquer et à vaincre l'autre. Hillary Clinton a en réalité dit : « C'est parce qu'il [Poutine] préfère avoir une marionnette comme président des États-Unis. » Ce à quoi Trump rétorqua : « C'est vous la marionnette ! »

Des épisodes comme celui-ci sont devenus si fréquents dans les débats politiques contemporains qu'il est facile d'oublier à quel point ils diffèrent radicalement des discussions que nous avons le plus souvent dans notre quotidien. Prenons l'exemple de deux amies qui veulent aller dîner au restaurant. L'une propose : « Essayons le nouveau restaurant indien ce soir. Ça fait des mois que je n'ai pas mangé indien. » Son amie répond : « Tu sais, j'ai lu de mauvaises critiques sur cet endroit. Si nous allions plutôt manger une pizza ? » « Ah ? C'est bon à savoir. Va pour la pizza », conclut la première.

Dans cet exemple, chaque personne vient avec une opinion. Une discussion commence, au cours de laquelle chacune présente un argument, puis écoute l'argument de l'autre, et les interlocutrices s'orientent vers un accord. Ce genre de dialogue se produit tout le temps. Dans nos travaux de recherche, qui impliquent >



> psychologie cognitive et philosophie expérimentale, nous appelons cela une « argumentation pour apprendre ».

Mais à mesure que la polarisation politique augmente, le genre d'échange antagoniste qu'illustre le débat Trump-Clinton se produit de plus en plus fréquemment, non seulement parmi les personnages politiques, mais aussi parmi nous tous. Dans de telles interactions, les gens peuvent fournir des arguments à l'appui de leur point de vue, mais aucune des deux parties n'est réellement intéressée à apprendre de l'autre.

## ARGUMENTER POUR GAGNER

L'objectif réel est plutôt de « marquer des points », c'est-à-dire de battre l'autre partie dans un esprit de compétition. Les conversations sur Twitter, Facebook et les sections de commentaires de divers médias sur Internet sont devenues de puissants symboles de la combativité du discours politique de nos jours. Nous appelons « argumentation pour gagner » ce type de discussion.

Les divergences idéologiques entre personnes s'accompagnent d'une animosité envers ceux qui ne sont pas du même bord. Des sondages récents montrent que, aux États-Unis, les partisans des libéraux et ceux des conservateurs s'associent moins souvent entre eux, ont une opinion défavorable du parti adverse et seraient même mécontents si un membre de la famille épousait quelqu'un de l'autre camp.

En même temps, la montée des réseaux sociaux sur Internet a révolutionné la façon dont les gens s'informent – les nouvelles parvenant à l'internaute sont souvent personnalisées en fonction de ses préférences politiques. Ainsi, les perspectives rivales peuvent être complètement exclues de la bulle médiatique que l'on a soi-même créée. Pire encore, les contenus suscitant l'indignation sont davantage susceptibles de se répandre sur ces plateformes, créant ainsi un terreau fertile pour les gros titres et les fausses nouvelles. Cet environnement toxique en ligne est très probablement en train d'éloigner davantage les gens les uns des autres et de favoriser les échanges improductifs.

En cette époque de tribalisme croissant, une question importante s'est posée au sujet des effets psychologiques de l'argumentation pour gagner. Que se passe-t-il dans nos esprits lorsque nous nous trouvons en train de converser d'une façon qui vise simplement à défaire un adversaire? Nous avons récemment exploré cette question à l'aide de méthodes expérimentales, et nous avons constaté que la distinction entre les différents modes d'argumentation a des effets étonnamment profonds. Non seulement le mode d'argumentation influe sur la façon dont les gens perçoivent le débat et les personnes du camp opposé, mais il a aussi un effet

plus fondamental sur notre façon de comprendre la question même qui fait l'objet de la discussion.

La question de l'objectivité morale et politique est une question notoirement épineuse, dont les philosophes débattent depuis des millénaires. Pourtant, le cœur de la question est assez facile à saisir en considérant quelques conversations hypothétiques. Prenons un débat sur une question très simple de science ou de mathématiques. Supposons que deux amies travaillent ensemble sur un problème et constatent qu'elles ne sont pas d'accord sur la solution:

Marie: La racine cubique de 2197 est 13.

Susanne: Non, la racine cubique de 2197 est 14.

Les observateurs de ce désaccord ne savent pas nécessairement quelle est la bonne réponse. Mais ils sont tout à fait sûrs qu'il n'existe qu'une seule réponse objectivement correcte. Il ne s'agit pas d'une question d'opinion, il s'agit d'un fait, et quiconque a un autre point de vue est tout simplement dans l'erreur.

Considérons maintenant un autre type de scénario. Supposons que ces deux amies décident de faire une pause-déjeuner et qu'elles se retrouvent en désaccord sur ce qu'il faut mettre sur leurs bagels:

Marie: Le fromage crémeux végétal est vraiment délicieux.

Susanne: Non, le fromage crémeux végétal n'est pas bon du tout. Il a un goût horrible.



Le débat préélectoral entre Donald Trump et Hillary Clinton : un exemple type d'argumentation pour vaincre l'interlocuteur, et non pour apprendre de lui.

Dans cet exemple, les observateurs pourraient adopter une autre attitude: même si les deux personnes ont des opinions opposées, il se peut que ni l'une ni l'autre de ces opinions ne soit incorrecte. Il semble qu'il n'y ait pas de vérité objective sur la question.

En gardant cela à l'esprit, pensez à ce qui se passe lorsque les gens débattent de questions controversées sur des sujets politiques empreints de morale. Supposons que, pendant qu'elles profitent de leur déjeuner, nos deux amies se lancent dans une discussion politique animée:

Marie: L'avortement est moralement répréhensible et ne devrait pas être légal.

Susanne: Non, il n'y a rien de mal dans l'avortement, et il devrait être parfaitement autorisé.

La question que nous nous posons est de savoir comment comprendre ce genre de débat. Est-ce comme la question mathématique, où il existe une réponse objectivement juste et où quiconque dit le contraire se trompe forcément? Ou s'agit-il plutôt d'un affrontement sur une question de goût, où il n'existe pas une seule bonne réponse et où les gens peuvent avoir des opinions opposées sans que l'une ou l'autre ne se trompe?

Ces dernières années, les travaux sur ce sujet ont dépassé le domaine de la philosophie et se sont étendus à la psychologie et aux sciences cognitives. Au lieu de s'appuyer sur les intuitions de philosophes professionnels, des

sembler évident, mais des études ultérieures ont exploré les différences entre les personnes présentant ces types de pensée. Lorsqu'on demande aux participants s'ils seraient prêts à partager un appartement avec un colocataire ayant des opinions divergentes sur des questions morales ou politiques, les objectivistes sont plus enclins à dire non. Lorsqu'on demande aux participants de s'asseoir dans une pièce à côté d'une personne qui a des points de vue opposés, les objectivistes s'assoient plus loin. Autrement dit, les gens ayant une vision objectiviste ont tendance à répondre de façon plus «fermée».

Pourquoi en est-il ainsi? Une possibilité évidente est que si vous pensez qu'il existe une réponse objectivement correcte, vous pouvez être amené à conclure que tous ceux qui ont le point de vue opposé ont tout simplement tort et ne valent donc pas la peine d'être écoutés. Ainsi, le point de vue des gens sur les vérités morales objectives influencerait sur leurs interactions avec les autres. Il s'agit là d'une hypothèse plausible qui mérite d'être étudiée plus avant.

Pourtant, nous avons pensé que la problématique est peut-être plus riche. En particulier, nous avons soupçonné qu'il pourrait y avoir un effet dans l'autre sens. Ce n'est peut-être pas juste le fait d'avoir des points de vue objectivistes qui façonne vos interactions avec d'autres personnes: peut-être vos interactions avec les autres déterminent-elles à quel degré vous êtes objectiviste.

## UNE EXPÉRIENCE AVEC LES DEUX TYPES D'ARGUMENTATION

Pour tester cette hypothèse, nous avons mené une expérience dans laquelle des adultes se sont engagés dans une conversation politique en ligne. Chaque participant s'est connecté à un site web et a indiqué ses positions sur divers sujets politiques polémiques, notamment l'avortement et la possibilité de détenir des armes à feu. Il a été jumelé à un autre participant ayant des points de vue opposés, et les participants ont ensuite engagé une conversation en ligne sur un sujet à propos duquel ils étaient en désaccord.

La moitié des participants ont été encouragés à argumenter pour gagner. On leur a dit qu'il s'agirait d'un échange hautement compétitif et que leur objectif devrait être de surpasser l'autre personne. Le résultat était exactement le genre d'échanges que l'on voit tous les jours sur les réseaux sociaux. Voici, par exemple, une transcription de l'une des conversations réelles:

P1: Je crois à 100% au choix d'une femme.

P2: On devrait interdire l'avortement parce qu'il arrête un cœur qui bat.

P1: L'avortement est dans la loi du pays, le pays où vous vivez. >

# Vos interactions avec les autres peuvent déterminer le degré de votre objectivisme

chercheurs comme nous ont commencé à recueillir des preuves empiriques pour comprendre comment les gens pensent réellement ces questions. Les gens ont-ils tendance à penser que les questions morales et politiques ont des réponses objectivement correctes? Ou bien ont-ils une vision plus relativiste?

Au niveau le plus fondamental, les recherches de la dernière décennie ont montré que la réponse à cette question est complexe. Certaines personnes sont plus objectivistes, d'autres sont plus relativistes. Cela peut

> P2: Le cœur bat à 21 jours, c'est un meurtre. L'autre moitié des participants ont été encouragés à argumenter pour apprendre. On leur a dit qu'il s'agirait d'un échange très coopératif et qu'ils devraient essayer d'apprendre le plus possible de leur adversaire. Ces conversations tendaient à avoir un ton tout à fait différent:

P3: Je crois que l'avortement est un droit que toutes les femmes devraient avoir. Je comprends que certaines personnes choisissent de placer certains déterminants sur le délai et le motif, mais je pense que ce devrait être pour n'importe quel motif avant un certain délai dans la grossesse, convenu par les médecins afin de ne pas nuire à la mère.

P4: Je crois que la vie commence à la conception (rencontre du spermatozoïde et de l'ovule), donc l'avortement est pour moi l'équivalent d'un meurtre.

P3: Je comprends tout à fait ce point. Sur le plan biologique, il est évident que, dès la première division cellulaire, la «vie» est à l'œuvre. Mais je ne pense pas que cette vie soit à un stade assez avancé pour justifier l'abolition de l'avortement.

Il n'est pas si surprenant que ces deux séries d'instructions aient conduit à de tels résultats. Mais ces échanges donneraient-ils lieu à des points de vue différents sur la nature même de la question à l'étude? Une fois la conversation terminée, nous avons demandé aux participants s'ils pensaient qu'il existe une vérité objective sur les sujets qu'ils venaient de discuter. Il est frappant de constater que ces échanges de 15 minutes ont en fait changé le point de vue des gens. Les individus étaient plus objectivistes après s'être disputés pour gagner qu'ils ne l'étaient après s'être disputés pour apprendre. En d'autres termes, le contexte social de la discussion – comment les gens définissent l'objectif du débat – a modifié les opinions des interlocuteurs sur la question philosophique profonde de savoir s'il existe une vérité objective.

Ces résultats mènent naturellement à une autre question qui va au-delà de ce qui peut être abordé dans une étude scientifique. Lequel de ces deux modes d'argumentation serait-il préférable d'adopter lorsqu'il s'agit de controverses politiques? Au premier abord, la réponse semble simple. Qui pourrait ne pas voir qu'il y a quelque chose de très important dans le dialogue coopératif et quelque chose de fondamentalement contre-productif dans la concurrence pure et simple?

Bien que cette réponse simple soit pertinente la plupart du temps, il peut aussi y avoir des cas où les choses ne sont pas aussi nettes.

Ainsi, supposons que nous soyons engagés dans un débat avec un groupe de personnes climatosceptiques. Nous pourrions essayer de nous asseoir ensemble, écouter les arguments



des climatosceptiques et faire de notre mieux pour apprendre de tout ce qu'ils ont à dire. Mais certains pourraient penser que c'est précisément la mauvaise approche. Il n'y a peut-être rien à gagner à rester ouverts aux idées qui contredisent le consensus scientifique. En effet, le fait d'accepter de participer à un dialogue coopératif pourrait être un exemple d'un «faux équilibre» – une légitimation d'une position extrême aberrante qu'il ne faudrait pas prendre en compte de façon égale. Certains diraient que la meilleure approche dans ce genre d'affaire est d'argumenter pour gagner.

## QUEL MODE DE DÉBAT CHOISIR ?

Bien sûr, nos études ne peuvent pas déterminer directement quel mode d'argumentation est le «meilleur». Et bien que de nombreuses preuves suggèrent que le débat politique contemporain devient de plus en plus combatif et axé sur la victoire, nos conclusions n'expliquent pas pourquoi ce changement s'est produit. Elles fournissent plutôt une nouvelle information importante à prendre en considération: le mode d'argumentation que nous adoptons change notre compréhension de la question elle-même. Plus nous argumenterons pour gagner, plus nous aurons le sentiment qu'il n'y a qu'une seule réponse objectivement correcte et que toutes les autres réponses sont erronées. Inversement, plus nous argumenterons pour apprendre, plus nous aurons le sentiment qu'il n'existe pas de vérité objective unique et que des réponses différentes peuvent être également justes.

Ainsi, la prochaine fois que vous déciderez de la façon d'entrer dans une discussion sur Facebook au sujet de la question controversée du jour, rappelez-vous que vous ne faites pas seulement un choix sur la façon d'interagir avec une personne qui a un point de vue opposé. Vous prenez également une décision qui façonnera votre manière – et celle des autres – de penser si la question elle-même a une bonne réponse. ■

## BIBLIOGRAPHIE

M. Fisher et al., **The influence of social interaction on intuitions of objectivity and subjectivity**, *Cognitive Science*, vol. 41(4), pp. 1119-1134, 2017.

G. P. Goodwin et J. M. Darley, **Why are some moral beliefs perceived to be more objective than others ?**, *Journal of Experimental Social Psychology*, vol. 48 (1), pp. 250-256, 2012.

## Sur le vif Photographie et anthropologie

L'histoire de l'anthropologie et celle de la photographie sont étroitement liées depuis leur apparition quasi simultanée au XIX<sup>e</sup> siècle. Mais force est de constater la relative absence de travaux portant sur les pratiques, les usages et plus généralement l'histoire des « images » de l'anthropologie dans l'entre-deux-guerres, période pendant laquelle l'institutionnalisation de la discipline va de pair avec l'essor d'une modernité photographique. Or, les archives d'ethnologues montrent aujourd'hui l'importance de la pratique photographique sur le terrain, l'apparition d'appareils légers comme le Leica et celle du genre du photoreportage, les ayant influencés et séduits. Leurs carnets de l'époque contiennent souvent de nombreuses photos, des collections muséales se constituent et des réseaux de diffusion visuels variés débordent le cadre strictement scientifique. Par ailleurs, la réutilisation de la photographie de « types » physiques, encore très courante, illustre la tension entre la permanence de schèmes visuels hérités de l'anthropologie physique du XIX<sup>e</sup> siècle et la volonté d'une science moderne de remettre en question l'existence des races. Ce numéro interroge aussi les enjeux techniques et financiers de conservation, de classement et d'archivage ainsi que le traitement éditorial des images parfois révélateur de tensions entre les logiques scientifique, économique et esthétique. Il fait le point sur les enjeux que présente la photographie en anthropologie dans l'entre-deux-guerres, en abordant différentes traditions nationales et aires géographiques et propose de questionner le geste photographique en tant que geste scientifique, car les images font partie intégrante de l'histoire de la discipline, à l'instar des grands textes classiques.



« Questionner le geste photographique en tant que geste scientifique »

LES AUTEURS



**ANTON GASS**  
archéologue  
à la **Fondation**  
du patrimoine  
culturel prussien,  
en Allemagne



**ELKE KAISER**  
archéologue  
à l'**université**  
libre de Berlin,  
en Allemagne



**HERMANN  
PARZINGER**  
président  
de la **Fondation**  
du patrimoine  
culturel prussien

L'ESSENTIEL

> Hérodote et d'autres auteurs grecs mentionnent qu'un peuple nomade occupait dans l'Antiquité les steppes bordant l'Empire perse : les Scythes.

> De cette culture équestre des steppes allant de l'Europe à l'Asie centrale, il ne reste pratiquement que des tumulus.

> La prolongation des recherches entreprises par les archéologues soviétiques révèle de quelle façon le mode de vie des nomades s'est peu à peu installé dans la steppe eurasienne.

# Sur les traces des cavaliers des steppes

Les cavaliers de la steppe eurasienne ont laissé très peu de vestiges en dehors de leurs édifices funéraires. Mais ces tumulus ont fourni aux archéologues suffisamment d'indices pour retracer l'évolution du mode de vie de ces populations, passées d'une culture de chasseurs-cueilleurs au nomadisme.

**F**ace aux armées perses, les Scythes d'Idanthyse, qui régna à la fin du VI<sup>e</sup> siècle avant notre ère, évitaient l'affrontement direct. Agacé, le roi perse Darius I<sup>er</sup> enjoignit à Idanthyse de se battre ou de se soumettre. Hérodote, au V<sup>e</sup> siècle avant notre ère, rapporte que le roi scythe lui fit cette réponse : « [...] je vais te dire pourquoi je ne t'ai pas combattu sur la plaine. Comme nous ne craignons ni qu'on prenne nos villes, puisque nous n'en avons point, ni qu'on fasse du dégât sur nos terres, puisqu'elles ne sont point cultivées, nous n'avons pas de motifs pour nous hâter de donner bataille. Si cependant tu veux absolument nous y forcer au plus tôt, nous avons les tombeaux de nos pères; trouve-les, et essaye de les renverser: tu sauras alors si nous combattons pour les défendre. »

Selon les anciens auteurs grecs, des tribus de cavaliers nomades hantaient les steppes d'Europe orientale au cours du I<sup>er</sup> millénaire avant notre ère. Les mots d'Idanthyse confirment les constatations que font et refont de leur côté les archéologues des steppes eurasiennes: ces cavaliers nomades n'ont laissé pratiquement >



> aucun vestige de village; en revanche, leurs monticules funéraires – les fameux kourganes – ont toujours constitué dans leurs cultures et dans le paysage de la steppe des points de repère importants. Dès lors, ce sont ces cimetières qui nous renseignent le plus sur les cultures de ces cavaliers nomades du passé. Nous allons voir comment.

## UN MILIEU INHOSPITALIER ET INADAPTÉ À L'AGRICULTURE

Qui connaît les conditions régnant dans l'immense steppe reliant les Carpates à la Chine occidentale se persuade facilement que, durant l'Antiquité, elle n'a accueilli pratiquement aucun habitat permanent. Ses paysages secs sont brûlants en été et glaciaux en hiver. L'agriculture y a toujours été difficile. Dès lors, l'existence dans ces régions des tribus nomades mentionnées dans tant de sources historiques n'a rien de surprenant. Toutefois, à quoi ressemblaient ces gens? Se sont-ils un jour sédentarisés comme l'ont fait vers le VI<sup>e</sup> millénaire les ancêtres des Européens?

Les archéologues soviétiques, en particulier le Moscovite Nikolai Merpert, ont répondu non: selon leur thèse, qui est la plus communément admise par les archéologues, les habitants préhistoriques des steppes auraient abandonné la chasse et la cueillette pour devenir des éleveurs nomades. Au lieu de suivre les troupeaux d'herbivores sauvages comme ils le faisaient auparavant, ils se seraient progressivement mis à pousser des vaches à la recherche de bons pâturages. Au début de l'âge du Bronze, ce mode de vie était déjà largement établi dans les steppes.

C'est cette hypothèse que l'un des groupes du pôle d'excellence allemand en archéologie, le groupe Topoi, de l'université libre de Berlin, a réexaminée. Ses archéologues se sont concentrés sur la partie funéraire de la culture des nomades de la steppe d'Eurasie occidentale afin de saisir de quelle façon leur mode de vie a évolué vers 3000 avant notre ère.

Les données archéologiques montrent qu'à partir du milieu du IV<sup>e</sup> millénaire avant notre ère, soit peu avant de passer à l'élevage, les chasseurs-cueilleurs des steppes se sont de plus en plus souvent mis à enterrer leurs morts sous des kourganes. Issu du turc ancien, ce terme désigne un tumulus, c'est-à-dire un monticule recouvrant une sépulture. Dans les steppes, les grandes installations funéraires qui en ont résulté sont devenues les monuments les plus notables du paysage, et, comme l'ont montré nos chercheurs, des sanctuaires importants.

Les chercheurs de notre groupe ont en particulier essayé de déterminer si les conditions d'un mode de vie nomade étaient remplies au III<sup>e</sup> millénaire. Pour ce faire, ils ont

commencé par évaluer les résultats de fouilles des rares habitats sédentaires des IV<sup>e</sup> et III<sup>e</sup> millénaires découverts au nord de la mer Noire. Une condition préalable au nomadisme est en effet l'élevage spécialisé de certaines espèces, phénomène qui peut être attesté par les déchets de boucherie.

Les nombreux os d'animaux sauvages retrouvés prouvent qu'au IV<sup>e</sup> millénaire, la chasse jouait encore un rôle important. Sept sites habités à différentes périodes entre 4000 et 3000 avant notre ère contenaient des proportions très différentes d'os et de fragments d'os de moutons, de chèvres, de bovins ou de chevaux. Il n'est pas possible d'affirmer avec certitude que, au IV<sup>e</sup> millénaire, les chevaux consommés étaient déjà domestiqués: les os équins présents pourraient être ceux de proies...

## SOUDAIN DU BÉTAIL

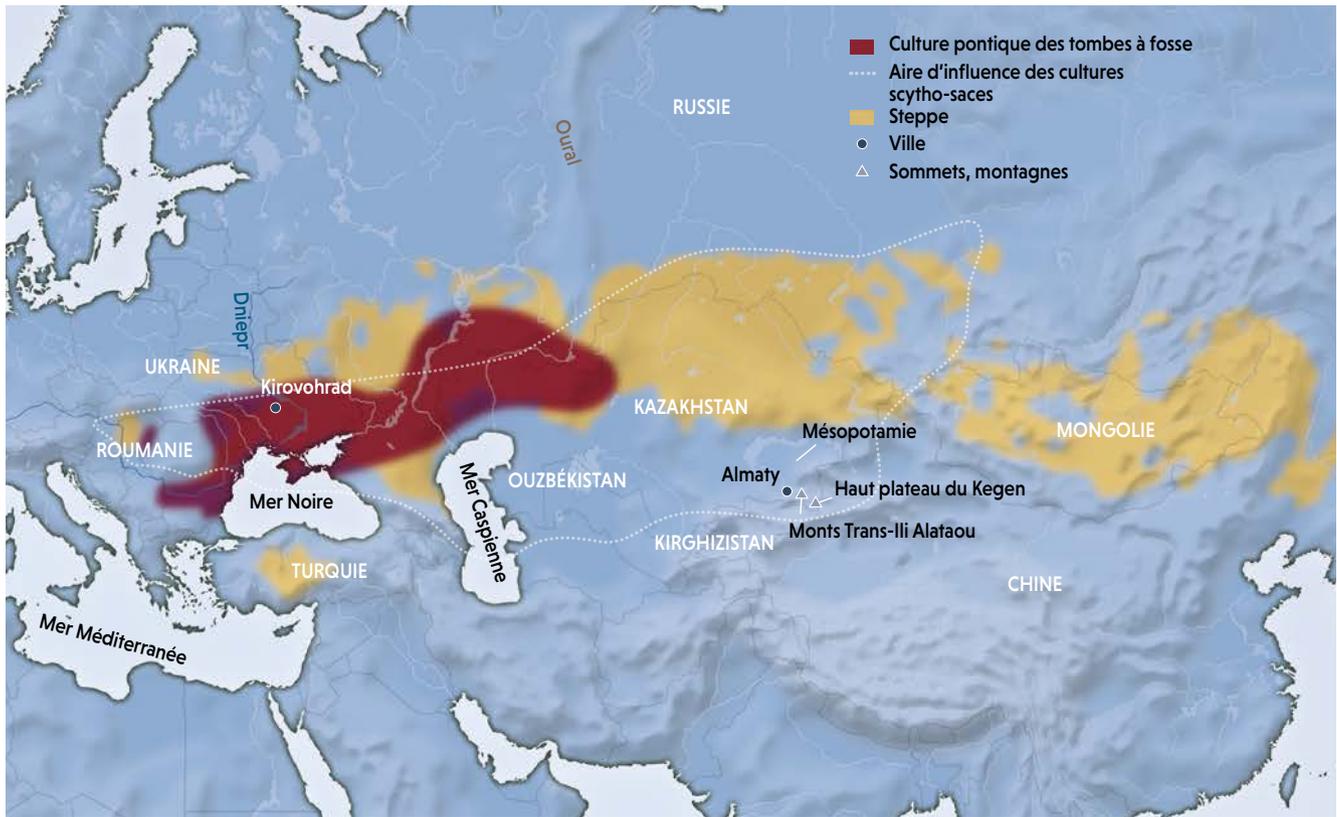
Les statistiques bouchères des sites plus récents prouvent qu'à partir des années 3000, les habitants des steppes élevaient de plus en plus de bétail. Auparavant, les proportions d'os et de fragments d'os bovins n'avaient pas dépassé 50%, voire avaient été inférieures à 20%, mais aux époques ultérieures, elles passèrent au-dessus de 60%. La plus grande partie du bétail était manifestement constituée de bovins. Cette innovation en matière d'élevage fut durable: l'élevage de vaches a dominé pendant tout le III<sup>e</sup> et le II<sup>e</sup> millénaires.

Cette pratique nouvelle s'accompagna de l'entrée en nomadisme. *A priori*, on se dit que ce changement de mode de vie fut entraîné par la recherche de bons pâturages. Il semble en effet raisonnable de penser que les transhumances saisonnières augmentaient l'efficacité de l'élevage. Mais ce n'est qu'une hypothèse... Et dans les cas où il est possible de prouver que des transhumances avaient lieu, d'autres questions restent sans réponses. Quelle était la taille des troupeaux? Ceux-ci n'étaient-ils accompagnés que de quelques bergers? Quelles



**Les morts étaient couchés sur des nattes au fond de fosses rectangulaires ou ovales**





Une immense bande steppique (en orange) s'étend depuis les montagnes des Carpates, en Roumanie, jusqu'aux confins de la Chine. L'agriculture a toujours été difficile à pratiquer dans cette immense région. Les chasseurs-cueilleurs semblent s'y être transformés en éleveurs, d'abord

de bovins, puis surtout de moutons et de chevaux. C'est du moins ce que suggère l'analyse des os et des dents des défunts de la culture Yamna (en rouge sombre), dont les rapports isotopiques prouvent que les individus se déplaçaient parfois sur de très longues distances au cours de leur vie.

distances parcourait-on? Avec quelle fréquence recherchait-on de nouveaux pâturages?

## LES PREMIÈRES TOMBES ÉTAIENT PAUVRES

La présence au III<sup>e</sup> millénaire de traditions funéraires très similaires sur de grandes distances est une indication archéologique forte de l'existence du nomadisme dès cette époque. En effet, des indices de la présence de la culture Yamna, connue aussi sous le nom de « culture pontique des tombes à fosse », se rencontrent dans toute la steppe allant de l'Oural au Danube inférieur. Les archéologues y ont documenté des milliers de tombes construites de façon identique et attestant des mêmes rituels funéraires: les défunts y étaient couchés les jambes repliées, souvent sur des nattes, au fond de fosses rectangulaires ou ovales; en outre, le mort et le sol de la tombe étaient généralement saupoudrés d'ocre.

Contrairement à ce qui sera le cas au I<sup>er</sup> millénaire avant notre ère, ces tombes ne sont pas riches. Les défunts étaient parfois accompagnés d'un vase ou d'une aiguille d'os. Toutefois, certaines sépultures contiennent aussi des chariots lourds. Leur restitution révèle une sorte de chariot bâché, que l'on interprète comme un véhicule de

bergers errants. Nous ignorons si seuls les chefs tribaux étaient enterrés avec un chariot ou si une telle offrande funéraire obéissait à une autre logique. Comme les rituels funéraires étaient par ailleurs assez uniformes, les archéologues supposent que des rites communs s'étaient profondément enracinés chez les habitants de la steppe. Comment imaginer en effet le maintien des mêmes rituels dans un espace aussi vaste sans l'existence d'une culture nomade?

Pour autant, dans l'ensemble, ces considérations sont avant tout des spéculations mal fondées scientifiquement. Pour remédier à cette situation, les chercheurs se sont appuyés sur une méthode permettant de déterminer où un individu a séjourné pendant sa vie: l'analyse isotopique.

En effet, les rapports isotopiques du strontium contenu dans l'émail des dents dépendent de la composition du substrat rocheux de la zone où l'individu a bu et s'est nourri pendant son enfance, à l'époque où ses dents poussaient; en revanche, les rapports isotopiques du strontium contenu dans les os évoluent lentement durant toute la vie de l'individu. Dès lors, les rapports isotopiques mesurés dans les dents de l'individu indiqueront dans quelle région il a passé son enfance >

> et différeront de ceux mesurés dans ses os s'il a passé sa vie adulte ailleurs.

Claudia Gerling, une archéologue faisant partie de notre équipe, a analysé les molaires de défunts enterrés dans les tumulus de 11 sites de la steppe située au nord de la mer Noire. À des fins de comparaison, elle a aussi analysé les dents d'individus plus anciens morts au IV<sup>e</sup> millénaire, c'est-à-dire pendant la période précédant l'introduction de l'élevage spécialisé et la présumée transition vers le nomadisme. Claudia s'est aussi intéressée au taux d'oxygène 18; celui-ci dépend de divers facteurs et, pour l'essentiel, renseigne sur les conditions climatiques sous lesquelles la personne a vécu.

Les analyses combinées sur l'oxygène et le strontium ont mis en évidence que certains individus ont parcouru de très longues distances au cours de leur vie. Cette mobilité est particulièrement notable chez les morts du tumulus Sugokleya, de la culture Yamna, tumulus que des archéologues ukrainiens ont fouillé en 2004, dans la ville de Kirovohrad, au centre de leur pays. On pouvait s'attendre à ce que les os présentent pour l'oxygène des valeurs isotopiques caractéristiques de l'eau potable dans cette région de l'Ukraine d'aujourd'hui, et ce fut bien le cas. En revanche, les rapports isotopiques du strontium mesurés dans les dents présentaient des anomalies. Sept des huit individus examinés présentaient des rapports isotopiques ne correspondant pas à la région du tumulus. Et l'étude, par la même méthode, de certains des tumulus de la région a montré qu'environ la moitié des défunts avaient changé de région au cours de leur vie.

Cependant, la carte géologique détaillée des environs de la ville de Kirovohrad montre que les roches sous-jacentes varient tous les quelques kilomètres, passant de roches jeunes à des roches anciennes, ce qui peut jouer sur les rapports isotopiques. Ces résultats suggèrent néanmoins qu'une partie au moins des habitants de la steppe se déplaçaient sur de longues distances, ce qui va dans le sens d'un mode de vie nomade.

## DES DENTS ANALYSÉES AU FIL DE LEUR CROISSANCE GRÂCE À L'ABLATION LASER

Claudia Gerling s'est aussi attachée à analyser les molaires d'individus enterrés dans des tumulus de la période scythe, c'est-à-dire du I<sup>er</sup> millénaire avant notre ère. Les valeurs trouvées sur les défunts du kourgane de Berel', au Kazakhstan oriental, donc très loin à l'est, ont révélé l'importance des distances parcourues par les cavaliers nomades. Grâce à une nouvelle méthode d'ablation au laser, on peut aujourd'hui analyser simultanément plusieurs zones dentaires situées le long d'une ligne de



croissance. Cela permet de mesurer les modifications des rapports isotopiques pendant une plus longue période de la vie.

Ainsi, une telle analyse a établi qu'un homme enterré avec un couteau de fer a manifestement voyagé entre l'âge de 3 et 5 ans et a vécu à la fois dans les montagnes de l'Altaï et dans la steppe. Une telle alternance s'explique de façon très plausible par les transhumances saisonnières. Ces résultats ne sont que ceux d'une étude pilote: de nombreuses autres recherches du même type

Ces tumulus scythes ont été érigés entre le VIII<sup>e</sup> et le III<sup>e</sup> siècle avant notre ère au pied des monts Trans-Ili Alataou, au Kazakhstan.

## SCYTHES ET SACES

Les Scythes sont la première culture de la bande steppique eurasiatique connue par les sources écrites anciennes. Leurs cousins asiatiques sont désignés par le terme de Saces dans les chroniques perses. Au cours du I<sup>er</sup> millénaire avant notre ère,

les nombreuses tribus de nomades équestres de la steppe avaient des économies, des modes de vie et des rites funéraires similaires, que les Grecs anciens ont décrits. Les archéologues parlent à leur propos de culture scythe; il est clair toutefois que l'immense bande steppique de l'Antiquité n'était pas foulée par les porteurs d'une seule culture, ni même par un seul peuple, mais par une multitude de groupes. La connaissance de ceux-ci ne progressera qu'à la faveur de découvertes archéologiques, la plupart funéraires, les nomades n'ayant pas d'habitats fixes.



seront nécessaires pour rassembler des données suffisantes en nombre et en qualité révélant le mode de vie et les activités économiques des habitants de la steppe d'Europe de l'Est.

L'une des grandes interrogations concernant les steppes du I<sup>er</sup> millénaire avant notre ère est le moment de la mise en place du mode de vie des cavaliers nomades. Cette nouvelle façon de vivre s'est développée à la faveur d'innovations dans plusieurs domaines, parmi lesquels la cavalerie guerrière est au premier rang. Toutefois, cette façon de se battre découle d'un développement antérieur. En analysant les grains de pollen conservés dans le sol, les chercheurs ont pu reconstituer les fluctuations de la végétation dans la steppe eurasienne entre le x<sup>e</sup> et le viii<sup>e</sup> siècle avant notre ère. À ces évolutions de la couverture végétale correspondent une baisse de la température moyenne annuelle et une hausse des précipitations, notamment sous la forme de neige.

En conséquence, les sols des steppes ont changé, et sont devenus moins adaptés à l'agriculture et à l'élevage des bovins, lequel était déjà devenu assez sporadique. Les nomades des steppes se sont alors mis à élever des chevaux et des moutons, des troupeaux composés de ces animaux étant nettement plus faciles à conduire sur de longues distances vers de nouveaux pâturages que des troupeaux de vaches.

L'exploitation par les nomades de ces pâturages a sans doute suscité des conflits avec les populations locales. On peut penser que l'intensification de ces conflits aura conduit à l'émergence d'une société nomade guerrière. Alors que

les sociétés nomades des steppes étaient auparavant plutôt égalitaires, une classe dirigeante masculine se serait établie. C'est en effet au plus tard entre le x<sup>e</sup> et le viii<sup>e</sup> siècle avant notre ère que l'on observe une stratification sociale prononcée des sociétés de cavaliers nomades. Désormais, les membres de l'élite se font enterrer au sein de monumentaux kourganes, accompagnés d'un mobilier funéraire de valeur, de nombreux chevaux parfois, voire de gardes du corps et autres serviteurs, que l'on mettait à mort à l'occasion des funérailles de leur maître.

## LES PREMIERS MONUMENTS FUNÉRAIRES DU JETYSSOU

À quelle vitesse ce changement social s'est-il produit? Ses aspects se sont-ils tous diffusés dans d'autres régions? Pour tenter de répondre, notre équipe a choisi de se concentrer sur le Jetyssou. En kazakh, ce nom signifie «pays des sept rivières»; il désigne une région d'Asie centrale dont la plus grande partie se trouve aujourd'hui au Kazakhstan, même si ses marges sud et sud-est sont au Kirghizistan et dans la province autonome chinoise du Xinjiang.

Nos chercheurs ont exploité les informations disponibles portant sur plus d'un millier de kourganes répartis sur 77 sites. L'un de nous (Anton Gass) les a rassemblées dans une base de données: il s'agit de photos, de mesures des tumulus et de leurs éléments architecturaux (fossés circulaires, cercles de pierre, murs les entourant...) ainsi que des coordonnées géographiques de ces structures. À l'aide d'un système d'information géographique, Anton a ensuite évalué statistiquement et fusionné les données ainsi compilées.

Cette recherche a produit des cartes mettant en évidence dans quel ordre chronologique la culture des kourganes s'est développée dans le Jetyssou. Cela revient à retracer la colonisation de la région par les Saces (*voir l'encadré page précédente*), un type de cavaliers nomades scythes asiatiques. Notre équipe a ainsi non seulement révélé l'apparition des nomades équestres dans le Jetyssou, mais aussi, à travers la construction de nécropoles et l'émergence de nouveaux paysages funéraires, l'évolution de leur mode de vie au fil du temps.

Les plus anciens tumulus du Kazakhstan oriental ont été érigés entre le viii<sup>e</sup> et le début du vi<sup>e</sup> siècle avant notre ère. Il semble que les cavaliers saces n'ont immigré que progressivement vers le Jetyssou, qui à cette époque était encore exempt de kourganes dans certaines régions. Au sud du Jetyssou et des monts Trans-Ili Alataou qui le bordent par le sud, se trouvent les montagnes du nord du Tien Shan – les montagnes célestes des Chinois. Leurs contreforts ont-ils aussi été peuplés par des cavaliers nomades à cette époque? Cela reste une question ouverte. >

➤ D'abord peu nombreux, les cavaliers nomades saces se sont répandus dans le sud-est du Jetyssou depuis le VI<sup>e</sup> siècle et jusqu'en 200 avant notre ère environ, laissant même des vestiges identifiables de villages peu durables. Leur peuplement occupait principalement la steppe plate et les collines adjacentes proches du côté nord des monts Trans-Ili Alataou. Cette zone a manifestement été un centre culturel important pendant cette période, car on y dénombre 168 grands tumulus.

À l'occasion, des groupes isolés ont aussi pénétré dans les régions montagneuses, mais en ne laissant que peu de traces de leur passage. À une exception près : le haut plateau de Kegen, sur la frontière kazakho-kirghizo-chinoise. Sur ce haut plateau, 344 tumulus se répartissent au sein de 12 nécropoles. Parmi eux, 126 sont nettement plus grands que les autres et jouaient sans doute un rôle central. De plus, 3 habitats fixes, mais peu solidement établis, ont aussi été découverts. Le fait que les Saces aient construit des villages contredit Hérodote, selon qui les cavaliers nomades n'avaient ni villes ni champs. Cette constatation ne concerne pas seulement les Saces : au cours des dernières décennies, les fouilles archéologiques menées en Europe de l'Est, au Kazakhstan et dans le Caucase du Nord ont à maintes reprises révélé des vestiges de villages scythes. Une petite partie au moins de la population de l'aire culturelle scythe était donc sédentaire.

## LES GRANDS KOURGANES, DES SANCTUAIRES

Les grands kourganes saces prennent la forme remarquable de plateformes arrondies délimitées par trois flancs abrupts et un quatrième à faible pente (voir la photographie page 60). Depuis la Sibérie à l'est jusqu'au fleuve Dniepr à l'ouest, on trouve des tumulus aux contours similaires dans toute la bande steppique. Hérodote lui-même a décrit des sanctuaires scythes en l'honneur d'Arès (le dieu de la guerre) construits de façon comparable. Que les formes des kourganes de l'élite sace ressemblent à celles de sanctuaires n'est probablement pas un hasard : on érigeait ces grands tumulus en imitant les sanctuaires, du moins dans leurs formes.

La forme n'est pas le seul aspect visible de l'architecture de ces kourganes. Au voisinage immédiat des grands kourganes, dont certains sont édifiés sur de grandes plateformes en terre, des fossés circulaires, des murs et des cercles simples ou doubles de pierres sont encore visibles en surface. S'y trouvent aussi de plus petits tumulus, des sépultures en coffre et des fosses. Ainsi, les grands kourganes encore visibles aujourd'hui ne constituent qu'une partie d'installations

plus grandes. Sur la colline Žoan Tobe, à l'est de la ville d'Almaty (ou Alma-Ata, l'ancienne capitale du Kazakhstan), on a aussi découvert un mur de pierre de 113 mètres de diamètre et de 11 mètres de haut !

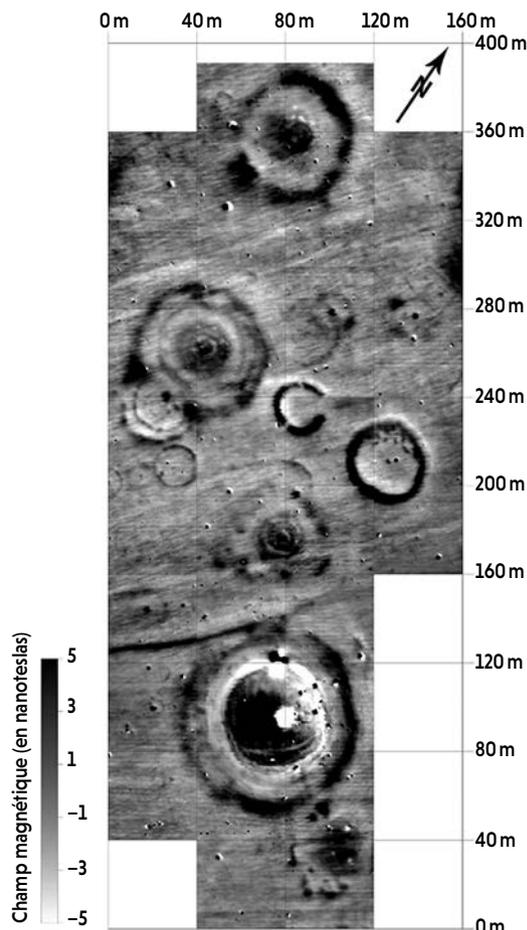
Les grandes constructions d'époque scythe dont un tumulus constitue le centre couvrent au total une surface de 185 mètres de diamètre. Les études géophysiques et archéologiques de ce type d'installation ont montré que les doubles cercles de pierres constituent une sorte de voie. Même si sa fonction exacte reste inconnue, on la nomme la « voie processionnaire ». Des voies similaires ont aussi été découvertes autour de 18 grands kourganes d'autres nécropoles du Jetyssou. Cela traduit des innovations techniques dans la construction de routes jusqu'à inconnues en Asie centrale. Au I<sup>er</sup> millénaire avant notre ère, ces routes ne se rencontrent que dans le Jetyssou ; aucune installation comparable n'a encore été découverte dans les autres régions de la steppe eurasiennne.

Les Saces ont peut-être importé ces connaissances techniques du Proche-Orient au moment où ils ont combattu les Perses, au VI<sup>e</sup> siècle, voire plus tard, quand, au cours de la première moitié du V<sup>e</sup> siècle avant notre ère, des unités saces ont servi dans l'armée perse. Pour les Saces et les Scythes, ces grands

Une « voie processionnaire » : c'est ainsi que les archéologues nomment ce type de double alignement de pierres faisant tout le tour d'un grand kourgame scythe. Mais la fonction exacte de cette structure typique des grandes nécropoles saces n'est pas élucidée.



Cette carte magnétique révèle les structures cachées de la nécropole de Vinogradnyj 1, dans le nord du Caucase. Dans cette région, les Scythes ont créé de véritables paysages sacrés en accumulant les tumulus et en structurant leurs environs.



tumulus aux environs aménagés n'étaient probablement pas seulement des sépultures de chef, mais aussi des sanctuaires.

Toutes ces nouvelles et intéressantes observations ont poussé notre équipe à étudier aussi le pré-Caucase septentrional. Sous la direction du géophysicien Jörg Fassbinder, de l'université Ludwig-Maximilians, à Munich, une équipe a réalisé au cours des années 2012 à 2015 un total de 13 prospections. Dans la nécropole de Vinogradnyj 1, aux environs immédiats d'un grand kourgane de 5,4 mètres de haut et de 58 mètres de diamètre, plusieurs installations ont été construites, parfois même à distance du tumulus.

### DES SANCTUAIRES FRÉQUENTÉS SANS INTERRUPTION DURANT DES SIÈCLES

Leur étude géophysique a révélé de nombreux vestiges architecturaux si endommagés par les passages des charrues qu'ils ne sont plus visibles en surface. En plus de fossés circulaires entourant le grand kourgane, lui-même encore largement préservé, l'imagerie magnétique a révélé les bases de tumulus détruits, d'extensions semi-circulaires, de fosses, des tombes plates, des tranchées

carrées et d'autres structures funéraires, notamment une fosse en fer à cheval. De fortes anomalies géomagnétiques, indicatrices d'incendie, y ont été détectées.

Un forage a révélé que la fosse en forme de fer à cheval est remplie de cendres et de charbon de bois. La datation au radiocarbone montre que ce remplissage s'est fait entre le VI<sup>e</sup> et le IV<sup>e</sup> siècle avant notre ère. La fosse a donc été aménagée en même temps que le grand kourgane de Vinogradnyj 1. Nous ignorons tout de sa fonction et des événements à l'origine de son remplissage par des cendres.

Pour autant, tout ce qui a été établi dans le Jetysou se retrouve dans le pré-Caucase: les tumulus constituaient un élément important du paysage sacré, lequel était manifestement constitué aussi d'autres installations. Ces études montrent en outre que les Scythes revenaient à leurs lieux saints pendant de très longues périodes, voire pendant plusieurs siècles.

Cependant, les installations sacrées documentées par les méthodes géophysiques ne sont pas toutes scythes. Certaines tombes sont à associer au peuple des Alains, mentionné par les historiens de l'Antiquité. Elles contiennent une chambre latérale entourée d'un carré de fossés, et remontent aux premiers siècles de notre ère. En 2012, des tombes de ce genre, situées dans la partie russe du Caucase, ont été explorées par l'archéologue moscovite Dmitry Korobov, qui les a décrites comme étant des tombes alaines précoces. Elles datent du IV<sup>e</sup> siècle de notre ère.

Dans la partie sud de la surface prospectée, un tumulus petit et flanqué au sud d'une modeste extension latérale contenait une tombe en son centre. Datée au radiocarbone, cette tombe pourrait remonter à la fin du IV<sup>e</sup> millénaire avant notre ère, à une époque où le grand tumulus de Vinogradnyj 1 n'existait pas encore. Ainsi, des gens ont construit au même endroit des tumulus dès 3000 avant notre ère et jusqu'au IV<sup>e</sup> siècle de notre ère! Dès lors, on ne peut exclure que les habitants des steppes ont maintenu une utilisation traditionnelle des mêmes grandes nécropoles prestigieuses pendant des milliers d'années.

Les sanctuaires ont peut-être joué très tôt un grand rôle dans les sociétés nomades, car l'on ne s'y réunissait que dans certains centres, sans doute pour commémorer et célébrer. Nous avons beaucoup nuancé suivant les époques ce que nous savons des nomades des steppes eurasiennes. Pour autant, le fait qu'ils se soient spécialisés très tôt sur une forme d'élevage efficace est une constante de ces cultures steppiques. Tout aussi caractéristique est le fait que leurs sépultures, comme l'a déjà décrit Hérodote, constituaient des sanctuaires qui transformaient certains lieux en paysages sacrés. ■

### BIBLIOGRAPHIE

P. Librado et al., **Ancient genomic changes associated with domestication of the horse**, *Science*, vol. 356, pp. 442-445, 2017.

G. Caspari et al., **Tunnug 1 (Arzhan 0) – An early Scythian kurgan in Tuva Republic, Russia**, *Archaeological Research in Asia*, en ligne, 11 novembre 2017.

I. Lebedynsky, **Les Scythes**, Errance, 2011.

I. Lebedynsky, **Scythes, Sarmates et Slaves**, L'Harmattan, 2009.

**L'ESSENTIEL**

- > Après la Seconde Guerre mondiale, les États-Unis cherchèrent à s'assurer le contrôle de l'uranium mondial.
- > En espionnant les recherches atomiques françaises, ils apprirent que de l'uranium avait été détecté au Maroc.
- > En échange des techniques qu'ils avaient développées pour

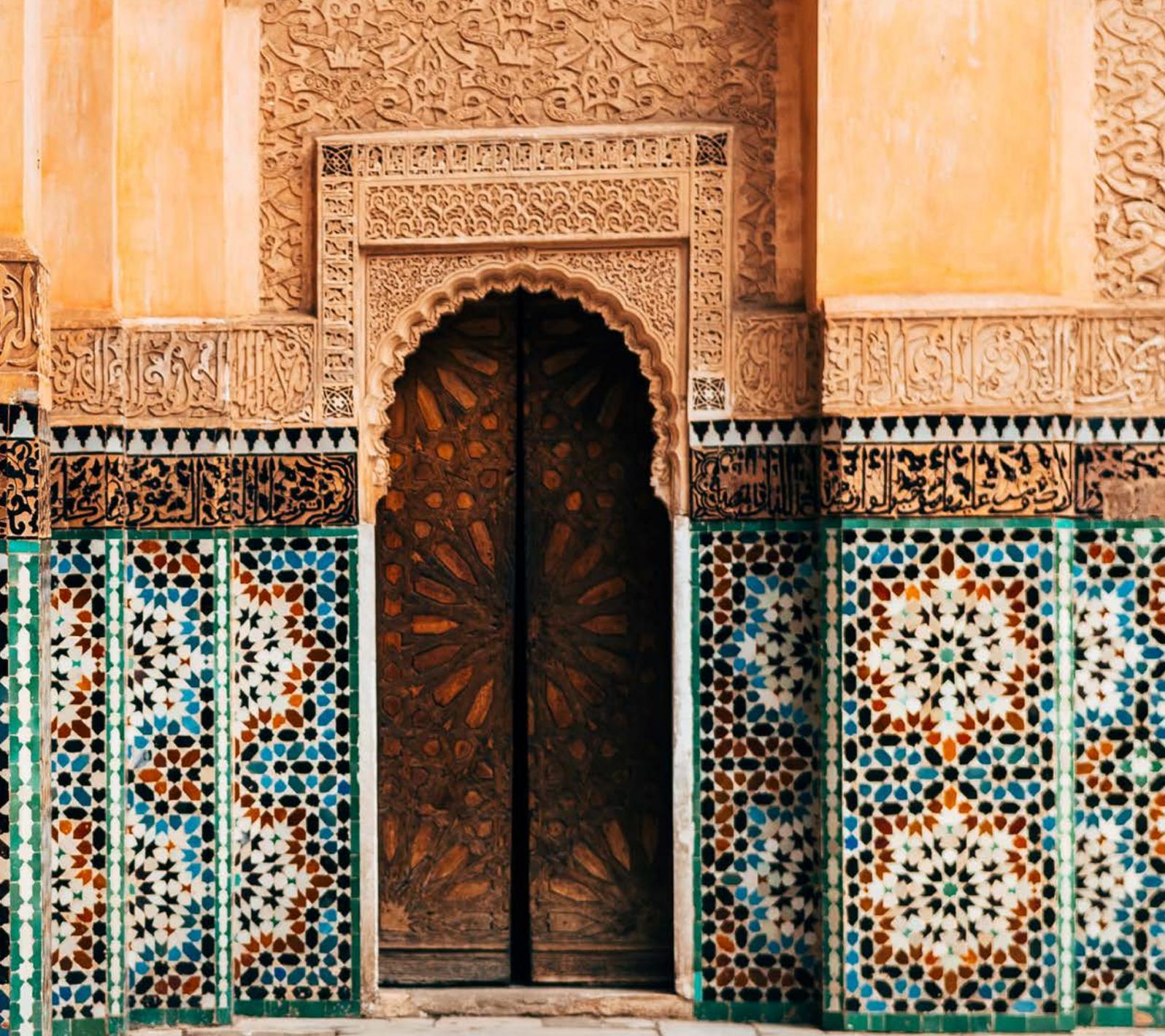
concentrer l'uranium issu des gisements, ils conclurent un accord secret avec la France pour prospector ensemble au Maroc.

> Mais la soif grandissante d'indépendance du peuple marocain et les particularités géologiques du pays en décidèrent autrement.

**L'AUTEUR**



**MATTHEW ADAMSON**  
professeur d'histoire  
au McDaniel College  
Budapest, en Hongrie



# **GUERRE FROIDE**

# **La course à l'uranium**

# **marocain**

Dans les années 1950, la France et les États-Unis conclurent un pacte secret visant à s'approprier les réserves d'uranium du Maroc. Mais rien ne se passa comme prévu...

**W**ashington, octobre 1939. Le président Franklin Roosevelt reçoit une lettre qui va changer le monde.

Les deux éminents physiciens Albert Einstein et Leó Szilárd y alertent le dirigeant américain des dangers d'une récente découverte: la fission nucléaire de l'uranium. La missive fut le point de départ du projet Manhattan. Mais elle anticipait plus que l'avènement des bombes atomiques et d'une nouvelle source d'énergie. La principale inquiétude de ses deux auteurs concernait l'approvisionnement des États-Unis en minerai d'uranium. Ils redoutaient que la majorité des réserves connues tombent entre les mains des nazis, ce qui aurait conféré aux forces de l'Axe le monopole de la fission nucléaire et de sa puissance potentielle.

La lettre d'Einstein et de Szilárd constitue l'acte de naissance d'une obsession pour l'uranium qui a longtemps hanté l'administration américaine. Elle conduisit le pays à explorer l'Ouest américain tous azimuts à la recherche d'éléments radioactifs, mais aussi à mener une guerre feutrée à la fois diplomatique et scientifique afin de s'assurer le contrôle des gisements mondiaux d'uranium – peu importe que cette ambition exige le recrutement d'agents infiltrés sur le terrain, la signature d'accords secrets avec des pays rivaux et la création d'entreprises servant de façades.

L'une de ces sociétés, la Société marocaine de recherches et d'études minières (Somarem), a fouillé le sol et les sables du Maroc de 1953 à 1955. Même si ses opérations de prospection se sont révélées infructueuses, la Somarem a été utile à ses deux pays géneurs, les États-Unis et la France. Tous deux ont tiré de cette expérience des leçons géophysiques et géopolitiques toujours pertinentes aujourd'hui.

## CONTRÔLER L'URANIUM MONDIAL

En 1945, les attaques sur Hiroshima et Nagasaki ont conféré un rôle stratégique à l'uranium. Alors que s'achevait la Seconde Guerre mondiale, une autre débuta, celle de l'approvisionnement en matière fissile. Avec l'aide de la Grande-Bretagne et du Canada, les États-Unis cherchèrent à s'assurer le contrôle de l'uranium mondial. À l'époque, les géologues considéraient l'uranium comme une ressource rare. Ils n'avaient répertorié que trois gisements avec des concentrations élevées de cet élément: la mine de Shinkolobwe au Congo belge, celle de Joachimsthal en Tchécoslovaquie et Port Radium au Canada. Des recherches secrètes menées en temps de guerre avaient montré que les schistes et les sables bitumineux (des roches renfermant une partie plus ou moins importante

de substances organiques) pouvaient aussi contenir de l'uranium. En dépit de ces informations, selon l'avis général des géologues américains, la rareté des gisements d'uranium justifiait l'espoir de les contrôler tous.

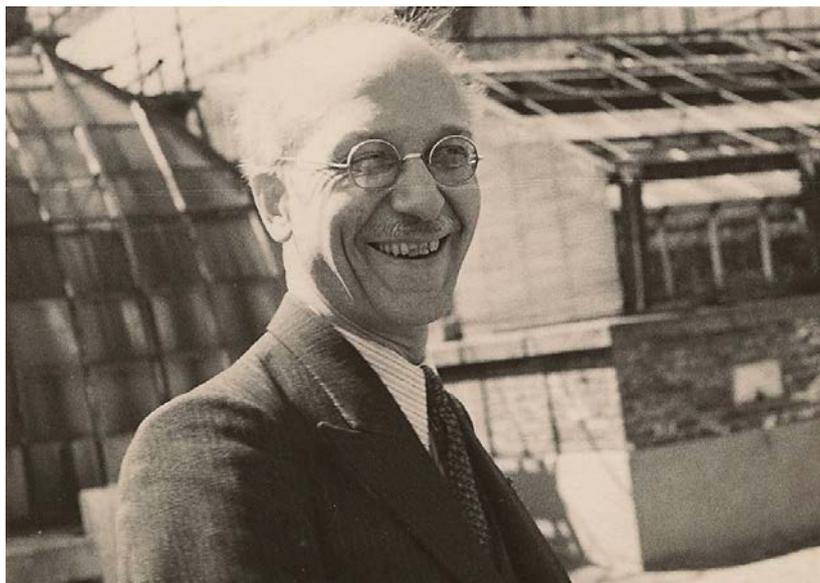
Les États-Unis n'étaient pas les seuls à chercher à s'approvisionner en uranium. L'URSS, parce qu'elle venait de se lancer dans la course atomique, était bien entendu sur les rangs, mais les Américains devaient aussi compter avec leurs anciens alliés, dont certains démarraient leur propre programme nucléaire. En particulier la France. En octobre 1945, le gouvernement provisoire de Charles de Gaulle créa par décret le Commissariat à l'énergie atomique (CEA). Sa mission? Développer l'énergie et les technologies nucléaires, dont l'arme atomique.

Le CEA s'attela à la tâche avec entrain. L'un de ses premiers objectifs était de localiser un gisement d'uranium pour l'approvisionnement du nouveau programme nucléaire français. Au cours des cinq premières années de l'organisme, presque la moitié de son modeste budget finança la prospection et l'exploitation minière, notamment la création de sections spécifiques à l'exploration géologique, au forage et à la minéralogie. Des fonctionnaires du CEA partaient étudier des roches dans le Massif central ou dans les colonies françaises dans l'espoir d'y découvrir le précieux minerai.

Des agents américains suivaient discrètement les prospecteurs français. Non seulement la Commission de l'énergie atomique des États-Unis (AEC) surveillait étroitement leurs missions, mais le ministère américain des Affaires étrangères était lui-même impliqué dans ces actes d'espionnage. En fait, Washington était à l'écoute de tout ce qui concernait l'uranium. Des

Entre 1953 et 1955, la Somarem prospecta dans plusieurs régions du Maroc, tant dans des mines de l'Atlas que dans les gisements de phosphates des plaines.





En 1945, le minéralogiste français Jean Orcel (ici en 1947 au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris) découvrit au Maroc un minéral contenant de l'uranium. Il encouragea alors le programme atomique français à lancer une prospection dans la région.

compteurs Geiger avaient été distribués à ses ambassades et consulats du monde entier. Pierre angulaire du dispositif, l'ambassade américaine à Paris était devenue une station de transit pour les minerais. Elle recueillait les échantillons provenant de l'ancien programme allemand de guerre et rapportés de missions menées en France, en Europe occidentale et ailleurs. Ceux qui se révélaient hautement radioactifs traversaient l'Atlantique et atterrirent au laboratoire de l'AEC, à New Brunswick, dans le New Jersey.

Décidés à maîtriser les flux mondiaux d'uranium, les États-Unis étaient prêts à contrer les ambitions de tout programme d'approvisionnement rival, même d'un pays ami comme la France. En 1950, nanti d'un petit stock d'uranium d'avant-guerre et de gisements prometteurs découverts dans le centre de la France, le CEA s'appêtait à signer un accord avec la Norvège pour lui fournir de l'uranium. Ce contrat aurait permis aux Français d'accéder aux réserves d'eau lourde de la Norvège (richement dotée en hydroélectricité, la

Norvège était l'unique pays capable de produire de l'eau lourde en grosses quantités) et aurait posé la France en acteur atomique international. Mais les responsables américains eurent vent de l'accord et intervinrent. Ils convainquirent leurs homologues britanniques d'offrir aux Norvégiens un stock d'uranium venant des Pays-Bas et maintinrent ainsi les Français à l'écart de l'accord.

## UN MINÉRAI JAUNE VERDÂTRE AU MAROC

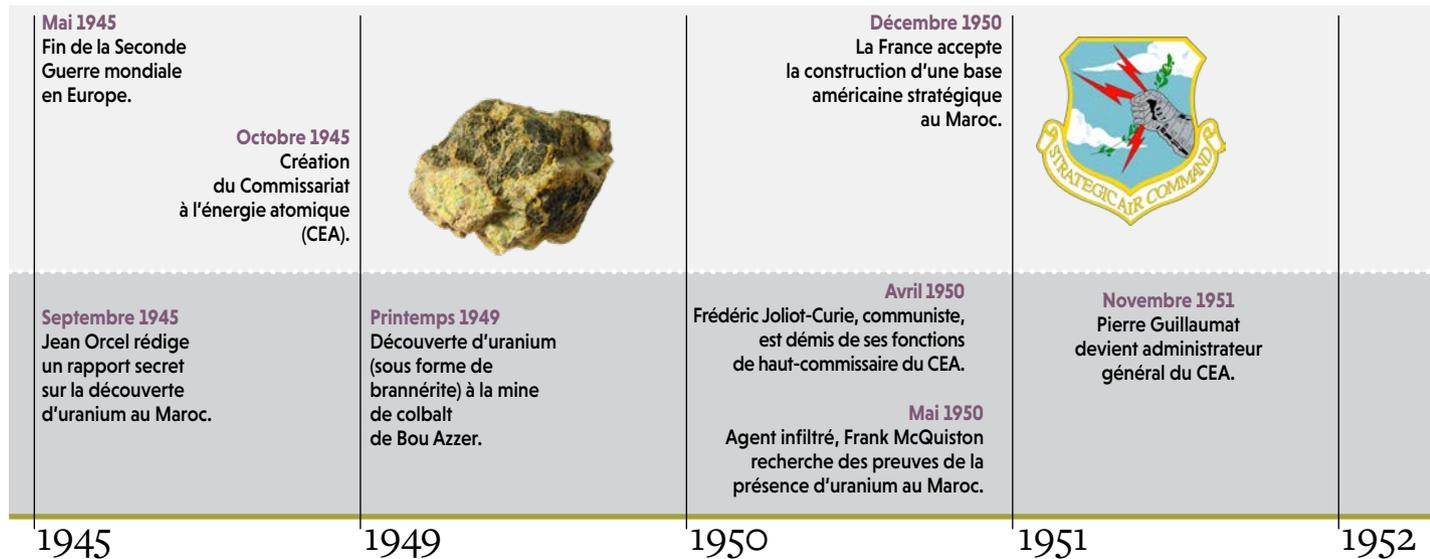
C'est Jean Orcel, un éminent minéralogiste du Muséum national d'histoire naturelle et principal consultant du CEA sur l'uranium, qui fut à l'origine de la décision française d'envoyer des prospecteurs au Maroc. Orcel connaissait bien le pays. En septembre 1945, il avait déposé à l'Académie des sciences un pli cacheté dans lequel il rapportait avoir découvert « un minéral jaune verdâtre, évoquant immédiatement l'idée d'un sel possible d'uranium » dans un lieu non spécifié du Maroc. Il n'en fallait pas plus pour lancer le CEA, tout juste créé, sur la piste de l'uranium marocain.

Mais une spécificité administrative allait entraver cette entreprise. Le traité de Fez de 1912 avait fait du pays un protectorat que la France traitait comme une colonie. Toutefois, techniquement, le sultan du Maroc dirigeait un État souverain. Cette semi-autonomie, que Mohammed V cultivait avec soin depuis la Seconde Guerre mondiale, suffisait à empêcher le CEA de s'arroger automatiquement le droit sur l'uranium marocain, comme dans les colonies françaises. Dans le protectorat marocain, l'uranium tombait dans la catégorie des métaux communs. Sur le plan juridique, la ressource la plus stratégique au monde relevait donc du commerce des biens ordinaires. En outre, le CEA était à court de financement : au cours des années 1940, il ne put envoyer qu'un seul géologue explorer le sous-sol marocain.

L'incapacité du CEA à exploiter la piste marocaine devint patente fin 1948, lorsque la compagnie minière de Bou Azzer, aidée des services miniers du protectorat, détecta des traces d'uranium dans une mine de cobalt située dans la chaîne de l'Anti-Atlas (*voir la carte page ci-contre*). Peu de temps après, des lentilles de pechblende furent trouvées dans la mine de molybdène d'Azegour, au sud-ouest de Marrakech. Le CEA envoya alors des renforts, espérant réunir assez d'agents pour explorer le pays entier.

Les États-Unis apprirent la découverte de Bou Azzer grâce à un géologue membre de l'Administration de la coopération économique – le bras administratif du plan Marshall. Discrètement, l'AEC envoya l'un de ses hommes à la pêche aux informations : Frank McQuiston Jr, un expert en métaux alors directeur adjoint >

Les États-Unis étaient prêts à contrer les ambitions d'un pays ami comme la France



> de la division des matières premières de l'AEC et consultant pour la Newmont Mining Corp. McQuiston avait vu la mine de Shinkolobwe, au Congo belge, et les gisements d'or du Witwatersrand, en Afrique du Sud, qui renfermaient de l'uranium. Il se rendit au Maroc sous prétexte de visiter la mine de zinc de Newmont, dans l'est du pays. Il confirma la présence de traces d'uranium dans les mines de cobalt et de molybdène, ainsi que dans les vastes gisements de phosphates de Khouribga. Il entendit aussi des rumeurs sur la présence d'uranium ailleurs dans le protectorat.

En 1951, de nouveaux rapports sur l'uranium marocain convainquirent l'AEC et le ministère américain des Affaires étrangères qu'il était temps d'avancer leurs pions au Maroc. Mais comment? La situation diplomatique était sensible. Non seulement la France avait déjà ses propres prospecteurs sur le terrain, mais le protectorat français revêtait une place grandissante dans la stratégie de guerre froide des États-Unis. En effet, un accord franco-américain signé en décembre 1950 autorisait l'US Air

Force à construire sur le sol marocain des bases stratégiques pour ses bombardiers, ce qui avait considérablement augmenté la présence militaire américaine dans la région.

Mais les États-Unis ne s'estimaient pas pour autant en terrain conquis. Depuis le déclenchement de la guerre de Corée en juin 1950, le maintien des alliances américaines avec l'Europe était devenu une priorité diplomatique. Les États-Unis avaient besoin de conserver la France comme alliée et la fragile IV<sup>e</sup> République (elle connut 21 gouvernements de 1946 à 1958) était une source constante de préoccupation. Washington voulait à tout prix éviter de déstabiliser la politique française, tiraillée entre la droite gaulliste et la gauche communiste. Envoyer des scientifiques américains à la recherche d'une ressource stratégique à l'intérieur même d'un protectorat français serait pris comme un affront par les deux bords.

## DES NÉGOCIATIONS SECRÈTES

Dans ce contexte, les États-Unis accueillirent comme une bonne nouvelle le remplacement de la tête pensante scientifique du CEA. Au communiste Frédéric Joliot-Curie succéda le politiquement modéré Francis Perrin (*voir la photo page 70*). Perrin et l'administrateur général du CEA, Pierre Guillaumat, clamèrent aussitôt leur intention de développer la production française d'uranium. Les Américains virent dans cette annonce une chance de coopérer à ne pas rater.

Le 11 février 1952, l'ambassadeur des États-Unis à Paris approcha le Premier ministre français pour ouvrir des négociations secrètes en vue d'un accord sur la recherche d'uranium au Maroc. Pourquoi entourer les pourparlers de tant de mystère? D'une part afin d'éviter que les forces politiques françaises, les gaullistes et les communistes en particulier, ne se mêlent aux

# Il confirma la présence de traces d'uranium dans les mines de cobalt et de molybdène

<p><b>Automne 1952</b> Mohammed V appelle à nouveau à la création d'une monarchie constitutionnelle.</p>	<p><b>Août 1953</b> La France exile Mohammed V à Madagascar. Des émeutes s'ensuivent.</p> <p><b>Décembre 1953</b> Le président américain Dwight Eisenhower annonce le programme <i>Atoms for Peace</i>.</p>	<p><b>1954</b> Les actes nationalistes se multiplient au Maroc. Des représentants de l'État colonial et des bâtiments sont visés.</p>	<p><b>20 août 1955</b> Soulèvement à Oued Zem. Les violences contre les colons français s'intensifient.</p> <p><b>Novembre 1955</b> Retour d'exil de Mohammed V.</p>	<p><b>Mars 1956</b> Le Royaume du Maroc accède à l'indépendance.</p> 	<b>ÉVÉNEMENTS POLITIQUES</b>
<p><b>Février 1952</b> Les États-Unis et la France entament des négociations pour chercher ensemble de l'uranium au Maroc.</p>	<p><b>Mars 1953</b> La France et les États-Unis signent un accord secret pour la prospection d'uranium au Maroc.</p> <p><b>Fin 1953</b> Premières recherches des géologues de la Somarem dans la vallée de Moulouya.</p>	 <p><b>Fin 1954 / début 1955</b> La Somarem poursuit la prospection et mène des reconnaissances aériennes.</p>	<p><b>Automne 1955</b> La Somarem suspend ses activités.</p> <p><b>Fin 1955</b> Les géologues de la Somarem quittent le Maroc.</p>		
<b>1953</b>	<b>1954</b>	<b>1955</b>	<b>1956</b>		

négociations. D'autre part, les Américains, qui redoutaient de passer pour des traîtres aux yeux de leurs alliés britanniques, ne souhaitaient pas révéler qu'ils sortaient du cadre habituel de l'alliance américano-britanno-canadienne pour surveiller et contrôler les ressources d'uranium.

L'écriture de l'accord se révéla une tâche d'équilibriste. Un partenariat au Maroc ne consistait pas simplement à demander à des scientifiques de programmes rivaux de collaborer ensemble. Les États-Unis craignaient deux écueils : que les négociations fassent chanceler la IV<sup>e</sup> République française et qu'elles enflamment le sentiment nationaliste marocain contre les Américains eux-mêmes à un moment où la présence américaine au Maroc grandissait chaque jour.

S'ensuivit une négociation d'un an impliquant scientifiques, ingénieurs, technocrates et diplomates. McQuiston, l'expert en métaux qui avait joué les 007, fit miroiter à Guillaumat et d'autres responsables français des techniques de concentration chimique que les Américains étaient disposés à partager. La promesse d'un accès futur à ce que le ministère français des Affaires étrangères décrivit comme « des techniques secrètes jalousement gardées par les Américains » persuada la France de l'importance stratégique du Maroc pour les Américains. Les responsables français exprimèrent leur conviction que les intérêts américains au Maroc (la prospection secrète d'uranium étant explicitement citée) renforçaient la position de la France vis-à-vis de son protectorat, « la présence de la France étant garante de l'ordre et de la sécurité dans le pays ».

Une vraie lune de miel. En apparence... Car les responsables américains étaient loin de cautionner la gestion française des affaires marocaines. Un épisode récent avait déplu aux Américains : le passage en force de réformes

pro-françaises au cours de l'été 1952. Ces réformes, obtenues grâce à l'intervention de l'armée, accordaient aux résidents français des pouvoirs civiques dans un pays où ils étaient légalement étrangers. L'épisode avait humilié le sultan, fâché le peuple marocain et déçu les Américains, qui espéraient voir le pays se diriger vers l'autonomie.

Toutefois, pour l'administration américaine, la stabilité stratégique – et le marché de l'uranium – primait devant les réformes politiques. Quand Thami El Glaoui, un riche homme d'affaires de Marrakech ayant des intérêts dans l'agriculture et le secteur minier, apprit la découverte d'uranium dans une de ses mines, il demanda aux responsables de l'AEC d'envoyer sur place des géologues. Mais les agents américains refusèrent immédiatement – l'émergence de potentats locaux vendant de l'uranium au plus offrant était la dernière chose qu'ils désiraient encourager (en outre, Thami El Glaoui était un rival du sultan). La géopolitique du Maroc et le devenir d'une grande partie de son combustible nucléaire reposaient dorénavant sur l'accord passé avec les Français.

## UNE SOCIÉTÉ FAÇADE

L'accord secret liant Américains et Français entra en vigueur le 2 mars 1953. Deux mois plus tard, le *Bulletin Officiel* du Maroc annonçait la création de la Somarem, une société privée dédiée à « la prospection et la recherche de tous les gisements métallifères et, plus généralement, de tous les gisements minéraux ». Pas un mot sur l'uranium. Les véritables agissements de la Somarem derrière cette façade publique n'étaient connus que d'une poignée de fonctionnaires travaillant à l'AEC, aux ministères américain et français des Affaires étrangères et au CEA.

Le conseil d'administration de la Somarem et ses actionnaires furent choisis parmi les >

> fonctionnaires du CEA et de divers bureaux miniers du protectorat – aucun investisseur ou entrepreneur du secteur minier n'y figuraient. Un «comité de gestion» secret composé de trois personnes – représentant l'AEC, le CEA et le Maroc – garantissait l'influence des États-Unis. L'AEC assurait la majorité du financement. Le minerai d'uranium extrait des gisements serait divisé en parts variables, celle dévolue à l'AEC devant croître au fil des découvertes.

Les nouveaux partenaires étaient impatients de commencer. En avril, une mission préliminaire amena les géologues américains et français à Azegour, Bou Azzer et dans la haute vallée de la Moulouya, au nord de Midelt. L'été, l'air marocain devenait une fournaise. Les conditions climatiques dictèrent le déroulement des opérations: la prospection commencerait à l'automne et se prolongerait pendant l'hiver et le printemps, tandis que l'été serait consacré à la comptabilité et à la prospection dans les régions plus fraîches du Haut Atlas.

## DANS LES MONTAGNES DE L'ATLAS

La recherche était difficile en raison de la rareté de l'uranium. Au Maroc, seuls certains granites et des roches à scheelite (un tungstate de calcium) étaient connus pour renfermer le précieux élément. Et même si des phosphates de la région orientale de Khouribga contenaient des minéraux d'uranium, il ne s'agissait que de traces: la concentration en uranium n'y dépassait pas les 0,03-0,05%, alors que le seuil de rentabilité avait été fixé à 0,1%. Certes, les teneurs augmentaient à mesure que les géologues descendaient vers le sud, mais elles demeuraient insuffisantes pour permettre l'extraction.

Les troubles politiques ne facilitaient pas la tâche des prospecteurs. Tandis que la coopération entre géologues français et américains débutait, le gouvernement français ignora les conseils des diplomates américains. En août 1953, il envoya Mohammed V en exil et installa sur le trône un homme plus conciliant. L'acte d'ingérence indigna les Marocains. Une lutte sanglante opposa les révolutionnaires aux autorités coloniales, tandis que des milliers de radios étaient vendues pour capter les émissions dissidentes du Caire.

Les responsables américains ne prirent pas la peine d'informer les dirigeants marocains qu'ils désapprouvaient l'attitude française. Au conseil de sécurité des Nations unies, ils votèrent contre l'ouverture d'une enquête sur l'incident. Il y a tout lieu de penser que la recherche secrète de l'uranium était derrière cette réaction américaine. En novembre 1953, lorsque le secrétaire d'État américain, John Foster Dulles, déclara que «la transition ordonnée du statut colonial à l'autonomie

gouvernementale devrait être résolument menée à terme», les Français furent assurés en privé que ces paroles ne relevaient que de la communication publique. Après tout, un même effort secret de prospection liait Français et Américains, avec peut-être à la clé des retombées stratégiques énormes...

La prospection débuta à l'automne 1953 avec trois équipes: deux au sol munies de jeeps et une troisième embarquée à bord d'un petit coucou, un Piper Super Cub. Lorsqu'ils n'étaient pas sur le terrain, les prospecteurs vivaient dans la capitale, Rabat, où la Somarem disposait de bureaux, de logements, d'un laboratoire minéralogique, d'un atelier et d'un garage. Au cours de cette première campagne de 1953-54, les équipes – qui comprenaient toujours au moins un membre américain, selon l'accord de mars 1953 – poursuivirent le travail entamé le printemps précédent dans la haute vallée de la Moulouya. Elles lancèrent aussi l'exploration de la chaîne de l'Anti-Atlas. Le bilan de la campagne se révéla mitigé: malgré de nombreuses pistes prometteuses, aucun gisement ne fut jugé exploitable dans l'immédiat.

Les Américains des trois équipes apportaient aux Français des compétences qui leur faisaient défaut. Un géologue du nom de Royal Stuart Foote, un spécialiste de la prospection d'uranium vue du ciel qui avait inventé un dispositif de détection par rayons gamma adapté aux formations sédimentaires, dirigeait l'équipe aéroportée. John Beall était un ingénieur expérimenté de l'extraction minière et un spécialiste des phosphates. D'autres géologues américains, experts des nombreuses associations métal-uranium que recèle le sous-sol du sud-ouest des États-Unis, participaient à la campagne. Les géologues et ingénieurs du CEA profitèrent également de l'expérience de leurs collègues

Trois fervents défenseurs de la recherche d'uranium au Maroc, réunis le 30 mars 1956 à Saclay: de gauche à droite, le physicien Francis Perrin, haut-commissaire du CEA, Georges Guille, ministre en charge de l'Énergie atomique, et Pierre Guillaumat, administrateur général du CEA.



Cet article est adapté de M. Adamson, *The secret search for uranium in cold war Morocco*, *Physics Today*, vol. 70(6), pp. 54-60, 2017, avec la permission de AIP Publishing. Publication elle-même adaptée de M. Adamson, *BJHS*, vol. 49(1), pp. 79-105, 2016. © The British Society for the History of Science, avec l'autorisation de Cambridge University Press.

américains lors d'un voyage transatlantique qui les mena aux gisements sédimentaires d'uranium du Colorado et de l'Utah. Le voyage enrichit considérablement leurs connaissances sur les dépôts d'uranium. Les géologues américains avaient en effet découvert que ces gisements étaient plus variés, plus répandus et plus facilement exploitables qu'on ne le pensait.

Lors de la seconde campagne, en 1954, deux équipes au sol s'ajoutèrent au dispositif. La Somarem se félicitait d'une collaboration «très honnête et efficace» entre ses divers agents en dépit de la diversité des langues et des origines. La saison de prospection poursuivait en partie les recherches précédentes. On reprit l'examen du grès permotriasique d'Argana, dans les parties occidentales du Haut Atlas, ainsi que les tests conduits à Choukrane sur le versant sud des champs de phosphate. Simultanément, d'autres équipes exploraient plus au sud et à l'ouest. Une veine de quartz se révéla particulièrement intéressante. Elle cisailait les grès de l'Ordovicien à Cheib er Ras, au nord-ouest de Taouz. On commença immédiatement à y forer. Hélas, en dépit

## Le taux d'uranium ne dépassait pas 0,03-0,05% alors qu'il fallait 0,1% pour être rentable

de cette trouvaille et des 25 permis de recherche distincts que revendiquait désormais la Somarem, aucun gisement d'importance commerciale n'avait été découvert. La désillusion guettait l'AEC, qui spéculait encore sur l'existence d'une éventuelle province uranifère.

Pendant ce temps, la situation au Maroc se détériorait. Les violences s'étaient intensifiées au cours de l'année 1954. Des colons français avaient été assassinés et des grèves paralysaient des secteurs vitaux de l'industrie. La montée des tensions écorchait chaque jour un peu plus l'image de la France, semant le doute chez les Américains sur la pertinence de la Somarem comme symbole de l'unité franco-américaine. Un changement radical de la politique atomique américaine sonna le glas de la société.

À l'ONU, en décembre 1953, le président américain Dwight Eisenhower proposa que les

puissances atomiques créent un stock de matière fissile destinée à des utilisations pacifiques – un programme connu sous le nom d'*Atoms for Peace*. Son discours représenta un changement majeur dans la politique nucléaire américaine. Pour la première fois, des amendements à la loi McMahon – une loi de 1946 qui plaçait le développement des technologies nucléaires sous contrôle strict de l'État – autorisaient l'AEC à céder de la matière fissile à des États amis. Durant les années de l'après-guerre, les scientifiques avaient appris que l'uranium était plus répandu qu'ils ne l'avaient d'abord pensé. En outre, le développement de nouvelles techniques de concentration chimique rendait désormais possible l'exploitation de gisements à plus faible teneur en uranium. En Afrique du Sud, par exemple, avait été construite la première usine de purification d'uranium par échange d'ions. Enfin, des programmes atomiques rivaux de plus en plus puissants émergeaient, comme celui de la France.

Dans ces conditions, espérer maîtriser les ressources mondiales en uranium ou, du moins, empêcher les autres d'y accéder, devenait obsolète. En conséquence, les États-Unis changèrent leur stratégie. Ils cherchaient dorénavant à établir des échanges favorables avec des pays amis afin de promouvoir les techniques américaines et l'usage pacifique de l'énergie nucléaire. La politique des États-Unis vis-à-vis du nord-ouest de l'Afrique s'infléchit elle aussi. Les nouveaux enjeux consistaient à sécuriser autant que possible les bases aériennes du commandement de l'US Air Force en charge des bombardements stratégiques, à priver l'URSS de ressources stratégiques et à nouer des relations amicales avec les pays en voie d'indépendance, quitte à fouler l'ego post-colonial de la France. En résumé, chercher de l'uranium au Maroc n'était plus une priorité.

### LA FIN DE LA SOMAREM

On peut même se demander si, début 1955, les agents français et américains de la Somarem voulaient vraiment trouver de l'uranium. Le caractère précipité de la dernière campagne de prospection suggère que les alliés occidentaux espéraient seulement vérifier l'absence d'uranium facilement exploitable au Maroc. Les instructions pour mener des campagnes de prospection détaillée dans des zones limitées devinrent, sur le terrain, de vastes reconnaissances régionales conduites à la fois au sol et dans les airs. Les géologues de la Somarem détectèrent de nombreuses zones d'anomalies et la présence d'uranium dans de nouvelles régions et de nouveaux types de roches, mais rien d'exploitable à leur sens.

La violence dans le protectorat culmina en 1955 avec l'attaque brutale de nationalistes contre une communauté agricole coloniale à >

► Oued Zem, qui provoqua une riposte militaire tout aussi brutale. Les géologues de la Somarem constituaient eux aussi des cibles potentielles et commençait à être rapatriés. Les observateurs américains pensaient que le Maroc se dirigeait vers une guerre civile à l'image de celle qui embrasait son voisin, l'Algérie, et que cela aboutirait à l'indépendance du pays. Compte tenu des nouveaux objectifs américains au nord-ouest de l'Afrique, la Somarem était désormais plus un handicap qu'un atout. Ses activités furent suspendues. Fin 1955, l'aventure géologique franco-américaine était terminée. Les géologues des deux pays quittèrent discrètement le Maroc; l'entreprise vendit ses ateliers et ses laboratoires, et mit en location ses jeeps et son avion.

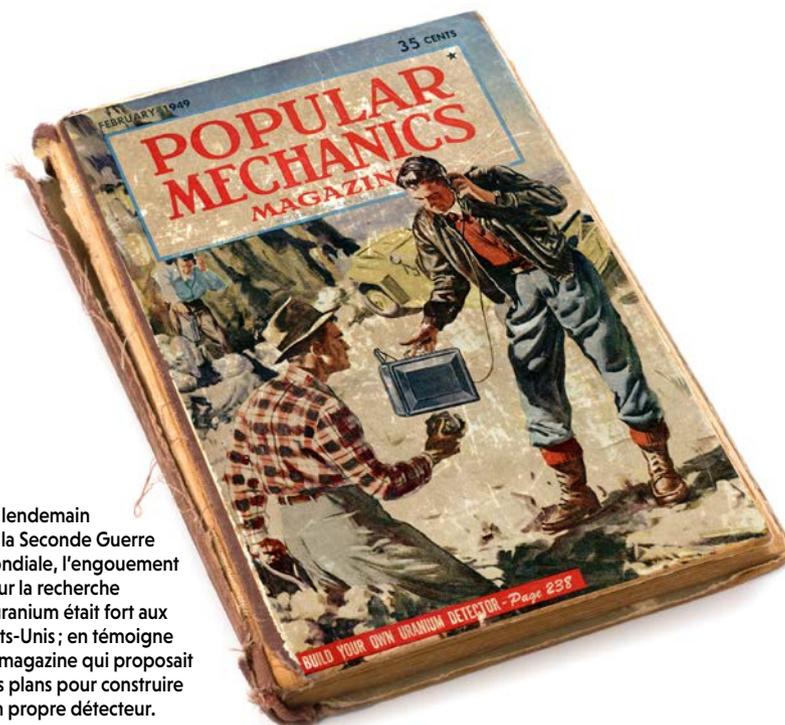
## LA CONQUÊTE DE L'URANIUM DANS LE RESTE DE L'AFRIQUE

L'arrêt des activités de la Somarem ne signa pas pour autant la fin de l'intérêt occidental pour l'uranium africain. Au contraire, les États-Unis continuèrent de collecter des informations sur l'uranium des régions situées à l'ouest et au sud du Sahara. Quant à la France, elle menait ses propres prospections dans le nord et le centre de l'Afrique. À l'aide des techniques radiométriques aéroportées apprises des Américains, ses ingénieurs explorèrent le désert algérien, puis découvrirent un gisement notable au Gabon et, la décennie suivante, un autre encore plus impressionnant au Niger.

En novembre 1955, Mohammed V revint dans son pays en triomphe et le Maroc accéda à l'indépendance. La recherche de l'uranium sur le territoire héritait maintenant au royaume. Incapable de mener seul ces opérations, le Maroc s'adressa à la communauté internationale. Entre 1960 et 1985, l'Agence internationale de l'énergie atomique mena huit missions d'assistance technique visant à aider le pays à prospecter l'uranium. Les équipes traversaient souvent les mêmes terrains déjà couverts par la Somarem et s'appuyaient sur ses rapports. Cependant, malgré les nombreuses nouvelles techniques mises en œuvre, dont la spectroscopie à rayons gamma et la fluorimétrie, les résultats furent les mêmes: de l'uranium était présent à maints endroits, mais en concentration insuffisante pour une exploitation économiquement viable.

Néanmoins, le Maroc a retenu deux leçons de ces échecs. D'une part, ses gisements prendraient probablement de la valeur avec le développement de l'énergie nucléaire. D'autre part, le minerai a une valeur stratégique: la prospection d'uranium peut servir à un pays pour affirmer sa souveraineté. En 1975, agissant à son tour de façon provocatrice, le royaume envoya des milliers de sujets et de soldats de l'autre côté de sa frontière méridionale afin de

Au lendemain de la Seconde Guerre mondiale, l'engouement pour la recherche d'uranium était fort aux États-Unis; en témoignent ce magazine qui proposait des plans pour construire son propre détecteur.



s'emparer du territoire espagnol du Sahara occidental. La région, théâtre d'incessants combats de la guérilla et de missions de l'ONU, est toujours en conflit aujourd'hui. Il y a quelques années, à la suite de campagnes de prospection aéroportées, le Maroc a notamment tenté d'attirer des intérêts étrangers dans le Sahara occidental afin qu'ils y recherchent de l'uranium et lui fournissent ainsi une meilleure vision géopolitique de la région.

Aujourd'hui, à l'approche du 80<sup>e</sup> anniversaire de la lettre d'Einstein et Szilárd, le statut de l'uranium a considérablement changé. Grâce au travail de milliers de géologues, géophysiciens, géochimistes, minéralogistes, experts en métaux, prospecteurs et diplomates du monde entier, on a compris que l'uranium est un élément en réalité largement répandu. Il est disponible sous de nombreuses formes et dans de nombreux endroits du globe, prêt à être enrichi dès que le nucléaire aura le vent en poupe.

Les gisements du Maroc se sont peut-être révélés d'un intérêt faible, mais l'histoire de leur prospection rappelle que le rôle de l'uranium n'a jamais été et ne sera jamais purement économique. L'importance stratégique et symbolique de la ressource demeure d'une brûlante actualité. L'historienne américaine Gabrielle Hecht a montré le rôle clé de l'uranium dans la préparation de l'invasion de l'Iraq en 2003 par les États-Unis. Et ceux qui doutent encore de l'intérêt géopolitique de l'uranium ont juste à s'arrêter en Corée du Nord et en Iran, deux pays disposant de leurs propres ressources uranifères. Quant aux minerais marocains, même s'ils dorment toujours, ils conservent toute leur valeur stratégique. ■

## BIBLIOGRAPHIE

M. Adamson, **Les liaisons dangereuses : ressource surveillance, uranium diplomacy and secret French-American collaboration in 1950s Morocco**, *BJHS*, vol. 49(1), pp. 79-105, 2016.

M. Adamson et al., **The Surveillance Imperative : Geosciences During the Cold War and Beyond**, Palgrave Macmillan, 2014.

G. Hecht, **Being Nuclear : Africans and the Global Uranium Trade**, MIT Press, 2012.

L. Helmreich, **Gathering Rare Ores : The Diplomacy of Uranium Acquisition**, Princeton University Press, 1986.

COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION DÈS MAINTENANT!



N° 488 (juin 18)  
réf. PL488



N° 487 (mai 18)  
réf. PL487



N° 486 (avril 18)  
réf. PL486



N° 485 (mars 18)  
réf. PL485



N° 484 (févr. 18)  
réf. PL484



N° 483 (janv. 18)  
réf. PL483



N° 482 (déc. 17)  
réf. PL482



N° 481 (nov. 17)  
réf. PL481



N° 480 (oct. 17)  
réf. PL480



N° 479 (sept. 17)  
réf. PL479



N° 478 (août 17)  
réf. PL478



N° 477 (juil.17)  
réf. PL477



À retourner accompagné de votre règlement à :

Pour la Science – Service VPC – 19 rue de l'Industrie – BP 90053 – 67402 Illkirch Cedex – email : pourlascience@abopress.fr



**OUI**, je commande des numéros de **Pour la Science**, au tarif unitaire de 9,90 €.

**1 / JE REPORTE CI-DESSOUS LES RÉFÉRENCES** à 5 chiffres correspondant aux numéros commandés :

1<sup>er</sup> réf. \_\_\_\_\_ x 9,90 € = 9,90 €

2<sup>e</sup> réf. \_\_\_\_\_ x 9,90 € = \_\_\_\_\_ €

3<sup>e</sup> réf. \_\_\_\_\_ x 9,90 € = \_\_\_\_\_ €

4<sup>e</sup> réf. \_\_\_\_\_ x 9,90 € = \_\_\_\_\_ €

5<sup>e</sup> réf. \_\_\_\_\_ x 9,90 € = \_\_\_\_\_ €

6<sup>e</sup> réf. \_\_\_\_\_ x 9,90 € = \_\_\_\_\_ €

**TOTAL À RÉGLER** \_\_\_\_\_ €

Groupe Pour la Science – Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris Cedex 14 – Sarl au capital de 32000 € – RCS Paris B 311 797 393 – Siret : 311 797 393 000 23 – APE 5814 Z

Offre valable jusqu'au 31/12/2018 en France Métropolitaine uniquement. Pour l'export, rendez-vous sur notre site internet boutique.pourlascience.fr. Les prix affichés incluent les frais de port et les frais logistiques. 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.

**2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES**

M.  Mme

Nom : \_\_\_\_\_

Prénom : \_\_\_\_\_

Adresse : \_\_\_\_\_

Code postal \_\_\_\_\_ Ville : \_\_\_\_\_

Téléphone \_\_\_\_\_

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

**3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT**

Par chèque à l'ordre de Pour la Science

Carte bancaire

N° \_\_\_\_\_

Date d'expiration \_\_\_\_\_

Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB) \_\_\_\_\_

**Signature obligatoire :**



**RETROUVEZ TOUS LES ANCIENS NUMÉROS SUR BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR**

# R

## ENDEZ-VOUS

P.74 Logique & calcul  
 P.80 Art & science  
 P.82 Idées de physique  
 P.86 Science & fiction  
 P.92 Chroniques de l'évolution  
 P.96 Science & gastronomie  
 P.98 À picorer

# UNE EXPLICATION POUR LA LOI DE BENFORD

La loi de Benford, qui porte sur le premier chiffre significatif des nombres, a perdu de son mystère. Parallèlement, elle a été généralisée et, ainsi, a gagné en efficacité pour détecter des données frauduleuses.

## L'AUTEUR



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

**L**a loi de Benford ou «loi du premier chiffre significatif» n'en finit pas de troubler, d'intéresser et de susciter des travaux et des applications. Plus de 130 articles scientifiques ont été publiés sur le sujet ces cinq dernières années (voir <http://www.benfordonline.net>).

Certains la trouvent mystérieuse, alors que d'autres croient en comprendre la nature et en proposent des explications. Elle a été généralisée et utilisée pour effectuer des tests et repérer des fraudes. Nous présenterons quelques-unes des idées récentes sur ce sujet étrange et passionnant.

## LA LOI DU PREMIER CHIFFRE

Les nombres que l'on rencontre pour mesurer la population des villes, les distances entre étoiles ou les prix apparaissant sur les produits d'un grand supermarché montrent une propriété surprenante. Dans ces séries, la proportion de nombres dont le premier chiffre significatif est 1 est supérieure à la proportion de nombres dont le premier chiffre significatif est 2, elle-même supérieure à la proportion de nombres dont le premier chiffre significatif est 3, et ainsi de suite.

La loi du premier chiffre significatif indique précisément que dans un contexte général, et sans raisons particulières opposées, les probabilités de rencontrer les différents chiffres en tête des nombres sont respectivement :

$p(1) = 30,1\%$ ,  $p(2) = 17,6\%$ ,  $p(3) = 12,5\%$ ,  
 $p(4) = 9,7\%$ ,  $p(5) = 7,9\%$ ,  $p(6) = 6,7\%$ ,  $p(7) = 5,8\%$ ,  
 $p(8) = 5,1\%$ ,  $p(9) = 4,6\%$ .

Bien qu'aujourd'hui désignée sous le nom de loi de Benford, cette loi a été formulée la première fois par l'astronome canadien Simon Newcomb en 1881. Il avait remarqué que les premières pages des tables de logarithmes étaient plus abîmées que les suivantes. Son article fut ignoré jusqu'à ce que, 57 ans plus tard, le physicien américain Frank Benford remarquât lui aussi l'usure inégale des pages des tables numériques. Les articles de Newcomb et de Benford proposent la même formule: la probabilité de rencontrer le chiffre  $c$  comme premier chiffre d'un nombre est d'après eux  $\log_{10}(c+1) - \log_{10}(c)$ , où le logarithme utilisé est le logarithme décimal qui, rappelons-le, vérifie :

$$\begin{aligned} \log_{10}(1) &= 0; \\ \log_{10}(10^n) &= n \text{ pour } n \text{ entier}; \\ \log_{10}(ab) &= \log_{10}(a) + \log_{10}(b); \\ \log_{10}(a/b) &= \log_{10}(a) - \log_{10}(b). \end{aligned}$$

Toutes les séries statistiques ne vérifient pas cette loi de Benford. La taille d'un humain adulte mesurée en centimètres commence, à de rares exceptions près, par 1 et ne la vérifie donc pas. De même, les plaques d'immatriculation des véhicules automobiles ont des numéros qui, dans chaque pays, sont le plus souvent bien répartis: autant de numéros commençant par 1, que par 2, etc. Pour que la loi se manifeste, il semble nécessaire que les nombres de la série envisagée prennent des valeurs variant sur plusieurs ordres de grandeur (c'est le cas des tailles des villes), et qu'ils soient assez régulièrement espacés (voir l'encadré 1 pour d'autres détails).

Pour certaines suites numériques, la loi de Benford n'est pas conjecturée, mais prouvée.



Jean-Paul Delahaye  
 a récemment publié:  
**Le fabuleux  
 nombre  $\pi$**   
 (Belin, 2018).

## LES SÉRIES NUMÉRIQUES DE BENFORD ET SA LOI

# 1

Simon Newcomb, véritable inventeur de la loi dite aujourd'hui de Benford, qu'il a formulée en 1881, était un astronome, mathématicien, économiste et statisticien né au Canada. Il a été professeur de mathématiques et d'astronomie à l'université Johns-Hopkins et fut éditeur de l'*American Journal of Mathematics*. En plus de l'anglais, il parlait le français, l'allemand, l'italien et le suédois. Il était aussi alpiniste, a publié plusieurs ouvrages de vulgarisation scientifique et un roman de science-fiction.

Dans son article de 1938, Franck Benford prend 20 séries de nombres (longueurs de rivière, surfaces géographiques, séries mathématiques, tables de mortalité, etc.) et calcule pour chacune la proportion de nombres commençant par 1, par 2, etc. Toutes les séries suivent à peu près la loi qu'il énonce et qui affirme que dans une série de nombres, on

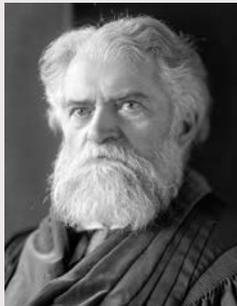
trouvera le plus souvent une proportion de nombres commençant par  $c$  égale à  $\log_{10}(c+1) - \log_{10}(c)$ . Une multitude d'autres confirmations approchées de la loi ont depuis été apportées (graphique a).

Il existe des versions de la loi de Benford pour chaque base de numération (graphique b), et elles aussi ont été confrontées avec un bon succès aux séries numériques réelles. La loi de Benford n'est donc pas liée à l'usage de la base 10 par les humains. Notons que la loi reste vérifiée (sauf exception) quand on change les unités de mesure, par exemple quand on passe des kilomètres aux miles pour mesurer des distances.

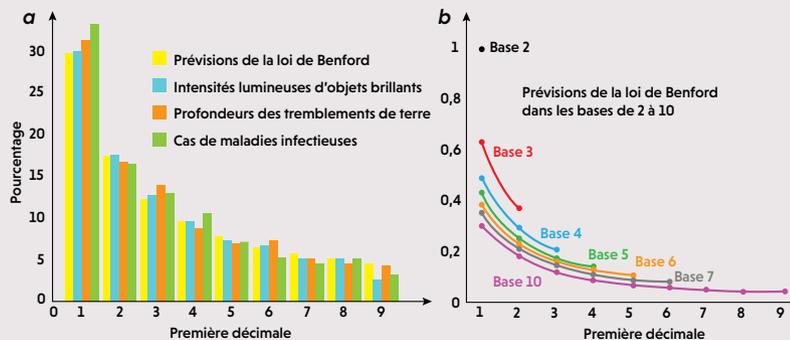
La loi de Benford s'exprime sous une forme continue (dont découle la version en termes de premier chiffre significatif) : la probabilité pour que la partie fractionnaire du logarithme décimal des valeurs d'une série

soit comprise entre  $a$  et  $b$  avec  $a < b$  est égale à  $(b - a)$ , c'est-à-dire que la probabilité est uniforme sur l'intervalle  $[0, 1]$  (voir le texte principal pour plus de détails sur ce point).

On a remarqué que la loi n'est pas systématiquement vraie, mais que lorsque les données sont bien étalées et ne présentent pas d'irrégularité manifeste, elle est presque toujours approximativement vraie. Quand on multiplie les données, il y a bien convergence vers des probabilités qui favorisent le 1 comme premier chiffre par rapport au 2, le 2 par rapport au 3, etc., mais les probabilités limites observées ne sont que rarement celles annoncées par la loi. Selon une grande expérience portant sur 230 ensembles de données, seuls 13 % des ensembles se conforment de très près à la loi de Benford. Aujourd'hui, on dispose d'une explication claire de cette constatation.



Simon Newcomb (1835-1909)



C'est le cas pour les puissances de 2 (2, 4, 8, 16, 32, ...). On a démontré qu'à l'infini, la proportion des puissances de 2 qui commencent par le chiffre 1 est exactement  $\log_{10}(2) - \log_{10}(1)$ , que la proportion des puissances de 2 qui commencent par 2 est  $\log_{10}(3) - \log_{10}(2)$ , etc.

### L'ÉTALEMENT UNIFORME ATTENDU

Peut-on formuler une explication simple de ce que nous observons et prouvons pour certaines suites numériques? Il semble que oui. Celle que nous allons présenter maintenant convainc la plupart de ceux qui font l'effort de la comprendre. Elle pourra sembler un peu compliquée, mais c'est la justification intuitive la plus générale connue, et ce qu'elle suggère est utile, comme nous allons le voir.

L'explication se fonde sur une première loi qui est rarement énoncée, car sans doute

jugée trop simple, et que nous appellerons «loi d'étalement uniforme de la partie fractionnaire». Avant de la formuler, fixons des notations qui aideront à s'exprimer efficacement. Soit  $r$  un nombre réel (par exemple  $r=2,71828\dots$ ). Sa partie entière est le plus grand entier inférieur ou égal à  $r$ , que nous noterons  $[r]$ . Sa partie fractionnaire est  $r - [r]$  et sera notée  $\{r\}$ : ainsi,  $[2,71828] = 2$  et  $\{2,71828\} = 0,71828$ . En langage simple, la partie entière est ce qui se trouve devant la virgule, la partie fractionnaire ce qui se trouve derrière.

### LA LOI D'ÉTALEMENT DE LA PARTIE FRACTIONNAIRE

Si l'on choisit des nombres réels  $r$  au hasard dans un intervalle large de plusieurs unités (par exemple entre 0 et 20), et que la loi qui indique >

> la probabilité de tomber sur une des valeurs possibles est assez régulière et étalée, alors la partie fractionnaire des nombres  $r$  sera, à peu de chose près, uniformément répartie dans l'intervalle des nombres entre 0 et 1.

Considérons par exemple la moyenne générale des notes (sur 20) des élèves d'une école. On trouve des nombres du type: 10,54; 12,43; 7,23; 11,97; 12,41; 13,80; 16,55... dont les parties fractionnaires sont: 0,54; 0,43; 0,23; 0,97; 0,41; 0,80; 0,55...

Les notes ne seront pas nécessairement uniformément étalées sur tout l'intervalle allant de 0 à 20, et il est même probable qu'il y aura un grand nombre de notes autour de 10 ou 11. En revanche, ce qu'indique la loi d'étalement uniforme est que la partie fractionnaire de ces notes sera, elle, bien étalée entre 0 et 1. En particulier, il y aura à peu près autant de parties fractionnaires commençant par 0 (après la virgule) que de parties fractionnaires commençant par 1, que de parties fractionnaires commençant par 2, etc. Avec sans doute de petites variations autour de  $1/10$ , la

proportion de notes sera la même pour chacune des 10 catégories.

Plus généralement, si l'on se donne deux nombres  $a$  et  $b$  compris entre 0 et 1 avec  $a < b$ , la proportion de notes dont la partie fractionnaire est comprise entre  $a$  et  $b$  vaut  $b - a$ , la longueur de l'intervalle  $[a, b]$ . Dans notre exemple, la proportion de notes d'élèves dont la partie fractionnaire est comprise entre 0,25 et 0,40 vaut environ 15%.

L'explication de cette loi est que, sauf cas particuliers, les parties fractionnaires des nombres ne seront pas concentrées sur la même zone de l'intervalle  $[0, 1]$ . S'il y a plus de nombres entre 12,3 et 12,4, cela ne sera pas vrai (sauf exception) entre 15,3 et 15,4. Ainsi, les irrégularités possibles de densité sur les 20 intervalles possibles entre deux entiers consécutifs se compenseront plus ou moins, ce qui uniformisera la série des parties fractionnaires, que l'on peut voir comme une sorte de moyenne de ce qui se passe sur chacun des 20 intervalles entre deux entiers. Une interprétation graphique de cette idée est

# 2

## LOTÉRIE ET LOI D'ÉTALEMENT UNIFORME

**L**a loi d'étalement uniforme de la partie fractionnaire indique que les nombres d'une série dont on enlève ce qui précède la virgule (2,3456 devient 0,3456 ; 132,4388 devient 0,4388) se répartissent à peu près uniformément dans l'intervalle  $[0, 1]$ .

Tous les joueurs de loterie acceptent (inconsciemment) la loi d'étalement uniforme de la partie fractionnaire. En effet, lancer assez fort la roue d'une loterie de un mètre de périmètre et regarder où se place la marque indiquant la case gagnante revient au même que lancer fort une boule sur une rainure

circulaire de un mètre de périmètre en considérant que l'endroit où elle s'arrête après plusieurs tours désigne la case gagnante (on a recopié les secteurs de la roue de loterie sur la rainure circulaire).

Cette opération est aussi équivalente à lancer une boule avec assez de puissance sur une rainure rectiligne assez longue où tous les mètres, on a recopié les dessins de la rainure circulaire désignant les cases gagnantes.

Cette opération est encore équivalente à choisir un nombre réel assez grand, à prendre sa partie fractionnaire et à considérer un dessin

des secteurs gagnants entre 0 et 1 reproduisant celui utilisé périodiquement sur la rainure rectiligne.

Si vous pensez que la loterie est équitable, c'est-à-dire que la probabilité que la marque s'arrête sur un secteur du disque qui tourne est proportionnelle à l'angle de ce secteur, alors vous pensez aussi que la partie fractionnaire de nombres au hasard assez grands est, à peu de chose près, uniformément distribuée entre 0 et 1.

Vous croyez donc à la loi d'étalement uniforme de la partie fractionnaire et donc aussi à la loi de Benford qui en découle.



proposée dans l'encadré 3, ainsi qu'une analogie avec la croyance en l'équité d'une loterie dans l'encadré 2.

À côté de l'idée intuitive et un peu vague, il y a bien évidemment des formulations précises de conditions mathématiques qui assurent que l'écart à l'uniformité est faible, ou même qu'il est nul; les lecteurs intéressés pourront les consulter dans les articles de la bibliographie.

L'origine de cette loi dont on va comprendre l'importance centrale est difficile à retracer. En 1912, Henri Poincaré a exprimé un principe équivalent sans énoncer de théorème précis. Il expliquait à propos de la troisième décimale des nombres trouvés dans une table de logarithmes qu'on observera «que les dix chiffres 0, 1, 2, 3, ..., 9 sont également répartis sur cette liste et par conséquent la probabilité pour que cette troisième décimale soit paire est égale à  $1/2$ ». Pour lui, cet énoncé d'uniformité était évident; il écrit: «[...] un instinct invincible porte à le penser».

L'idée de l'uniformisation des parties fractionnaires a été reprise par le mathématicien d'origine croate William Feller dans son célèbre traité de théorie des probabilités de 1966, mais comme on l'a noté depuis, en voulant formuler un énoncé mathématique, il s'est trompé. Sans connaître ni le texte de Poincaré ni celui de Feller, et cette fois avec un énoncé et une démonstration exacts, Nicolas Gauvrit et moi avons retrouvé l'idée en 2008, en même temps qu'un autre énoncé précis différent et correct était proposé indépendamment par les chercheurs allemands Lutz Dümbgen et Christoph Leuenberger. L'impossibilité de classer les résultats mathématiques pour les retrouver facilement comme on classe les mots d'un dictionnaire a pour conséquence que, souvent, des résultats qui ne se rattachent pas clairement à un domaine précis des mathématiques sont découverts indépendamment plusieurs fois.

### ÉVIDENCE DE LA LOI DE BENFORD

Grâce à cette loi d'étalement à la fois intuitive et formalisable, on va obtenir une justification naturelle et simple de la loi de Benford. L'idée consiste simplement à appliquer un logarithme décimal à la loi précédente... et à réfléchir un peu.

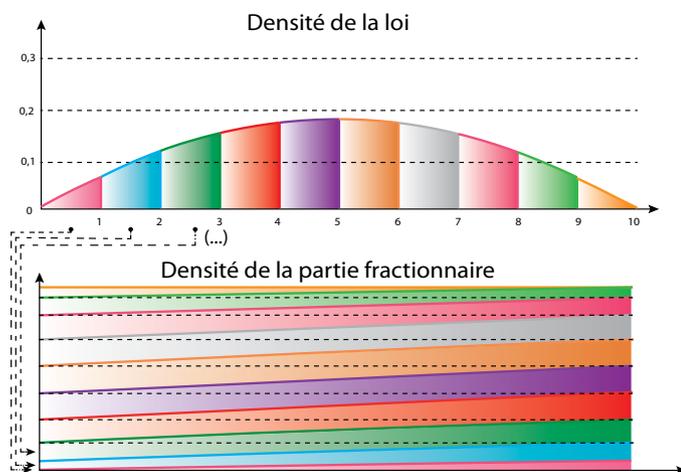
On reprend l'énoncé précédent et on l'applique non pas aux nombres  $r$  de la série considérée, mais à leur logarithme décimal,  $\log_{10}(r)$ . Si l'on choisit des nombres réels  $r$  au hasard sur une large plage couvrant plusieurs ordres de grandeur (par exemple entre 1 et  $10^{20}$ ), et que la loi qui indique la probabilité de tomber sur une des valeurs possibles est assez régulière et étalée, alors les parties fractionnaires des logarithmes décimaux des nombres, c'est-à-dire les  $\{\log_{10}(r)\}$ , seront, à peu de chose près, uniformément réparties entre 0 et 1.

# 3

## LA LOI D'ÉTALEMENT DE LA PARTIE FRACTIONNAIRE

**L**a partie fractionnaire ( $r$ ) d'un nombre  $r$  est ce qui est derrière la virgule. Par exemple,  $\{52,98734\} = 0,98734$ . La loi d'étalement uniforme de la partie fractionnaire permet de déduire la loi de Benford. En voici l'énoncé : si l'on choisit au hasard des nombres réels sur une plage large de plusieurs unités (par exemple entre 1 et 10), et que la loi donnant la probabilité de tomber sur une des valeurs possibles est assez régulière, alors la partie fractionnaire des nombres qu'on trouvera sera, à peu de chose près, uniformément

répartie entre 0 et 1. La figure ci-dessous, due à Nicolas Gauvrit, illustre l'idée intuitive de la loi d'étalement uniforme de la partie fractionnaire. Dans le graphique du bas, les tranches de la densité de départ sont superposées après réduction proportionnelle de taille, pour former la densité de la partie fractionnaire. Les pentes des tranches se compensent à peu près. Dans le cas d'une fonction linéaire sur chaque intervalle  $[n, n + 1]$ , la compensation se fait parfaitement, et donc la partie fractionnaire est dans un tel cas parfaitement uniforme.



On ne le voit pas d'emblée, mais ce qu'on vient d'énoncer est la loi de Benford (ou plus exactement une loi plus puissante parfois dénommée «loi de Benford continue»). En effet, affirmer que  $c$  est le premier chiffre significatif du nombre  $r$  équivaut à énoncer que  $\log_{10}(c) \leq \{\log_{10}(r)\} < \log_{10}(c+1)$ , ce que l'on justifiera un peu plus loin.

Les parties fractionnaires des images par  $\log_{10}$  des nombres  $r$  dont le premier chiffre significatif est  $c$  occupent donc dans l'intervalle  $[0, 1]$  un intervalle de longueur  $\log_{10}(c+1) - \log_{10}(c)$ , ce qui signifie, si l'on admet l'uniforme répartition, que leur >

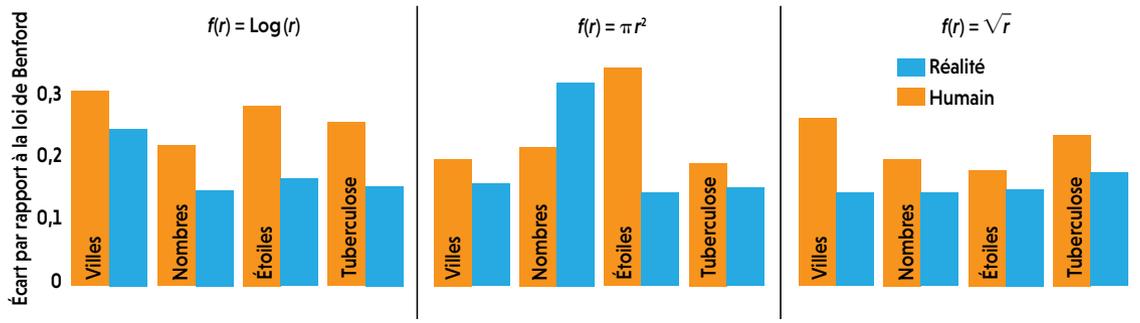
## LA LOI DE BENFORD GÉNÉRALE SOUMISE À DES TESTS

4

La loi de Benford générale affirme que la partie fractionnaire des nombres  $f(r)$  obtenus à partir d'une série de nombres  $r$  sera uniformément étalée sur l'intervalle  $[0, 1]$  et cela pour toute fonction continue croissante  $f$ . Comme la loi de Benford classique, fondée sur  $f(r) = \log_{10}(r)$ , on peut utiliser la loi générale pour repérer des données truquées.

Afin de s'assurer que la méthode est bonne, on a demandé à des sujets humains de créer de fausses données et on a mesuré la qualité de ce qu'ils produisaient en utilisant la loi de Benford générale pour trois fonctions différentes :  $f(r) = \text{Log}(r)$ ,  $f(r) = \pi r^2$  et  $f(r) = \sqrt{r}$ . On a utilisé des données provenant de quatre sources différentes qui ont conduit à 12 comparaisons

entre la réalité et ce que produit un humain simulant la réalité (voir le protocole détaillé dans le texte principal). Dans 11 cas sur 12, la simulation par l'humain est moins conforme à la loi de Benford que les données réelles. Il est donc possible, en effectuant des tests fondés sur la loi de Benford, de détecter des données artificielles produites par des humains.



> proportion est  $\log_{10}(c+1) - \log_{10}(c)$ . C'est exactement ce qu'exprime la loi de Benford formulée au sujet du premier chiffre significatif en base décimale!

La loi de Benford continue est effectivement un peu plus puissante que la loi n'évoquant que les chiffres significatifs en base 10. Elle permet par exemple de retrouver, dans toute base de numération, un énoncé évoquant le premier chiffre significatif.

La justification de l'équivalence utilisée plus haut se fait rigoureusement, mais un exemple clarifiera l'équivalence. Prenons  $r=7234$ . On a :

$$\begin{aligned} \{\log_{10}(7234)\} &= \log_{10}(7234) - [\log_{10}(7234)] \\ &= \log_{10}(7234) - [3,8593\dots] = \log_{10}(7234) - 3 \\ &= \log_{10}(7234) - \log_{10}(10^3) = \log_{10}(7234/1000) \\ &= \log_{10}(7,234). \end{aligned}$$

Puisque  $\log_{10}$  est une fonction croissante, on a :  $\log_{10}(7) < \log_{10}(7,234) < \log_{10}(8)$ .

Soustraire  $[\log_{10}(r)]$  à  $\log_{10}(r)$  ramène la valeur dans le  $\log_{10}$  entre 1 et 10 et donc l'encadrement entre  $\log_{10}(c)$  et  $\log_{10}(c+1)$  repère le premier chiffre significatif. D'où l'équivalence indiquée.

### ON VEUT DES PREUVES!

Comme précédemment, le principe énoncé, c'est-à-dire la loi de Benford continue, est un peu vague, et il faudrait préciser quand elle ne s'applique pas, à l'aide de résultats mathématiques démontrés.

De tels énoncés mathématiques existent; ils sont un peu compliqués à formuler (voir l'article de Michel Valadier cité dans la

bibliographie). Ils consistent à formuler des hypothèses exprimant l'idée d'étalement et de régularité, et, en fonction de la précision avec laquelle les hypothèses sont imposées, ils affirment que la série de nombres vérifie la loi de Benford avec une précision que le théorème explicite.

Il faut être un peu prudent avec la formulation non formelle de la loi de Benford; elle n'est que la traduction d'une intuition « invincible » comme l'écrit Poincaré, mais qui reste une intuition. Tout dépend de ce qu'on nomme « large plage de plusieurs ordres de grandeur » et « loi étalée et régulière ». Cependant, l'énoncé informel montre pourquoi la loi est souvent vérifiée, au moins approximativement.

La loi informelle explique aussi une autre propriété de la loi de Benford remarquée depuis longtemps: en augmentant la taille d'une série de nombres, on ne tend pas toujours vers les valeurs annoncées des probabilités  $\log_{10}(c+1) - \log_{10}(c)$ . L'explication est claire: si les nombres suivent une loi précise, la compensation entre les intervalles quand on passe aux parties fractionnaires des logarithmes ne se fera qu'exceptionnellement, et donc en multipliant les données, on ne converge pas vers une loi parfaitement uniforme sur  $[0, 1]$ , mais vers une loi approximativement uniforme.

Comprendre est le meilleur moyen d'avancer et c'est ici le cas. L'identification de l'origine de la loi de Benford suggère une méthode simple de la généraliser: remplacer la fonction

$\log_{10}$  par une autre du même type, c'est-à-dire croissante et continue.

Si  $f$  est une fonction continue croissante, si l'on choisit des nombres réels  $r$  au hasard sur une large plage, et si la loi qui indique la probabilité de tomber sur une des valeurs possibles est assez régulière et étalée, alors la partie fractionnaire des  $f(r)$  sera, à peu de choses près, uniformément répartie entre 0 et 1.

Là encore, des théorèmes sont possibles. Malheureusement, pour les fonctions  $f$  que l'on peut envisager (par exemple  $f(x) = \sqrt{x}$ ,  $f(x) = x^2$ ,  $f(x) = \exp(x)$ ) il n'y a pas de traduction simple de la loi générale en termes de premier chiffre significatif. Ces généralisations ne sont donc pas aussi spectaculaires que la loi obtenue avec  $f(x) = \log_{10}(x)$ . Elles sont cependant utiles, car elles procurent des outils de détection de fraude.

### UTILISER LA LOI DE BENFORD GÉNÉRALE POUR DÉTECTER DES FRAUDES

La loi de Benford a maintes fois été utilisée pour détecter des fraudes. Un livre récent est même consacré à ce sujet (Mark Nigrini, *Benford's Law: Applications for Forensic Accounting, Auditing, and Fraud Detection*, Wiley, 2012).

Le principe est simple: s'ils s'étalent régulièrement sur plusieurs ordres de grandeur, les nombres apparaissant dans des comptes ou des statistiques doivent, sauf raisons particulières, vérifier la loi de Benford. Si ce sont des nombres inventés, leur auteur risque d'avoir voulu en créer à peu près autant qui commencent par 1 que par 2, 3, etc. N'étant pas averti de la propriété qu'énonce la loi de Benford, le faussaire ne la respectera pas. Si les données suspectes ne concordent pas avec la loi de Benford, on conclura que les données ont été falsifiées.

Cela s'est produit à propos de l'expertise de données financières et fiscales, cela s'est produit en science où des tests ont repéré des données d'expériences frauduleuses. La loi de Benford a aussi été utilisée pour distinguer des images numériques artificielles d'images numériques naturelles ou pour identifier quelles étaient les images d'une série qui contenaient des données cachées (stéganographie).

Un problème apparaît. À force de parler de la loi de Benford, les truqueurs de données pourraient en être informés. Ils s'appliqueraient à produire des données inventées qui la respectent et passeraient ainsi à travers les outils de repérage statistique fondés sur la loi de Benford. La loi générale permet de contrer ce risque: en utilisant les variantes avec diverses fonctions  $f$ , on repérera les données falsifiées.

Pour tester cette méthode, une série d'expériences a été réalisée par un groupe de chercheurs réunis autour de Nicolas Gauvrit. Nous

décrivons ici l'une des expériences menées. Les productions pseudoaléatoires humaines ont été examinées dans quatre contextes où l'on constate la loi de Benford sur les chiffres significatifs.

Un groupe de 169 adultes, recrutés *via* les réseaux sociaux ou par courrier électronique, a participé à cette expérience. Leurs âges variaient de 13 à 73 ans. Les participants ont été répartis au hasard en quatre groupes pour s'occuper de données:

(a) sur la population des 5000 villes américaines les plus peuplées,

(b) sur des constantes mathématiques provenant des tables de Simon Plouffe,

(c) sur les distances en années-lumière entre la Terre et les étoiles visibles les plus proches,

(d) sur les nombres de cas de tuberculose par pays pour l'année 2012.

Dans chaque groupe, les participants ont été informés que l'on avait sélectionné au hasard une série de 30 nombres dans les données réelles, et qu'ils devaient tenter de produire ce qu'ils pensaient être une série analogue et plausible de 30 nombres. Des séries de 30 nombres provenant des bases de données réelles ont aussi été constituées.

Pour chaque ensemble de 30 valeurs de  $r$  (fabriquées ou réelles), on a examiné les distributions des parties fractionnaires des  $f(r)$ , avec  $f(r) = \text{Log}(r)$ ,  $f(r) = \pi r^2$  et  $f(r) = \sqrt{r}$ . L'écart par rapport à la loi de Benford générale a été mesuré par une méthode classique (la statistique de Kolmogorov-Smirnov). Comme prévu, les données fabriquées par les humains se conforment moins bien à la loi de Benford que les données réelles (voir l'encadré 4).

Sur les 12 comparaisons (3 fonctions, 4 types de données), une seule exception a été notée provenant de la comparaison des données de la table de constantes de Simon Plouffe testées avec la loi de Benford pour la fonction  $f(r) = \pi r^2$ : dans ce cas, les humains sont en moyenne plus conformes à ce que prévoit la loi de Benford que les données réelles!

La conclusion est donc claire: les humains se font repérer par la loi de Benford générale quand ils tentent de fabriquer de fausses données.

D'autres résultats de l'étude menée suggèrent aussi que, selon le type de données dont on veut contrôler l'authenticité, certains choix de la fonction remplaçant  $\log_{10}$  dans la loi de Benford générale sont préférables à d'autres. Comprendre pourquoi sera important pour créer des outils de détection auxquels plus aucun fraudeur ne pourra échapper. Mais, c'est certain, grâce à la loi de Benford générale, la panoplie des chasseurs de tricheurs numériques s'est enrichie d'une nouvelle arme puissante. ■

## BIBLIOGRAPHIE

N. Gauvrit et al., **Generalized Benford's law as a lie detector**, *Advances in Cognitive Psychology*, vol. 13(2), pp. 121-127, 2017.

M. Valadier, **The Benford phenomenon for random variables. Discussion of Feller's way**, prépublication arXiv:1203.2518, 2012.

N. Gauvrit et J.-P. Delahaye, **Scatter and regularity imply Benford's Law... and more**, dans Hector Zenil (éd.), *Randomness through computation: Some answers, more questions*, World Scientific, ch. 4, pp. 53-69, 2011.

N. Gauvrit et J.-P. Delahaye, **La loi de Benford générale**, *Math. Sci. Hum. Math. Soc. Sci.*, vol. 186, pp. 5-15, 2009.

N. Gauvrit et J.-P. Delahaye, **Pourquoi la loi de Benford n'est pas mystérieuse**, *Math. Sci. Hum. Math. Soc. Sci.*, vol. 182, pp. 7-15, 2008.

J.-P. Delahaye, **L'étonnante loi de Benford**, *Pour la Science* n° 351, pp. 90-95, janvier 2007.



Certains mangent du lion. Pour Abraham Poincheval, c'est l'inverse.

## L'AUTEUR



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

# COMME EN CAGE DANS UN LION

**L'artiste Abraham Poincheval a passé une semaine au sein d'une réplique de l'homme-lion, l'une des statues préhistoriques les plus célèbres.**

# A

près un ours naturalisé, une grande bouteille le long du Rhône, un caillou, une plateforme perchée sur un mât à douze mètres de hauteur, Abraham Poincheval a élu domicile dans un nouvel endroit exigü : un lion ! L'artiste français s'est enfermé dans une sculpture léonine d'environ trois mètres de hauteur du 2 au 8 juin 2018.

La performance a été l'aboutissement d'un projet lauréat d'une commande publique pour le Musée-forum de l'Aurignacien à Aurignac (en partenariat avec le ministère de la Culture). L'objet de la commande était une œuvre d'art originale reliant la préhistoire, l'art contemporain et l'environnement. Pourquoi un lion ?

Parce que l'animal-refuge en question est une réplique, agrandie dix fois, d'une des plus célèbres statues préhistoriques,

l'homme-lion de Hohlenstein-Stadel. Ce nom est celui de la grotte allemande, dans le Bade-Wurtemberg, où les premiers morceaux de la figurine (de 29,6 centimètres de hauteur) ont été trouvés en 1939 par Robert Wetzel et Otto Völzing.

La sculpture, en ivoire de mammouth, représente un corps humain orné d'une tête de lion des cavernes. L'œuvre a d'abord été datée de 32 000 ans, mais d'autres morceaux mis au jour en 2010 et 2011 à l'entrée de la grotte ont repoussé à 40 000 ans l'âge de l'objet, en plein Aurignacien. Cela en fait l'une des plus anciennes sculptures de la Préhistoire. Ce « puzzle » de plus de 300 fragments, achevé en 2013 et désormais presque complet, est aujourd'hui conservé au musée de la ville d'Ulm, en Allemagne.

Ainsi, Abraham Poincheval est resté pendant près d'une semaine dans un homme-lion préhistorique sculpté dans du bois de mélèze. On peut voir dans ce projet un écho à l'idée d'abri, incarné localement par l'abri-sous-roche d'Aurignac, occupé il y a environ 35 000 ans.

Le lion des cavernes est aussi au cœur d'une exposition que lui consacre le Musée-forum de l'Aurignacien. Conçue avec le Muséum de Toulouse et trois

chercheurs de l'équipe scientifique de la grotte Chauvet (Carole Fritz, Philippe Fosse et Gilles Tosello), elle offre l'occasion d'admirer les restes du squelette d'un lion des cavernes découverts par le préhistorien Louis Méroc dans les années 1950 à seulement 20 kilomètres d'Aurignac, dans les gorges de la Seygouade.

Un lion en Haute-Garonne ? Oui, le lion des cavernes (*Panthera leo spelaea*) a vécu depuis il y a 300 000 ans jusqu'il y a 12 000 ans environ dans une zone qui s'étendait de la Sibérie (en 2015, deux lionceaux bien conservés y ont été découverts dans le pergélisol) jusqu'au sud de l'Europe. Il était le plus grand prédateur terrestre de cette époque.

Suggestion à Abraham Poincheval pour un prochain animal où se nicher : le *Tyrannosaurus rex* qui vient de poser ses valises à Paris pour l'été. C'est sans doute plus spacieux qu'un lion ! ■

*Dans la peau du lion*, jusqu'au 30 novembre 2018,  
Musée-forum de l'Aurignacien, 31420 Aurignac.  
<http://musee-aurignacien.com/fr>



Retrouvez la rubrique  
Art & science sur  
[www.pourlascience.fr](http://www.pourlascience.fr)

## LES AUTEURS



JEAN-MICHEL COURTY et ÉDOUARD KIERLIK  
professeurs de physique à Sorbonne Université, à Paris

# LA VOITURE, UN SPORT... DE GLISSE!

Les pneus des véhicules ne font pas que rouler: simultanément, ils glissent, même en l'absence de dérapage. Ce n'est pas sans incidence sur la conduite.

**Q**uel conducteur n'a jamais eu le sentiment que, lorsqu'il freine ou accélère brutalement, il a du mal à garder la direction de son véhicule? Ou ne s'est interrogé sur la vitesse avec laquelle il peut prendre un virage sans déraper? Les réponses à ces questions sont déterminées par les limites d'adhérence des pneus.

## AU-DELÀ DES LOIS DU FROTTEMENT

Or pour comprendre ces limites, invoquer les lois usuelles du frottement ne suffit pas, car la gomme des pneus se déforme beaucoup au contact du sol. La conséquence principale est troublante: même lorsqu'il y a adhérence, une partie du pneu glisse sur la route.

Les situations où des frottements sont à l'œuvre, par exemple lorsqu'on

veut pousser une caisse sur un parquet, paraissent simples: ça glisse ou ça ne glisse pas! Et quand ça ne glisse pas, il n'y a pas de mouvement.

La force de frottement qui compense la force motrice (la poussée de la main dans l'exemple de la caisse) résulte des déformations, invisibles à notre échelle, des aspérités microscopiques des surfaces en contact. Dans ce cas statique, la force de frottement est indépendante de l'aire de contact et présente un maximum égal au produit de la charge (ici le poids) par un coefficient qui dépend de la nature des surfaces en contact. Quand la poussée dépasse ce seuil, l'objet se met à glisser, avec une force de frottement quasiment indépendante de la vitesse de glissement.

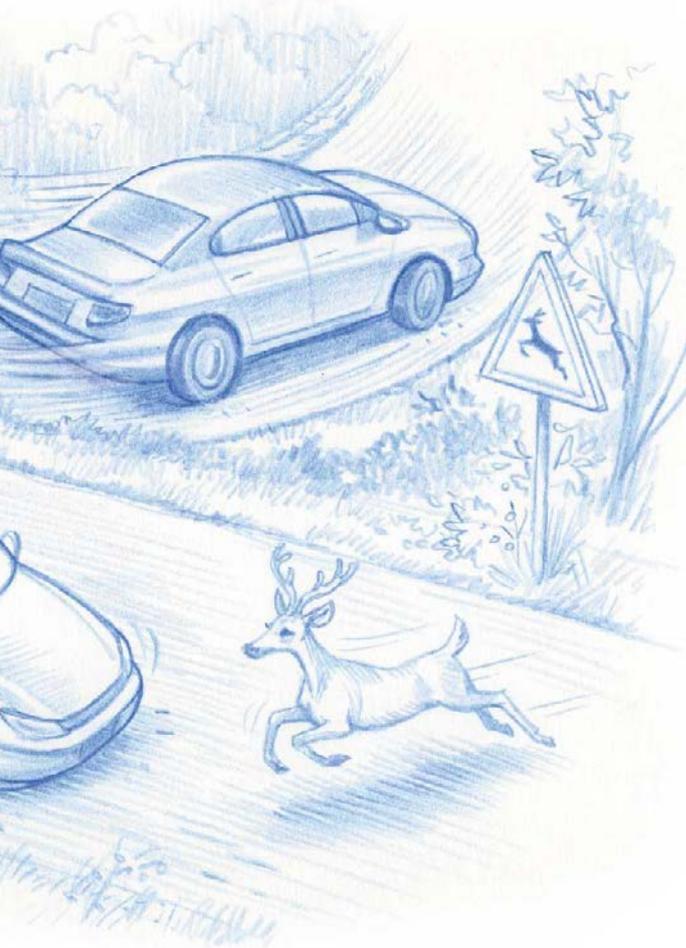
Pour un pneu, la situation est différente. Sa gomme peut se déformer fortement, comme on peut le constater en observant l'écrasement des pneus sous le

Quand une voiture freine brutalement ou suit un virage, une partie notable de la surface des pneus au contact de la route subit un glissement. Ce phénomène a une influence sur la vitesse effective du véhicule et, lorsqu'il tourne, sur sa direction.

poids du véhicule. Par conséquent, quand celui-ci roule, notamment lors des phases d'accélération, de freinage, lors des virages ou en présence de vent latéral, des contraintes mécaniques supplémentaires apparaissent au niveau de la couche de gomme périphérique en contact avec le sol: celle-ci subit d'importantes forces de cisaillement.

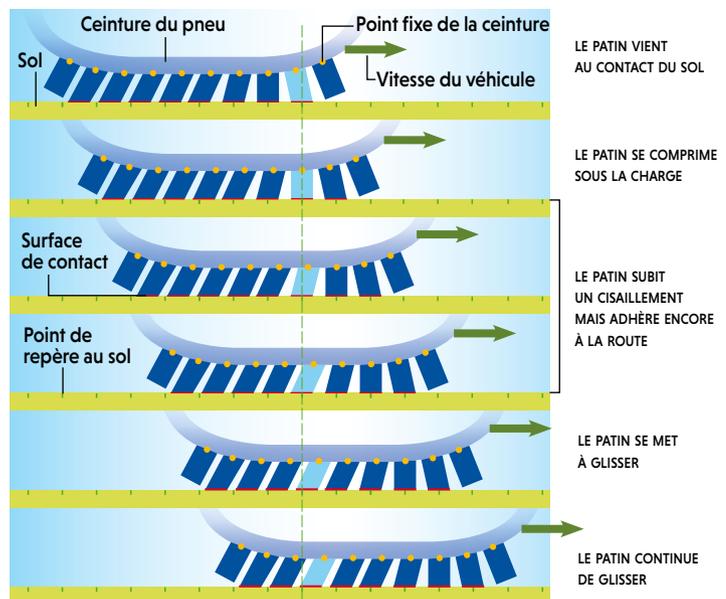
Comment se comporte alors le pneu? Pour le comprendre, modélisons la couche périphérique du pneu comme une succession de patins de gomme indépendants, très peu compressibles mais déformables. Ces patins sont fixés à l'armature métallique du pneu, qui est composée





## UN PNEU QUI GLISSE PARTIELLEMENT

**L**a couche externe d'un pneu est composée de patins de gomme déformables, fixés à une « ceinture » qui est, elle, inextensible. Lorsque la roue tourne et qu'un patin vient, à l'avant de la surface de contact pneu-sol, se poser sur la route, ce patin se comprime et se déforme. Le patin subit alors une force de cisaillement. Au début, ce cisaillement est insuffisant pour vaincre l'adhérence gomme-sol et la surface de contact du patin reste immobile. Puis, quand la force de cisaillement a dépassé un certain seuil, cette surface se met à glisser sur le sol (ici vers la droite). Ce glissement d'une partie des patins du pneu implique que, dans la situation de freinage illustrée ici, la vitesse effective du véhicule est légèrement supérieure à la vitesse nominale indiquée par la rotation des roues.



d'une multitude de fils d'acier noyés dans la gomme.

Lorsque le véhicule est au repos, la situation vis-à-vis des frottements est analogue à celle d'un solide habituel, la seule différence étant la déformation, visible à l'œil nu, du pneu.

Dès qu'il y a mouvement, la situation diffère radicalement, car les patins défilent sur la route comme avec une chenille. Analysons donc un freinage à décélération constante et supposons, pour simplifier, qu'à chaque fois qu'un patin entre en contact avec le sol, à l'avant du contact pneu-sol (dans le sens du mouvement), un patin se soulève à l'arrière.

Juste avant que le patin situé à l'avant ne se pose, la force de freinage est répartie sur tous les patins déjà posés. Ceux-ci sont donc fléchis et cisailés: leur base au contact du sol est décalée vers l'arrière par rapport à leur point d'attache sur la ceinture métallique du pneu (*voir l'encadré ci-dessus*). Lorsque, à l'avant, un patin entre en contact avec le sol en raison de la rotation de la roue, les forces horizontales sont donc déjà équilibrées par les autres patins. Ce patin se pose à la verticale de son point d'attache.

Le véhicule continuant à avancer un peu, le patin arrière se soulève et quitte le sol. La force qu'il exerçait doit alors être

assurée par tous les patins restés au contact de la route: leurs flexions augmentent, ainsi que les décalages entre leurs positions et celles de leurs points d'attache. Si l'on suit un patin donné à partir de son arrivée au contact du sol, on voit qu'il se déforme de plus en plus à mesure que les patins arrière se soulèvent. Ainsi, la force de frottement qu'il subit du sol augmente, jusqu'à atteindre le seuil de glissement. Le patin se met alors à glisser. ➤

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



> Autrement dit, la partie antérieure du pneu au contact de la route est soumise à des contraintes faibles et ne glisse pas, tandis que la partie postérieure, soumise à des contraintes plus fortes, glisse.

### GLISSEMENT ET DÉRIVE, MAIS TOUJOURS DE L'ADHÉRENCE

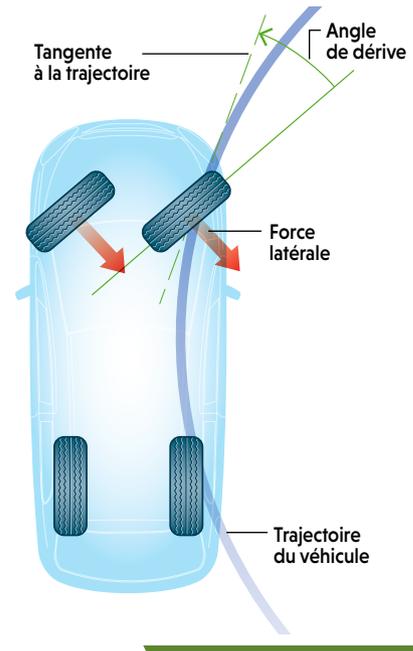
Quelle est la conséquence? Lorsque la roue fait un tour entier, la distance parcourue par le véhicule n'est pas simplement égale au périmètre (inextensible) de l'armature métallique: s'ajoute le déplacement de cette armature par rapport au sol dû au glissement d'une partie des patins. Il s'ensuit que la vitesse du véhicule ne coïncide pas avec la vitesse transmise par l'essieu à l'armature métallique. L'écart peut atteindre 10% lors d'un freinage bien maîtrisé par le conducteur ou le système antiblocage des roues. La force de freinage (respectivement la décélération) est alors de l'ordre du poids (respectivement de l'accélération de la pesanteur,  $g$ ). L'adhérence du véhicule est bien préservée, mais seule une petite partie du pneu (entre 10% et 20% sur sol sec) ne glisse pas.

Un phénomène analogue se produit lorsque la voiture avance à vitesse constante. Le véhicule subit alors une force de traînée aérodynamique dirigée vers l'arrière, donc une décélération que compense l'action du couple moteur (la roue est motrice dans ce cas, donc les patins fléchissent, par rapport au cas du freinage, dans le sens inverse). Cependant, les ordres de grandeur sont très différents. Même à 130 kilomètres par heure, la traînée sur une voiture citadine est de l'ordre de 500 newtons, environ 5% du poids du véhicule chargé, soit une décélération correspondante égale à 5% de  $g$ . Le glissement ne se produit alors que pour une toute petite partie à l'arrière du pneu, juste avant que les patins ne se soulèvent, et l'écart des vitesses demeure inférieur à 1%: l'effet est négligeable.

Ce n'est plus le cas lorsque le véhicule entame un virage ou subit une bourrasque de travers. Dans ces conditions, les forces latérales peuvent être du même ordre de grandeur que le poids. Le raisonnement est alors le même que celui fait précédemment, mais il s'applique au niveau du contact au sol sur l'axe perpendiculaire à la vitesse du véhicule. Cette fois, la conséquence est un décalage angulaire, appelé dérive, entre l'orientation des roues et la vitesse du véhicule. La dérive peut atteindre 1 à 2 degrés pour la conduite sur route et 5 à 7 degrés pour la

## DÉRIVE DANS UN VIRAGE

**L**orsque le véhicule effectue un virage, des forces latérales (flèches rouges) du même ordre de grandeur que le poids agissent sur les pneus au niveau de leur contact avec le sol. Le glissement partiel des pneus qui s'ensuit a pour conséquence une dérive. Pour suivre la courbe de la trajectoire, le conducteur doit donc tourner ses roues d'un angle un peu supérieur à celui indiqué par la tangente.



conduite en ville, où les virages sont parfois très serrés. C'est loin d'être négligeable: pour 2 degrés de dérive, le décalage est de 3,5 mètres pour 100 mètres parcourus, soit la largeur d'une voie de circulation d'autoroute.

En outre, comme les forces sont plus importantes à l'arrière qu'à l'avant du pneu, celles-ci exercent sur la roue un couple. Nous ressentons celui-ci par l'intermédiaire du volant lorsqu'une bourrasque latérale déporte notre véhicule ou lorsque nous prenons un virage. Nous devons alors non seulement exercer un effort pour maintenir le volant dans la direction souhaitée, mais aussi tourner le volant pour ne pas être déporté: par exemple, on contrebraque à gauche lorsque le vent pousse le véhicule sur la droite. Ne rien faire, c'est le fossé assuré!

Ces effets latéraux ont aussi un impact majeur sur la tenue de route du véhicule. En effet, sur chaque patin intervient la force de frottement totale: à la fois la force de frottement longitudinale (dans la direction du mouvement) et la force de frottement latérale. Par conséquent, il y a un couplage entre l'adhérence longitudinale et transversale. Une étude plus précise montre que ce couplage n'est pas symétrique: autant freiner ou accélérer en ligne droite nous fait perdre assez rapidement le contrôle de la direction du véhicule, avec le risque de le sentir se déporter sur le côté, autant on garde notre capacité à freiner ou accélérer efficacement lorsque le véhicule effectue un virage. ■

### BIBLIOGRAPHIE

J. Svendenius et B. Wittenmark, **Review of wheel modeling and friction estimation**, Département de contrôle automatique de l'Institut de technologie de Lund, août 2003.

**Le pneu, l'adhérence**, Société de Technologie Michelin, 2001.



LES AUTEURS



**ROLAND LEHOUCQ**  
chercheur  
au Service  
d'astrophysique  
du CEA à Saclay



**J.-SÉBASTIEN STEYER**  
paléontologue du CNRS  
au Muséum national  
d'histoire naturelle,  
à Paris



# Les dragons de chair, d'os et de feu

Source d'inspiration pour les artistes, le dragon est tantôt couvert d'écaillés, de poils, doté d'ailes... Il emprunte bon nombre d'attributs à la nature, mais quel genre d'animal est-il ? Et peut-il vraiment voler et cracher du feu ?

Les dragons asiatiques, au corps allongé comme celui des serpents ou ici d'une salamandre, sont souvent associés à l'eau, comme dans cette estampe de l'artiste japonais Utagawa Kuniyoshi (1797-1861).

**H**antant depuis des millénaires l'imagination des peuples, les dragons comptent sans doute parmi les plus célèbres monstres de légende. D'ailleurs, il en existe des représentations très variées. Celles-ci ont souvent fait l'objet d'analyses symboliques, mais, depuis la Renaissance, un courant naturaliste s'est aussi efforcé d'appréhender ces monstres comme formant une espèce plausible. Ces animaux mèneraient alors une existence discrète, à l'abri dans certains massifs européens,

africains ou asiatiques. Tels des cryptozoologues, nous vous convions à une enquête naturaliste sur les traces d'un animal insolite, non pas d'un monstre fabuleux mais bien d'une espèce qui fut longtemps considérée comme réelle quoique insaisissable. Plusieurs questions se posent alors : les dragons sont-ils des amphibiens, des reptiles ou autre chose ? Leurs ailes sont-elles aptes au vol ? Et comment pourraient-ils cracher du feu ?

## DRAGON, QUI ES-TU ?

Si nous devons effectuer une sorte de classification systématique des dragons du monde, la première distinction serait à faire entre les dragons occidentaux et les dragons orientaux, tels les *ryu* japonais ou *lóng* chinois. Ces derniers sont en effet caractérisés par un corps serpentiniforme et aptère, c'est-à-dire sans ailes, ce qui >

> n'empêche pas ces espèces magiques de voler! Le dragon oriental représente clairement les forces de la nature – symbolisme shintoïste que l'on retrouve aussi chez le mythique Godzilla, monstre du cinéma japonais dont la première représentation date de 1954. Long de plusieurs mètres, le dragon-serpent asiatique est souvent intimement lié à l'eau. Notons que, dans la réalité, le milieu aquatique n'est pas incompatible avec les reptiles tels que les serpents, puisque ceux-ci nagent très bien en effectuant de grandes ondulations latérales – il existe même des serpents marins, les hydrophinés au corps aplati comme celui des anguilles et qui regroupent aujourd'hui une soixantaine d'espèces réparties dans les eaux chaudes des océans Indien et Pacifique. Concernant la taille «respectable» des dragons-serpents asiatiques, celle-ci nous rappelle que le gigantisme touche aussi les serpents réels, puisque le python réticulé (*Python reticulatus*) d'Asie atteint jusqu'à 7 mètres de long, tandis que *Titanoboa cerrejonensis*, qui évoluait sur Terre il y a 60 millions d'années environ, frôlait les 13 mètres.

Le dragon occidental, quant à lui, a un corps plus court, une longue queue, une paire d'ailes et crache des flammes. Son aspect est cependant plus hétéroclite que celui de son cousin asiatique. Tête de lézard, langue de serpent, pattes de varan, corps écailleux, ailes de chauve-souris ou de ptérosaure, le dragon est alors construit comme une chimère, par simple addition de parties de corps d'espèces différentes.

Si, dans les mythes et légendes, les dragons inspirent de la terreur, ils pouvaient malgré tout

#### LE WINGSUIT DU LÉZARD

En déployant les membranes souples le long de son corps, *Draco volans*, un lézard asiatique, plane dans les airs.



vivre en paix avec les humains qui se conciliaient leurs bonnes grâces en échange d'un tribut. La tradition chrétienne a fait du dragon le symbole du mal, de la Bête de l'Apocalypse, l'incarnation de Satan et du paganisme. Il est aussi un être puissant et omniprésent dans la littérature de fantasy, mais aussi au cinéma, dans les jeux de rôles ou les jeux vidéo: Smaug dans *Le Hobbit*, de J.R.R. Tolkien, ou les dragons de Daenerys Targaryen dans la série *Game of Thrones* (adaptée des romans de G.R.R. Martin) ne sont que quelques exemples.

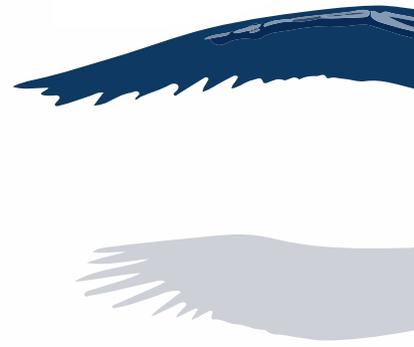
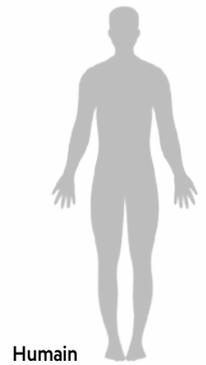
Anatomiquement et symboliquement parlant, les dragons sont très souvent des reptiles, animaux qui suscitent fréquemment chez nous de l'aversion. Il existe cependant des dragons-amphibiens, comme celui du film d'animation *Dragons* (inspiré du roman pour enfant *How To Train Your Dragon*, de Cressida Cowell), qui présente des traits de salamandre (peau noire, tête triangulaire et plate, membres potelés, etc.). Enfin, notons que dans le roman *L'Histoire sans fin* (Michael Ende, 1979), le dragon porte-bonheur et aptère nommé Fuchur (ou Falkor dans les adaptations cinématographiques) est clairement de type mammifère, puisqu'il arbore dans les films une magnifique fourrure blanche et une sympathique tête de lion ou de chien.

Dans l'univers de Tolkien, les dragons sont des reptiles maléfiques nés au cours du Premier Âge des œuvres de Morgoth, roi des ténèbres. Ils sont parfois appelés vers, car les premiers dragons étaient aptères; ils se déplaçaient en rampant et «grandissaient lentement, s'ils vivaient longtemps» (*Le Silmarillion*, 1977). Le plus connu du grand public est sans doute Smaug, qui apparaît dans le court roman *Le Hobbit* (1937) et dont la récente adaptation de Peter Jackson (en trois films!) donne une spectaculaire représentation.

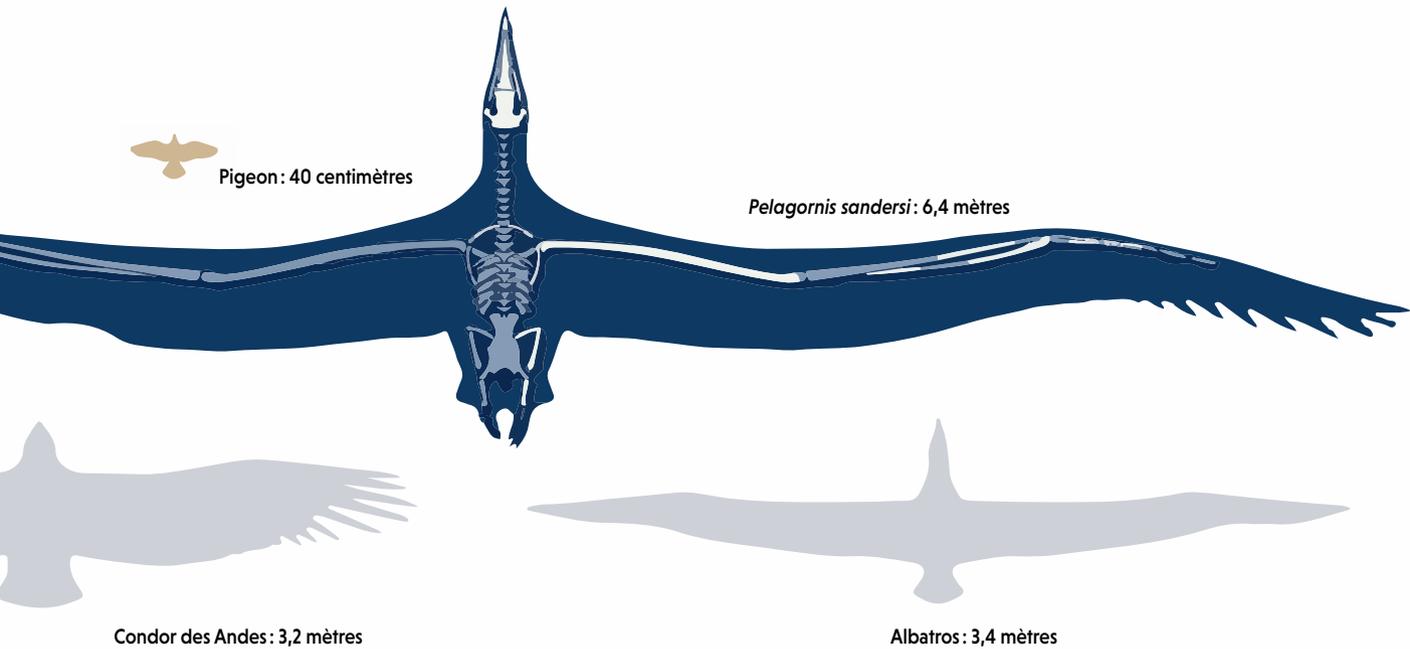
Dans la saga *Harry Potter*, le jeune sorcier se retrouve confronté à un magyar à pointes (ou *Hungarian horntail* en anglais), «le plus dangereux des dragons» selon Norbert Dragonneau, jeune naturaliste de l'univers développé par l'auteure J.K. Rowling: la particularité de ce dragon-reptile est d'être hérissé de pointes (sans doute des excroissances d'écailles comme chez le diable cornu, ou *Moloch horridus*, un petit saurien d'Australie) et muni d'un puissant bec de dinosaure cératopsien – dont le représentant le plus connu est le *Triceratops horridus*, gros herbivore du Crétacé. Nous le voyons, entre dragons-reptiles, dragons-amphibiens et dragons-mammifères, la classification phylogénétique de ces reptiles fictifs varie clairement en fonction des auteurs!

#### UN DRAGON VOLANT?

Les dragons inspirent la peur, notamment parce qu'ils sont capables de voler: c'est la menace qui surgit du ciel. En zoologie, on



L'oiseau disparu, *Pelagornis sandersi*, avec une envergure de 6,4 mètres environ dépassait largement en taille l'albatros ou encore le condor géant. Des analyses récentes ont néanmoins montré qu'il était capable de voler à grande vitesse sur plusieurs kilomètres sans battre des ailes. Cet animal démontre qu'un dragon, de cette taille tout du moins, serait capable de voler.



distingue le vol plané du vol battu. Le vol plané est une sorte de chute contrôlée de l'animal, effectuée grâce à diverses structures permettant d'allonger la durée et la distance de vol après un saut (à la façon du vol en *wingsuit* de certains amateurs de sensations fortes). Les nageoires très allongées de l'exocet, un poisson des mers chaudes, les membranes souples le long du corps de *Draco volans* (petit lézard arboricole des forêts asiatiques), ou entre les doigts de la grenouille volante de Wallace (*Rhacophorus nigropalmatus*) et du gecko volant de Kuhl (*Ptychozoon kuhli*), ou encore les extensions de peau entre les pattes des écureuils volants (*Pteromyiinae*) et des lémuriens volants (dermoptères) sont autant d'exemples d'évolution qui ont conduit au vol plané chez les vertébrés.

Le vol battu, quant à lui, correspond à un type de locomotion active où certains muscles et éléments du squelette (et pas seulement des extensions de peau ou des baguettes osseuses) participent activement à une locomotion aérienne, dynamique et en trois dimensions. Au cours de l'évolution des vertébrés, seuls trois groupes naturels ou clades ont expérimenté le vol battu : les ptérosaures, les oiseaux et les chauves-souris. Les premiers constituent un clade de reptiles fossiles apparus au Trias, il y a environ 230 millions d'années, et disparus à la fin du Crétacé, il y a 66 millions d'années lors de la grande extinction qui balaya aussi les

dinosaures non-aviens. Premiers vertébrés ayant développé le vol battu, les ptérosaures avaient des ailes formées d'une membrane souple sous-tendue par le quatrième doigt (l'équivalent de votre annulaire) et reliée au corps au niveau des flancs. Par leur aspect membraneux, ces ailes évoquent irrésistiblement celles des dragons.

Les oiseaux sont, quant à eux, des dinosaures à plumes : leurs ailes sont formées par trois doigts (le troisième, c'est-à-dire le majeur, est le plus imposant) et bien sûr par des plumes qui sont, sur le plan morphogénétique, de longues écailles ramifiées. Enfin, les ailes des chauves-souris ou chiroptères (de *cheiro* la main et *pterygion*, la membrane ou l'aile, en grec) correspondent à de fines membranes sous-tendues par les cinq doigts de la main. Elles sont aussi souvent comparées à celles des dragons. Ptérosaures, oiseaux et chauves-souris présentent aussi, par convergence évolutive, un bréchet, excroissance du sternum qui permet l'accroche des puissants muscles pectoraux thoraciques nécessaires au vol battu. Dépourvus de bréchet, certains oiseaux comme les autruches ou les kiwis sont incapables de voler. Est-ce le cas aussi chez les dragons ?

Pour le savoir, il faut comprendre la mécanique du vol. Celui-ci résulte de l'écoulement de l'air autour des ailes. Ce flux engendre une force aérodynamique proportionnelle à la >

> masse volumique de l'air ambiant, au carré de la vitesse de l'animal par rapport à cet air et à la surface de ses ailes. La composante verticale de cette force, la portance, permet de voler tandis que sa composante horizontale, la «traînée», s'oppose à la vitesse. Voler à altitude constante impose au volatile de se déplacer assez vite par rapport à l'air pour que la portance compense le poids. Pour un animal volant de taille  $L$ , la surface des ailes est proportionnelle au carré de  $L$  alors que son poids est proportionnel à son volume, donc au cube de  $L$ . Ainsi, la vitesse à laquelle la portance compense le poids est proportionnelle à la racine carrée de la taille de l'animal: plus il est grand, plus il doit voler vite pour se maintenir en l'air.

Mais voler à altitude constante nécessite aussi de fournir une puissance suffisante pour compenser l'effet de la traînée, faute de quoi la vitesse diminuera et le volatile tombera. Les ailes remplissent donc à la fois le rôle de sustentateur et celui de propulseur. Comme la portance, la force de traînée est proportionnelle au carré de la vitesse par rapport à l'air. La puissance à dépenser pour se maintenir en l'air, égale au produit de la traînée par la vitesse relativement à l'air, varie donc comme le cube de cette vitesse.

Comme il est très coûteux en énergie de voler vite, une espèce volante a nécessairement un métabolisme actif. On montre que la puissance à fournir pour compenser la puissance dissipée par la traînée varie comme la masse de l'animal à la puissance  $7/6$ . La puissance est fournie par les muscles et, selon une loi empirique, varie comme la puissance  $3/4$  de sa masse, plus lentement que la puissance à dépenser. Il existe donc une limite supérieure à la masse d'un volatile, fixée par sa capacité à fournir la puissance nécessaire au maintien de sa vitesse de vol. L'outarde, avec ses 20 kilogrammes en moyenne, est l'oiseau volant actuel le plus massif.

Afin d'économiser leur énergie, les grands oiseaux, tels le condor des Andes (3,2 mètres d'envergure pour une masse variant entre 11 et 15 kilogrammes) et l'albatros (3,4 mètres d'envergure pour une masse comprise entre 6 et 12 kilogrammes), préfèrent planer avec leurs grandes ailes alors que les pigeons et les moineaux pratiquent plus volontiers le vol battu. Plus grand, plus lourd, *Pelagornis sandersi* évoluait dans le ciel il y a 25 à 28 millions d'années avec une envergure estimée à plus de 6 mètres pour une masse comprise entre 22 et 40 kilogrammes! En 2014, grâce à des simulations numériques, Daniel Ksepka, conservateur au Bruce Museum, dans le Connecticut, a montré que cet oiseau était capable de planer à grande vitesse sur plusieurs kilomètres sans avoir besoin de battre des ailes.

Cette envergure record pour un oiseau n'a atteint cependant pas celle des plus grands

ptérosaures: *Quetzalcoatlus* et *Hatzegopteryx*, avec leurs 10 mètres de large et leurs 100 kilogrammes estimés, restent les plus grands animaux volants connus. Qu'en est-il des dragons? Leurs mensurations démesurées imposent *a priori* des contraintes physiques qui rendent très difficile le vol battu. Mais certaines «trouvailles» de la nature pourraient aider. Ainsi, pour rendre plausibles ces géants ailés, nous pourrions les imaginer, comme les oiseaux ou les ptérosaures,



UN VRAI CRACHEUR DE «FEU»

Le coléoptère bombardier *Stenaptinus insignis* a un mécanisme de défense original et élaboré: il projette sur le prédateur un liquide corrosif à presque 100 °C.

dotés de diverses structures d'allègement: des sacs aériens multiples, des poumons démesurés, des crânes très fenêtrés ou encore des os complètement creux, et ainsi de suite. L'évolution a sélectionné une large gamme de structures possibles permettant de se mouvoir dans les airs!

## ALLUMEEER LE FEU!

Le trait caractéristique du dragon, celui qui en fait un être à la fois puissant et effrayant, est sa capacité à cracher du feu. Or une réaction de combustion ne peut se produire que si trois éléments sont réunis: un combustible, un comburant et une énergie d'activation en quantités suffisantes. C'est pourquoi les pompiers parlent de «triangle du feu». Si la question du comburant est facilement évacuée (il s'agit généralement du dioxygène,  $O_2$ , contenu dans l'air), examinons quel serait le combustible et d'où viendrait l'énergie déclenchant la combustion.

Dans les feux courants, le combustible est un solide (charbon, bois, papier, carton, tissu,

PVC, etc.), un liquide (essence, gazole, fioul, huile, etc.) ou un gaz (gaz naturel, butane, propane, méthane, dihydrogène, etc.). Avec les contraintes que représente le vol pour un dragon, utiliser un gaz moins dense que l'air et inflammable, comme le dihydrogène (H<sub>2</sub>), semble être une solution idéale. Le dihydrogène remplissait d'ailleurs les fameux zeppelins, ces dirigeables rigides qui connurent leur âge d'or dans les années 1930. Le spectaculaire embrasement du *Hindenburg*, le 6 mai 1937, sonna le glas de ce mode de déplacement aérien.

Le méthane pourrait aussi être un bon choix, car les bactéries méthanogènes sont omniprésentes dans la biosphère (marécages, mangroves, sous-sol sibérien) et on les trouve aussi chez les termites et dans le tube digestif des vaches. Avec un microbiote adapté, le dragon serait capable de produire du méthane durant sa digestion avant de le stocker dans une poche dédiée. Le problème est qu'à pression et température ambiantes, un gaz occupe un volume considérable, environ 1000 fois supérieur à celui d'un liquide de même masse! C'est pourquoi le gaz naturel, qui contient essentiellement du méthane, est liquéfié à très basse température (environ -162 °C à la pression atmosphérique) pour être transporté dans des bateaux spécialisés, les méthaniers. Dans les véhicules fonctionnant au gaz naturel, il est stocké dans des réservoirs spécifiques à une pression 200 fois supérieure à la pression atmosphérique.

Mais l'utilisation d'un gaz pour créer son souffle pose un autre problème au dragon: peu dense, le jet serait difficile à diriger et se disperserait rapidement dans l'air ambiant. Le dragon émettrait une boule enflammée plutôt qu'un jet de feu.

La solution serait peut-être de s'inspirer des cracheurs de feu humains. Pour réaliser leur performance, ces artistes prennent en bouche un peu de liquide inflammable (pétrole désaromatisé ou paraffine liquide) et le pulvérisent en minuscules gouttelettes en direction d'une torche. La spectaculaire flamme qui en résulte donne l'impression de sortir directement de la bouche du cracheur. Cela évoque aussi le lance-flammes, une arme portative conçue pour projeter un liquide enflammé. Il existe également des lance-flammes destinés aux spectacles pyrotechniques qui émettent des flammes contrôlées à l'aide d'un brûleur. Bref, notre dragon pourrait disposer d'un organe spécialisé produisant un biocarburant liquide, stocké dans une poche dédiée et projetable à volonté sur ses ennemis.

Reste la question de la source d'énergie déclenchant la combustion. Dans les situations réelles, cette source est généralement de la chaleur (échauffement par frottement pour

une allumette ou par passage d'un courant électrique), une étincelle (allume-gaz, pierre à briquet) ou une flamme. Plusieurs solutions sont imaginables. Le dragon serait capable, par exemple, de créer des étincelles en crissant des « dents » spécialisées. Si son combustible est gazeux, il pourrait aussi utiliser un catalyseur comme la mousse de platine (néanmoins pas



## Les plus grands animaux volants connus sont des ptérosaures de 10 mètres d'envergure



facile à produire par un processus biologique!). À température ambiante, la mousse de platine fixe sur sa grande surface massique (qui peut atteindre des dizaines de mètres carrés par gramme!) de l'ordre de 100 fois sa masse de dihydrogène et jusqu'à 20 fois sa masse de dioxygène. Cette accumulation déclenche spontanément la réaction exothermique de combustion du dihydrogène.

Dans le cas des liquides, on trouve même des réactions autocatalytiques: il suffit de mélanger combustible et comburant pour que le mélange s'enflamme spontanément. Ce type de combustion est employé dans la propulsion spatiale car il dispense du dispositif d'allumage et permet de concevoir des propulseurs déclenchés ou arrêtés par simple ouverture ou fermeture de l'alimentation de la chambre de combustion. Malheureusement, ils font souvent appel à des comburants toxiques tels que l'hydrazine. Mauvais pour notre dragon.

La solution est peut-être à trouver chez les insectes. À partir des années 1980, Thomas Eisner, de l'université Cornell, a étudié les coléoptères bombardiers (appartenant au grand groupe des carabes). Ces insectes projettent par l'anus sur leurs prédateurs un liquide très chaud (100 °C) résultant du mélange exothermique d'hydroquinone (composé organique aromatique apparenté au phénol) et de peroxyde d'hydrogène (appelé eau oxygénée en solution aqueuse). Sans être aussi spectaculaire qu'une flamme de feu, le jet de ces insectes est tout aussi dissuasif. Mais alors, que resterait-il de la magie du dragon? ■

### BIBLIOGRAPHIE

M. Meurger, **Histoire naturelle des dragons : un animal problématique sous l'œil de la science**, Terre de Brume, 2006.

L. Grasset, **Les dragons pourraient-ils cracher du feu ?**, sur la chaîne YouTube *DirtyBiology*, [http://bit.ly/PLS488\\_Dragons1](http://bit.ly/PLS488_Dragons1)

V. Amouroux, **Le Musée des Dragons**, documentaire-fiction sur une histoire naturelle des dragons, 2005, [http://bit.ly/PLS488\\_Dragons2](http://bit.ly/PLS488_Dragons2)  
[http://bit.ly/PLS488\\_Dragons3](http://bit.ly/PLS488_Dragons3)

E. Buffetaut, **Des fossiles et des hommes**, Robert Laffont, 1991.

## L'AUTEUR



HERVÉ LE GUYADER  
professeur émérite de biologie  
évolutive à Sorbonne  
Université, à Paris

# COMMENT LE TÉTRA A PERDU LA VUE

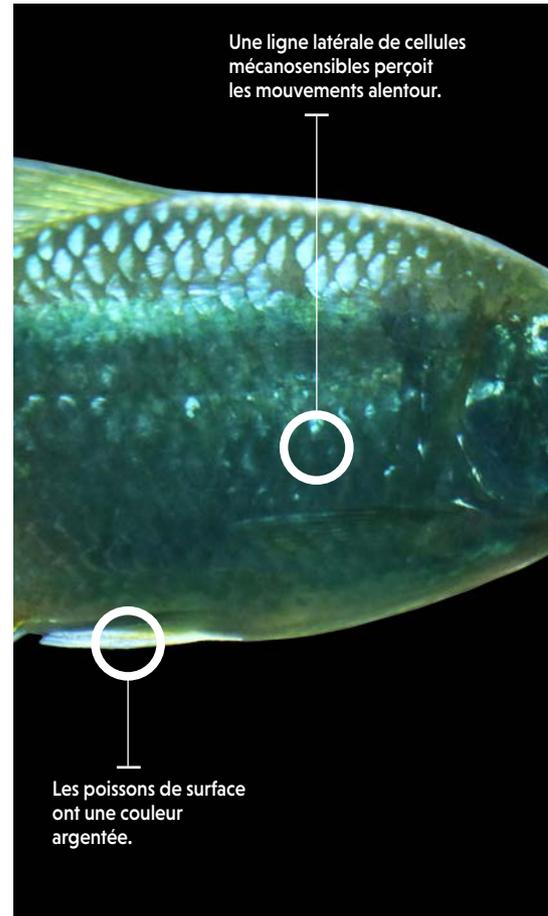
Contrairement à son frère de surface, le tétra mexicain des cavernes n'a plus d'yeux, alors que ces poissons appartiennent à la même espèce. Pourtant, son embryon commence bien à fabriquer ses yeux. Que deviennent les cellules produites ?

**D**ans la Sierra del Abra, au centre du Mexique, un petit poisson solitaire, rose pâle et sans yeux, explore sans relâche, méthodiquement, les fonds de Pachón, l'une des grottes souterraines de la vallée karstique. Cette version cavernicole du tétra mexicain (*Astyanax mexicanus*), un poisson d'eau douce rencontré du sud du Texas à la Patagonie, se nourrit en effet préférentiellement de fientes de chauves-souris... quand il en trouve. Son frère de surface, pourtant, nage en bancs dans la colonne d'eau des rivières et absorbe diverses proies, souvent des petits crustacés, qu'il capture en pleine eau.

La différence entre le tétra mexicain de surface et celui devenu cavernicole ne s'arrête pas là. De nombreux traits liés aux originalités de son nouveau milieu ont été décelés : les poissons cavernicoles ont non

seulement perdu leurs yeux et leur pigmentation, mais ils ont acquis des mâchoires plus puissantes et pourvues de plus de dents, ainsi qu'un plus grand nombre de bourgeons du goût et de neuro-mastes – des cellules ciliées formant une ligne mécanosensorielle le long du corps (la ligne latérale). Par ailleurs, leur métabolisme de base est très réduit, tandis que leur charge en graisse est plus élevée, ce qui leur confère une étonnante résistance à la famine – très utile dans leur habitat pauvre en nourriture. Enfin, leur temps de sommeil est très réduit, ce qui augmente celui consacré à la recherche alimentaire.

Ces singularités anatomiques et comportementales ont très vite intéressé les biologistes de l'évolution : en comparant les deux morphes du tétra, ils comprendraient peut-être les bases moléculaires de l'évolution du poisson cavernicole et parviendraient, qui sait, à retracer le récit de cette évolution. De fait, l'histoire qu'ils



Une ligne latérale de cellules mécanosensibles perçoit les mouvements alentour.

Les poissons de surface ont une couleur argentée.

## EN CHIFFRES

# 30 000

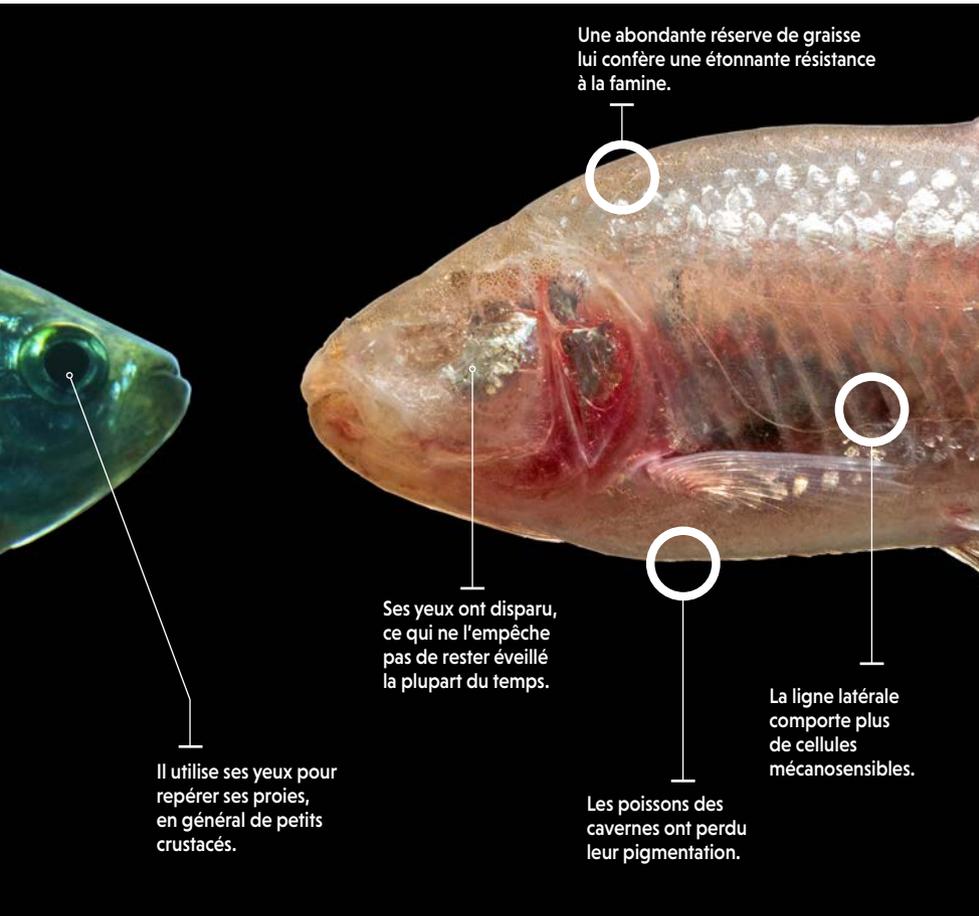
Les tétras mexicains auraient colonisé des grottes il y a environ 30 000 ans. Ils se seraient donc adaptés à leur nouvel habitat en très peu de temps, à l'échelle de l'évolution.

## 27 neurones

Le tétra mexicain cavernicole âgé de 24 heures compte 27 neurones à hypocréline, contre 17 chez le poisson de surface. Chez l'humain adulte, cette population de l'hypothalamus est elle aussi petite: 10 000 à 20 000 neurones sur les quelque 100 milliards que compte le cerveau.

# 100

Les neurones à neuropeptide Y sont à peine plus nombreux que ceux à hypocréline: 100 chez le poisson cavernicole âgé de 84 heures, soit deux fois plus que chez le poisson de surface.



l'exception du quadrant ventral de la rétine, réduit ou absent. Puis, tout à coup, chez l'embryon âgé de un jour, le cristallin se détruit par une apoptose (mort cellulaire) qui déclenche la dégénérescence complète et progressive de l'œil.

Pour en chercher l'explication, les biologistes ont comparé les expressions de certains gènes majeurs de développement chez les embryons des deux morphes. Ils ont ainsi montré que, d'une part, le gène *Shh* s'exprime un peu plus vers l'avant de l'embryon chez le morphe cavernicole. D'autre part, le gène *Fgf8*, qui interagit avec la protéine *Shh*, s'exprime deux heures plus tôt chez les embryons de poissons cavernicoles.

Ce sont ces légers décalages spatio-temporels qui entraînent la réduction de la taille de la rétine, avec la disparition du quadrant ventral. De plus, c'est le changement du territoire d'expression de *Shh* qui déclenche l'apoptose du cristallin. Enfin, en modulant l'expression de ces deux gènes, les chercheurs ont réussi à restaurer la taille de la rétine chez les poissons cavernicoles. Les cellules étaient donc bien quelque part, mais où? En fait, comme l'ont aussi montré Sylvie Rétaux et ses collègues, le décalage spatiotemporel des gènes de développement déplace les cellules du quadrant ventral de la rétine vers une région du cerveau, l'hypothalamus, laquelle devient donc plus importante chez le poisson cavernicole. >

commencent à dessiner est plus que surprenante.

### UNE DESTRUCTION PROGRAMMÉE

C'est en enquêtant sur la disparition de l'œil du tétra cavernicole que l'équipe de Sylvie Rétaux, à l'institut des neurosciences Paris-Saclay, à Gif-sur-Yvette, a peu à peu reconstitué tout un pan de cette histoire. Tout d'abord, en 2011, l'équipe a mis en évidence le mécanisme par lequel l'œil du tétra cavernicole a régressé. Intuitivement, on s'attendrait à ce qu'il ne se construise pas lors de l'embryogenèse. Pourtant, l'organe se développe normalement chez l'embryon précoce, à



Tétra mexicain  
(*Astyanax mexicanus*)  
Taille maximale: 12 cm

> Cette redistribution des cellules éclaire d'un jour nouveau le développement d'un système visuel chez un animal aveugle à l'âge adulte. Ce n'est pas une question de tout ou rien, mais de cohérence générale du développement du système nerveux central. L'œil et le cerveau ne se développent pas indépendamment l'un de l'autre. L'ensemble neuronal doit se construire précocement pour que l'animal ait un système nerveux fonctionnel. Ce n'est que devenu autonome, toute structuration embryologique terminée, que l'œil peut être résorbé sans dommage collatéral. Ainsi s'explique le paradoxe d'un animal aveugle qui présente toujours le programme de fabrication de l'œil.

### DE LA RÉTINE À L'HYPOTHALAMUS

Que deviennent les cellules intégrées à l'hypothalamus? Cette question est primordiale, car l'hypothalamus est un centre nerveux qui, en intégrant les signaux centraux et périphériques, se comporte comme une plaque tournante. Il libère des messagers chimiques contrôlant des comportements tels que l'activité locomotrice, les cycles sommeil-éveil, la prise de nourriture... c'est-à-dire les comportements originaux des poissons cavernicoles. Chez la souris, ces comportements sont sous le contrôle de populations adjacentes de neurones de l'hypothalamus, qui sécrètent différents neuropeptides. Tout récemment, l'équipe de Sylvie Rétaux est donc partie en quête de telles populations chez les deux morphes de tétra. Les résultats les plus impressionnants concernent les neurones à hypocretine et à neuropeptide Y.

L'hypocretine est un neurotransmetteur produit par une population très restreinte de neurones de l'hypothalamus. Elle stimule l'appétit et l'état d'éveil. Le neuropeptide Y, quant à lui, stimule la prise de nourriture et, par conséquent, favorise l'adiposité. Or les neurones à hypocretine et à neuropeptide Y se sont révélés plus nombreux chez les poissons cavernicoles – lesquels mangent plus, dorment moins et sont plus gras que les poissons de surface. Ainsi, les anciennes cellules rétiniennes sont devenues des neurones sécréteurs de l'hypothalamus, lesquels ont favorisé des changements de comportement – comme si la disparition des yeux du tétra n'avait été qu'un dommage collatéral de la réorientation des cellules de la rétine vers l'hypothalamus.

Par ailleurs, les tétras ont dû acquiescer assez rapidement ces modifications.

## DIABÉTIQUES, MAIS EN BONNE SANTÉ

**L**es tétras mexicains cavernicoles sont diabétiques. Leur glycémie est près du double de celle des poissons de surface et ils présentent une forte résistance à l'insuline : l'hormone se fixe moins sur son récepteur à cause d'une mutation ponctuelle sur ce dernier. C'est ce qu'ont montré Misty Riddle, de l'université Harvard, et ses collègues, en 2018. Or une telle mutation est bien connue en génétique humaine, car elle est à l'origine du syndrome de Rabson-Mendenhall, une forme très sévère de diabète. Chez l'humain, une telle déficience entraîne des désordres importants, tels que des difformités de la face et des anomalies de la peau. De plus, l'hyperglycémie entraîne une fixation de sucres sur les protéines, avec pour conséquence un vieillissement accéléré des tissus. Le tétra cavernicole, lui, semble très bien s'accommoder de cette mutation. Son espérance de vie est identique à celle des poissons de surface, et la mutation lui conférerait même des réserves de graisse plus abondantes. Explorer les mécanismes compensateurs qui ont gommé ses effets délétères aidera probablement à comprendre toutes les facettes de la maladie humaine.

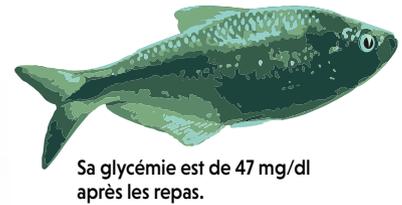
POISSON DES CAVERNES



Selon la grotte, sa glycémie varie de 64 à 92 milligrammes par décilitre (mg/dl) après les repas.

Les mâles jeunes et à jeun pèsent 2 grammes.

POISSON DE SURFACE



Sa glycémie est de 47 mg/dl après les repas.

Les mâles jeunes et à jeun pèsent 1,5 gramme.

C'est ce que suggère une autre étude récente menée par Didier Casane, de l'université Paris-Saclay, et Sylvie Rétaux. Modélisations élaborées à l'appui, les biologistes plaident pour une colonisation des cavernes il y a 30 000 ans environ, au Pléistocène. Soit bien plus récente que les migrations vieilles de 8 et 3 millions d'années que suggérait en 2012 Joshua Gross, de l'université de Cincinnati, à partir d'informations géologiques et climatiques sur la formation des grottes karstiques, et de données génétiques partielles.

Or cette période de 30 000 ans est bien trop courte pour soutenir l'explication classique de l'évolution: des mutations ne peuvent survenir et être sélectionnées en un temps si bref. Plusieurs variants génétiques de tétras mexicains devaient donc préexister dans les eaux de surface, dont certains ont été sélectionnés dans les cavernes. Ainsi, des changements anatomiques, physiologiques et comportementaux majeurs peuvent être obtenus très rapidement, en quelques dizaines de milliers d'années... ■

### BIBLIOGRAPHIE

A. Alié *et al.*, **Developmental evolution of the forebrain in cavefish, from natural variations in neuropeptides to behavior**, *eLife*, vol. 7, article e32808, 2018.

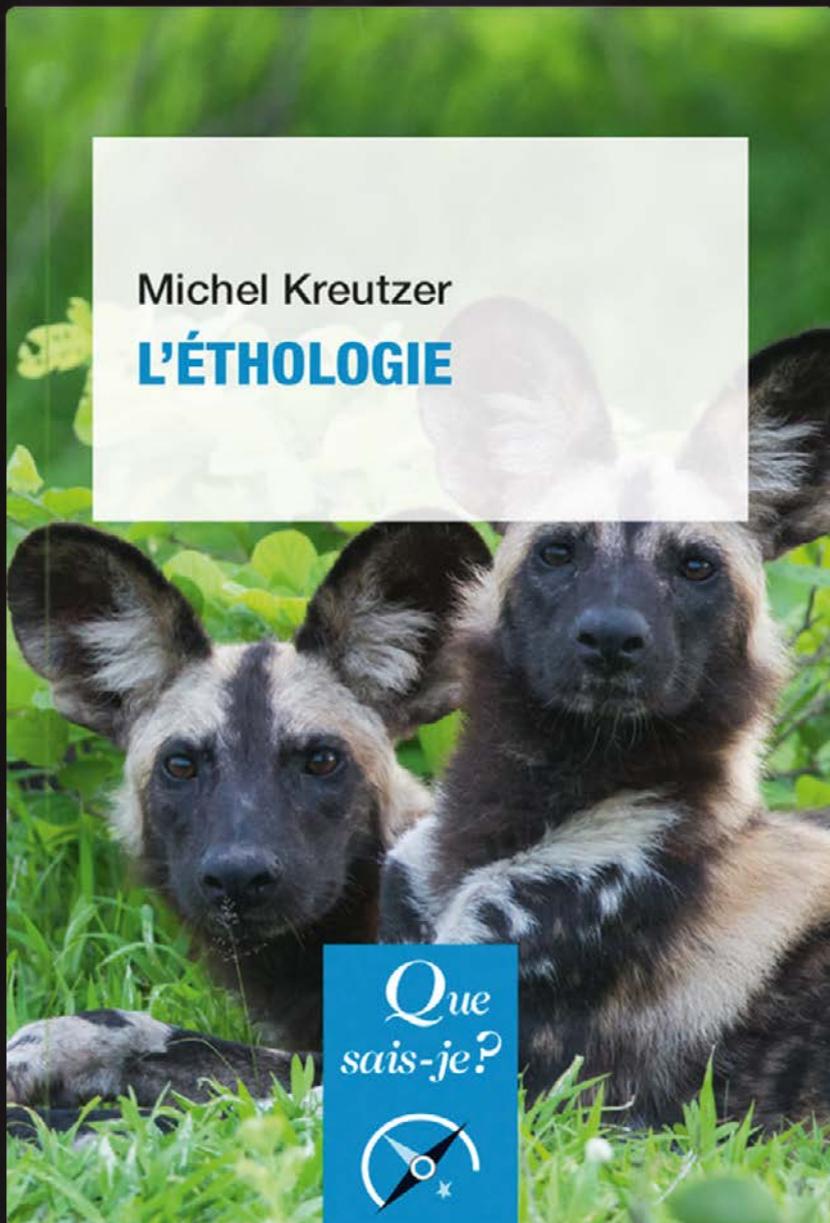
J. Fumey *et al.*, **Evidence for late Pleistocene origin of *Astyanax mexicanus* cavefish**, *BMC Evol. Biol.*, vol. 18, article 43, 2018.

M. Riddle *et al.*, **Insulin resistance in cavefish as an adaptation to a nutrient-limited environment**, *Nature*, vol. 555, pp. 647-651, 2018.

J. B. Gross, **The complex origin of *Astyanax* cavefish**, *BMC Evol. Biol.*, vol. 12, article 105, 2012.



# À l'écoute de nos amis les animaux



Suivez-nous  
sur les réseaux sociaux



quesaisje.com

## L'AUTEUR



**HERVÉ THIS**  
physicochimiste,  
directeur du Centre  
international de  
gastronomie moléculaire  
AgroParisTech-Inra, à Paris

# DES BONBONS POUR TOUS LES GOÛTS

En variant les ingrédients de la ganache et ceux de la coque dure de la friandise, on obtient des bonbons généralisés, qui peuvent être sucrés ou salés.

**A**vec leur mince coque de chocolat cristallisé autour d'une ganache tendre, les bonbons de chocolat apportent du contraste de consistance, de la tendreté, de la matière grasse et du sucre... sans compter le goût du chocolat. Mais la gourmandise réclame de la diversité: les chocolatiers ont appris à faire des ganaches parfumées au café, au miel, au thé, aux épices, aux fruits... Pourrait-on varier davantage?

Oui, grâce à la gastronomie moléculaire. Pour ce faire, il faut noter que la couverture des bonbons est classiquement faite de matière grasse cristallisée, et la ganache d'une émulsion partiellement cristallisée. En pratique, le chocolat de couverture est fait principalement de sucre, de beurre de cacao et de chocolat en poudre. Pour la ganache, les chocolatiers mêlent du chocolat fondu et de la crème chauffée, et leurs opérations conduisent à une émulsion où la matière grasse fondue se disperse dans une phase aqueuse continue, apportée par la crème: le principe est celui de la confection d'une mayonnaise, où la crème joue le rôle du mélange de jaune d'œuf et de vinaigre, et le chocolat fondu tient le rôle de l'huile.

Le sucre est facultatif: on peut faire des bonbons au goût que l'on voudra, il faudra seulement produire une coque de matière grasse solide, avec un intérieur restant tendre.

Une coque de matière grasse solide? Le beurre de cacao a une composition en triglycérides telle que sa fusion s'effectue entre 34°C et 37°C environ; mais d'autres matières grasses, telles que la graisse de rognons de bœuf ou le beurre, ont un comportement analogue. On choisira donc l'une ou l'autre de ces matières grasses pour réaliser la coque de bonbons

La coque n'est pas obligatoirement en chocolat, et la tendre ganache n'est pas forcément à base de crème laitière.



généralisés, à condition de maîtriser les températures de travail.

Pour l'intérieur des bonbons, la tendreté est due au fait que le système contient au moins une phase aqueuse et une phase grasse partiellement à l'état liquide: c'est le cas de la matière grasse laitière de la crème, qui commence à fondre à -10°C et finit de fondre vers 50°C. Pour généraliser la ganache, on partira donc d'une phase aqueuse, où l'on émulsionnera de la matière grasse susceptible d'être partiellement fondue à la température de travail et de consommation.

Une phase aqueuse? Pour de la cuisine classique, cela peut être de l'eau, du café, du thé, une infusion, une décoction, une macération, du bouillon, du vin, un légume broyé (la teneur en eau atteint 99% dans les laitues), un fond, un fumet, une essence... Pour de la cuisine «note à note», où les ingrédients sont des composés purs, la phase aqueuse sera une solution de composés hydrosolubles (acide tartrique, citrique, glucose, lactose, sels minéraux, acides aminés, polyphénols...) dans de l'eau.

À cette phase aqueuse, on ajoutera un composé tensioactif, tel la gélatine, ou encore des lécithines, des protéines variées; puis du beurre, en chauffant et en fouettant, afin de reproduire un analogue de la crème. Disposant de cette «crème», on pourra alors reproduire la ganache en ajoutant le beurre de cacao fondu à l'émulsion. Tout en surveillant la température: il s'agit d'éviter les «grainages» qui se

produiraient par solidification de la matière grasse du beurre de cacao.

Le nom de «bonbon» est-il approprié? Le terme désigne une friandise de consistance relativement dure, ce qui n'est pas le cas de nos généralisations des bonbons de chocolat. Il faudrait introduire un nouveau nom. Je propose «cryptand» puisque, comme les productions du chimiste Jean-Marie Lehn, il y a une inclusion. Mais qu'importe l'enrobage linguistique, pourvu qu'on ait le plaisir! ■

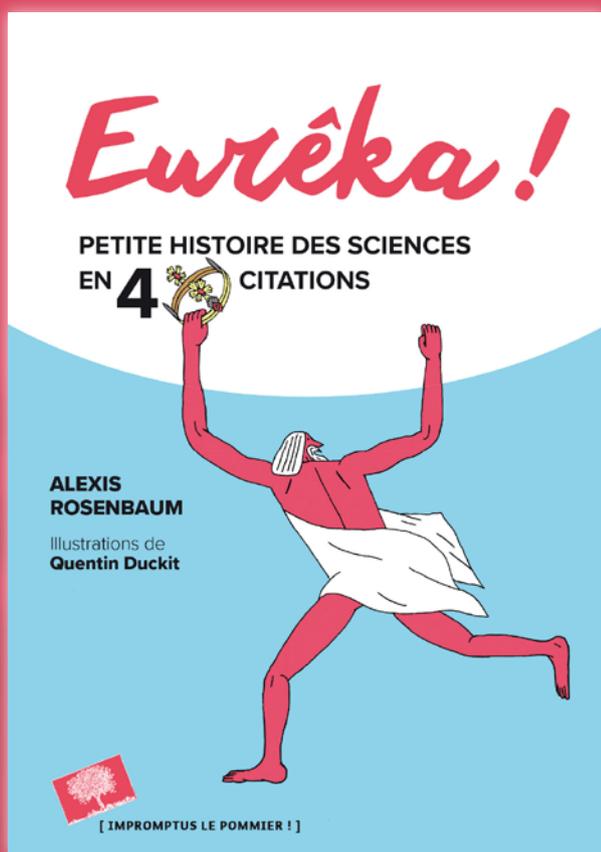


## LA RECETTE

- 1 Pour des cryptands de beurre d'ail à servir avec des filets de sole ou des bulots, commencer par fondre du beurre de cacao.
- 2 Dans les alvéoles de moules antiadhérents (silicone, polycarbonate), verser le beurre de cacao fondu, puis retourner les moules pour ne laisser qu'une mince couche de cacao fondu; à la spatule, éliminer le beurre de cacao sur la partie supérieure des moules. Mettre ces derniers au réfrigérateur pendant 5 minutes.
- 3 Préparer une émulsion en broyant de l'ail blanchi, du sel, du persil, du jus de citron, puis en y versant du beurre fondu tout en fouettant. Chauffer et y émulsionner du beurre de cacao fondu.
- 4 Laisser refroidir l'émulsion jusqu'à ce que la température soit inférieure à 30°C, puis en emplir les alvéoles. Mettre au réfrigérateur pendant 5 minutes.
- 5 Puis fermer les bonbons de beurre d'ail en versant une couche de beurre de cacao fondu. Mettre au réfrigérateur pendant 5 minutes.

Livre  
conseillé par  
LE POMPIER POUR LA  
**SCIENCE**

L'histoire des sciences  
comme on ne vous l'a  
jamais racontée !



Alexis Rosenbaum - 182 p. - 18 €

Un moyen simple et  
agréable d'aborder  
l'extraordinaire  
histoire des sciences  
qui a, directement  
ou indirectement,  
façonné nos sociétés.

Retrouvez toutes nos nouveautés sur notre site  
[www.editions-lepommier.fr](http://www.editions-lepommier.fr)



# A

## PICORER



Retrouvez tous  
nos articles sur  
[www.pourlascience.fr](http://www.pourlascience.fr)

P. 86

## CRACHEUR

Le coléoptère bombardier *Stenaptinus insignis* a un mécanisme de défense original et élaboré : il projette sur son agresseur un liquide corrosif porté à une température de presque 100°C.

P. 80

## 300

C'est le nombre de fragments de l'homme-lion de Hohlenstein-Stadel, une sculpture en ivoire de mammoth vieille de 40 000 ans. Mis au jour en 1939, ces fragments ont été rassemblés depuis. Mais il manque encore des pièces du puzzle... Cela n'a pas empêché d'en faire une réplique dix fois plus grande, à l'intérieur de laquelle un artiste s'est enfermé durant plusieurs jours.

P. 26

« Est-il normal que, sur des questions de santé publique sensibles et complexes, les moteurs de recherche sur Internet affichent prioritairement des contenus qui contredisent le consensus scientifique? »

GÉRALD BRONNER  
sociologue à l'université  
Paris-Diderot

P. 82

## 2°

C'est l'écart angulaire qu'il peut y avoir, quand une voiture prend un virage sur route, entre la direction des roues et celle du mouvement du véhicule. En cause : le glissement partiel des pneus!

P. 40

## PÉRIL GAMMA

Sur une période de 500 millions d'années, la probabilité qu'un sursaut gamma détruise entièrement la couche d'ozone de la Terre est égale à environ 50%. L'extinction massive de l'Ordovicien, il y a 450 millions d'années, était-elle due à un tel événement? Certains chercheurs le pensent.

P. 74

## LOI DE BENFORD

Dans une série de nombres telle que les populations des villes, les distances entre étoiles, les prix de marchandises... le premier chiffre significatif est le plus souvent 1, plus rarement 2, encore plus rarement 3, etc. Mais cette loi a des exceptions, par exemple avec les numéros des plaques d'immatriculation.

P. 28

## COUSINS

Les cétacés ont évolué d'une façon assez spectaculaire. Leur ancêtre était un mammifère placentaire terrestre, dont les descendants se sont progressivement adaptés à la vie aquatique il y a plusieurs dizaines de millions d'années. Leurs plus proches parents actuels sont... les hippopotames!

L'Observatoire de Paris propose deux Diplomes d'Université:

# LUMIÈRES SUR L'UNIVERS

Formation en ligne en astrophysique - Niveau (L1-M1) - Diplômante

- Cours et nombreux exercices interactifs - **Tutorat personnel individualisé** assuré par des **astrophysiciens professionnels**.
- Ouvert à tous (niveau bac minimum) : passionnés, animateurs, étudiants...
- Validation possible sous forme d'un Diplôme d'Université ou de Crédits de Licence ou de Master (ECTS))

## Des parcours spécialisés adaptés à tous

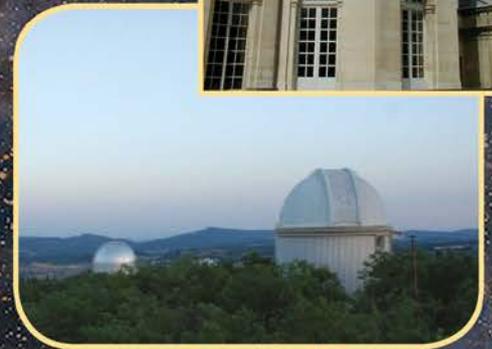
Des étoiles aux planètes : niveau L1-L2  
Cosmologie et Astrophysique extragalactique : niveau L2  
Mécanique Céleste : niveau L3  
Fondamentaux pour l'astronomie et l'astrophysique : niveau L3  
Sciences Planétaires : niveau L3  
Fenêtres Sur l'Univers : niveau M1  
Instrumentation, chaîne de mesure et projets : niveau M1

Inscriptions 2018 - 2019 ouvertes jusqu'au 3 Septembre 2018 :

[https://ufe.obspm.fr/candidatures\\_ufe](https://ufe.obspm.fr/candidatures_ufe)

Contenus visibles ici : <https://media4.obspm.fr/dulu>

[contact.dulu@obspm.fr](mailto:contact.dulu@obspm.fr)



# EXPLORER ET COMPRENDRE L'UNIVERS

Formation en présentiel ou à distance en vidéo, Niveau L1, Diplômante

## Objectifs

Acquérir un panorama des connaissances actuelles et des recherches en cours en astronomie et en astrophysique auprès d'astronomes professionnels. Un stage d'observation de 4 nuits est proposé à l'Observatoire de Haute Provence en été (en option et sous conditions ; nombre de places limitées).

## Contenu

Cours le mardi soir de 17h à 20h à Paris : Mécanique Céleste, Ondes et instruments, Histoire, Soleil, Planétologie comparée, Traitement de données, Etoiles et milieu interstellaire, Galaxies, Cosmologie, Epistémologie. Cette formation s'adresse 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.

Ces cours peuvent être suivis en présentiel ou à distance en vidéo (en direct ou en différé).

## Publics concernés

## Inscriptions

Un stage de travaux pratiques est proposé en mars à l'Observatoire de Meudon (en option et sous conditions ; nombre de places limitées). Dossiers à déposer avant le 3 septembre sur le site d'inscription en ligne : [https://ufe.obspm.fr/candidatures\\_ufe](https://ufe.obspm.fr/candidatures_ufe)

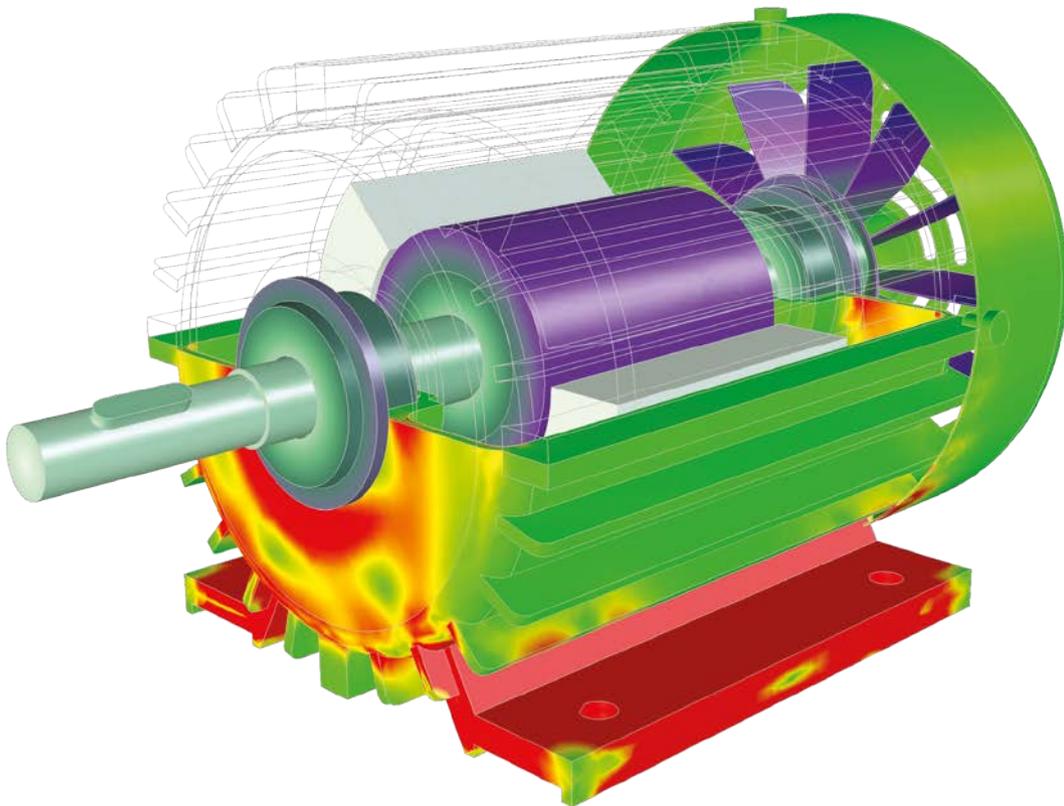
## Renseignements

<http://ufe.obspm.fr/Diplomes-d-Universite/DU-en-presentiel>

[contact.duecu@obspm.fr](mailto:contact.duecu@obspm.fr)

Téléphone : 01.45.07.78.87

*Inventé au 19<sup>ème</sup> siècle. Optimisé pour aujourd'hui.*



*Distribution des contraintes de von Mises dans le carter d'un moteur à induction avec prise en compte des effets électromécaniques.*

Au 19<sup>ème</sup> siècle, deux scientifiques ont inventé séparément le moteur à induction AC. Aujourd'hui, c'est un composant commun en robotique. Comment y sommes nous arrivés, et comment les ingénieurs d'aujourd'hui peuvent-ils continuer d'améliorer ces moteurs?

Le logiciel COMSOL Multiphysics® est utilisé pour simuler des produits, des systèmes et des procédés dans tous les domaines de l'ingénierie, de la fabrication et de la recherche. Découvrez comment l'appliquer pour vos designs.

[comsol.blog/induction-motor](https://comsol.blog/induction-motor)