

POUR LA

Édition française de Scientific American

Mai 2018
N° 487

POUR LA SCIENCE

SCIENCE



STEPHEN HAWKING RACONTÉ PAR THIBAUT DAMOUR

BIOLOGIE

**LE PLACENTA,
CET ORGANE
SI MAL CONNU**

ASTROPHYSIQUE

**LA NAISSANCE
FULGURANTE
DES PLANÈTES**



**UN HORS-SÉRIE NUMÉRIQUE
GRATUIT À TÉLÉCHARGER**

L'ÉNIGME DES MATRICES ALÉATOIRES

**Pourquoi ces objets
mathématiques sont-ils partout ?**

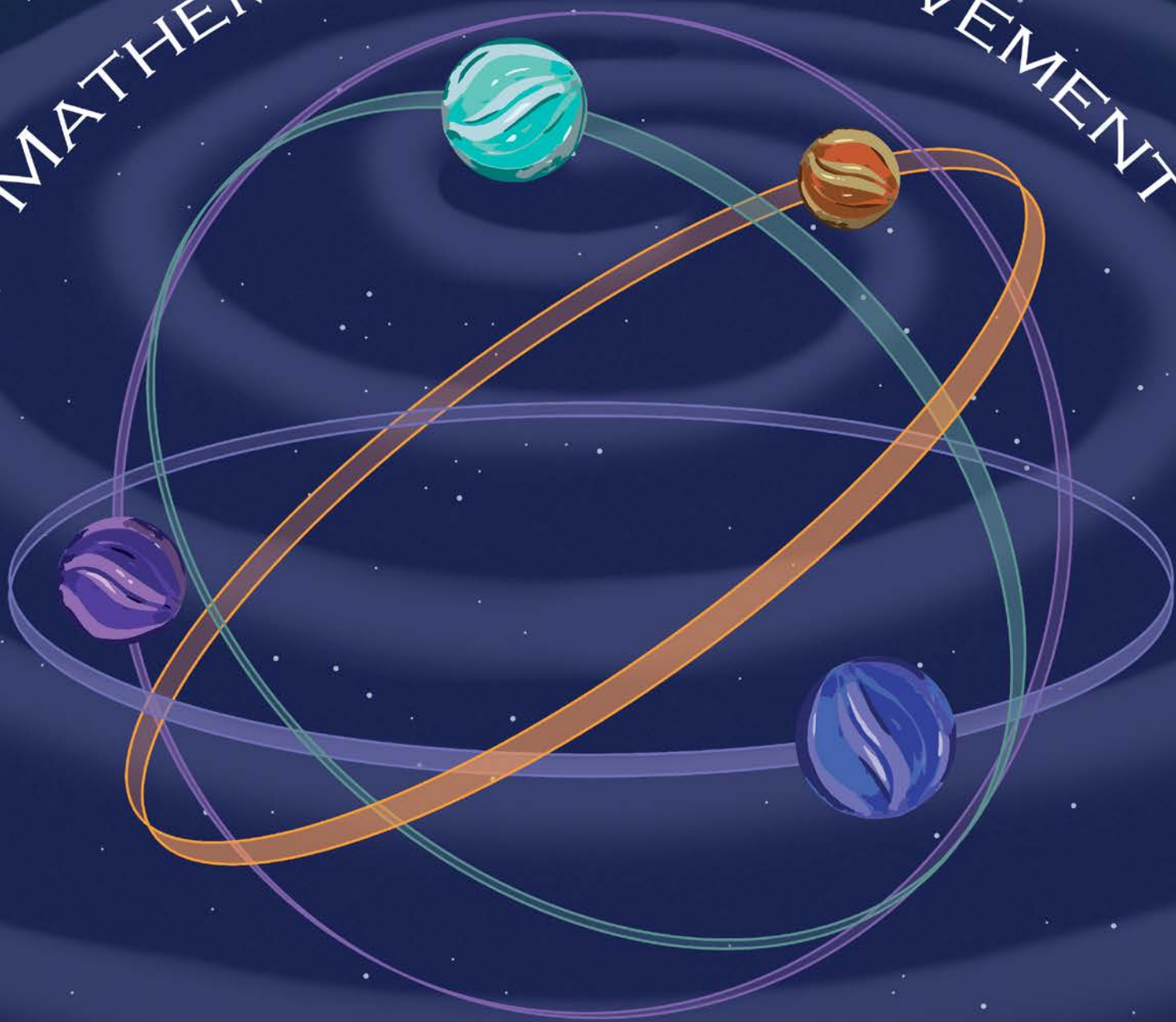
M 02687 - 487 - F: 6,90 € - RD





19^E SALON
CULTURE & JEUX MATHÉMATIQUES

MATHÉMATIQUES ET MOUVEMENT



DU 24 AU 27 MAI 2018
PLACE SAINT-SULPICE - PARIS 6^E

TOUT PUBLIC. ENTRÉE LIBRE ET GRATUITE !

CIJM.ORG/SALON



@JEUXMATHS



Certifié PEFC

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

10-31-1282

pefc-france.org



**MAURICE
MASHAAL**
Rédacteur
en chef

DE L'ORDRE UNIVERSEL DANS LE HASARD

Le hasard est un phénomène désigné en général au singulier, ce qui est trompeur: il existe en effet d'innombrables formes de hasard. Pour prendre un exemple simple, le hasard d'un jet de dé régulier n'est pas le même que celui associé à un dé pipé, dont la face favorable apparaît plus souvent que une fois sur six. Mais en dépit de l'existence d'une infinité de formes différentes de hasard, celui-ci obéit, quand on répète un grand nombre de fois la même épreuve aléatoire, à certaines lois statistiques de caractère universel.

La plus célèbre est sans doute la loi de Gauss, aussi appelée loi normale: cette distribution statistique décrite par une courbe en forme de cloche est universelle dans le sens où une multitude de phénomènes aléatoires différents s'y conforment. Et ce n'est pas seulement une constatation: un théorème fondamental de la théorie des probabilités explique cette réalité.

La loi de Gauss et des lois statistiques analogues font aujourd'hui partie de la science «classique». Dans ce numéro, le physicien théoricien Bertrand Eynard nous introduit à d'autres lois universelles, découvertes beaucoup plus récemment à propos des matrices aléatoires – des tableaux de nombres tirés au hasard (*voir pages 34 à 44*). Ces objets mathématiques, très étudiés depuis les années 1950, se sont révélés captivants: non seulement ils présentent des lois statistiques universelles, mais on retrouve celles-ci un peu partout, dans les métros, les forêts, le long des trottoirs... Et, cerise sur le gâteau, des liens profonds, souvent fructueux et parfois mystérieux, se révèlent avec divers champs des mathématiques et de la physique théorique, comme la théorie des nombres, la géométrie des surfaces, la théorie des cordes... Bonne découverte! ■

Nous avons appris avec tristesse le décès d'Annie Tacquenot, qui a été la secrétaire de rédaction de *Pour la Science* depuis ses origines, en 1977, jusqu'en 2013. Toute l'équipe adresse ses sincères condoléances à sa famille et à son époux Daniel, lui aussi collaborateur de longue date de *Pour la Science*.

S

OMMAIRE

N° 487 /
Mai 2018



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

HOMMAGE



P. 6
ENTRETIEN

STEPHEN HAWKING RACONTÉ PAR THIBAUT DAMOUR

Stephen Hawking s'est éteint le 14 mars dernier à l'âge de 76 ans. Son empreinte sur la physique est-elle aussi forte que sa notoriété auprès du grand public? Au-delà des résultats qu'il a obtenus, les réflexions qu'il a suscitées en cosmologie sont une source d'inspiration qui nourrit toujours les physiciens.



En couverture:
© Shutterstock.com/bekulnis

Les portraits des contributeurs
sont de Seb Jarnot

ACTUALITÉS

P. 14

ECHOS DES LABOS

- L'angle magique du graphène
- Les gènes des derniers Néandertaliens
- Des étoiles nées 180 millions d'années après le Big Bang
- Fin des douleurs chroniques?
- La surprise de la saxifrage
- Des virus géants très bactériens
- Traiter les eaux polluées
- L'archéoptéryx volait comme un faisan
- L'énigmatique expansion des langues Pama-Nyungan
- Eau et ondes sismiques
- La glace des profondeurs
- Des vents dans les abîmes de Jupiter

P. 26

LES LIVRES DU MOIS

P. 28

AGENDA

P. 30

HOMO SAPIENS INFORMATICUS

L'art de la synchronisation
Gilles Dowek

P. 32

CABINET DE CURIOSITÉS SOCIOLOGIQUES

Quand l'idéologie
détourne la science
Gérald Bronner

GRANDS FORMATS



P. 46

BIOLOGIE DU DÉVELOPPEMENT

LE PLACENTA, CET INCONNU

Adrian Erlebacher
et Susan J. Fisher

Le placenta, l'organe le plus mystérieux de l'anatomie humaine, est bien plus qu'une simple centrale d'approvisionnement du fœtus. À la fois lien avec la mère et barrière, il conditionnerait la vie entière de l'enfant.



P. 56

PLANÉTOLOGIE

LA NAISSANCE FULGURANTE DES PLANÈTES

Linda Elkins-Tanton

Une naissance lente et progressive: tel était le scénario des origines pour les planètes du système solaire. Mais des études récentes, notamment de la météorite Allende, racontent une autre histoire, bien plus rapide et agitée.



P.66

EVOLUTION

COMMENT LES SERPENTS ONT PERDU LEURS PATTES

Hongyu Yi

L'étude de plusieurs fossiles de serpents et du développement embryonnaire des espèces actuelles suggère que les serpents ont acquis leur corps fuselé dans un milieu terrestre.



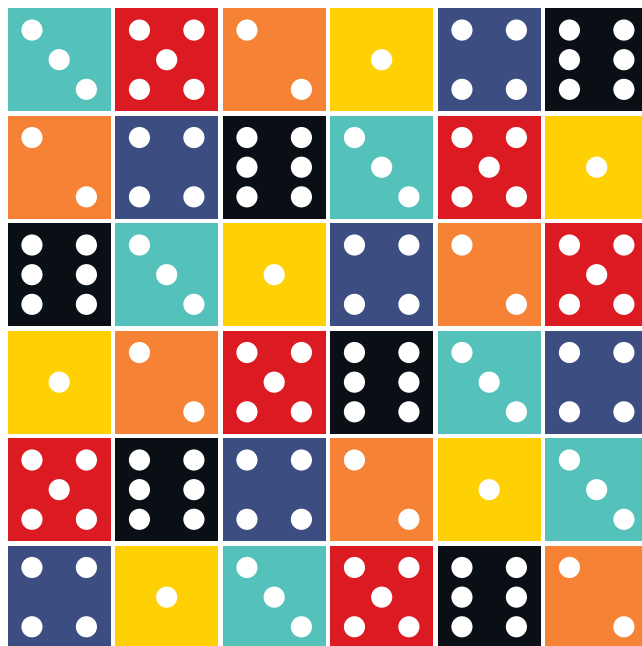
P.74

HISTOIRE DES SCIENCES

LE TROU NOIR DES LUMIÈRES

Jacques Gappaillard

Au XVIII^e siècle, d'illustres savants se sont trouvés confrontés à une singularité mathématique. Sans soupçonner qu'elle constituait un sérieux obstacle théorique, ils n'hésitèrent pas à passer outre de façon *a priori* plausible ou, au contraire, carrément extravagante.



P.34

MATHEMATIQUES

L'UNIVERSALITÉ DES MATRICES ALÉATOIRES

Bertrand Eynard

Les régularités tapies dans le hasard n'ont pas fini de nous étonner. Avec les matrices aléatoires, les scientifiques découvrent des lois statistiques fascinantes et universelles, c'est-à-dire indépendantes du type de hasard choisi, ainsi que des liens intimes et féconds avec la géométrie, la théorie des cordes...

RENDEZ-VOUS

P.80

LOGIQUE & CALCUL

LES CARRÉS MAGIQUES D'AIRES

Jean-Paul Delahaye

On s'intéresse aux carrés magiques depuis plus de deux millénaires. Des amateurs d'énigmes leur ont récemment associé des exigences géométriques, ce qui enrichit spectaculairement le domaine.



P.86

ART & SCIENCE

Apollon et la petite souris

Loïc Mangin

P.88

IDÉES DE PHYSIQUE

Les transformations du transformateur

Jean-Michel Courty
et Édouard Kierlik

P.92

CHRONIQUES DE L'ÉVOLUTION

La leçon du pongo de Tapanuli

Hervé Le Guyader

P.96

SCIENCE & GASTRONOMIE

Faut-il fouetter la sauce hollandaise?

Hervé This

P.98

À PICORER



1942

Naissance
le 8 janvier
à Oxford,
en Angleterre.

Études
à l'université
d'Oxford, puis
début de la thèse
de doctorat
à l'université
de Cambridge.

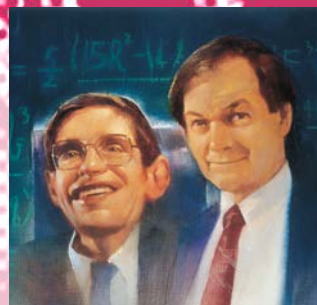
1959-1962

1963

Premiers signes
de sclérose
latérale
amyotrophique.

Obtention
du doctorat,
sur l'étude
des singularités.

1965



1970

Avec Roger Penrose,
il montre sous
certaines conditions
que l'Univers
a débuté par
une singularité.

Stephen Hawking

raconté par Thibault Damour

Stephen Hawking s'est éteint le 14 mars dernier à l'âge de 76 ans. Son empreinte sur la physique est-elle aussi forte que sa notoriété auprès du grand public ? Au-delà des résultats qu'il a obtenus, les réflexions qu'il a suscitées en cosmologie sont une source d'inspiration qui nourrit toujours les physiciens.

Travaux montrant que les trous noirs « s'évaporent » (rayonnement de Hawking).

1974

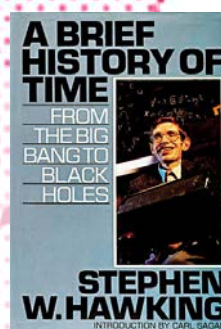


1979-2009

Chaire de professeur lucasien à l'université de Cambridge.

Selon lui, l'information est définitivement perdue dans un trou noir.

1981



1988

A Brief History of Time (Une brève histoire du temps), succès de librairie.

Nouvelles idées, selon lesquelles l'information n'est pas détruite dans un trou noir.

2004

THIBAUT
DAMOUR

est physicien théoricien, professeur à l'IHES (Institut des hautes études scientifiques, à Gif-sur-Yvette) et membre de l'Académie des sciences. Spécialiste de la relativité générale et de la théorie des cordes, il a reçu la médaille d'or du CNRS en 2017 pour ses travaux sur le rayonnement gravitationnel des systèmes binaires.



Stephen Hawking est un sphinx qui nous lègue des énigmes

Stephen Hawking était un de vos proches collègues, mais aussi le physicien le plus connu du grand public, élevé au rang de mythe de son vivant. Que penser de cette notoriété ?

Hawking n'était peut-être pas «le nouvel Einstein» que les médias ont voulu présenter, mais n'allons pas déboulonner des statues pour autant ! Il reste avant tout un scientifique remarquable. Qu'il ait pu, sa vie durant, se maintenir aux frontières du savoir tout en affrontant sa terrible maladie m'a toujours laissé admiratif. C'était une personnalité riche, un amoureux de la musique et un homme plein d'humour.

Un autre trait de sa personnalité m'a frappé un soir qu'il m'avait invité à dîner à Cambridge. Je m'attendais à une tablée de physiciens, mais nous étions seuls et il voulait simplement jouer avec moi à un jeu – Othello – dont il a dû m'expliquer les règles. Au bout d'un moment, je commençais à comprendre et à gagner, ce qui manifestement le chiffonnait. Une minute avant minuit, l'heure à laquelle je devais partir, je jouai un coup gagnant qui mettait fin à la partie. Mais comme je me levais, à minuit et une minute, Stephen produisit discrètement un autre coup, qui l'aurait fait gagner s'il n'avait pas déjà perdu... Hawking jouait toujours pour gagner ! C'est aussi cette volonté qui lui a permis de tenir si merveilleusement face à sa maladie. Mais il n'écrasait pas les autres. Il n'a jamais joué les vedettes parmi les autres scientifiques, même si sa célébrité l'amusait. En fait, il a tenté d'en faire quelque chose d'utile, pour la défense de la vie animale ou sous la forme d'une fondation à Cambridge. C'était fondamentalement un type bien.

Stephen Hawking a fait une entrée remarquée dans le monde de la physique théorique en 1966, avec sa thèse qui prolongeait les travaux du physicien et mathématicien britannique Roger Penrose visant à prouver que les singularités sont inévitables en relativité générale. Que reste-t-il de ce travail ?

Les travaux de Penrose, puis de Stephen Hawking à cette époque, restent très importants. Penrose avait inauguré des méthodes mathématiques qui prenaient en considération les propriétés globales de l'espace-temps de la relativité générale sans qu'il y ait besoin de résoudre les équations d'Einstein. Il s'en était servi pour démontrer l'existence de lignes d'univers qui n'ont pas de futur. Qu'est-ce qu'une ligne d'univers ? En quelque sorte la ligne de vie d'un objet dans l'espace-temps. Penrose avait montré que celle d'une particule tombant dans un trou noir s'arrête en un temps fini selon son horloge. Il y a donc bel et bien quelque chose de singulier à cet endroit. L'espace-temps n'est pas complet : des points en sont ôtés, ainsi que toutes les lignes qui en partent vers le futur. Hawking s'est servi de ce résultat pour montrer qu'il en va de même

de la singularité cosmologique au début de l'Univers : des lignes d'univers n'ont pas de passé au-delà d'un certain point.

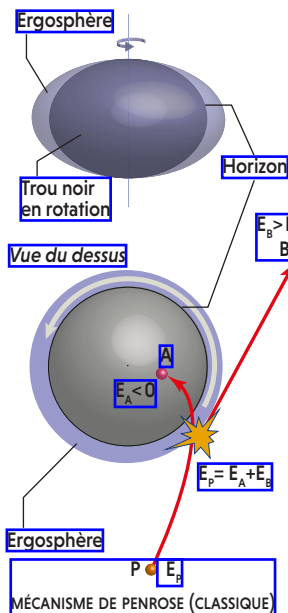
Certes, ces méthodes générales ne permettaient pas de savoir ce qui se passe exactement. Le temps existe-t-il encore au niveau du Big Bang ? N'y a-t-il effectivement plus d'espace ? À quoi correspondent les points singuliers de l'espace-temps de Penrose dans l'Univers ? On ne sait toujours pas répondre à ces questions. Néanmoins, ces résultats, aujourd'hui nommés théorème de Penrose-Hawking, ont marqué un tournant. En 1963, les Russes Isaak Khalatnikov et Evgueni Lifchitz venaient de poser le problème de la nature de la singularité cosmologique. En relativité générale, nous faisons nos calculs dans le cadre d'hypothèses simplificatrices, en supposant par exemple que l'Univers est homogène et isotrope, c'est-à-dire très symétrique. Khalatnikov et Lifchitz s'interrogeaient : est-ce à cause de ces hypothèses qu'une singularité apparaît au départ de l'Univers ? Si les choses étaient moins symétriques, cet artefact disparaîtrait-il ? Ils n'avaient pas résolu le problème. Le théorème de Hawking les a obligés à revoir leur travail puisqu'il annonçait que la singularité est, de façon très générale, obligatoire.

En collaboration avec Volodia Belinski, ils ont finalement trouvé une solution aux équations d'Einstein qui montre précisément ce qui se passe lorsque l'Univers n'est ni homogène ni isotrope : quand on s'approche du Big Bang, la géométrie au voisinage de chaque point de l'Univers oscille violemment et de façon chaotique, de plus en plus vite, de sorte qu'une infinité d'oscillations nous séparent du moment singulier, au temps $t = 0$, où toutes les distances sont réduites à zéro. Là encore, il n'est pas prouvé que c'est ainsi que fonctionne l'Univers réel. Cette question est toujours à l'étude. Mais Hawking a contribué à convaincre la communauté scientifique de l'existence d'une singularité à l'origine de l'Univers, sans pouvoir cependant préciser sa nature.

Les hypothèses qu'il a faites pour cela sont-elles toujours d'actualité ?

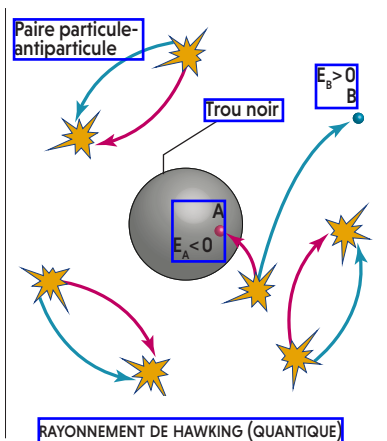
Hawking a utilisé ce qu'on appelle des conditions fortes sur l'énergie. Ce sont des hypothèses que l'on ajoute aux équations d'Einstein et qui postulent, par exemple, que la densité de masse (ou, cela revient au même, d'énergie) est positive et très supérieure à toute pression ou tension présente dans la matière. Il y a différents choix possibles. Stephen était jeune et, surtout à l'époque, très ambitieux. Il voulait un théorème ! Il a donc pris toutes les hypothèses nécessaires pour que son résultat soit obligatoire. Il faut aussi comprendre que ces conditions sur l'énergie paraissaient parfaitement naturelles à l'époque, car les observations cosmologiques semblaient aller dans ce sens.

DU MÉCANISME DE PENROSE À L'ÉVAPORATION DES TROUS NOIRS

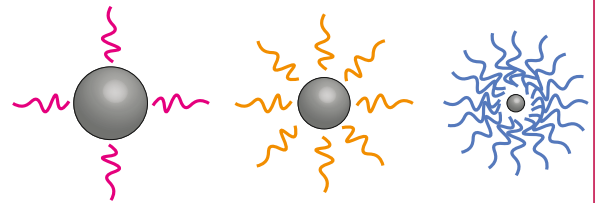


Un trou noir en rotation est entouré d'une région, l'ergosphère, où l'espace-temps est entraîné par le mouvement du trou noir au point qu'une particule qui y pénètre ne peut rester immobile par rapport aux étoiles lointaines (ci-dessous à gauche). Roger Penrose démontra qu'il est possible d'ajuster la trajectoire d'une particule P qui se désintègre en deux particules A et B à l'intérieur de l'ergosphère pour que la partie A (qui tombe sur l'horizon) ait, du point de vue d'un observateur lointain, une énergie négative. Dès lors, la particule B qui s'échappe à l'infini a une énergie E_B supérieure à l'énergie initiale E_P : de l'énergie a donc été extraite du trou noir.

Le rayonnement de Hawking repose sur une comptabilité comparable, concernant cette fois les paires de particule-antiparticule



qui apparaissent et s'annihilent mutuellement dans le vide quantique : près de l'horizon, ces paires peuvent produire l'émission d'une particule d'énergie positive et l'absorption d'une particule d'énergie négative (au centre). Le bilan est alors que le trou noir rayonne en perdant de la masse-énergie. Ce rayonnement est d'autant plus fort que la gravité de surface (inversement proportionnelle au rayon de courbure de l'horizon) est grande (à droite). L'introduction de ce mécanisme quantique implique que l'horizon du trou noir ne croît pas indéfiniment, comme l'avait d'abord décrit Hawking dans un cadre théorique classique, mais recule à mesure qu'il s'évapore et que toute son énergie, y compris la masse-énergie classiquement « irréductible » (qui est la seule qui existe pour un trou noir non tournant) soit finalement extraite par évaporation quantique.



8 Certes, depuis, des contre-exemples à cette hypothèse du théorème de Hawking sont apparus. Notamment, la découverte en 1998 que l'expansion de l'Univers s'accélère a nécessité d'introduire une nouvelle hypothèse : une forme énigmatique d'énergie, dite sombre, qui serait responsable de cette accélération. Or l'énergie sombre n'obéit pas aux conditions fortes sur l'énergie de Hawking. Néanmoins, même si son théorème n'est valide que sous certaines hypothèses, il montre clairement à quel endroit il faut chercher. Il montre que la question de la singularité cosmologique ne dépend pas des symétries du problème, alors que les conditions sur l'énergie, elles, comptent beaucoup. C'est une preuve de l'importance du théorème de Hawking.

A partir de 1970 commence le « renouveau de la relativité générale », auquel vous avez vous-même contribué, notamment autour de l'étude théorique des trous noirs. Comment Hawking s'est-il attaqué à ces questions ?

Ce renouveau a eu lieu au départ exclusivement à Cambridge, en Angleterre, et à Princeton, aux États-Unis, et je n'y étais pas ! J'étais encore étudiant et en France, où certains scientifiques ne croyaient pas du tout aux trous

noirs ! J'ai travaillé sur la question parce que je suis allé à Princeton à partir de 1974 et que je me suis retrouvé dans le bain.

Le premier résultat important du côté classique (c'est-à-dire non quantique) date d'un peu avant et vient encore de Penrose. En 1969, il étudia ce qui se passe quand une particule se désintègre en deux particules à l'approche de l'horizon d'un trou noir qui tourne sur lui-même, un trou noir de Kerr. Il montra qu'on peut ajuster les trajectoires pour qu'une particule tombe sur l'horizon et que l'autre s'échappe à l'infini avec une énergie supérieure à celle de la particule initiale (voir l'encadré ci-dessus). Autrement dit, vous avez extrait de l'énergie du trou noir. C'était la première indication que l'on pouvait extraire de l'énergie d'un trou noir tournant.

Ce processus a été immédiatement étudié en détail à Princeton par le jeune Demetrios Christodoulou (18 ans à l'époque !) et son mentor Remo Ruffini. Ils démontrèrent qu'il y avait quelque chose d'irréversible chez les trous noirs : vous pouvez extraire une partie de leur masse-énergie, mais pas tout. Il restera toujours une « masse irréductible » qui, elle, ne peut qu'augmenter, comme une sorte d'entropie (l'entropie étant ce qui mesure le « désordre » d'un système

physique, l'information qui s'y trouve cachée, et, selon le deuxième principe de la thermodynamique, celle d'un système isolé ne peut diminuer) – bien qu'à l'époque, je ne crois pas que qui que ce soit l'ait formulé ainsi. Hawking généralisa ensuite leur résultat en démontrant que l'aire de l'horizon d'un trou noir (égale dans les cas considérés ici au carré de la masse irréductible) ne peut qu'augmenter au cours du temps: même en cas de fusion de deux trous noirs, l'aire finale est supérieure ou égale à la somme des aires des deux trous noirs initiaux.

D'où est finalement venue l'idée d'entropie des trous noirs?

C'est Jacob Bekenstein qui, en 1972, sous l'impulsion de son mentor John Wheeler, a franchi le pas. Bekenstein était en thèse à Princeton et Wheeler lui avait demandé de réfléchir au problème suivant: si j'ai une tasse de thé bouillant et que je la jette dans un trou noir, que devient l'entropie de l'eau chaude? En reprenant les travaux de Christodoulou, Ruffini et Hawking, Bekenstein affirma que l'aire d'un trou noir était effectivement une mesure de son entropie. Pour cela, il suivit deux lignes de calcul différentes. D'une part, il montra que lorsque le trou noir absorbe une particule, son aire augmente d'une certaine quantité en même temps que de l'information est perdue derrière l'horizon – le «bit» d'information qui vous dit en quelque sorte si la particule existe encore ou pas. C'est cohérent avec le fait que l'entropie est une mesure de l'information cachée dans un système.

D'autre part, il considéra une petite boîte remplie d'un gaz chaud. L'entropie du gaz est grande, car du fait de sa température, le mouvement des molécules de gaz est très désordonné. Aussi, quand la boîte tombe dans un trou noir, l'entropie de l'Univers devrait diminuer, puisque le gaz ne reviendra pas. Or on s'attend à ce qu'elle augmente. Il fallait donc que le trou noir ait lui-même une entropie, qui augmenterait quand le gaz y tomberait. Et, par conséquent, une température non nulle. En d'autres termes, les trous noirs étaient d'une certaine façon «chauds» et devaient donc produire un rayonnement! C'était une idée violemment nouvelle et iconoclaste.

Comment cette idée a-t-elle été reçue?

Cette année-là, tous ces gens se sont rencontrés en France, à l'école d'été des Houches, en août 1972. Bekenstein était là en tant qu'étudiant. Les orateurs étaient Brandon Carter, Hawking, Ruffini et d'autres. Lors de cette session, Hawking, Carter et James Bardeen ont certes montré que la physique des trous noirs présente une série d'analogies avec la thermodynamique classique, mais pour eux ce n'étaient que des analogies. Ils étaient convaincus que, sur le fond, Bekenstein avait tort. Il faut dire aussi qu'à cette époque, en Union soviétique, les

Russes avaient commencé à produire des résultats nouveaux en introduisant la mécanique quantique dans l'étude des trous noirs.

Iakov Zeldovitch, notamment, avait eu l'idée nouvelle que les trous noirs en rotation, les trous noirs de Kerr, devaient rayonner des particules quantiques et il l'avait démontré avec son étudiant Alexei Starobinski. Il se trouve qu'Hawking est allé à Moscou la même année et qu'il a discuté du sujet avec Zeldovitch. C'est sûrement là qu'il a compris l'intérêt d'étudier les trous noirs d'un point de vue quantique. Il s'est dit en substance: «Je vais appliquer les méthodes de Zeldovitch, mais sur un trou noir de Schwarzschild, un trou

En 1974, il a fait sa plus grande découverte: l'évaporation quantique des trous noirs

noir qui ne tourne pas, et comme il ne rayonnera pas, cela démontrera que les idées de Bekenstein sont fausses.» Mais il a en fait prouvé le contraire! En 1974, il a fait sa plus grande découverte, celle qui restera comme un résultat essentiel de la physique théorique: l'évaporation quantique des trous noirs, qui rayonnent comme des corps incandescents dont la température est proportionnelle à leur gravité de surface (et donc inversement proportionnelle à leur masse).

Ici encore, il est remarquable que ces résultats soulèvent des questions auxquelles on ne sait toujours pas répondre. L'entropie est définie en physique comme le nombre d'états microscopiques possibles – ou plutôt le logarithme de ce nombre – pour un état macroscopique donné (par exemple le nombre de façons d'interchanger les positions et les vitesses des molécules dans une bonbonne d'air à une pression de 1 atmosphère [atm] et à 20 °C tout en ayant toujours une bonbonne d'air à 1 atm et à 20 °C). Mais dans le cas où l'état macroscopique est un trou noir, quels sont ces états microscopiques que l'on est censé compter? Où sont-ils? À quoi ressemblent-ils? On ne le sait toujours pas...

Ce qui nous amène à la très médiatisée « guerre des trous noirs » avec Leonard Susskind...

Oui, c'est surtout Susskind, à Stanford, qui a voulu jouer avec l'idée de «sa guerre contre »

Stephen». Mais le problème est important et il faut reconnaître que là encore, c'est Stephen qui a mis le doigt dessus. Quand un trou noir finit de s'évaporer complètement, il s'est transformé en chaleur, en désordre, et l'information quantique contenue dans l'état des particules qui l'avaient constitué au départ est définitivement perdue. Elle a été détruite, ce qu'en principe la mécanique quantique interdit. Pendant des années, Hawking a affirmé qu'il fallait changer la mécanique quantique, mais en 2004, il a reconnu que c'était probablement faux. Des travaux en théorie des cordes, notamment du Néerlandais Gerard 't Hooft et de l'Argentin Juan Martín Maldacena, suggéraient en effet que l'information quantique était conservée.

Aujourd'hui, tout le monde est à peu près convaincu que c'est bien le cas, mais les preuves sont très indirectes et des chercheurs travaillent encore dessus. Des pistes d'explications impliquant des structures très modifiées à l'horizon des trous noirs sont avancées, mais elles ont à mon avis très peu de chances d'être vraies et n'expliquent pas vraiment comment l'évaporation d'un trou noir respecte l'information quantique. C'est caractéristique de tout problème vraiment profond. Longtemps après qu'on l'a posé, il vous survit. C'est le mérite de Stephen d'avoir montré qu'il y avait un problème là où tout le monde pensait qu'il n'y en avait pas.

Dans les années 1980, Stephen Hawking s'est intéressé au problème de l'inflation du très jeune cosmos...

Il a contribué dans ce cadre à des résultats pratiques très importants, même si on sait aujourd'hui que les mêmes calculs avaient été faits quelques années avant en Union soviétique par Gennady Chibisov et Viatcheslav Mukhanov. À son initiative, en 1982, des discussions ont commencé sur les fluctuations du fond de rayonnement cosmologique au sortir de l'inflation – l'image de l'Univers tel qu'il était 300 000 ans après le Big Bang et qui nous parvient sous la forme de microondes. En effet, on pense qu'au tout début de son histoire, l'Univers a connu une phase d'expansion extrêmement rapide qui a amplifié les fluctuations microscopiques du vide quantique. Ce sont ces fluctuations étirées jusqu'à une taille cosmique qui sont à l'origine des petites inhomogénéités du gaz chaud dont le fond cosmologique est l'image. Ces inhomogénéités sont à leur tour les germes qui ont donné, en se condensant, les grandes structures de l'univers actuel, les galaxies et les amas de galaxies.

Avec des gens comme Paul Steinhardt, Michael Turner, Alan Guth, le groupe réuni à Cambridge a compris comment estimer l'amplitude de ces fluctuations dans tous les modèles d'inflation. Stephen a montré dans un article très clair que tout cela est calculable. Ces calculs ont permis de comparer les modèles

aux observations lorsque les mesures du rayonnement cosmologique ont été assez précises pour montrer ces fluctuations.

Dans le même temps, Hawking a poursuivi un effort plus purement théorique en posant son hypothèse « d'Univers sans bord ».

A-t-il des successeurs sur ce chemin ?

Là encore, Hawking a posé une très bonne question qui, comme les précédentes, lui survit. Toute l'histoire de la physique jusqu'à aujourd'hui consiste à découvrir des lois dynamiques qui donnent l'évolution d'un système, par exemple de l'Univers, à partir d'un état

Il a montré qu'il y avait un problème là où personne n'en attendait

initial. Si je connais son état à un instant t_0 , je peux calculer son état à un autre instant t . Hawking s'est demandé, étant donné la présence de cette étrange singularité au début du cosmos, s'il ne manquait pas quelque chose. Ne faudrait-il pas poser, à côté des lois de la physique, une hypothèse de plus, un autre genre de loi qu'on ne peut pas déduire des lois dynamiques et qui stipulerait quel doit être l'état quantique initial de l'Univers ?

La solution « sans bord » qu'il a développée avec Jim Hartle était une proposition dans ce sens. Ils ont utilisé une technique de théorie quantique des champs – qui combine mécanique quantique et relativité restreinte – connue depuis les années 1960 et utilisée pour calculer l'état fondamental d'un système quantique simple. Le résultat n'est pas très probant, les calculs ne sont pas bien définis, mais même si au niveau technique la solution proposée par Hawking n'est plus d'actualité, la question fondamentale qu'il a posée reste. On peut dire qu'il a rendu crédible toute la discipline de la cosmologie quantique.

Tout au long de sa carrière, il a soulevé des problèmes auxquels il a apporté des contributions importantes et qui, à chaque fois, sont restés des problèmes ouverts. C'est un hommage à sa perspicacité et la preuve que ce sont des problèmes importants ! Stephen Hawking est un sphinx qui nous a légué toutes ces énigmes, ce qui est la marque des grands scientifiques. ■

PROPOS RECUEILLIS PAR RENÉ CUILIERIER

POUR LA SCIENCE

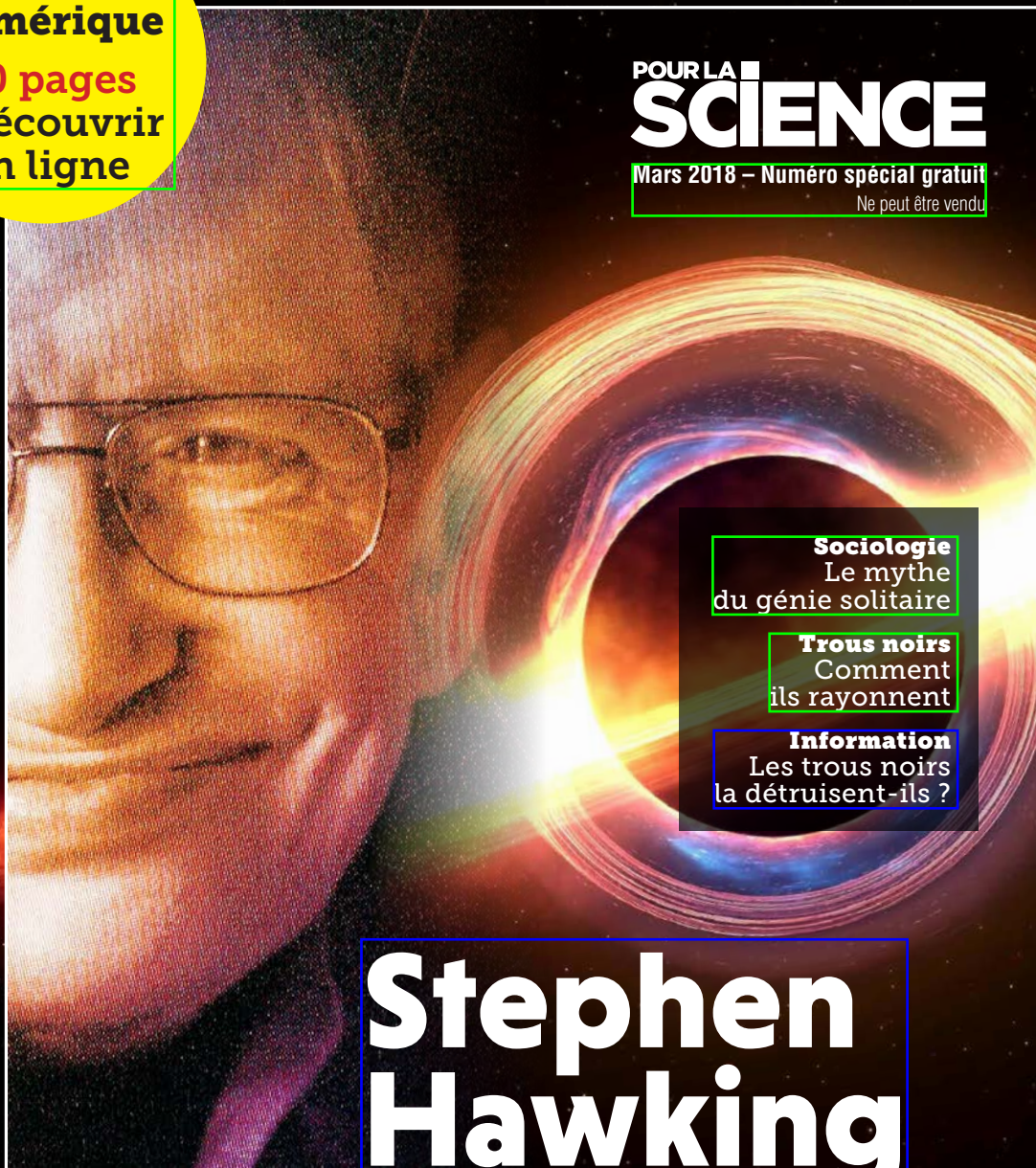
Hors-Série numérique - Mars 2018

**Hors-Série
numérique**

**60 pages
à découvrir
en ligne**

POUR LA
SCIENCE

Mars 2018 - Numéro spécial gratuit
Ne peut être vendu



Sociologie
Le mythe
du génie solitaire

Trous noirs
Comment
ils rayonnent

Information
Les trous noirs
la détruisent-ils ?

Stephen Hawking

**FONDATEUR DE LA PHYSIQUE
DES TROUS NOIRS**



Hors-série numérique à **télécharger
gratuitement** sur bit.ly/PDFHawking

A

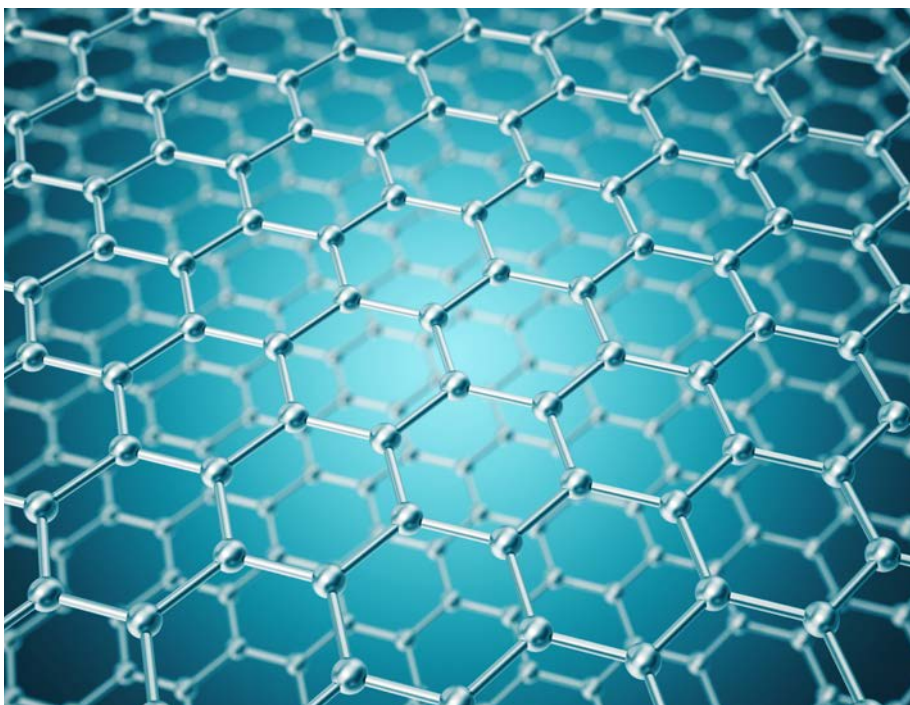
CTUALITÉS

P.14 Échos des labos
P.26 Livres du mois
P.28 Agenda
P.30 Homo sapiens informaticus
P.32 Cabinet de curiosités
sociologiques

Une double couche
de graphène.
Un tel système aidera
peut-être à comprendre
la supraconductivité
à haute température.

PHYSIQUE

L'ANGLE MAGIQUE DU GRAPHÈNE



En superposant à une couche de graphène une autre, tournée de 1,1 degré, on obtient un dispositif isolant, mais qui peut devenir supraconducteur à très basse température.

Découvert en 2004, le graphène n'a pas fini d'intriguer les physiciens. Sa structure, une couche unique d'atomes de carbone liés en un réseau hexagonal, lui confère des propriétés étonnantes. À la fois très bon conducteur d'électricité et de chaleur, il est aussi presque transparent et mécaniquement très résistant. Yuan Cao, du MIT (institut de technologie du Massachusetts), et ses collègues ont découvert de nouvelles propriétés électroniques du graphène lorsqu'ils en superposent deux couches tournées d'un angle relatif de 1,1°.

Pourquoi une configuration aussi particulière? Les calculs, dans le cadre de la théorie des bandes électroniques, prévoyaient des propriétés particulières pour cette double couche de graphène, que Yuan Cao et ses collègues ont vérifiées expérimentalement. La théorie des bandes explique, notamment, les comportements isolants ou conducteurs des matériaux. Ces propriétés sont liées à l'énergie et à la mobilité des électrons, qui sont décrits par un objet mathématique, la fonction d'onde. Celle-ci indique où les électrons tendent à se trouver et les niveaux d'énergie qu'ils peuvent occuper. Si la structure du matériau est périodique,

les fonctions d'onde des électrons interfèrent les unes avec les autres. Une conséquence est que les niveaux d'énergie accessibles aux électrons forment alors des intervalles continus, nommés bandes, séparés par des zones interdites, les gaps.

Les électrons remplissent d'abord les bandes de plus basses énergies. Si la dernière couche contenant des électrons – la « bande de conduction » – est totalement remplie et que le gap vers la bande d'énergie supérieure est grand, les électrons ne peuvent pas acquérir assez d'énergie pour franchir le gap et devenir mobiles au sein du matériau: ce dernier est alors un isolant. Si les électrons remplissent partiellement une bande, le moindre apport d'énergie les rend mobiles, et le matériau est alors conducteur.

Dans le cas du graphène, la dernière bande est totalement remplie mais le gap est exactement nul. Il s'ensuit un comportement très original des électrons, qui se

déplacent dans le graphène comme si leur masse était quasi nulle. Ils atteignent alors des vitesses de l'ordre de 1 000 kilomètres par seconde, soit 150 fois plus que dans le silicium, la coqueluche de l'électronique.

En superposant deux couches de graphène faisant un angle relatif de $1,1^\circ$, on modifie la structure des bandes électroniques: la bande de conduction devient étroite tout en étant à moitié remplie. *A priori*, le système devrait se comporter comme un métal conducteur, mais ce n'est pas le cas. En effet, en raison de l'étroitesse de la bande, la répulsion électrostatique entre les électrons (d'habitude négligée dans la théorie des bandes) devient importante comparée à leur énergie cinétique. Ces interactions maintiennent alors les électrons immobiles, ce qui empêche la circulation d'un courant. On a alors ce qu'on appelle un isolant de Mott.

La double couche de graphène à angle magique est encore plus surprenante. En appliquant une tension électrique au dispositif, les chercheurs ont enrichi le milieu en électrons, ce qui permet de sortir de l'état d'isolant de Mott. Ils ont montré qu'en dessous de 1,7 kelvin (-271°C environ), le matériau devient non seulement conducteur, mais supraconducteur: sa résistance électrique est nulle.

La supraconductivité apparaît pour de nombreux matériaux à une température proche du zéro absolu. Or, depuis 1986, les physiciens ont découvert des matériaux supraconducteurs à des températures plus élevées, dépassant parfois 100 kelvins, dont certains cuprates (contenant un ion cuivre). Et ce phénomène de supraconductivité à haute température reste mal élucidé.

Les cuprates et la double couche de graphène ont des températures maximales de supraconductivité très différentes. Pourtant, les deux systèmes ont des ressemblances intrigantes. Notamment, les deux sont des isolants de Mott et ne deviennent supraconducteurs qu'en rajoutant des charges – par substitution chimique dans les cuprates ou par application d'une tension dans la double couche de graphène. Ainsi, avec cette dernière, les chercheurs ont un système simple pour étudier la supraconductivité non conventionnelle et le rôle des interactions électroniques, qui reste aujourd'hui mal compris. ■

SEAN BAILLY

Y. Cao et al., *Nature*, en ligne le 5 mars 2018

PALEOANTHROPOLOGIE

Les gènes des derniers Néandertaliens révélés

Autour de Mateja Hajdinjak, une équipe de l'institut Max-Planck d'anthropologie évolutionniste de Leipzig vient de séquencer cinq nouveaux génomes néandertaliens. Silvana Condemi, paléanthropologue au CNRS/Aix-Marseille Université/EFS



Propos recueillis par FRANÇOIS SAVATIER

SILVANA CONDEMI, paléanthropologue au CNRS/Aix-Marseille Université/EFS

Qu'a fait l'équipe de Mateja Hajdinjak ?

Grâce à une méthode mise au point à l'institut Max-Planck de Leipzig, elle a réussi à séquencer les génomes de cinq Néandertaliens, dont quatre tardifs provenant d'Europe occidentale – un de France, deux de Belgique et un de Croatie – et un, plus ancien, du Caucase russe. Ce n'est pas rien : auparavant, nous disposions seulement du génome d'une Néandertalienne qui vivait dans l'Altai sibérien il y a environ 100 000 ans, ceux, partiels, de trois individus d'El Sidrón, en Espagne, datant d'il y a 40 000 à 50 000 ans et celui d'un individu mort il y a 44 000 ans dans la grotte de Vindija, en Croatie. Les nouveaux génomes datent d'entre 39 000 et 49 000 ans et nous renseignent sur la génétique des derniers Néandertaliens d'Europe.

Qu'apprend-on sur cette génétique ?

Sa structure est géographique. Les gènes des Néandertaliens tardifs d'Europe occidentale sont bien plus proches de ceux des Néandertaliens tardifs d'Europe orientale qu'ils ne le sont de ceux des Néandertaliens d'Asie. La même chose se constate dans le temps : le génome des Néandertaliens tardifs est plus proche de celui des Néandertaliens qui les précèdent que de celui des Néandertaliens anciens. Rien que de très logique, mais encore fallait-il le vérifier dans ces nouvelles données génétiques !

Et c'est tout ?

Non. On sait que les derniers Néandertaliens d'Europe occidentale vivaient à une époque d'oscillations climatiques extrêmes, qui ont rendu leur survie très difficile. Les auteurs de l'étude en déduisent que la proximité génétique entre Est et Ouest de l'Europe peut s'expliquer de deux façons : soit certains Néandertaliens occidentaux se sont

réfugiés dans le Sud-Est pendant les phases les plus froides, soit l'Ouest de l'Europe a été repeuplé par des Néandertaliens de l'Est après ces mêmes phases. Quelle que soit la bonne explication, elle traduit une fois de plus que les Néandertaliens étaient des chasseurs-cueilleurs très mobiles et très résilients, ce que nous savons bien.

Cette nouvelle étude nous apprend-elle quelque chose sur le métissage avec *Homo sapiens* ?

Oui, en creux. La même équipe avait déjà montré que tous les *H. sapiens* actuels non africains ont de l'ordre de 2 % de gènes néandertaliens en eux. Ces nouveaux travaux montrent que les Néandertaliens tardifs n'ont pas de gènes nucléaires sapiens en eux, ce qui est une énigme pour les chercheurs. Cela apparaît d'autant plus problématique que ces Néandertaliens vivaient entourés de primo-arrivants sapiens. Une hybridation tardive entre les deux espèces était donc possible et semble plus que plausible. De fait, elle a bien eu lieu : en 2015, l'une des signataires de la nouvelle étude génétique a découvert que 8 % des gènes nucléaires contenus dans le fossile roumain Oase 1 d'un individu sapiens mort il y a quelque 40 000 ans étaient néandertaliens. Pour autant, Mateja Hajdinjak et ses collègues relèvent aussi que les gènes néandertaliens des Européens actuels ne sont pas proches de ceux des Néandertaliens tardifs d'Europe. Tant cette distance génétique que l'absence énigmatique de gènes sapiens chez les Néandertaliens tardifs s'expliquent alors si l'on fait – et valide – deux hypothèses : d'une part, que le métissage a surtout induit des flux géniques dans le sens *H. neanderthalensis* → *H. sapiens* ; d'autre part que le principal événement d'hybridation s'est produit hors d'Europe bien avant l'arrivée de nos ancêtres sur ce continent. Au Proche-Orient sans doute. Quand ? Cela reste à préciser. ■

M. Hajdinjak et al., *Nature*, vol. 555, pp. 652-656, 2018

ASTROPHYSIQUE

DES ÉTOILES NÉES 180 MILLIONS D'ANNÉES APRÈS LE BIG BANG

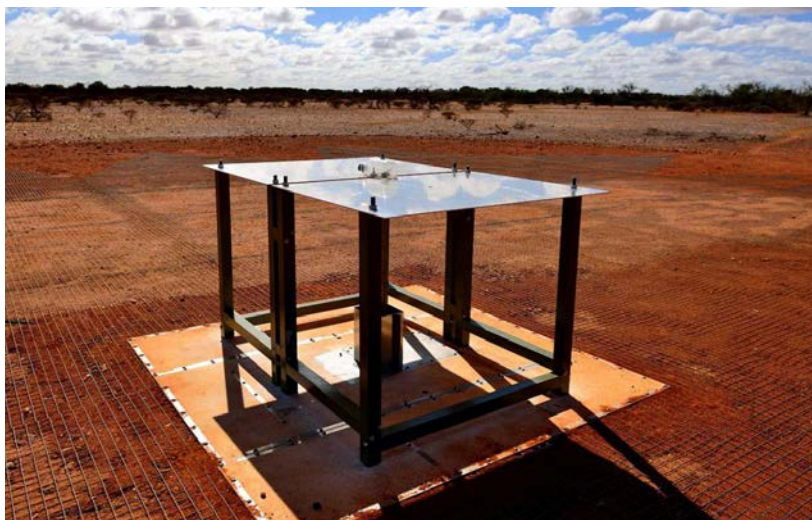
En étudiant le fond diffus cosmologique, la première lumière de l'Univers, des astrophysiciens ont détecté la trace des premières étoiles.

Grande comme une table de ping-pong posée au milieu du désert ouest-australien, à l'abri de toute perturbation électromagnétique, l'expérience EDGES «écoute» le cosmos pour y déceler un signal ténu venant des confins de l'Univers. Elle aurait ainsi détecté la présence des premières étoiles, formées à peine 180 millions d'années après la naissance de l'Univers. Ces étoiles sont bien trop lointaines et trop peu lumineuses pour être observées avec des télescopes ordinaires. C'est donc par des moyens indirects que Judd Bowman, de l'université d'État de l'Arizona, et son équipe les ont recherchées.

Ces astres sont importants pour l'histoire cosmique. En effet, ils ont brûlé très vite et en grande quantité leur hydrogène et leur hélium, et ont ainsi produit les premiers éléments lourds tels que le carbone et l'oxygène. Mais quand ces étoiles ont-elles commencé à peupler l'Univers? En 2017, Nicolas Laporte, de l'University College de Londres, et ses collègues ont étudié la galaxie A2744_YD4 telle qu'elle était dans l'Univers alors âgé de 600 millions d'années. Ils y ont trouvé de la poussière émise par des étoiles déjà disparues, qui se seraient formées quand l'Univers avait 400 millions d'années. Si ces étoiles sont parmi les plus anciennes connues, d'autres ont-elles pu naître plus tôt?

Judd Bowman et son équipe ont utilisé une stratégie très différente pour chercher les premières étoiles. Ils se sont intéressés au fond diffus cosmologique, un rayonnement émis 380 000 ans après le Big Bang. Le cosmos était à cette époque devenu assez froid pour que les noyaux d'hydrogène et les électrons se combinent et forment un gaz d'atomes neutres. Les photons ont alors pu se propager librement, d'où la première lumière de l'Univers – le fond diffus cosmologique. Mais après ce flash, le cosmos, rempli de gaz neutre et dépourvu de sources lumineuses, est entré dans l'ère sombre.

Il a alors fallu attendre la formation des premières étoiles, nées de l'accumulation d'hydrogène par effondrement gravitationnel, pour que les réactions de fusion en leur cœur se mettent à produire de la lumière. Ce rayonnement, de haute énergie, a excité les atomes du gaz



L'expérience EDGES, en Australie, mesure une partie du rayonnement électromagnétique cosmique pour y déceler des indices laissés par les premières étoiles.

4,4

MILLIARDS D'ANNÉES APRÈS LE BIG BANG : C'EST L'ÉPOQUE À LAQUELLE LA LUMIÈRE DE L'ÉTOILE LS1 A ÉTÉ ÉMISE. CELA ÉTABLIT LE RECORD DE DISTANCE D'UNE ÉTOILE OBSERVÉE EN OPTIQUE PAR LE TÉLESCOPE HUBBLE. UNE DÉCOUVERTE RENDUE POSSIBLE GRÂCE À UN EFFET DE LENTILLE GRAVITATIONNELLE, QUI A FORTEMENT AMPLIFIÉ LA LUMINOSITÉ DE L'ASTRE.

Source : *Nature Astronomy*, vol. 2, pp. 334-342, 2018

d'hydrogène dans son voisinage. Ce gaz a ainsi absorbé une composante du rayonnement de fond diffus cosmologique, à la fréquence particulière de 1420 mégahertz, qui correspond à une longueur d'onde de 21 centimètres – on parle de la «raie à 21 centimètres». Mais comme l'Univers est en expansion, le rayonnement cosmologique subit un décalage (en longueur d'onde, ou en fréquence) vers le rouge. Judd Bowman et ses collègues ont recherché la raie à 21 centimètres liée aux premières étoiles et décalée en fréquence à cause de l'expansion cosmique. C'est par ce principe que l'on peut déterminer quand les premières étoiles sont apparues.

Après des centaines d'heures de prise de données entre 2015 et 2017, et une analyse difficile pour extraire le signal du bruit de fond, l'équipe d'astrophysiciens a détecté la raie recherchée à la fréquence de 78 mégahertz. La forme du signal permet d'affirmer que les premières étoiles ont perturbé le gaz d'hydrogène dès 180 millions d'années après le Big Bang. Un résultat que devront néanmoins confirmer de futurs observatoires tels que le SKA, un réseau de détecteurs déployé en Afrique du Sud et en Australie et qui sera opérationnel vers 2022. ■

S. B.

J. D. Bowman et al., *Nature*, vol. 555, pp. 67-70, 2018

LE DERNIER RHINOCÉROS BLANC MÂLE EST MORT

Le 19 mars 2018, l'humanité a fait ses adieux à Sudan, le dernier rhinocéros blanc mâle de la sous-espèce *Ceratotherium simum cottoni* (c'est la seule représentante actuelle du genre *Ceratotherium*, l'un des quatre genres de rhinocéros). La santé de cet animal de 45 ans qui vivait dans un parc au Kenya avec les deux dernières femelles de son espèce s'étant dégradée, il a été euthanasié. Certains rêvent de faire remonter les effectifs de l'espèce en procédant par fécondation *in vitro*.

DAMA VOIT ENCORE DE LA MATIÈRE NOIRE

L'expérience Dama, dans le laboratoire du Gran Sasso, en Italie, vise à révéler des variations saisonnières du vent de matière noire à mesure que la Terre tourne autour du Soleil. Depuis vingt ans, ses physiciens interprètent en effet les flashes de lumière au sein de cristaux d'iodure de sodium comme le signal attendu. Confrontés au scepticisme de leurs pairs, ils ont reconçu leur détecteur et retrouvé le signal. L'expérience américano-coréenne *Cosine-100* et l'expérience espagnole *Anais* montent en puissance pour confirmer ou infirmer ce résultat.

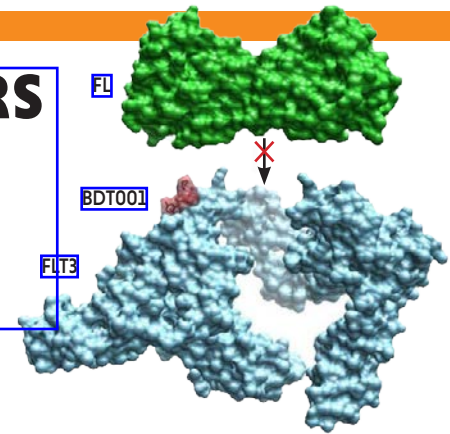
UNE MOLÉCULE QUI IMITE L'ADN

Ivan Huc, de l'université de Bordeaux, et ses collègues ont mis au point une séquence moléculaire artificielle imitant les propriétés de surface de l'ADN. Or de nombreuses protéines interagissent avec l'ADN en se fixant à sa surface. En servant de leurre, cette molécule artificielle peut alors inhiber l'activité d'enzymes – par exemple l'intégrase du virus du sida, qui permet à cet agent d'insérer son génome dans celui d'une cellule hôte.

FIN DES DOULEURS CHRONIQUES ?

Quatre millions de personnes en France souffrent tous les jours, sans arrêt, d'une forme de douleur pour laquelle il n'existe presque aucun traitement : la douleur neuropathique. Elle est due à une lésion d'un nerf périphérique, elle-même provoquée par divers facteurs tels qu'un cancer, un zona, un diabète, un accident traumatique ou une intervention chirurgicale. Le problème : même si la cause de la lésion a été guérie, la douleur persiste. Jean Valmier, de l'Institut des neurosciences à Montpellier, Didier Rognan, de l'université de Strasbourg, et leurs collègues ont identifié une molécule responsable des douleurs neuropathiques, ainsi qu'une autre, qui bloque ses effets et donc la douleur.

Ces douleurs chroniques proviennent d'une hypersensibilisation des neurones de la douleur dans la zone de la lésion. En effet, les cellules immunitaires envahissant cette région sécrètent des molécules qui réparent les tissus, mais favorisent aussi l'hypersensibilité nerveuse. Les neuroscientifiques ont identifié l'une de ces substances : la cytokine FL. Ils ont montré que l'injection de cette molécule chez des souris provoque des symptômes similaires aux douleurs neuropathiques et des modifications moléculaires des neurones de la moelle épinière qui



En bloquant la liaison entre la cytokine FL et son récepteur FLT3, la molécule BDT001, en prise unique, atténue la douleur chronique pendant 48 heures chez la souris.

finissent par rendre la douleur chronique. Cette cytokine agit en se fixant sur un récepteur spécifique, FLT3, et c'est bien cette liaison qui déclenche la cascade de transformations neuronales à l'origine de la douleur neuropathique.

Des inhibiteurs de FLT3 existent déjà, mais ils présentent de nombreux effets secondaires. Pour y remédier, Didier Rognan et ses collègues ont criblé informatiquement trois millions de molécules et en ont identifié une, BDT001, qui supprime spécifiquement la liaison de la cytokine FL à son récepteur FLT3. Les tests sont très encourageants chez la souris et des essais cliniques sont prévus chez l'homme. ■

BÉNÉDICTE SALTHUN-LASSALLE

C. Rivat et al., *Nature Communications*, vol. 9, article 1042, 2018

LA SURPRISE DE LA SAXIFRAGE

Saxifraga scardica pousse dans le nord du Monténégro, au Kosovo, en Albanie et en Grèce, à des altitudes comprises entre 1800 et 2500 mètres. Raymond Wightman, de l'université de Cambridge, au Royaume-Uni, et ses collègues ont analysé la composition de la croûte minérale qui couvre ses feuilles. Ils ont découvert qu'elle contient du carbonate de calcium sous deux formes : l'une, la calcite, est l'un des minéraux les plus répandus sur Terre et on la retrouve dans de nombreuses saxifrages ; l'autre, la vatérite, est beaucoup plus rare.

La vatérite est un cristal instable qui se solubilise facilement pour se recristalliser en calcite. De faibles quantités de vatérite ont été trouvées dans des météorites et des rochers, chez certains crustacés, dans des coquilles d'œufs d'oiseaux et dans l'oreille interne des



Les feuilles de saxifrages sont couvertes d'une croûte minérale, contenant dans certains cas un composé rare.

saumons. Ce serait la première fois que ce minéral est trouvé dans de telles quantités et la première fois qu'il est associé aux plantes. Plusieurs saxifrages produisent de la vatérite, substance qui serait intéressante pour délivrer des médicaments dans l'organisme. ■

ALINE GERSTNER

R. Wightman et al., *Flora*, vol. 241, pp. 27-34, 2018

EN IMAGE

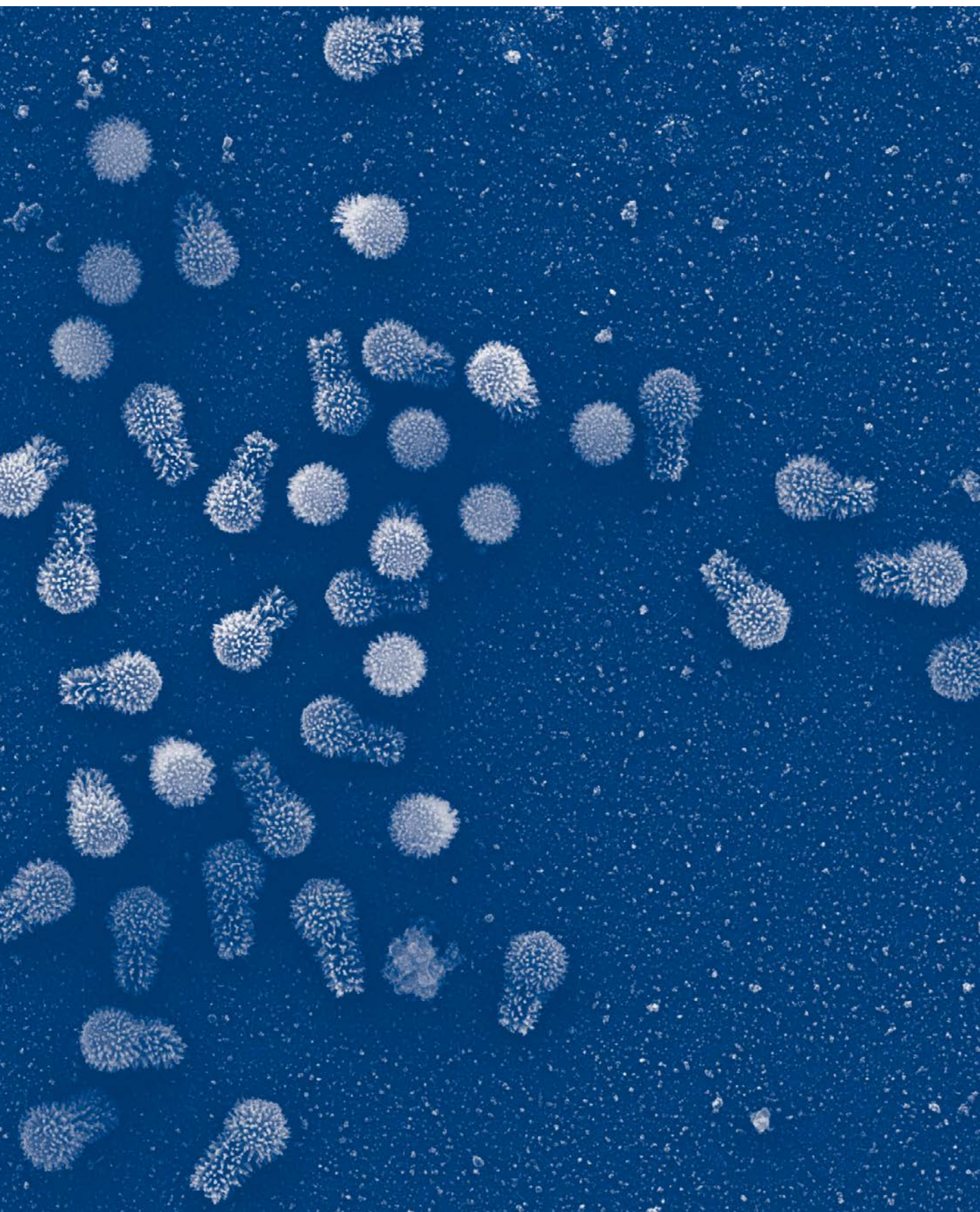
DES VIRUS GÉANTS TRÈS BACTÉRIENS

La frontière entre les virus et le monde cellulaire s'estompe encore un peu plus. Mimivirus et les autres virus géants d'amibes découverts depuis 2003 avaient déjà surpris les biologistes, car leur génome, particulièrement long, comportait des gènes impliqués dans la synthèse des protéines et que l'on n'avait jamais détectés chez des virus. À présent, autour de Jônatas Abrahão et de Bernard La Scola, de l'unité de recherche Microbes, évolution, phylogénie et infections et de l'IHU Méditerranée Infection, à Marseille, une équipe franco-brésilienne vient d'annoncer la découverte de *Tupanvirus*, un nouveau genre de virus géant d'environ 1,5 micromètre de long doté d'une machinerie de traduction du génome en protéines étonnamment complète. Découverts dans des milieux salés – un lac alcalin et un fond océanique –, les *Tupanvirus* (ci-contre vus au microscope électronique) portent en effet, outre une queue particulièrement longue, tout le nécessaire pour synthétiser des protéines, hormis les ribosomes, ces structures qui, dans les cellules, décodent l'information génétique. Il ne leur manque que la capacité à produire de l'énergie pour être... des bactéries! Reste à savoir dans quelle mesure les *Tupanvirus* utilisent cette machinerie pour se répliquer. Et à comprendre dans quelle histoire évolutive ils s'inscrivent. ■

F. S.

J. Abrahão et al., *Nature Communications*, vol. 9(1), article 749, 2018





CHIMIE

TRAITER LES EAUX POLLUÉES

Face à la pollution aux métaux lourds, les méthodes de traitement des eaux sont limitées, onéreuses et peu efficaces.

Daniel Sun, de l'École polytechnique fédérale de Lausanne, et ses collègues proposent une nouvelle solution: le Fe-BTC/PDA, un matériau composite à base de MOF (*metal-organic framework*) et de polymères.

Ce matériau a une structure de type MOF, c'est-à-dire un réseau tridimensionnel formant des pores réguliers où des ions métalliques (ici des ions Fe^{3+}) sont reliés entre eux par des anions organiques (ici des ions benzènetricarboxylate). Dans ce matériau, les pores sont partiellement remplis par du polydopamine, un polymère riche en groupements hydroxyles et amines susceptibles de se lier à des ions plomb (Pb^{2+}) ou mercure (Hg^{2+}) et ainsi de les piéger.

Le Fe-BTC/PDA présente de nombreux avantages. Sa structure métalloorganique lui confère une grande surface spécifique (plus de 1 000 mètres carrés par gramme) qui, combinée à la forte affinité entre le polydopamine et les ions Pb^{2+} et Hg^{2+} , permet de fixer plusieurs centaines de milligrammes de ces ions par gramme de composé. Les propriétés dépolluantes du matériau sont ensuite restaurées par simple lavage avec une solution d'EDTA, un agent qui



La pollution des eaux en métaux lourds touche tous les pays, mais les méthodes de traitement sont jusqu'à présent peu efficaces.

extrait le métal de la structure poreuse en formant avec lui des complexes.

Les chercheurs ont évalué les performances du composite en situation réelle, à l'aide d'échantillons d'eau de rivière ou de mer, avec des concentrations en ions Pb^{2+} allant jusqu'à 1 microgramme par litre, soit 100 fois le maximum recommandé par l'OMS. Dispersé dans ces solutions, le matériau réduit en quelques secondes les quantités de plomb de 99,8%. Les concentrations en plomb sont alors acceptables pour la consommation humaine. ■

MARTIN TIANO

D. T. Sun et al., *ACS Central Science*, vol. 4 (3), pp. 349-356, 2018

PRÉHISTOIRE

CRO-MAGNON PAS MIGNON

Découvert dans l'abri du même nom, l'homme de Cro-Magnon est l'un des plus anciens *Homo sapiens* connus en Europe. Son fossile, celui d'un crâne vieux de 30 000 ans environ, intriguait par ses lésions. Autour du paléopathologiste Philippe Charlier, de l'université de Versailles-Saint-Quentin-en-Yvelines, une équipe vient d'expliquer son aspect et de représenter son visage.

Les chercheurs ont réalisé plusieurs toмоgraphies assistées par ordinateur de la région lésée, dont une de très haute résolution, et ont conclu à une maladie génétique: la neurofibromatose de type 1. La comparaison avec des cas types de lésions osseuses créées par cette maladie conservés dans des collections de référence a confirmé leur diagnostic. La neurofibromatose de type 1 occasionne le développement de



La reconstruction faciale de l'homme de Cro-Magnon avec tous les nodules créés par sa maladie présumée. tumeurs bénignes des nerfs périphériques à la fois superficielles et profondes – on parle dans ce cas de neurofibromes – ainsi que des taches sur la peau. À partir de leur diagnostic, les chercheurs ont proposé une nouvelle reconstruction faciale de l'homme de Cro-Magnon. Et, franchement, le Cro-Magnon n'avait rien de mignon... ■

F. S.

P. Charlier et al., *The Lancet*, vol. 391, p. 1259, 2018

EN BREF

L'ÉTOILE DE SCHOLZ PERTURBATRICE

Aujourd'hui, l'étoile de Scholz se trouve à environ 20 années-lumière de nous, mais il y a 70 000 ans, elle est passée dans le nuage d'Oort, réservoir de comètes du Système solaire. Sverre Aarseth, de l'université de Cambridge, au Royaume-Uni, et ses collègues ont étudié 340 objets du Système solaire ayant des trajectoires hyperboliques, et conclu que certains ont été éjectés du nuage d'Oort, en raison du passage de l'étoile de Scholz.

SIGNE PRÉCURSEUR POUR LA MALADIE DE CHARCOT

La maladie de Charcot se traduit par une dégénérescence des neurones qui contrôlent la contraction des muscles. Aussi appelée sclérose latérale amyotrophique (SLA), elle conduit à une paralysie musculaire progressive. Marin Manuel, chercheur du CNRS à l'université Paris-Descartes, et ses collègues ont observé chez deux espèces de souris modèles de la SLA qu'à un stade précoce de la maladie, ces neurones deviennent moins sensibles aux stimuli du cerveau. Cela écarte l'hypothèse contraire qui était avancée, celle d'une surexcitabilité des neurones les plus vulnérables.

L'ŒIL DU MORPHO AU BLOC OPÉATOIRE

Pour repérer des tissus cancéreux, les chirurgiens utilisent parfois des colorants qui se lient aux cellules tumorales et émettent un signal dans l'infrarouge proche. Les techniques pour voir ce rayonnement sont cependant coûteuses et peu pratiques. Viktor Gruen, de l'université de l'Illinois, et son équipe se sont inspirés de nanostructures présentes dans l'œil du morpho, un papillon, et sensibles à l'infrarouge pour réaliser des lunettes peu onéreuses et assurant une vision précise.

LES MYCORRHIZES VOYAGENT

Avec la mondialisation, certaines plantes sont introduites dans de nouvelles régions, mais la migration des microorganismes associés n'avait pas été étudiée. Marc-André Selosse, du Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, et une équipe internationale ont étudié le cas du raisinier bord de mer (*Coccoloba uvifera*), originaire des Caraïbes et introduit au Brésil, au Japon, en Malaisie, à la Réunion et au Sénégal.

Des champignons du genre *Scleroderma* ont colonisé les racines de cet arbre, formant un organe mixte nommé mycorrhize. Les chercheurs ont comparé les sclérodermes des sites d'introduction avec ceux des Caraïbes: ce sont presque les mêmes. Autrement dit, les champignons étaient aussi du voyage... ■

S. B.

S. Séne et al., *The ISME Journal*, en ligne le 13 mars 2018

CAVITATION DIGITALE

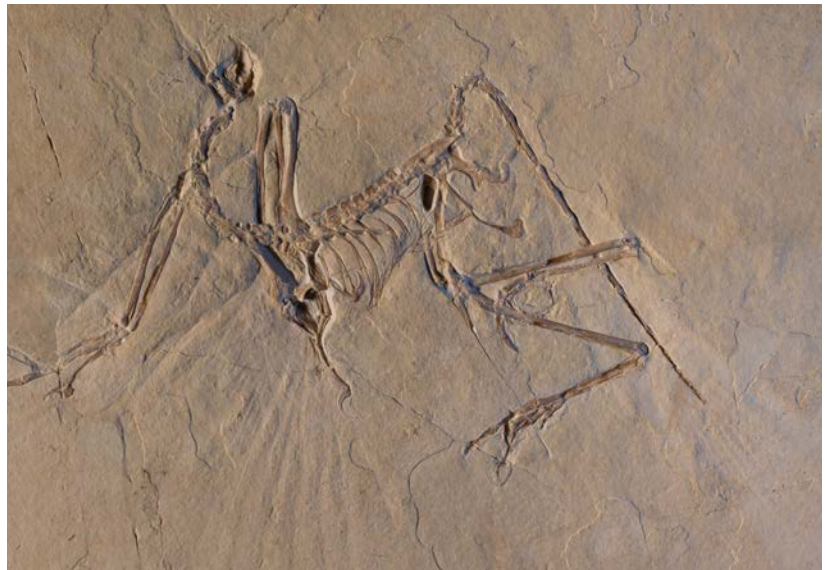
Nombre d'hypothèses expliquent le craquement des articulations des doigts: étirement des tendons, arrachement d'adhésions intra-articulaires... Toutefois, depuis qu'en 2015, l'équipe de Gregory Kawchuk, de l'université de l'Alberta, a filmé en temps réel la formation d'une cavité dans le liquide synovial d'une articulation étirée, c'est l'hypothèse d'un bruit lié à la brusque formation d'une bulle de gaz qui l'emporte. Abdul Barakat, de l'École polytechnique, et un collègue viennent de conforter cette hypothèse de la «cavitation» en calculant l'émission sonore de la bulle.

Les chercheurs combinent trois ingrédients: une représentation de l'articulation métacarpo-phalangienne comme un emboîtement de deux sphères; l'équation différentielle régissant la dynamique d'une bulle sphérique dans un fluide incompressible (équation de Rayleigh-Plesset); une émission acoustique proportionnelle à l'accélération du volume de la bulle. Résultat de cette approche simplifiée: l'essentiel de l'émission acoustique mesurée est correctement prédit. L'idée de la cavitation est la bonne! ■

F. S.

V. Chandran Suja et al., *Scientific Reports*, vol. 8, article 4600, 2018

L'ARCHÉOPTÉRYX VOLAIT COMME UN FAISAN



Le fossile munichoïse d'archéoptéryx, un petit dinosaure à plumes de la fin du Jurassique. Des impressions des plumes sont visibles dans la région des ailes et à l'extrémité de la queue.

L'archéoptéryx pouvait voler. C'est du moins ce que l'on a pensé en 1861, quand le premier fossile de cette espèce emplumée, dotée d'ailes et d'une longue queue pendante, a été découvert en Bavière. Depuis, on a constaté que le squelette d'archéoptéryx ressemble comme deux gouttes d'eau à celui de *Compsognathus*, un petit dinosaure carnivore bipède, datant comme lui de quelque 150 millions d'années; mais aussi que les oiseaux actuels descendent d'un groupe de dinosaures à plumes dont l'archéoptéryx ne fait pas partie. Dès lors, dans les années 1990, des chercheurs ont émis l'idée que, bien que l'archéoptéryx ait eu des plumes, il ne pouvait peut-être pas voler. C'est cette incertitude qu'une équipe internationale dirigée par Sophie Sanchez, de l'université d'Uppsala, vient de lever.

Pour trancher, les chercheurs ont choisi d'étudier de près des coupes transversales de l'humérus et du cubitus de 11 fossiles d'archéoptéryx et de les comparer à celles de 69 espèces de dinosaures et d'oiseaux modernes. Comme les fossiles d'archéoptéryx sont parmi les plus précieux au monde, dégager leurs os n'était pas envisageable. Pour les visualiser, les chercheurs ont donc utilisé le faisceau de rayons X du synchrotron européen ESRF, à Grenoble, spécifiquement dédié à la tomographie de fossiles. Sur les images en 3D de grande qualité produites, ils se sont concentrés sur la géométrie de la diaphyse (la partie centrale) des os des ailes. La forme des os des ailes est en effet conditionnée par le type de vol, puisqu'elle résulte d'un compromis, caractérisé par plusieurs paramètres, entre la force des membres et le poids de l'animal. Les chercheurs ont comparé les paramètres, par exemple l'épaisseur des os ou la résistance normalisée à la torsion, de trois fossiles d'archéoptéryx à ceux des autres espèces. Cette analyse suggère que les archéoptéryx pratiquaient un vol battu occasionnel pour fuir ou franchir un obstacle, comme le font les faisans ou les paons. ■

F. S.

D. F. A. E. Voeten et al., *Nature Communications*, vol. 9, article 923, 2018

LINGUISTIQUE

L'ÉNIGMATIQUE EXPANSION DES LANGUES PAMA-NYUNGAN

La construction de l'arbre de parenté d'une famille de langues aborigènes suggère qu'elle est entrée en expansion il y a plus de 5 000 ans, puis a très vite occupé 90 % de l'Australie.

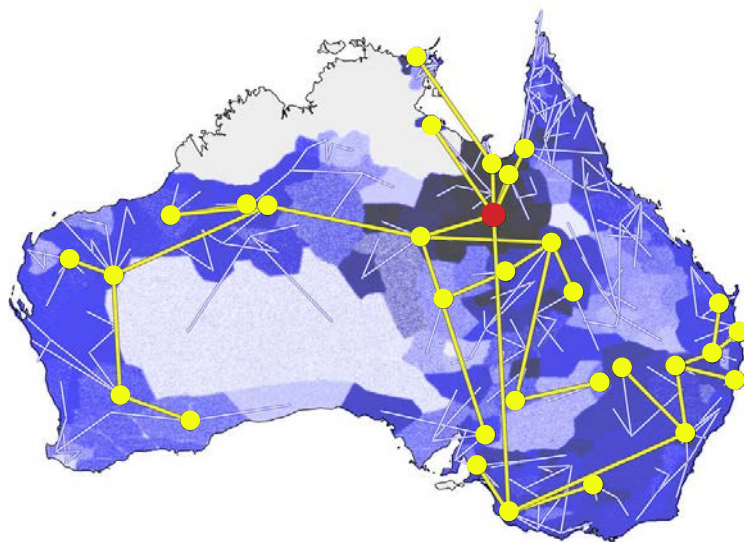
Sur les 28 familles linguistiques des aborigènes de l'Australie, 27 sont limitées à l'extrême nord, tandis qu'une famille – la famille Pama-Nyungan – couvre les 90 % restants du continent. Comment cette étonnante situation s'est-elle établie ?

Pour tenter de le savoir, Quentin Atkinson, de l'université d'Auckland, et des collègues ont dressé le plus probable des arbres de parenté des langues d'Australie. Sa structure les amène à proposer une explication à l'énigmatique expansion des langues Pama-Nyungan au sein des anciennes populations de chasseurs-cueilleurs australiens.

Les diverses hypothèses sur l'origine de la famille des langues Pama-Nyungan font varier leur âge entre 4000 et plus de 40000 ans. Selon une première hypothèse, des langues Pama-Nyungan auraient très vite remplacé des langues non Pama-Nyungan il y a 4000 à 6000 ans. Selon une autre, qui connaît plusieurs variantes, la famille Pama-Nyungan proviendrait de populations reliques juste après le dernier maximum glaciaire, il y a quelque 20000 ans. Une autre théorie relie plutôt l'origine du groupe Pama-Nyungan à une forte croissance démographique entraînée par l'amélioration du climat il y a quelque 10000 ans; enfin, une dernière hypothèse, controversée, est que l'expansion de la famille Pama-Nyungan daterait de l'arrivée des hommes modernes en Australie, il y a plus de 40000 ans.

Afin de départager ces théories, les chercheurs ont appliqué à la linguistique les méthodes probabilistes de la cladistique, cette discipline consistant à dresser des arbres de parenté entre organismes vivants à partir des caractères qu'ils partagent ou non. Plus précisément, ils ont employé la « phylogéographie bayésienne », une méthode exploitant les probabilités composées afin de dresser dans l'espace l'arbre de parenté le plus probable. Ils se sont appuyés sur pas moins de 18 238 mots Pama-Nyungan apparentés, enregistrés dans la base de données Chirila des langues aborigènes.

L'arbre le plus probable ainsi calculé correspond à la première hypothèse. Il suggère qu'avec une probabilité de 95 %, une région située dans



Le berceau des langues Pama-Nyungan est indiqué par la zone sombre située sous le golfe de Carpentarie. Les traits jaunes indiquent des déplacements successifs de langues de cette famille.

300

LANGUES ABORIGÈNES OU PLUS EXISTAIENT QUAND LES EUROPÉENS SONT ARRIVÉS EN AUSTRALIE, IL Y A QUELQUE 300 ANS. IL EN RESTAIT ENCORE ENVIRON 250 À LA FIN DU XVIII^e SIÈCLE, QUAND LES ANGLAIS ONT FONDÉ LEURS PREMIÈRES COLONIES. DE L'ORDRE DE 150 SONT ENCORE EN USAGE QUOTIDIEN DE NOS JOURS.

le Sud du golfe de Carpentarie (le golfe qui échancre la côte nord de l'Australie) a abrité le berceau de la famille il y a entre 7000 et 4500 ans. Puis une branche Pama-Nyungan aurait très rapidement gagné l'Ouest, atteignant les côtes occidentales avant de les longer vers le sud; dans le même temps, une autre branche aurait investi tout l'Est de l'Australie jusqu'au Sud.

Une telle conclusion suggère qu'une population de chasseurs-cueilleurs est entrée en expansion. Toutefois, une étude génétique récente des locuteurs de langues Pama-Nyungan n'a pas permis de confirmer cette hypothèse. En revanche, les données archéologiques attestent d'un renouvellement des outils et des techniques d'extraction de ressources il y a quelque 5000 ans, après une dégradation du climat. Aussi les chercheurs proposent-ils que les langues Pama-Nyungan ont accompagné l'assimilation, par les chasseurs-cueilleurs australiens, de tout un ensemble d'innovations techniques avantageuses. En clair, la majorité des Aborigènes auraient très vite adopté la langue de ceux qui dominaient en réussissant mieux, un peu comme les Irlandais ont adopté l'anglais. ■

F. S.

R. R. Bouckaert et al., *Nature Ecology & Evolution*, vol. 2, pp. 741-749, 2018

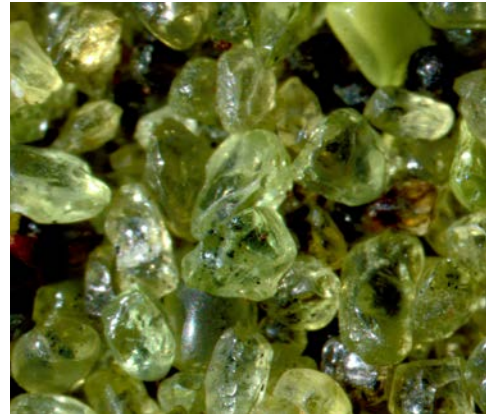
LE CASSE-TÊTE
DES GALAXIES NAINES

Dans les simulations de formation des galaxies, de petites galaxies se forment autour des grandes, avec une répartition aléatoire. Cependant, autour de la Voie lactée et de la galaxie d'Andromède, une grande part des galaxies naines se répartissent sur un plan particulier. Une explication invoquée est que la Voie lactée et Andromède appartiennent à un ensemble de galaxies, le Groupe local, qui aurait une dynamique particulière. Pour vérifier cet argument, Oliver Müller, de l'université de Bâle, en Suisse, a étudié la répartition des galaxies naines de Centaurus A, qui se trouve hors du Groupe local. Pas moins de 14 galaxies naines sur 16 sont dans un plan... Les simulations semblent donc incomplètes !

EAU ET ONDES
SISMQUES

Lors d'un séisme, des ondes sismiques se déplacent à travers la Terre à différentes vitesses et s'atténuent au cours de leur propagation. Les sismologues utilisent ces informations pour déduire la structure et la composition de la planète. «Jusqu'à présent nous pensions avoir identifié quatre paramètres principaux influant sur la vitesse et l'atténuation des ondes sismiques: la température, la présence de magma, c'est-à-dire de roche en fusion partielle, la composition des roches et l'eau», explique Eric Debayle, sismologue du CNRS à l'École normale supérieure de Lyon.

Or l'équipe de Christopher Cline, de l'université australienne de Canberra, vient de prouver que la présence d'eau dans les roches n'a en fait aucune influence sur la propagation des ondes sismiques. Pour ce faire, les chercheurs ont piégé des quantités variables d'eau dans des échantillons d'olivine, le minéral le plus abondant dans le manteau supérieur terrestre. Ils ont ensuite soumis chaque échantillon aux conditions de



L'olivine, ici sous forme de grains érodés, est le minéral le plus abondant dans le manteau supérieur de la Terre.

pression et de température du manteau terrestre et lui ont appliqué une torsion à l'une de ses extrémités pour observer la propagation des vibrations. La teneur en eau ne changeait rien. En revanche, les chercheurs ont montré que le niveau d'oxydation de la roche joue un rôle sur la propagation des ondes. ■

DONOVAN THIEBAUD

C. J. Cline *et al.*, *Nature*, vol. 555, pp. 355-358, 2018

{ Partagez
les savoirs }

LES
RENDEZ-
VOUS DU
MUSÉUM

Entrée
gratuite

Au Jardin
des Plantes

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

POUR LA
SCIENCE

ACTU/DÉBAT

Lundi 14 mai - 18h : Protéger le vivant : évolution de notre regard sur l'animal

Table-ronde animée par Marie-Odile Monchicourt, journaliste - Avec Sabrina Krief, primatologue, Muséum, Patrick Morel, réalisateur, Michel Saint Jalme, directeur de la Ménagerie du Jardin des Plantes, Muséum

UN CHERCHEUR UN LIVRE

Lundi 28 mai - 18h : Sagesse animale. Comment les animaux peuvent nous rendre plus humains

Ed. Stock, 19,50 € et 272 p.
De et présenté par Norin Chai, vétérinaire en chef de la Ménagerie du Jardin des Plantes, Muséum

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

BAR DES SCIENCES

Dimanche 27 mai - 17h30 : La gestion de la biodiversité : quelles interactions humaines possibles ?

Animé par Marie-Odile Monchicourt, journaliste Avec Hélène Artaud, anthropologue, Muséum, Shelly Masi, primatologue, Muséum, Anne-Caroline Prévot, psychologue de la conservation, Muséum

Le café Les belles plantes
47 rue Cuvier, Paris 5°



GÉOSCIENCES

LA GLACE DES PROFONDEURS

Seuls minéraux à nous parvenir des couches profondes du globe terrestre, les diamants, formés à plus de 150 kilomètres de profondeur, agissent comme un coffre-fort préservant les inclusions, souvent minérales, qu'ils contiennent. En étudiant une dizaine de diamants à l'aide d'un faisceau de rayons X de haute énergie du synchrotron de Chicago, Oliver Tschauner, de l'université du Nevada, et ses collègues ont identifié dans leurs inclusions une forme de glace d'eau connue jusqu'ici uniquement en laboratoire. Cette découverte leur a fourni de précieuses informations sur la présence supposée d'eau liquide dans les régions du manteau où ces diamants se sont formés.

Cette glace, dénommée glace VII, résulte de la solidification, lors de la remontée du diamant, d'une inclusion d'eau liquide intégrée dans la structure du cristal. Le minéral étant très peu compressible, l'eau de ces inclusions reste quasiment aux mêmes conditions de pression que lors de son piégeage, mais sa température baisse au fil de la remontée, d'où sa solidification.

En explorant avec précision les caractéristiques physiques de ces cristaux de glace grâce à la diffraction des rayons X, les chercheurs ont



Oliver Tschauner tient un échantillon de diamant qui présente des inclusions de glace d'eau.

estimé la pression à laquelle les diamants se sont formés. Les inclusions étudiées indiquent des pressions de formation allant de 1 à 25 gigapascals (10 000 à 250 000 atmosphères). Les chercheurs en déduisent que certains de ces diamants se seraient formés à des profondeurs allant jusqu'à 800 kilomètres. D'après ces résultats, l'eau se trouverait sous forme liquide jusque dans le manteau inférieur. Les futures recherches devraient nous confirmer la présence de ces phases aqueuses profondes et nous permettront peut-être de les quantifier. ■

LAMBERT BARAUT-GUINET

O. Tschauner et al., *Science*, vol. 359, pp. 1136-1139, 2018

AGRONOMIE

AGRICULTURE DURABLE EN CHINE

Depuis 30 ans, la Chine nourrit plus d'un milliard d'habitants. Malheureusement, cela s'accompagne d'une utilisation massive d'engrais: plus de 300 kilogrammes d'azote par hectare et par an, soit quatre fois la moyenne mondiale. Depuis 2005, Fusuo Zhang, de l'université chinoise d'agriculture, à Beijing, et ses collègues ont mis en place un vaste projet visant à produire autant, voire plus, et à augmenter le revenu des producteurs tout en réduisant l'usage des produits azotés, et ils viennent d'en dresser un bilan.

Les chercheurs ont d'abord recensé les meilleures pratiques selon diverses conditions climatiques et de cultures auprès de 13 123 exploitations. Plus d'un millier de scientifiques, 65 000 fonctionnaires du secteur et 14 000 représentants en fournitures agricoles ont alors tra-



Comment développer une agriculture durable en Chine, par exemple dans les rizières de la région du Yunnan ?

vaillé ensemble pour organiser quelque 14 000 ateliers, 21 000 démonstrations sur site et distribuer 337 000 prospectus. L'approche a permis d'augmenter en moyenne les rendements de 11% et de diminuer l'usage des engrais de 15 à 18%. Pour les producteurs, cela a représenté un gain de 12,2 milliards de dollars sur 10 ans. ■

NOËLLE GUILLON

Z. Cui et al., *Nature*, vol. 555, pp. 363-366, 2018

EN BREF

LA COURSE AUX SOMMETS

Du fait du réchauffement climatique, la flore de basse altitude migre de plus en plus vers les hauteurs, où la température s'adoucit. Jonathan Lenoir, de l'université de Picardie-Jules-Verne, et une équipe internationale ont étudié 302 sommets de massifs européens entre 2007 et 2016 ; et ont constaté que le nombre d'espèces ayant colonisé les sommets est cinq fois supérieur à celui de la période 1957-1966. Si aucune disparition d'espèce des sommets n'a été constatée, la cohabitation pourrait bientôt devenir difficile.

VOIR LES SONS EN COULEURS

La synesthésie est un phénomène, souvent héréditaire, qui mêle plusieurs sens. Par exemple, certains synesthètes associent des couleurs aux formes ou aux sons. Cela s'explique par une plus grande connectivité neuronale, mais l'origine de celle-ci restait à élucider. Chez trois familles de synesthètes son-couleur, Simon Fisher, de l'université Radboud, à Nimègue, aux Pays-Bas, et ses collègues ont identifié des variants rares de gènes qui contribuent à la formation de connexions neuronales.

PEAU ARTIFICIELLE

Dimitri Ivanov, de l'université de Haute-Alsace, et ses collègues ont conçu un matériau biocompatible composé d'un unique polymère. L'élastomère produit présente les propriétés mécaniques de la peau de porc : il est souple, mais durcit quand on l'étire. Les chercheurs ont eu la surprise de voir qu'en déformant cette peau artificielle, elle change de couleur. La lumière interfère avec la structure moléculaire et diffuse une couleur qui dépend des distances entre certaines parties des molécules.

LA CHALEUR DES VILLES

Les villes sont des îlots de chaleur où la température de l'air est en général plus élevée que dans les zones rurales. L'effet est surtout marqué la nuit et varie d'une ville à l'autre. Roland Pellenq, du Centre interdisciplinaire de nanosciences de Marseille, et son équipe ont montré qu'une ville aux rues droites et perpendiculaires, comme New York, piège davantage de chaleur qu'une ville au plan moins régulier, comme le cœur historique de Los Angeles.

Pour ce faire, les chercheurs ont modélisé la dynamique thermique des bâtiments. Ils ont inclus l'organisation spatiale des immeubles dans leur modèle grâce à des outils statistiques. Ils ont montré que dans les villes ordonnées, les bâtiments sont plus proches les uns des autres et échangent donc plus facilement de la chaleur, ce qui entrave son évacuation. ■

S. B.

J. M. Sobstyl et al., *Phys. Rev. Lett.*, vol. 120, article 108701, 2018

MILLE-FEUILLE SOUS LE MANS

Fouiller le centre d'une vieille ville de France revient à explorer un mille-feuille écrasé. L'équipe de Stéphane Augry, de l'Inrap, vient de restituer celui qui s'est formé à l'intérieur de 2500 mètres carrés de sol entourant le chevet gothique de la cathédrale Saint-Julien, au Mans.

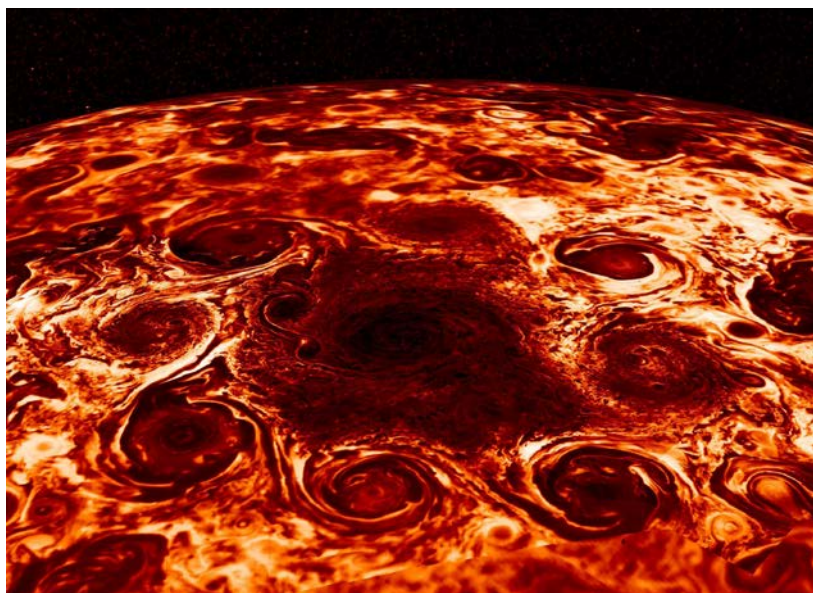
Là, dans un espace limité par le mur de la ville médiévale et par l'ancienne enceinte romaine, les archéologues ont retrouvé les fondations d'un palais épiscopal, d'une chapelle de la Renaissance, des éléments sculptés de la cathédrale enterrés à ses pieds lors d'une réfection, l'extrémité pavée d'une rue et moult poubelles...

Toutefois, c'est surtout le dégagement de deux pans de la célèbre enceinte romaine rose de la ville qui les ravit. Leur parement de pierres liées par un mortier rose où s'intercalent à intervalles réguliers des strates de briques témoigne du soin apporté à la fin du III^e siècle à la fortification de la ville, après que l'empereur Dioclétien eut ordonné la construction de remparts autour de toutes les villes de l'Empire. ■

F. S.

inrap.fr/fouilles-aux-abords-de-la-cathedrale-du-mans-10941

DES VENTS DANS LES ABÎMES DE JUPITER



Cette image reconstituée à partir des données de l'instrument JIRAM de la sonde *Juno* met en évidence le grand cyclone au pôle nord de Jupiter entouré de huit autres cyclones.

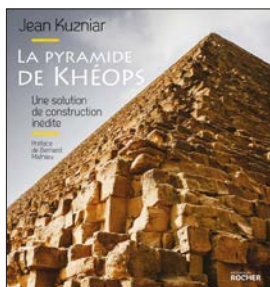
L'atmosphère de Jupiter exhibe de grandes bandes parallèles à l'équateur où soufflent des vents atteignant 600 kilomètres par heure. Les planétologues tentent depuis plusieurs décennies de comprendre la dynamique de ces vents. Par exemple, se manifestent-ils en profondeur ou sont-ils un phénomène de surface? Les récentes données de la sonde *Juno* ont permis de répondre à la question.

Afin d'arriver à leur conclusion, les chercheurs ont mesuré le champ gravitationnel de Jupiter. En effet, toute asymétrie dans ce champ serait le signe d'une structure interne complexe, comme un écoulement important de matière. Pour ce faire, les chercheurs ont suivi avec une grande précision la trajectoire de la sonde *Juno*. En notant toute variation anormale de sa vitesse (avec une précision de 0,01 millimètre par seconde), ils ont reconstitué le champ gravitationnel de la planète. Deux équipes, l'une menée par Yohai Kaspi, de l'institut Weizmann, en Israël, et l'autre par Tristan Guillot, de l'observatoire de la Côte d'Azur, ont utilisé ces résultats pour montrer qu'il existe des écoulements de gaz (de l'hydrogène et de l'hélium) jusqu'à 3000 kilomètres de profondeur. Dans cette région, la pression est 100 000 fois supérieure à celle régnant à la surface de la Terre. Les atomes s'y ionisent en perdant leurs électrons. Les particules chargées ainsi apparues créent des forces qui s'opposent alors à la circulation des vents. Plus en profondeur, la matière a donc un mouvement de rotation comme si elle était solide.

Ces résultats permettront peut-être d'expliquer certains phénomènes observés par *Juno*, notamment ceux qui se déroulent au niveau des pôles. Par exemple, comment expliquer la stabilité de ces structures comportant un cyclone central entouré de plusieurs autres, que l'on n'observe pas sur Saturne? ■

S. B.

A. Adriani et al., *Nature*, vol. 555, pp. 216-219, 2018; L. Less et al., *ibid.*, pp. 220-222; Y. Kaspi et al., *ibid.*, pp. 223-226; T. Guillot et al., *ibid.*, pp. 227-230



ÉGYPTOLOGIE

LA PYRAMIDE DE KHÉOPS, UNE SOLUTION DE CONSTRUCTION INÉDITE

Jean Kuzniar

Le Rocher, 2017
120 pages, 19,90 euros

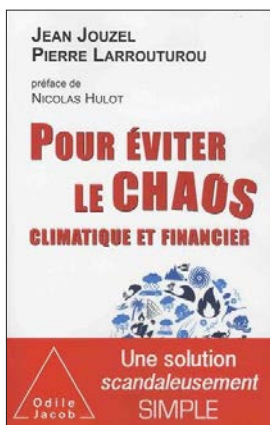
Encore la grande pyramide, une énième solution pour résoudre le « mystère » de sa construction, penseront certains... L'auteur ne prétend pas proposer « la » solution ni résoudre tous les problèmes. Plus modestement, il aborde la question d'un point de vue surtout pratique. Il essaie d'abord de définir les problèmes qu'ont eu à résoudre les concepteurs : organisation du chantier, matériaux, etc. Ensuite, il se demande comment les ouvriers utilisaient les outils qui nous sont parvenus, et cela par l'expérimentation et la pratique.

Il parvient ainsi à des résultats surprenants. Les fameux « berceaux oscillants », régulièrement présents dans les dépôts de fondation, sont par exemple à utiliser à l'envers de ce qu'on croyait : ils se révèlent particulièrement adaptés au déplacement de blocs de deux à trois tonnes. Ou encore la mise en évidence du rôle des « pierres de pivotement », que l'on prenait pour des poids : en considérant leur forme spécifique et les traces d'usure, l'auteur montre qu'elles servaient à déplacer des blocs dans les deux sens et sur différents terrains.

Si l'utilisation de certains outils

reste une hypothèse, beaucoup des solutions proposées sont très séduisantes. Elles frappent par leur simplicité et témoignent d'une parfaite connaissance du milieu, ce qui va tout à fait dans le sens de ce que nous savons des Égyptiens. Cet ouvrage apporte un regard neuf et propose des solutions simples et rationnelles, nous permettant de mieux appréhender les techniques mises en œuvre et de faire un grand pas dans la compréhension de ce monument fascinant. À un moment où des études totalement différentes ont une nouvelle fois mis en lumière cette pyramide, on voit tout l'intérêt d'aborder le monument sous des angles différents.

NADINE GUILHOU /
UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER



CLIMATOLOGIE

POUR ÉVITER LE CHAOS CLIMATIQUE ET FINANCIER

Jean Jouzel et Pierre Larroustourou

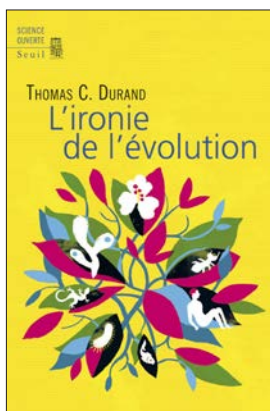
Odile Jacob, 2017
432 pages, 22 euros

Due à la plume de Jean Jouzel, paléo-climatologue du CEA qui fut vice-président du Giec, la première moitié de ce livre traite du changement climatique en cours. Ses conséquences physiques comme l'élévation des températures sont décrites en détail, mais les impacts biologiques, comme la sixième extinction de la biodiversité, le sont à peine. Après ce fracassant état des lieux, Pierre Larroustourou prend le relais et propose une « solution scandaleusement simple » : « Pour sauver les banques, on a mis 1 000 milliards. Pourquoi ne pas mettre 1 000 milliards pour sauver le climat ? » Cet ingénieur agronome bien connu en politique décrit les problèmes financiers et la solution qu'il préconise : une sorte de plan Marshall de transition énergétique. Le livre bénéficie d'une préface enthousiaste du ministre de l'Écologie. Ce n'est plus au niveau français que ce projet – qui serait financé par la BCE – est proposé, mais à celui de l'Europe, avec la création d'un impôt sur les bénéfices. Et le président Emmanuel Macron est invoqué pour diviser par quatre nos émissions de gaz à effet de serre. Les auteurs ont ainsi converti le plomb en or : de l'énorme menace du changement climatique, nous passerions à un programme donnant un sens à la politique européenne.

Reste que ces propositions suscitent

quelques interrogations. Notre pays peut-il convaincre les autres ? N'escamote-t-on pas d'autres menaces, la démographie par exemple, sachant que l'augmentation de la population mondiale est devenue le principal facteur d'accroissement de l'effet de serre ? Ce projet est-il trop ambitieux ?

PIERRE JOUVENTIN / DIRECTEUR
DE RECHERCHE ÉMÉRITE DU CNRS



MÉDECINE-SANTÉ

SANTÉ, SCIENCE, DOIT-ON TOUT GOBER ?

Florian Gouthière

Belin, 2017

432 pages, 18 euros

L'auteur, qui travaille dans des émissions de télévision, cherche à aider de plus jeunes que lui dans le domaine de la santé. Son livre est utile et courageux: il part en guerre contre les marchands d'orviétan, démonte des stratégies de communication d'un certain monde plus souvent technologique que scientifique, analyse des cas où la presse générale a été au-dessous de tout en matière d'information scientifique ou technologique, combat des bastions d'antiscience, etc.

Alors, certes, ce livre ne fera pas de mal aux jeunes journalistes... Plaira-t-il à l'«honnête homme du XXI^e siècle»? En tout cas, ce dernier en apprendra de belles sur une certaine presse, sera sensibilisé à des agissements qui pourraient lui nuire, sera incité à être critique, s'il a la faiblesse de ne pas l'être déjà. Mais quand il est question d'honnêteté, comme ici, il y a toujours cette difficile question de la stratégie: a-t-on vraiment besoin de convaincre ceux qui sont convaincus, et a-t-on la moindre chance de réfuter ceux qui ne veulent pas l'être?

À cet égard, je ferai deux critiques à la démarche de l'auteur. La première me semble être de ne pas avoir expliqué le débat actuel, dans de nombreuses revues scientifiques, sur la valeur p des tests d'hypothèse (« $p < 0,05$ »). Ce débat est en effet essentiel en biologie, dans les sciences de l'humain et de la société. La seconde est de ne pas mieux discuter l'oxymore «démonstration scientifique». Qu'importe! Retenons surtout que Voltaire nous a alertés: «N'est-il pas honteux que les fanatiques aient du zèle et que les sages n'en aient pas?» Florian Gouthière semble faire partie de la seconde catégorie, puisqu'il est prudent, et non point timide, ce don il faut lui être reconnaissant.

HERVÉ THIS / INRA-AGROPARISTECH

BIOLOGIE

L'IRONIE DE L'ÉVOLUTION

Thomas C. Durand

Seuil, 2018

256 pages, 20 euros

Dans un univers éditorial où les livres sont trop souvent à l'image de leur époque, éphémères et superficiels, celui-ci a manifestement été réfléchi pendant des années. Or son auteur est jeune, a enseigné la biologie végétale à l'université Claude-Bernard, à Lyon, a effectué des recherches en physiologie végétale à l'École normale supérieure de Lyon, a déjà écrit plusieurs nouvelles et pièces de théâtre, anime un blog militant («La menace théoriste») ainsi qu'une chaîne Youtube à la fois humoristique et sérieuse («La tronche en biais»). Bref, son profil est atypique. Toutes ces activités et ce premier essai de vulgarisation scientifique visent à développer l'esprit critique dans un contexte zététique militant, afin de nous protéger des croyances complotistes, homéopathiques, créationnistes, etc. Le style est plaisant et la bibliographie riche. Les définitions et concepts abondent, ce qui est pédagogique, mais exige un minimum de connaissances en biologie. Comme son titre l'indique, ce livre a pour objet d'expliquer les nombreuses résistances à la théorie de l'évolution (qui n'a pourtant pas de concurrente scientifique et satisfait la quasi-totalité des biologistes) par plusieurs biais cognitifs inscrits dans notre cerveau: «C'est un peu comme si l'évolution nous avait fabriqués avec la consigne de ne pas croire en elle», dit-il plaisamment. Dans le contexte de la psychologie évolutionniste, ces dénis sont innés et adaptatifs, ce qui est paradoxal et inquiétant, mais indiscutable d'après les études récentes.

PIERRE JOUVENTIN / DIRECTEUR DE RECHERCHE ÉMÉRITE DU CNRS

ET AUSSI



CRÉDULITÉ & RUMEURS

Gérald Bronner/Jean-Paul Krassinsky

Le Lombard, 2018

72 pages, 10 euros

Pour le sociologue (et chroniqueur à Pour la Science) Gérald Bronner, il est urgent de prendre conscience à quel point notre environnement nous transforme, beaucoup plus souvent que par le passé, en dupes. Le dessinateur de cette BD didactique lui a donné les traits d'un adolescent à la chevelure brune donnant à un copain blond un peu benêt une série de leçons sur les biais cognitifs. Ne vous y trompez pas: les benêts, c'est nous, autant que nos adolescents. Une excellente lecture, pour «faire face aux théories du complot et aux fake news».

GIORDANO BRUNO

Jean Rocchi

Matérialogiques, 2018

464 pages, 24 euros

Le sous-titre présente le célèbre philosophe de la Renaissance italienne Giordano Bruno comme un précurseur des Lumières. Pour le préfacier (l'éditeur), il le fut avant tout en tant que martyr de la libre-pensée. L'auteur raconte la longue fuite de Bruno à travers l'Europe et ses épiques luttes intellectuelles, jusqu'au combat ultime contre le tribunal du Saint-Office, qu'il perdit pour avoir trop souvent accepté puis refusé de se rétracter. Les remarquables intuitions de cet inventeur avant l'heure des expériences de pensées, de l'héliocentrisme, des mondes habités et de l'univers infini parsèment son cheminement, celui d'un héros de la liberté intellectuelle.

LES RESCAPÉS DU GONDWANA

Éric Guilbert, Christophe Daugeron et Cyrille D'Haese

SYNOPSIS/MNHN, 2017

224 pages, 24,90 euros

Certains scientifiques grimpent aux arbres pour étudier les fragiles écosystèmes des cimes forestières. Aidés par un grimpeur professionnel et un photographe, quatre d'entre eux sont partis traquer les microfaunes rescapées du Gondwana – un supercontinent disparu il y a 160 millions d'années – dans les forêts de Nouvelle-Calédonie, de Madagascar, de Nouvelle-Zélande, de Patagonie, d'Afrique du Sud et d'Australie. Résultat: partout la même fragilité face au réchauffement climatique; partout la même beauté sublime.

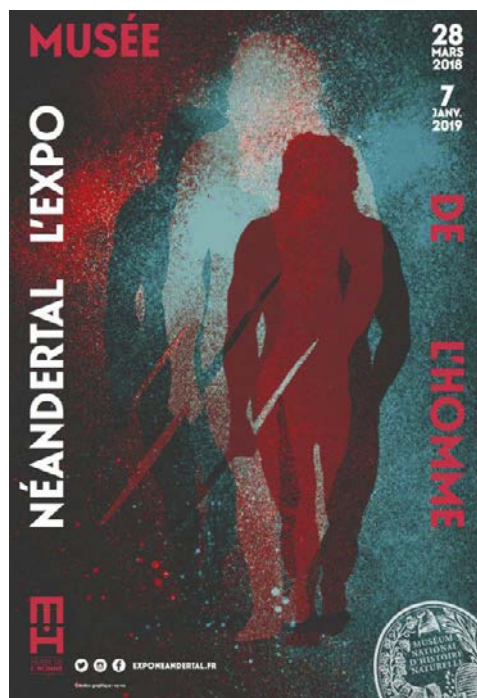
PARIS

JUSQU'AU 7 JANVIER 2019
Musée de l'Homme
exposeandental.fr

Néandertal

Les découvertes paléanthropologiques se sont multipliées ces dernières années. Celles concernant les Néandertaliens trouvent dans cette grande exposition un relais bienvenu vers le grand public. Car il n'y a pas si longtemps, on avait des hommes de Néandertal (*Homo neanderthalensis*) une vision caricaturale et fautive: celle de sous-humains primitifs aux allures de brutes, survivant avec peine dans des milieux perpétuellement enneigés. La visite de l'exposition permet ainsi de balayer bon nombre des idées reçues sur cette espèce humaine sœur de la nôtre, apparue il y a quelque 350 000 ans et disparue il n'y a que 30 000 ans environ.

Un parcours en trois parties est proposé, au fil duquel le portrait du Néandertalien se précise peu à peu. Dans la première, «Le temps d'une journée», le visiteur est immergé dans l'environnement naturel où vivaient les Néandertaliens, environnement qui a d'ailleurs varié en fonction des phases climatiques. Il se voit décrire le quotidien de ces chasseurs-cueilleurs nomades, grâce notamment à une reconstitution en grandeur réelle du campement de «La Folie» et à la présentation d'outils mis au jour en ce site. Dans la deuxième partie du parcours, on se retrouve face à des fossiles exceptionnels, dont huit crânes, qui permettent de caractériser le physique des Néandertaliens, voire leurs



capacités cognitives qui, semble-t-il, n'étaient pas inférieures aux nôtres. La troisième partie, enfin, aborde de grandes questions qui restent débattues, telles que la cohabitation avec *Homo sapiens* et les raisons de la disparition des Néandertaliens. Une riche et instructive exposition, à ne pas manquer si l'on veut mettre ses pendules à l'heure préhistorique. ■

ANNECY

JUSQU'AU 4 NOVEMBRE 2018
La Turbine sciences
laturbinesciences.fr

La mécanique des plantes



Diversité et histoire des plantes, modes de nutrition et de reproduction: ces grands axes sont proposés aux visiteurs par le biais d'observations et de jeux interactifs, mais aussi, ce qui est original, par le biais de sculptures évocatrices et de dispositifs mécaniques visant à expliquer la machinerie végétale. ■

CLERMONT-FERRAND

JUSQU'AU 4 NOVEMBRE 2018
Muséum Henri-Lecoq
clermontmetropole.eu

Mathissime



Redécouvrir les maths de façon ludique et interactive, telle est l'ambition de cette exposition accessible à partir de l'âge de 6 ans. Expérimentations et jeux mettant en œuvre des notions fondamentales, histoire des mathématiques et de ses grands personnages, histoire des machines à calculer...: voilà ce qui attend le visiteur. ■

ET AUSSI

Jeudi 3 mai, 18 h
Campus Joseph-Aiguier
Marseille
provence-corse.cnrs.fr
TARA PACIFIC
Conférence de Denis Allemand, du Centre scientifique de Monaco, sur l'expédition Tara Pacific et l'exploration des récifs coralliens, des joyaux de la nature menacés.

Jeudi 3 mai, 14 h - 20 h
BNF - Paris
www.bnf.fr
MANGEONS DEMAIN !
Lors de cette demi-journée ouverte au public, des apprentis des arts culinaires présentent les résultats de leur travail pour un concours de création culinaire. Avec une table ronde sur l'alimentation du futur, et dégustation pour le prix du public.

Du 14 au 16 mai en soirée
France et ailleurs
www.pintofscience.fr
PINT OF SCIENCE
Des scientifiques sortent de leurs laboratoires et viennent dans les bars discuter avec le public de leurs dernières découvertes. En France, l'événement concerne plus de 40 villes.

Mardi 15 et jeudi 17 mai, 18 h
Chambéry (le 15) et Annecy (le 17)
www.univ-smb.fr
ONDES GRAVITATIONNELLES
Didier Verkindt, chercheur du CNRS au Laboratoire d'Annecy de physique des particules, raconte l'histoire de ces ondes particulières, dont l'idée remonte au début du xx^e siècle, et qui n'ont été détectées directement qu'en 2015. Une grande aventure scientifique, mais aussi technologique.

Samedi 19 mai
France, Europe
www.nuitdesmusees.fr
NUIT EUROPÉENNE DES MUSÉES
Comme tous les ans depuis 2005, l'occasion de se cultiver en visitant gratuitement tous les musées (ou presque) que l'on veut et peut.

VILLENEUVE-D'ASCQ

JUSQU'AU 3 MARS 2019

Forum départemental des Sciences - Centre François Mitterrand
forumdepartementaldessciences.fr

L'archipel des émotions

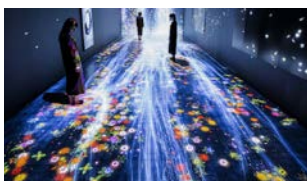


Cinq îlots composent cet archipel d'exposition, décliné en autant de thématiques: ressentir les émotions, le rôle des émotions dans la survie, leur observation, leur partage et leur étude. Par exemple, dans l'îlot « Ressentir les émotions », le visiteur pourra se mettre en situation d'éprouver joie, peur, tristesse, dégoût, colère ou surprise, et il pourra aussi regarder des extraits de films évoquant telle ou telle émotion. Dans l'îlot « Observer les émotions », il pourra notamment faire un minitest pour mesurer sa capacité à deviner les émotions d'autrui, un élément important de l'« intelligence émotionnelle ». Plus généralement, des expériences, des textes, des photos, des documents vidéo ou audio font comprendre au public à quoi sont utiles les émotions, comment elles se communiquent et avec quelles méthodes on peut les étudier, sans oublier des faits illustratifs et étonnants souvent tirés du monde animal. ■

PARIS

DU 4 MAI AU 2 SEPTEMBRE 2018

Grande Halle de la Villette
lavillette.com



teamLab: Au-delà des limites

Le collectif japonais teamLab, créé en 2001, est composé d'artistes, d'ingénieurs, d'animateurs 3D, etc. Il explore les nouvelles relations entre l'humain et la nature en créant de grandes installations interactives. Il en propose ici cinq, dont la principale est une cascade virtuelle haute de 11 mètres et qui s'étend sur le sol où circulent les visiteurs. Des expériences visuelles et immersives faisant la part belle à l'onirisme et à une nature fantasmée. ■

SORTIES DE TERRAIN

Jeudi 3 mai, 14 h

Saint-Martin-de-Crau (13)
Tél. 04 90 47 02 01

LIBELLULES DE LA CRAU

Une après-midi d'initiation à la capture et à l'identification des odonates (libellules et demoiselles) autour du canal de La Vergière.

Mardi 8 mai, 10 h

Villers-sur-Mer (Calvados)

Tél. 02 31 87 01 18

FALAISES DES VACHES NOIRES

Une balade familiale de deux heures sur trois kilomètres, dans un site paléontologique et avec initiation à la collecte de fossiles.

Dimanche 13 mai
Puisselet-le-Marais

(Essonne)

Tél. 01 60 91 97 34

ORCHIDÉES

Le temps d'une matinée, une plongée dans l'univers des orchidées sauvages et des relations curieuses qu'elles entretiennent avec les insectes.

Dimanche 13 mai
Barr (Bas-Rhin)

Tél. 06 47 29 16 20

SENTIER GÉOLOGIQUE DE BARR

Une journée de randonnée pour bons marcheurs, en compagnie du géologue Charles Frey, cofondateur de ce sentier qui chemine dans des paysages et sites géologiquement riches.

Samedi 19 mai, 14 h 30

Poulligny-Saint-Pierre (36)

Tél. 02 54 28 12 13

BOIS DES ROCHES

Petite balade à pied dans cette réserve naturelle à la rencontre des plantes et insectes typiques des plateaux calcaires, en écoutant les contes et légendes du lieu narrés par la conteuse Marie Rousseau.

Lundi 28 mai, 9 h

Sainte-Gemme (Indre)

Tél. 02 54 28 12 13

MARAIS DE L'OZANCE

Une petite matinée pour découvrir la faune et la flore d'un site riche et encore méconnu qui comprend prairies tourbeuses, étangs forestiers et dunes de sable.

BRUXELLES

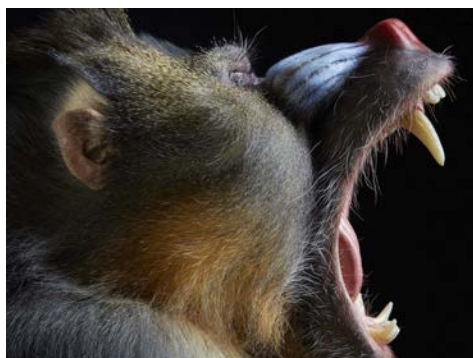
JUSQU'AU 26 AOÛT 2018

Muséum des sciences naturelles
sciencesnaturelles.be

Les singes

Avec environ 280 espèces dans le monde, les singes représentent plus de la moitié de la diversité de l'ordre des Primates (environ 500 espèces), dont font aussi partie les lémurins et d'autres mammifères apparentés. Cette exposition, qui, en dépit de son titre, porte sur les Primates, illustre cette diversité par plus de 60 spécimens d'animaux naturalisés, ce qui est assez exceptionnel pour être souligné. À cela s'ajoutent de belles photographies, une ambiance sonore, des textes, des dispositifs interactifs, des jeux...

Les divers aspects de la biologie des Primates sont abordés: évolution, locomotion, alimentation, communication, vie sociale... Puisque beaucoup d'espèces de Primates sont



menacées d'extinction (60% d'entre elles, selon une étude publiée en 2017), une part importante de l'exposition porte sur ces menaces et la préservation de ces animaux. Les menaces sont bien identifiées (pertes et dégradations des habitats, conflits armés, chasse pour la viande de brousse, commerce illégal de fourrures et d'animaux de compagnie, maladies...), mais pour les remédies, c'est une autre histoire! ■



LA CHRONIQUE DE
GILLES DOWEK

L'ART DE LA SYNCHRONISATION

De l'informatique à la biologie, coordonner les opérations est impératif. L'étude de la synchronisation dans une discipline éclaire ce phénomène dans d'autres domaines.



Les ciliés se déplacent en bougeant leurs cils. Mais seul un mouvement synchronisé de ces derniers permet une action efficace.

La meilleure façon de marcher, c'est de mettre le pied gauche devant le droit, le pied droit devant le gauche et de recommencer. Mais le plus important, dans cette entreprise, est de ne pas tenter de faire ces deux opérations simultanément. Il est donc nécessaire de synchroniser les muscles qui les commandent. Chez de nombreuses espèces, cette synchronisation est assurée par les nerfs moteurs et le cerveau qui, tel un chef d'orchestre, envoie un signal, d'abord à une jambe, puis à l'autre.

De façon similaire, les différents circuits d'un ordinateur sont synchronisés par une horloge qui bat la mesure en émettant un signal périodique, et par un arbre d'horloge qui, tel le système nerveux d'un animal, distribue ce signal à l'ensemble des circuits.

Mais, de même que dans un orchestre de chambre, les musiciens se synchronisent souvent sans chef, il existe aussi des algorithmes de synchronisation moins centralisés. L'un des plus simples permet à une ligne de fusiliers de faire

feu en même temps, même si chacun ne peut communiquer qu'avec ses deux voisins. Pour cela, il suffit que chaque fusilier compte à rebours, en se synchronisant sur son voisin de gauche, quand il s'aperçoit qu'il n'est pas au même point de son décompte. Ainsi, une vague de synchronisation se propage, de la gauche vers la droite, le long de la ligne de

Certains agents se synchronisent sans autorité centrale ni moyens de calcul importants

fusiliers et, pourvu qu'ils commencent leur décompte assez haut, les fusiliers finissent par faire feu en même temps. Dans cet algorithme, le fusilier le plus à gauche joue, malgré lui, le rôle de chef d'orchestre, bien qu'il se comporte exactement comme les autres.

Dans cet algorithme, chaque fusilier effectue une opération simple: un compte à rebours, ce qui ne lui demande que de mémoriser un nombre et d'effectuer une soustraction. Cela choque sans doute notre intuition, mais un grand nombre d'agents peuvent se synchroniser ainsi, sans autorité centrale ni moyens de calcul importants. Il existe même des algorithmes qui demandent, à chaque agent, des capacités de calcul et de mémorisation plus faibles encore.

L'étude des techniques de synchronisation en informatique éclaire peut-être certains phénomènes du vivant, tel le mouvement des ciliés (*Ciliophora*), organismes unicellulaires qui se déplacent grâce à des cils vibratiles recouvrant leur surface.

Si les cils vibraient indépendamment les uns des autres, le mouvement de ces protozoaires serait aléatoire, comme le mouvement brownien. Or cela est loin d'être le cas: les ciliés se déplacent très efficacement et, dans leurs mouvements, rien ne semble laissé au hasard. Le mouvement de leurs cils est donc nécessairement synchronisé, bien que ces microorganismes n'aient ni nerfs ni cerveau pour jouer les chefs d'orchestre. Ainsi, les ciliés utilisent sans doute un algorithme de synchronisation décentralisé, faisant appel à des canaux de communication, intra ou extracellulaires, entre les cils.

Les cils de ces microorganismes ne sont pas les seuls à se synchroniser ainsi. Les oiseaux migrateurs, par exemple, semblent de même s'organiser en formations sans chef d'orchestre.

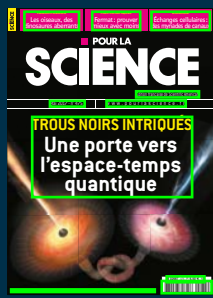
Décrire ainsi, à des échelles très différentes, les techniques de synchronisation des lignes de fusiliers, des cils des protozoaires, des formations d'oiseaux migrateurs, mais aussi des essaims d'insectes ou des personnes en mouvement dans une foule, comme des algorithmes décentralisés est un exemple de la façon dont le développement d'une science donne, par porosité, de nouveaux langages et de nouvelles méthodes aux autres sciences. ■

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

POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION DÈS MAINTENANT!



N° 475 (mai 17)
réf. PL475



N° 476 (juin 17)
réf. PL476



N° 477 (juil. 17)
réf. PL477



N° 478 (août 17)
réf. PL478



N° 479 (sept. 17)
réf. PL479



N° 480 (oct. 17)
réf. PL480



N° 481 (nov. 17)
réf. PL481



N° 482 (déc. 17)
réf. PL482



N° 483 (janv. 18)
réf. PL483



N° 484 (févr. 18)
réf. PL484



N° 485 (mars 18)
réf. PL485



N° 486 (avril 18)
réf. PL486

RETROUVEZ L'ENSEMBLE DES ANCIENS NUMÉROS SUR BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR

A 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

5,90 € dès le 2^e numéro acheté!

☒ **OUI, je commande des numéros de Pour la Science, au tarif unitaire de 5,90 € dès le deuxième acheté.**

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

1 ^{re} réf.	_____	01	x 6,50 € =	6,50	€
2 ^e réf.	_____		x 5,90 € =	_____	€
3 ^e réf.	_____		x 5,90 € =	_____	€
4 ^e réf.	_____		x 5,90 € =	_____	€
5 ^e réf.	_____		x 5,90 € =	_____	€
6 ^e réf.	_____		x 5,90 € =	_____	€

Frais de port (4,90€ France – 12€ export) _____ + _____ €

Je commande la reliure
Pour la Science (capacité 12 n°s)
(A0000905) au prix de 14 € _____ + _____ €

TOTAL À RÉGLER _____ €

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal _____ Ville : _____

Téléphone _____

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

☐ OUI ☐ NON
☐ 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: _____

Offre valable jusqu'au 31/12/2018. En application de l'article 27 de la loi du 6 janvier 1978, les informations ci-dessus sont indispensables au traitement de votre commande. Elles peuvent donner lieu à l'exercice du droit d'accès et de rectification auprès du groupe Pour la Science. Par notre intermédiaire, vous pouvez être amené à recevoir des propositions d'organismes partenaires. En cas de refus de votre part, merci de cocher la case ci-contre ☐.

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



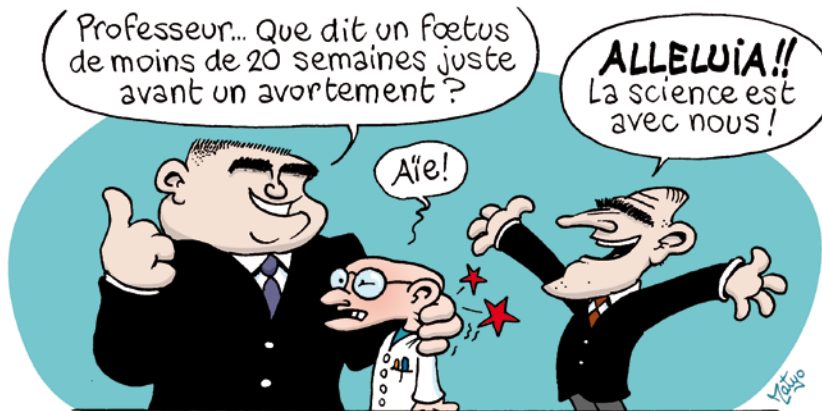
PLUS SIMPLE, PLUS RAPIDE
ABONNEZ-VOUS SUR BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR



LA CHRONIQUE DE
GÉRALD BRONNER

QUAND L'IDÉOLOGIE DÉTOURNE LA SCIENCE

Un corps qui réagit souffre-t-il forcément ? Les promoteurs d'un projet de loi américain limitant l'avortement semblent penser que oui, et sont ainsi victimes d'un sophisme.



Il y a quelques semaines, aux  tats-Unis, la science a été prise une fois de plus en otage par des enjeux idéologiques. Sujet sensible s'il en est, un projet de loi visant l'interdiction totale de l'avortement (y compris pour des raisons thérapeutiques) après 20 semaines de grossesse a été présenté devant le sénat américain, sans être adopté.

Si la quasi-totalité des sénateurs républicains ont voté en faveur de cette motion, l'opposition démocrate a été non moins unanime à la repousser. Il a manqué 9 voix pour que cette mesure soit adoptée, et cela n'aurait pas été sans conséquence. En effet, l'échographie que l'on réalise entre la 18  et la 22  semaine est déterminante pour repérer certaines malformations telles que la myéloméningocèle (forme grave de spina-bifida).

La motivation du sénateur Lindsey Graham, auteur de la motion, venait du fait que, selon ses partisans, la science aurait établi qu'un fœtus est capable de souffrir à partir de 20 semaines. La médecine la plus sérieuse s'est en effet intéressée à cette question, mais la littérature

qu'elle a produite n'a manifestement pas été consultée par ceux qui ont défendu le *Pain-Capable Unborn Child Protection Act*. Ainsi, l'un des arguments développés dans le texte est que le fœtus réagit, notamment lors de l'échographie, par un retrait des membres. Les promoteurs du projet de loi en infèrent que le fœtus a une sensibilité et qu'il peut donc souffrir.

Les sénateurs ont invoqué des données scientifiques en les interprétant de façon erronée

Pourtant, l'un des plus robustes  tats de l'art sur cette question, publié en 2004 dans le *Journal of the American Medical Association* (DOI:10.1001/jama.294.8.947), souligne que les réactions du fœtus comme la réponse hormonale aux procédures invasives, par exemple, ne prouvent pas qu'il souffre d'une quelconque façon.

 prouver de la souffrance nécessite notamment l'existence d'un réseau de connexions thalamocorticales fonctionnelles. Or ces fibres n'apparaissent qu'entre la 23  et la 30  semaine de gestation. Par ailleurs, l'électroencéphalographie suggère que la capacité de perception de la douleur chez les nouveau-nés prématurés n'existe probablement pas avant 29 ou 30 semaines.

Ceux qui veulent limiter le droit à l'avortement outre-Atlantique prétendent le faire au nom de données scientifiques qu'ils interprètent de façon erronée. On ne saurait distinguer ici la mauvaise foi de l'erreur sincère, mais il est probable que l'idéologie ait ici favorisé le sophisme bien connu sous le nom de l'« affirmation du conséquent ».

Cette erreur de raisonnement consiste à faire passer une condition suffisante pour une condition nécessaire. On pourrait dire ainsi, en étant trompé par ce sophisme: « L'eau est liquide à 10  C; or le vin est liquide à cette température, donc le vin est de l'eau. » Dans le cas qui nous intéresse, il faut distinguer une prémisses acceptable, à savoir: « Un corps qui souffre réagit » (la réaction est une condition nécessaire pour qu'il y ait souffrance), d'une conclusion abusive, à savoir: « Tout corps qui réagit souffre » (la réaction est une condition suffisante).

Ce sophisme est grossier, mais s'il est enseveli sous une masse de données (preuves que le fœtus réagit à la lumière, à des sons, etc.) et qu'il s'adosse à des impératifs idéologiques, il peut aisément passer inaperçu. Il ne suffit donc pas que les données soient disponibles pour éclairer rationnellement le débat politique, il faut aussi qu'elles soient convoquées avec un peu d'honn t  intellectuelle. Et dans cette affaire (qui n'est pas terminée, car ceux qui ont défendu la motion des 20 semaines promettent de revenir à la charge), on trouve une raison supplémentaire de réclamer que l'on distingue fermement la connaissance scientifique des compulsions politiques. ■

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



Le progrès a-t-il un avenir?

15.26 mai 2018

cité

sciences
et industrie

CONFÉRENCES

Qu'est-ce que le progrès ?

Mai 2018 est à la fois le cinquante-naire de Mai 68 et le bicentenaire de la naissance de Karl Marx, un événement et une personnalité qui ont questionné la notion de progrès.

Depuis lors, l'idée de progrès a-t-elle vieilli? Le progrès a-t-il encore un avenir?

Accès gratuit sur réservation

Tous les après-midis

Présentations des groupes de réflexion

AgroParisTech, École primaire Guadeloupe, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, Conservatoire national supérieur de musique et de danse de Paris, L'Arbre des connaissances, Prix Design & Sciences Université Paris-Saclay, un groupe de citoyens,...

À partir de 18h30
Tables rondes

Mardi 15 mai

MAI 68 Sous les pavés, la science

Mercredi 16 mai

INNOVATIONS Comment le Japon innove à l'ombre des traditions?

Jeudi 17 mai

SCIENCES ET TECHNIQUES Consommateurs ou participants?

Vendredi 18 mai

HISTOIRE Cours! Le progrès est derrière toi

Mardi 22 mai

ANTHROPOLOGIE Le progrès est-il le genre humain?

Mercredi 23 mai

ÉCONOMIE ET ENVIRONNEMENT On ne tombe pas amoureux d'un taux de croissance

Jeudi 24 mai

INÉGALITÉS Le progrès à tous les étages?

Samedi 26 mai

MUSIQUE Le progrès donne le "la"

Avec, entre autres: Delphine Batho, Ali Benmakhlouf, Bernadette Bensauade-Vincent, Catherine Bourgain, Lucas Chancel, Jean-Paul Demoule, Fabrice Flipo, Mark Hunyadi, Marylène Patou-Mathis, Catherine Portevin, Antonin Pottier, Sophie Roux, Stéphanie Ruphy, Jean-Philippe Uzan, Sophie Wahnich, ...

EN PARTENARIAT AVEC

PSL, AgroParisTech, Inserm

CAMPUS CONDORCET Paris-Auvergne, École nationale supérieure des Arts et Métiers, ihest

ined, CONSERVATOIRE NATIONAL SUPÉRIEUR DE MUSIQUE ET DE DANSE DE PARIS

AVEC LE SOUTIEN DE

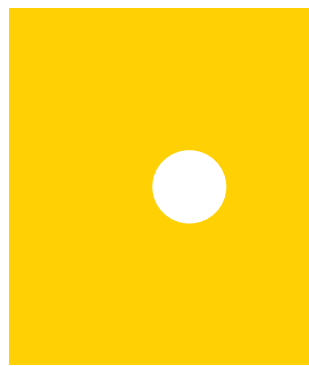
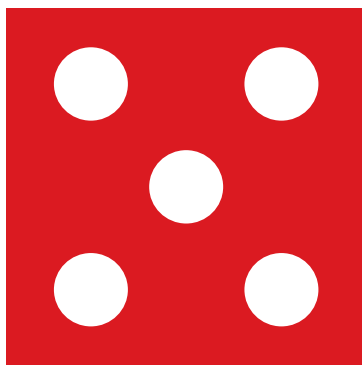
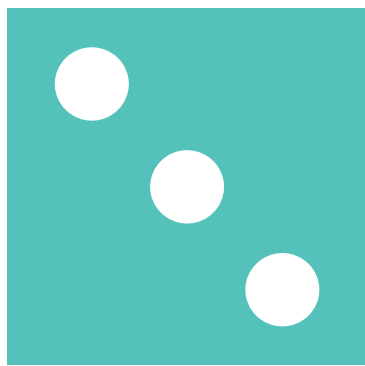
CNEWS, THE CONVERSATION

philosophie, SCIENCE

Cité des sciences et de l'industrie
30, avenue Corentin-Cariou - 75019 Paris

📍 Porte de la Villette 📞 3b Cité des sciences et de l'industrie

Programme sur cite-sciences.fr rubrique Conférences



L'ESSENTIEL

> Les matrices sont des ensembles de nombres rangés en lignes et colonnes. Elles représentent des transformations linéaires.

> Dans les matrices aléatoires, ces nombres sont tirés au hasard. On leur a découvert plusieurs

propriétés statistiques universelles – les mêmes quel que soit le type de hasard utilisé.

> De façon étonnante, on les retrouve dans quantité de situations. Et leur étude s'est révélée très féconde en mathématiques et en physique théorique.

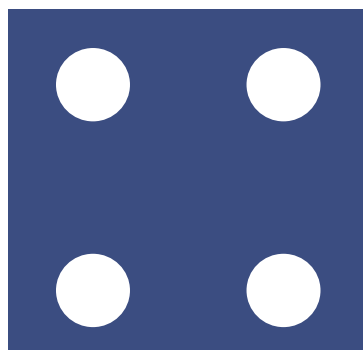
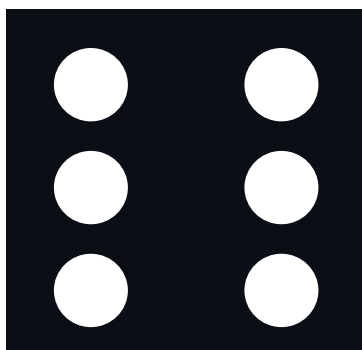
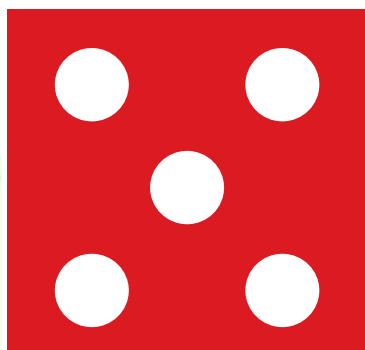
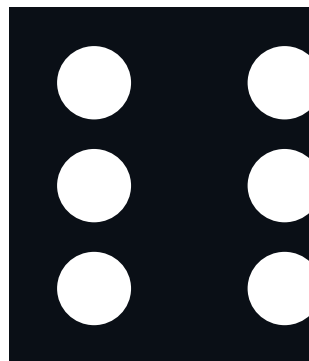
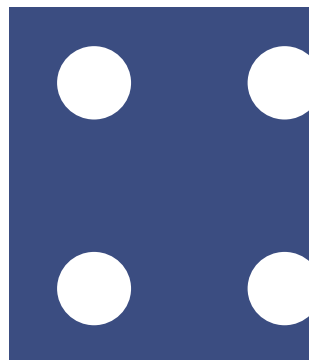
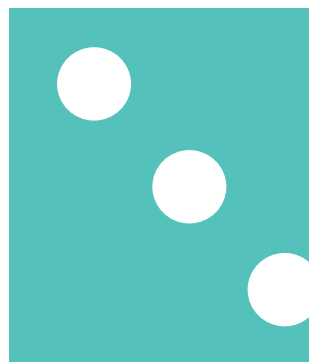
L'AUTEUR



BERTRAND EYNARD
chercheur à l'Institut de physique théorique du CEA, à Gif-sur-Yvette, ainsi qu'au Centre de recherches mathématiques de Montréal, au Canada

L'universalité des matrices aléatoires

Les régularités tapies dans le hasard n'ont pas fini de nous étonner. Avec les matrices aléatoires, les scientifiques découvrent des lois statistiques fascinantes et universelles, c'est-à-dire indépendantes du type de hasard choisi, ainsi que des liens intimes et féconds avec la géométrie, la théorie des cordes...





Temps d'attente entre deux mètres, niveaux d'énergie des noyaux atomiques, nombres premiers, théorie des cordes, tsunamis, cours de la bourse, forme des protéines, antennes de téléphonie mobile, position des arbres dans une forêt, durée d'embarquement des passagers dans les avions, géométrie des surfaces, cristaux, conduction électronique... Qu'y a-t-il de commun dans cet inventaire à la Prévert? Dans tous ces phénomènes, que ce soit dans leur description ou leur modélisation, les chercheurs ont mis au jour des propriétés qui sont celles des matrices aléatoires...

Ces objets combinent un outil mathématique très répandu, les matrices, avec un phénomène lui aussi présent dans une multitude de situations, le hasard. Et bien que le hasard soit *a priori* un agent de désordre, d'irrégularité et d'imprévisibilité, les matrices aléatoires ont révélé des propriétés traduisant un surprenant ordre caché : elles se comportent de façon « universelle », c'est-à-dire qu'elles présentent des régularités statistiques identiques quel que soit le type de hasard mis en jeu, et donc quel que soit le phénomène aléatoire précis que la matrice est censée décrire.

L'étude des matrices aléatoires remonte au moins à 1928, époque où le mathématicien écossais John Wishart s'y est intéressé dans le cadre de l'analyse de données statistiques. Mais ce sont surtout les travaux du physicien théoricien d'origine hongroise Eugene Wigner sur les niveaux d'énergie des noyaux atomiques lourds, publiés en 1955, qui ont stimulé l'intérêt des scientifiques pour le sujet.

Plusieurs autres physiciens théoriciens ont ensuite contribué à la théorie de ces objets et à établir des liens avec divers problèmes de physique. Et les percées qu'ils ont réalisées dans les décennies 1970-1990 ont attiré vers le domaine de nombreux mathématiciens et chercheurs d'autres disciplines. Ces scientifiques ont découvert d'une part que les matrices aléatoires ont des propriétés fascinantes, d'autre part qu'elles interviennent dans maintes questions scientifiques ou techniques. La théorie de ces objets est ainsi devenue, depuis, un champ de recherche très actif.

Pour comprendre ce que sont les matrices aléatoires et leurs remarquables propriétés, expliquons d'abord ce qu'est, en mathématiques, une matrice.

Étant donnés deux entiers positifs m et n , une matrice de dimension $m \times n$ est un tableau de $m \times n$ nombres rangés sur m lignes et n colonnes, ce tableau étant délimité par des parenthèses (voir l'encadré ci-dessus). Ici, on considérera presque toujours des matrices carrées (des matrices $n \times n$) et, le plus souvent, symétriques par rapport à leur diagonale.

MATRICES CARRÉES, SYMÉTRIQUES, HERMITIENNES

Une matrice est un tableau de nombres rangés en lignes et en colonnes, et qu'on délimite par des parenthèses de la taille appropriée. Les matrices carrées, qui ont autant de lignes que de colonnes, se rencontrent très fréquemment. Et parmi les matrices carrées, deux classes, celle des matrices symétriques et celle des matrices hermitiennes, jouent un rôle privilégié en physique.

Les matrices symétriques sont celles où les nombres se répètent symétriquement par rapport à la diagonale descendante de la matrice :

Si les matrices sont omniprésentes en mathématiques et dans leurs applications, c'est parce qu'elles permettent de représenter de façon très commode des opérateurs (ou applications) linéaires.

Au sens où on l'entend ici, un opérateur est un objet mathématique qui transforme une entrée (une liste de nombres) en une sortie (une autre liste de nombres). L'opérateur est dit linéaire si chaque nombre de la liste de sortie s'obtient en additionnant les nombres d'entrée pondérés par des coefficients multiplicatifs. Par exemple, si l'entrée est une liste de 4 nombres, et la sortie une liste de 2 nombres, l'opérateur est entièrement caractérisé par $2 \times 4 = 8$ coefficients, car pour chacun des 2 nombres de la sortie, il faut 4 coefficients, qui multiplient chacun un nombre de l'entrée. Dans cet exemple, l'opérateur linéaire est alors représenté par une matrice 2×4 , dont les éléments sont les coefficients en question (voir l'encadré page 39).

La liste d'entrée e et la liste de sortie s sont ce qu'on appelle des « vecteurs ». Si l'on note M la matrice qui transforme l'entrée e en la sortie s , on note l'opération $s = Me$ et on dit que le vecteur s est égal à la multiplication du vecteur e par la matrice M . Cette matrice comporte m lignes et n colonnes si le vecteur e est de dimension n (c'est-à-dire qu'il a n composantes) et si le vecteur s est de dimension m .

si a_{ij} désigne le nombre situé sur la ligne i et la colonne j , alors, si la matrice est symétrique, on a $a_{ij} = a_{ji}$ pour toutes les valeurs de i et de j .

Les matrices hermitiennes

sont celles qui vérifient $a_{ij} = (a_{ji})^*$ pour toutes les valeurs de i et de j , où a^* désigne le complexe conjugué du nombre a (si $a = p + iq$, où p et q sont des nombres réels et i est le symbole vérifiant $i^2 = -1$, alors $a^* = p - iq$).

Exemple d'une matrice de dimension 2×4 (c'est-à-dire ayant 2 lignes et 4 colonnes) :

$$\begin{pmatrix} -2 & 0 & -1 & -1 \\ 2 & 2 & 4 & 1 \end{pmatrix}$$

Exemple d'une matrice carrée de dimension 3×3 :

$$\begin{pmatrix} 1 & -2 & -1 \\ 4 & 0 & -3 \\ 0 & 5 & 2 \end{pmatrix}$$

Exemple d'une matrice symétrique de dimension 3×3 :

$$\begin{pmatrix} 1 & -2 & -1 \\ -2 & 0 & 5 \\ -1 & 5 & 2 \end{pmatrix}$$

Exemple d'une matrice hermitienne de dimension 3×3 :

$$\begin{pmatrix} 1 & 2+i & 5 \\ 2-i & 3 & 1-i \\ 5 & 1+i & 2 \end{pmatrix}$$

Les matrices, dont l'étude générale a été entreprise au milieu du XIX^e siècle avec les mathématiciens anglais Arthur Cayley et James Sylvester, sont l'un des concepts fondamentaux de l'algèbre linéaire. Comme on l'a dit, c'est un outil mathématique omniprésent. Donnons-en quelques illustrations.

LES MATRICES, DES OUTILS MULTITÂCHES

Un premier exemple est celui d'un comparateur de prix. Imaginons deux magasins qui vendent les mêmes quatre produits. Plaçons dans une matrice de dimension 2×4 les prix de chaque produit pour chaque magasin. Comme vecteur d'entrée, considérons une liste de courses: un vecteur de dimension 4 contenant les quantités désirées de chacun des quatre produits. Le vecteur de sortie, de dimension 2, est le montant total à payer pour cette liste de courses dans chacun des deux magasins, ce qui permet de comparer les prix.

De la même façon, en finances, on peut représenter par une matrice un courtier qui gère m portefeuilles contenant n types d'actions: on range dans une matrice de dimension $m \times n$ les nombres de chaque type d'action détenus dans chaque portefeuille. Le vecteur d'entrée étant choisi chaque jour comme la liste des valeurs des gains (éventuellement négatifs) de chaque action, le vecteur de sortie est la liste des gains de chaque portefeuille.

La transmission des ondes et des signaux est également souvent décrite par des matrices. Supposons, pour simplifier, qu'une onde parvenant au transmetteur soit composée de trois fréquences possibles, f_1, f_2 et f_3 . On représente alors cette onde par un vecteur de dimension 3, qui est la liste des poids respectifs des trois fréquences. Par exemple, le vecteur $(1/8, 1/2, 3/8)$

figurera une onde où la fréquence f_1 est présente avec un poids de $1/8$ (ou 12,5%), f_2 avec un poids de $1/2$ et f_3 avec un poids de $3/8$.

L'action du transmetteur serait de modifier la répartition de l'énergie de l'onde sur les trois fréquences, c'est-à-dire de modifier les poids des fréquences. Une telle modification est généralement linéaire et se représente donc par une «matrice de transmission» de dimension 3×3 . L'onde transmise sera par conséquent représentée par le vecteur égal au produit de cette matrice par le vecteur figurant l'onde incidente.

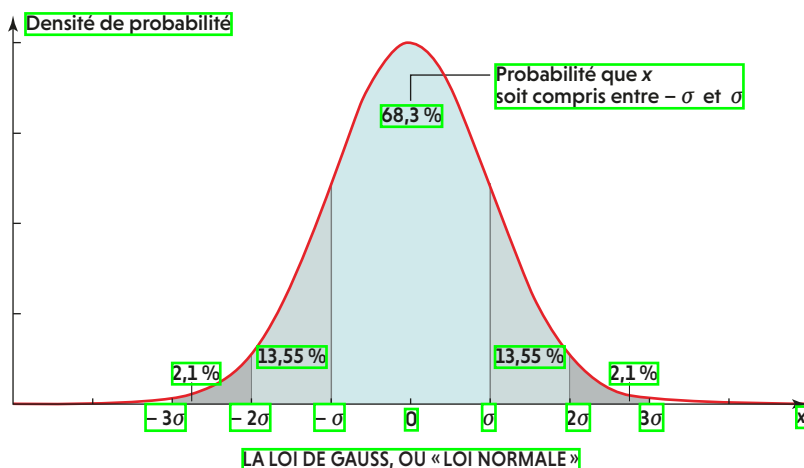
Dernier exemple, mais d'une grande importance: la mécanique quantique, dont la formulation qu'en avait donnée en 1925 le physicien allemand Werner Heisenberg a pour nom la «mécanique des matrices». Considérons un objet physique soumis à des interactions et pouvant occuper différents états de base (qui peuvent être des positions dans l'espace pour une particule, des orbites autour d'un noyau atomique pour un électron, des fréquences pour une onde lumineuse, etc.). Son état quantique se décrit par une «somme» des différentes possibilités, une superposition des états de base, chacun d'eux étant affecté d'un coefficient lié à la probabilité d'observer l'objet dans l'état de base en question lors d'une mesure.

Autrement dit, à chaque instant, l'état quantique de l'objet est une liste de nombres (en général, il s'agit de nombres complexes): les coefficients associés à la probabilité d'occuper l'état de base 1, l'état de base 2, l'état de base 3, etc. L'état quantique est donc représenté par un vecteur dont la dimension est le nombre d'états de base possibles (ce nombre est souvent très grand, voire infini).

Cet état quantique évolue au cours du temps sous l'effet des interactions. D'après les lois de la physique quantique, cette évolution temporelle est régie par un opérateur linéaire nommé hamiltonien; la matrice qui le représente caractérise l'ensemble des interactions agissant sur l'objet, et transforme à chaque instant l'état du système en un autre.

L'opérateur hamiltonien est par ailleurs lié à une grandeur cruciale: l'énergie du système. Plus précisément, les valeurs possibles de cette énergie – les niveaux d'énergie du système – sont données par le «spectre» du hamiltonien. De quoi s'agit-il? Ce n'est ni un fantôme ni une organisation secrète que combat James Bond. Le spectre d'une matrice est un ensemble de nombres nommés *valeurs propres* et qui lui sont caractéristiques.

Ces notions étant fondamentales pour la suite de notre propos, détaillons-les un peu. Donnons-nous une matrice carrée M , qui représente des transformations linéaires entre vecteurs de même dimension. Pour un vecteur d'entrée e arbitraire, le vecteur de sortie $s = Me$ est généralement très différent de e . Mais pour



Cette loi de probabilité, proportionnelle à $\exp(-x^2/2\sigma)$ où x est l'écart à la moyenne et σ est l'écart-type, décrit une multitude de phénomènes de nature aléatoire. C'est elle que, dans les années 1950, Eugene Wigner a choisie pour définir les matrices aléatoires et les étudier: les nombres qui les composent sont tirés au hasard selon la loi de Gauss centrée sur 0.



certains vecteurs d'entrée particuliers, qu'on nomme alors *vecteurs propres*, la sortie est proportionnelle à l'entrée. En d'autres termes, pour certains vecteurs v , on a $Mv = \lambda v$, où λ (lambda) est un simple nombre. Ce facteur λ de proportionnalité est alors qualifié de *valeur propre* de la matrice, et v est un vecteur propre associé. Pour le vecteur propre v (et tous ceux qui lui sont proportionnels), tout se passe comme si l'on pouvait remplacer la matrice par la multiplication par le nombre λ (voir l'encadré page 41). C'est en ce sens qu'une valeur propre est caractéristique de la matrice.

On démontre qu'une matrice carrée M de dimension $n \times n$ possède n valeurs propres (parfois non distinctes, auquel cas les valeurs propres identiques sont associées à des vecteurs propres différents), et le spectre de M est l'ensemble de ces n valeurs propres. On démontre aussi que les valeurs propres sont des nombres réels si la matrice est symétrique (et composée de nombres réels) ou si elle est hermitienne (voir l'encadré page 36). Sinon, ce sont souvent des nombres complexes.

Les spectres des opérateurs linéaires, et en particulier du hamiltonien associé à un système, jouent un rôle très important en physique (voir l'encadré page 42). Il est donc utile de les déterminer, et il existe des algorithmes ou des logiciels pour calculer numériquement le spectre de n'importe quelle matrice donnée. Cependant, la question qui nous intéresse dans le cadre des matrices aléatoires n'est pas le

calcul du spectre, mais la suivante: à quoi ressemble, en moyenne, le spectre d'une matrice?

C'est là qu'entrent en scène les travaux de Wigner du début des années 1950. À cette époque où il y avait une course à l'énergie nucléaire, on s'intéressait beaucoup aux niveaux d'énergie des noyaux atomiques, c'est-à-dire aux spectres de leurs hamiltoniens.

Les noyaux les plus légers, comme celui du deutérium, composé d'un proton et d'un neutron, ont un hamiltonien simple, et les physiciens savaient calculer leur spectre, au moins de façon approximative.

DES NOYAUX LOURDS AUX MATRICES ALÉATOIRES

En revanche, les noyaux lourds, comme celui de l'uranium 238, composé de 238 protons et neutrons, ont un hamiltonien d'une trop grande complexité pour que l'on puisse calculer leur spectre. Cependant, ces spectres peuvent être déterminés expérimentalement en envoyant sur les noyaux des faisceaux de neutrons, et en mesurant à quelles énergies ces faisceaux sont fortement déviés. Ainsi, les expériences des années 1950 ont exploré de vastes gammes d'énergie et permis de trouver des centaines de pics de diffusion des neutrons, correspondant aux niveaux d'énergie excités des noyaux.

Pour chaque noyau, les positions de ces pics dessinaient un ensemble très complexe. Renonçant à comprendre les valeurs exactes des niveaux d'énergie, Wigner s'est intéressé à

Une étude sur la distribution statistique des temps d'attente entre deux métros successifs à New York a été publiée en 2017 par Aukosh Jagannath (université de Toronto) et Thomas Trogdon (université de Californie à Irvine). Elle montre que les statistiques des matrices aléatoires décrivent en partie cette distribution.

MATRICES ET APPLICATIONS LINÉAIRES

Généralement, une matrice représente une application linéaire agissant sur des vecteurs. Une application linéaire f est une fonction qui vérifie $f(a v_1 + b v_2) = a f(v_1) + b f(v_2)$ quels que soient les nombres a et b et les vecteurs v_1 et v_2 . Si les vecteurs v considérés sont de dimension n et si les $f(v)$ sont des vecteurs de dimension m , l'application linéaire f peut être représentée par une matrice de dimension $m \times n$. Une matrice carrée, de dimension $n \times n$, représente souvent une application linéaire qui transforme des vecteurs d'un certain espace en d'autres vecteurs du même espace.

Par exemple, la matrice de dimension 2×4 :

$$M = \begin{pmatrix} -2 & 0 & -1 & -1 \\ 2 & 2 & 4 & 1 \end{pmatrix}$$

représente une application linéaire qui transforme des vecteurs de dimension 4 en vecteurs de dimension 2. Ainsi, le vecteur

$$e = \begin{pmatrix} 4 \\ 5 \\ 1 \\ 15 \end{pmatrix}$$

est transformé en

$$s = Me = \begin{pmatrix} -2 & 0 & -1 & -1 \\ 2 & 2 & 4 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 4 \\ 5 \\ 1 \\ 15 \end{pmatrix}$$

Cette opération s'effectue en « multipliant » la première (respectivement deuxième) ligne de M par la colonne de e pour obtenir la première (respectivement deuxième) composante de s .

Plus précisément, la première composante de s est égale à :

$$(-2) \times 4 + 0 \times 5 + (-1) \times 1 + (-1) \times 15 = -24,$$

tandis que la deuxième composante de s est égale à :

$$2 \times 4 + 2 \times 5 + 4 \times 1 + 1 \times 15 = 37.$$

On a donc :

$$\begin{pmatrix} -2 & 0 & -1 & -1 \\ 2 & 2 & 4 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 4 \\ 5 \\ 1 \\ 15 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -24 \\ 37 \end{pmatrix}.$$

leur répartition statistique. En traçant l'histogramme des écarts entre pics successifs, il a découvert une propriété remarquable : cet histogramme était à peu près le même pour différents noyaux (uranium 238, thorium 232, cadmium 110, erbium 166...) et s'ajustait à une courbe, qui sera nommée plus tard GOE. Pour certains noyaux, l'histogramme correspondait à une courbe différente (nommée GUE), et pour d'autres, dotés de propriétés magnétiques, l'histogramme tendait vers une troisième courbe (nommée GSE).

Wigner eut une idée : puisque le hamiltonien d'un noyau lourd est une grande matrice très compliquée, peut-être son spectre est-il assez proche de celui d'une matrice de très grande dimension et dont les éléments sont tirés au hasard ? Il entreprit donc de calculer de façon théorique le spectre moyen et les écarts entre valeurs propres d'une telle matrice aléatoire.

Au préalable, il fallait préciser ce que signifie choisir au hasard les nombres qui composent la matrice. En effet, il existe de nombreuses sortes de hasard ou façons de faire des choix aléatoires. Wigner a considéré le type de hasard suivant :

chaque nombre du triangle supérieur de la matrice est choisi au hasard indépendamment des autres nombres, mais tous selon la même loi de probabilité, la loi de Gauss, ou « loi normale » (voir la figure page 37). Quant aux nombres qui remplissent le triangle inférieur de la matrice, ils sont déterminés par ceux du triangle supérieur, afin que la matrice soit symétrique.

Le physicien américain Freeman Dyson (un collègue de Wigner), et deux physiciens du CEA, Madan Lal Mehta et Michel Gaudin, purent alors calculer la courbe de répartition théorique des espacements entre valeurs propres d'une telle matrice aléatoire, dans la limite où la dimension de la matrice est grande et tend vers l'infini. Cette courbe est celle que Freeman Dyson nota GOE (pour *Gaussian Orthogonal Ensemble*) et qui s'accorde très bien avec l'histogramme des écarts d'énergie d'un noyau lourd, mesurés par diffusion de neutrons (voir la figure page 40).

C'est cette remarquable découverte qui donna le coup d'envoi à la théorie des matrices aléatoires. Depuis, des chercheurs ont repris la méthode de Wigner et l'ont étendue à toutes sortes de matrices (symétriques ou non, hermitiennes ou non, ou avec d'autres types de symétries) et de lois de probabilité (autres que la loi de Gauss), en vue d'applications à des problèmes de physique, de mathématiques, d'économie, de télécommunications, de biologie...

Dans tous les cas, il s'agit de choisir une classe de matrices de grande dimension, dont les éléments sont tirés au hasard selon une certaine loi de probabilité, et de déterminer la répartition statistique de leurs valeurs propres. L'un des résultats majeurs auxquels ont abouti ces recherches est ce qu'on appelle l'universalité.

DES LOIS STATISTIQUES QUI NE DÉPENDENT QUE DES SYMÉTRIES

La propriété d'universalité est que la statistique des écarts entre valeurs propres d'une matrice aléatoire de grande dimension ne dépend pas de la loi de probabilité utilisée pour choisir les nombres de la matrice ! Elle dépend seulement des symétries des matrices considérées (par exemple symétriques ou pas, hermitiennes ou pas...).

Démontrer l'universalité, pour une classe donnée de matrices aléatoires, est aujourd'hui l'une des principales activités des mathématiciens probabilistes du domaine. Les preuves ne sont jamais faciles, mais à chaque fois la statistique des écarts entre valeurs propres se révèle universelle. L'idée intuitive est que chaque valeur propre est une fonction très compliquée de tous les nombres qui composent la matrice, et, quand la dimension de la matrice tend vers l'infini, la complexité s'efface et fait apparaître une moyenne, un peu

comme un mélange d'un grand nombre de particules devient homogène si on le secoue bien.

Puisque la statistique est universelle, elle est la même que celle trouvée par Wigner avec la loi de Gauss. Eugene Wigner et Freeman Dyson ont en fait considéré trois cas : les matrices symétriques, les matrices hermitiennes et les matrices quaternioniques, ces dernières ayant des symétries correspondant à celles du magnétisme. Les trois distributions statistiques correspondantes et qui sont universelles sont désormais respectivement appelées les distributions GOE, GUE (pour *Gaussian Unitary Ensemble*) et GSE (pour *Gaussian Symplectic Ensemble*) de Wigner. Depuis, d'autres distributions universelles, correspondant à d'autres symétries, ont été découvertes.

De façon étonnante, les scientifiques ont retrouvé un peu partout ces distributions universelles. Un exemple concerne le temps d'attente, à un arrêt, entre deux bus successifs. En 2000, deux physiciens tchèques, Milan Krbálek et Petr Šeba, ont étudié ce temps d'attente à Cuernavaca, au Mexique. Dans cette localité, il n'y a pas de compagnie de transport : chaque chauffeur est propriétaire de son bus. Grâce à des observateurs auxquels il donne un pourboire, chaque chauffeur peut savoir si le bus qui le précède est passé depuis longtemps ou non ; il peut donc décider d'accélérer ou ralentir, en vue de ramasser le plus de passagers possible. Or Milan Krbálek et Petr Šeba ont montré que l'histogramme des écarts de temps entre deux bus successifs obéit à la distribution d'écarts GUE de Wigner !

En 2007, Petr Šeba a également étudié la statistique de l'espacement entre voitures

Les espacements entre voitures garées obéissent aussi à une distribution de Wigner

stationnées l'une derrière l'autre le long d'un trottoir. Son modèle théorique et les quelques données qu'il a recueillies dans Hradec Králové, la ville de son université, ont montré que ces espacements entre voitures obéissent eux aussi à une distribution de Wigner.

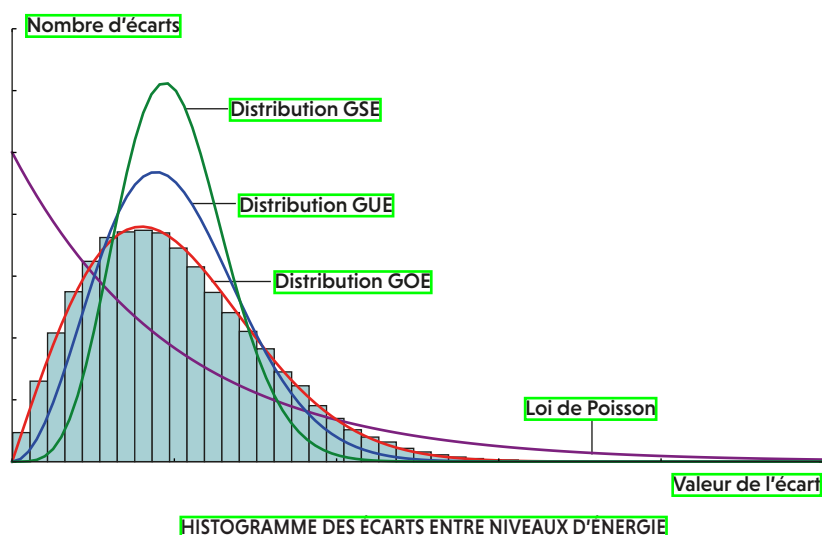
Et ces exemples ne sont pas les seuls. De telles distributions ont été mises en évidence par divers chercheurs dans la statistique des temps d'arrivée des métros à New York, dans celle des distances entre arbres d'une forêt primaire (non plantée par l'homme), dans celle des fluctuations des cours boursiers, dans celle des connexions entre neurones, etc.

Le plus souvent, on est loin de comprendre pourquoi une distribution statistique issue des matrices aléatoires intervient dans le phénomène étudié. Une illustration frappante de cette énigme est en rapport avec les nombres premiers (entiers qui ne sont divisibles que par 1 et par eux-mêmes).

UNE PISTE POUR PROUVER L'HYPOTHÈSE DE RIEMANN ?

En 1891, le mathématicien allemand Bernhard Riemann introduisit une fonction aujourd'hui nommée fonction zêta de Riemann, définie sur le plan, et qui s'annule en un nombre infini de points, les « zéros » de la fonction. La connaissance de la répartition de ces zéros permet d'analyser avec une grande précision comment se distribuent les nombres premiers parmi les entiers. Riemann énonça la célèbre conjecture que tous ces zéros (hormis les zéros « triviaux », les entiers négatifs pairs) sont alignés sur une droite précise, mais il ne put jamais la prouver, ni personne depuis.

En 1972, à l'Institut d'études avancées de Princeton, aux États-Unis, Hugh Montgomery, mathématicien spécialiste des nombres premiers, eut une discussion fortuite avec Freeman Dyson. À cette occasion, les deux chercheurs remarquèrent que l'histogramme des distances entre les zéros non triviaux de la



Pour certains noyaux atomiques lourds, l'histogramme des écarts entre deux niveaux d'énergie successifs ressemble à celui montré ci-dessus. Il est très proche de la distribution GOE de Wigner, courbe qui correspond à l'histogramme des écarts entre valeurs propres d'une matrice aléatoire (de type GOE) dont la dimension tend vers l'infini. Les distributions GUE et GSE de Wigner (également liées aux matrices aléatoires), ainsi que la loi de Poisson (une distribution statistique répandue), sont montrées à titre de comparaison.

SPECTRE, VALEURS PROPRES ET VECTEURS PROPRES

Une matrice carrée M de dimension $n \times n$ peut être vue comme une application linéaire qui transforme des vecteurs de dimension n en d'autres, de même dimension. Pour certains vecteurs v , la matrice M agit comme une simple multiplication par un nombre λ , c'est-à-dire $Mv = \lambda v$. On dit alors que v est un vecteur propre de M , et λ est la valeur propre associée. On démontre qu'une matrice $n \times n$ possède n vecteurs propres distincts (définis à un facteur de proportionnalité près), auxquels sont associées n valeurs propres (pas forcément toutes distinctes). L'ensemble des valeurs propres de M constitue le « spectre » de cette matrice. À titre d'exemple, considérons la matrice 3×3 suivante :

$$M = \begin{pmatrix} 7 & -1 & -5 \\ 6 & 2 & -7 \\ 2 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$

Si l'on considère un vecteur quelconque, par exemple

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix}$$

l'application de M conduit à un résultat qui ne ressemble pas du tout au vecteur dont on est parti :

$$\begin{pmatrix} 7 & -1 & -5 \\ 6 & 2 & -7 \\ 2 & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -11 \\ -12 \\ -1 \end{pmatrix}$$

En revanche, on a :

$$\begin{pmatrix} 7 & -1 & -5 \\ 6 & 2 & -7 \\ 2 & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \\ -3 \\ 3 \end{pmatrix} = 3 \times \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

ce qui signifie que le vecteur

$$\begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

(ainsi d'ailleurs que tous ses multiples) est vecteur propre de M avec la valeur propre 3. On peut aussi vérifier que les vecteurs

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \text{ et } \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix}$$

sont des vecteurs propres de M , le premier avec la valeur propre 1, le second avec la valeur propre 5. Le spectre de M est ainsi constitué des valeurs propres 1, 3 et 5, et ce sont les seules valeurs propres, puisque la matrice est de dimension 3×3 .

fonction zêta de Riemann (on en connaît aujourd'hui plusieurs milliers de milliards, calculés par ordinateur, et ils sont tous sur la droite conjecturée) est incroyablement bien décrit par la distribution GUE de Wigner.

À ce jour, cette extraordinaire concordance n'a pas reçu d'explication. L'énigme reste entière, et certains spécialistes considèrent d'ailleurs la piste des matrices aléatoires comme l'une des plus prometteuses pour prouver la conjecture de Riemann. Quel rapport y a-t-il entre la fonction zêta et une matrice ? Et de quelle matrice s'agirait-il ? À cette hypothétique et évasive matrice dont les valeurs propres seraient les zéros de la fonction zêta, les chercheurs ont donné le nom de « Riemannium », par analogie avec les noms des éléments ou noyaux atomiques. Mais à part son nom, on n'en sait pas beaucoup plus aujourd'hui...

L'universalité des propriétés des matrices aléatoires ne porte pas uniquement sur les espacements entre valeurs propres. Pour chaque tirage d'une matrice aléatoire, considérons sa plus grande valeur propre, et traçons l'histogramme des nombres ainsi obtenus. De nouveau, cet histogramme est universel pour les matrices de grande taille : il ne dépend pas de la loi de probabilité choisie pour remplir les matrices (mais il dépend de la classe de symétrie de ces matrices).

Cet histogramme s'ajuste sur une courbe dite de Tracy-Widom, introduite par les mathématiciens américains Craig Tracy et Harold Widom en 1993. Comme les distributions de Wigner sur les espacements des valeurs propres, celle de Tracy-Widom et ses variantes correspondant aux différentes classes de symétrie se retrouvent dans divers phénomènes étudiés en physique, en biologie, en économie... sans que l'on comprenne toujours bien pourquoi.

UNE LOI NON UNIVERSELLE POUR LA DENSITÉ SPECTRALE

Une autre propriété intéressante des matrices aléatoires porte sur la densité de leurs valeurs propres, ou « densité spectrale ». Il s'agit d'une fonction $p(x)$ qui indique la probabilité que x soit une valeur propre. Plus précisément, la probabilité qu'il y ait une valeur propre dans l'intervalle $[x, x + \Delta x]$, où Δx est très petit, est donnée par le produit $p(x) \Delta x$. Pour calculer en pratique cette densité $p(x)$, on peut procéder de la façon suivante. On prend un nombre x et un tout petit Δx , disons 0,01 ; on tire aléatoirement de nombreuses matrices, et pour chacune on compte combien de fois une valeur propre apparaît dans l'intervalle $[x, x + 0,01]$; on divise ce nombre d'occurrences par le nombre total de matrices tirées, et par la taille de l'intervalle, ici 0,01 ; le résultat est $p(x)$. On peut le voir comme la hauteur de la barre d'histogramme correspondant à x .

Si la loi de probabilité avec laquelle les matrices sont choisies est la loi de Gauss (centrée sur 0 et convenablement normalisée), Wigner a prouvé que plus la dimension des matrices est grande, plus l'histogramme ressemble à un « demi-cercle » (si l'échelle de l'axe vertical est appropriée) de rayon 2 (voir la figure page 44). Ainsi, la densité spectrale $p(x)$ est maximale en $x=0$, c'est-à-dire que beaucoup de valeurs propres sont proches de 0 ; plus x s'éloigne de 0, plus la densité diminue ; et la probabilité qu'il existe une valeur propre supérieure à 2 ou inférieure à -2 est à peu près nulle pour les matrices de grande taille.

Contrairement aux distributions de Wigner sur les écarts entre valeurs propres, le « demi-cercle de Wigner » n'est pas universel : si l'on choisit une autre loi de probabilité que la loi de Gauss, on obtient une autre forme limite pour la

densité spectrale. Cependant, Wigner, Dyson et d'autres ont progressivement découvert que pour toutes les lois cette forme limite est une courbe définie par des équations algébriques (équations ne faisant intervenir que des polynômes) et qu'il est possible de la prolonger en une surface (c'est l'unique surface qui a la même équation que la courbe, équation où les variables réelles sont remplacées par des variables complexes). Par exemple, pour la loi de Gauss, le demi-cercle se prolonge en une sphère, qui a la même équation. Cette courbe (ainsi que sa surface associée) est appelée la courbe spectrale. Elle n'est pas universelle: chaque loi de probabilité a sa courbe spectrale.

UNIVERSALITÉ POUR LES CORRÉLATIONS

Mais la densité spectrale est une information bien maigre sur la statistique des valeurs propres. Il est intéressant de savoir aussi quelle est la probabilité que deux nombres donnés soient simultanément valeurs propres d'une même matrice, ou trois nombres, ou quatre, etc. Ces probabilités conjointes de plusieurs valeurs sont ce qu'on appelle des corrélations de densité.

Notons $p_2(x, y)$ la densité de probabilité que x et y soient simultanément valeurs propres d'une même matrice, $p_3(x, y, z)$ la densité de probabilité que x, y et z soient des valeurs propres, etc. Si les valeurs propres étaient indépendantes les unes des autres, on aurait simplement:

$$p_2(x, y) = p(x) \times p(y).$$

Mais ce n'est pas le cas. En effet, le fait de savoir qu'il existe une valeur propre positionnée en x affecte la probabilité qu'il y en ait une en y . La différence $C(x, y) = p_2(x, y) - p(x)p(y)$ entre les deux expressions s'appelle la covariance. Elle indique à quel point les valeurs propres sont reliées: plus la covariance est petite, plus elles sont indépendantes; plus elle est grande, plus les valeurs propres sont liées. Or pour bien connaître la statistique des spectres de matrices aléatoires, il faut connaître non seulement la densité spectrale $p(x)$, mais aussi la covariance et toutes les covariances de corrélations, c'est-à-dire les généralisations de la covariance à 3, 4, 5... valeurs propres.

Nous avons vu que, quand la taille de la matrice augmente, la densité spectrale tend vers une limite qui n'est pas universelle. En revanche, le résultat remarquable est que les covariances des corrélations, elles, sont universelles dans un sens que l'on va expliquer et qui fait intervenir la géométrie.

Comme on l'a indiqué, chaque loi de probabilité d'une matrice aléatoire conduit à une courbe spectrale, qui se prolonge en une surface. Depuis les années 2000, mes collègues et moi avons établi que cela fonctionne aussi dans le sens inverse. Autrement dit, on sait partir

LES ONDES AU FILTRE DU SPECTRE

Les valeurs propres et vecteurs propres des matrices jouent un rôle très important en physique ou en ingénierie. La raison est la suivante. Supposons que l'état du système étudié soit décrit par une onde ayant plusieurs composantes, comme c'est le cas en mécanique quantique ou dans le domaine des télécommunications. Cette onde peut être représentée par un vecteur, et son évolution temporelle dépend d'un opérateur qui est représenté par une matrice. Lorsque l'onde n'est pas un vecteur propre de la matrice régissant son évolution, elle ressort à chaque fois différente et se retrouve souvent en opposition de phase avec elle-même; quand l'opération se répète, le signal finit par se brouiller totalement. Au contraire, les ondes qui sont des vecteurs

propres ne se brouillent pas: elles ne font que se renforcer elles-mêmes et finissent par dominer le signal de sortie. Dans les systèmes physiques qui interagissent longtemps (pour un atome, « longtemps » peut signifier moins de un milliardième de seconde), seules les ondes constituant des vecteurs propres sont finalement observables: ce sont les seules qui s'amplifient, alors que les autres se brouillent. C'est pourquoi le spectre est si important en physique.

Prenons l'exemple d'une onde lumineuse incidente sur un atome. L'état de l'onde lumineuse est caractérisé par les fréquences (ou couleurs, de l'infrarouge à l'ultraviolet) qui la composent. Il est donc représenté par un vecteur indiquant la proportion de chacune de ces fréquences ou couleurs. L'interaction avec l'atome agit sur l'onde comme un opérateur linéaire, qui transforme à chaque instant le vecteur. Comme l'interaction dure tout le temps de passage de la lumière, les états qui ne sont pas des vecteurs propres vont se brouiller, contrairement aux vecteurs propres. En fin de compte, seules les couleurs correspondant au spectre de la matrice d'interaction subsisteront. Le sens mathématique du mot spectre rejoint ainsi son sens physique initial (au XVII^e siècle, le terme de spectre utilisé par Newton ou Goethe désignait les « illusions » lumineuses, des phénomènes de décomposition de la lumière incompris à l'époque).

d'une surface et déduire de sa géométrie la densité spectrale correspondante $p(x)$, ainsi que toutes les covariances de corrélations. Par ailleurs, il a été montré que si deux lois de probabilité ont des courbes spectrales (des surfaces) qui peuvent se déformer l'une en l'autre par des changements de coordonnées vérifiant certaines conditions (il s'agit de « transformations conformes »), alors les covariances associées à l'une se déduisent des covariances de l'autre par un simple changement de coordonnées: les covariances sont les mêmes à cette transformation près, et c'est en ce sens que les covariances des corrélations sont universelles.

DES LIENS AVEC LA GÉOMÉTRIE, LA THÉORIE DES CORDES...

Les liens ainsi mis au jour entre matrices aléatoires et surfaces ont mené à de nombreuses découvertes récentes en géométrie et en physique théorique. C'est notamment le cas en théorie des cordes, qui a l'ambition de concilier la physique (quantique) des particules et la



La statistique des positions relatives des arbres dans les forêts non plantées par l'homme est similaire à celle des valeurs propres de matrices aléatoires – une constatation faite vers 1989 par le physicien français Gérard Le Caër.

relativité générale d'Einstein, et qui suppose que les particules ne sont pas ponctuelles, mais de minuscules cordes, dotées d'une longueur.

Dans ce cadre, l'une des principales questions est de calculer la probabilité d'une évolution de ces objets : étant donnée une position de départ d'une corde, quelle est la probabilité de telle ou telle position d'arrivée ? Ces probabilités dépendent de la géométrie de l'espace-temps où se déplacent les cordes. Or la théorie des cordes n'est mathématiquement cohérente que dans un espace-temps à 10 dimensions. Pour concilier cette contrainte théorique avec notre perception d'un espace-temps n'ayant que 4 dimensions, on suppose que les 6 dimensions supplémentaires nous sont invisibles parce qu'elles s'enroulent sur elles-mêmes à

une échelle extrêmement petite, de l'ordre de 10^{-35} mètre.

Mais les calculs sont difficiles et dépendent du choix de la façon dont s'enroulent les 6 dimensions. Il en résulte autant de théories des cordes que de choix possibles pour la géométrie des 6 dimensions invisibles. Y aurait-il un moyen simple de calculer les probabilités d'évolution, pour chaque choix ? Entre 2002 et 2012, plusieurs travaux de recherche, dont ceux de Nicolas Orantin et moi, ont permis de montrer que pour certains choix – ceux pour lesquels les 6 dimensions supplémentaires s'enroulent autour d'une surface –, les probabilités sont les mêmes que celles calculées en théorie des matrices aléatoires, si l'on choisit comme courbe spectrale la surface autour de laquelle s'enroulent les 6 dimensions...

Un dernier exemple de l'intérêt des matrices aléatoires est leur lien avec l'« intégrabilité », propriété physicomathématique que l'on décrit souvent comme le contraire du chaos. Les systèmes physiques intégrables sont réguliers et prédictibles ; de tels systèmes, par exemple un ressort qui oscille, une toupie symétrique, une planète seule en orbite autour d'une étoile, une vague se propageant le long d'un canal (un modèle simple de tsunami), sont nombreux et très étudiés.

Dès que le système se complique (par exemple deux planètes ou plus autour d'une étoile), son comportement peut devenir chaotique et, en pratique, imprévisible. On pourrait penser que les systèmes intégrables sont rares

Pour certains choix en théorie des cordes, on retrouve les lois des matrices aléatoires

> dans la nature, mais c'est plutôt le contraire: ils sont assez fréquents, ou du moins ils décrivent les systèmes réels avec une assez bonne approximation. Intuitivement, cela tient au fait que la partie chaotique des systèmes complexes se moyenne; or ce que l'on observe à notre échelle, c'est la partie qui ne se moyenne pas, justement celle qui est régulière.

Pour en revenir aux matrices aléatoires, une découverte importante, due à Madan Lal Mehta et Michel Gaudin, ainsi qu'à Freeman Dyson et à des chercheurs de l'université de Kyoto, a été que les matrices aléatoires constituent des systèmes intégrables. Qu'est-ce que cela signifie?

UNE QUANTITÉ QUI DÉTERMINE TOUTES LES AUTRES

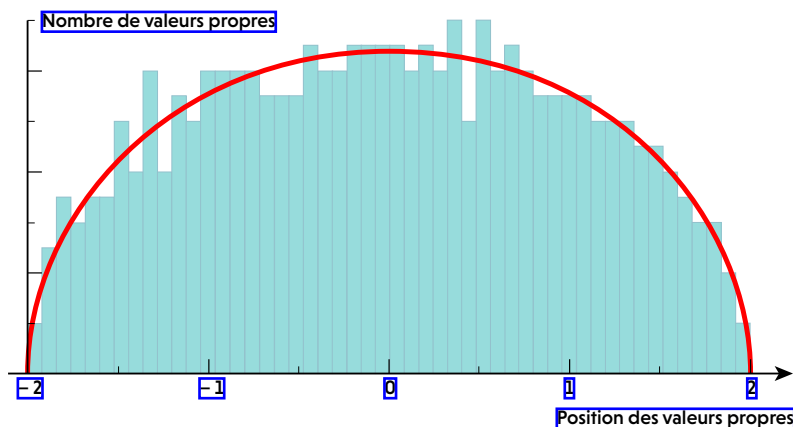
Lorsqu'on se donne une loi de probabilité à laquelle obéit une certaine variable (qui peut être un nombre, un vecteur, une matrice...), on peut calculer des moyennes. Prenons l'exemple d'un nombre x tiré au hasard un grand nombre de fois. On peut calculer la moyenne de x , qui est la somme des valeurs tirées, divisée par le nombre de tirages. On peut, de même, considérer la moyenne de x^2 , de x^3 , de x^4 , etc.

L'exemple le plus simple est la loi de Gauss centrée sur 0 (voir la figure page 37). Comme cette loi est symétrique, la probabilité de tirer x est la même que celle de tirer son opposé $-x$. Il en résulte que la valeur moyenne de x est nulle, de même que la valeur moyenne de toute puissance impaire de x . En revanche, la valeur moyenne de x^2 (ainsi que de toute puissance paire de x) n'est pas nulle, car c'est une somme de nombres positifs.

Pour la loi de Gauss, il existe une remarquable relation entre les valeurs moyennes des puissances paires de x . Si l'on note S la moyenne de x^2 , on calcule que la moyenne de x^4 vaut $3S^2$, que celle de x^6 vaut $15S^3$... et que celle de x^{2k} vaut S^k fois le produit de tous les nombres impairs inférieurs à $2k$. Ainsi, toute cette loi de Gauss est caractérisée par un seul nombre, S , qui détermine toutes les valeurs moyennes possibles par une formule.

Les lois intégrables sont celles qui ont cette propriété: si l'on connaît une moyenne dénommée fonction à deux points (pour la loi de Gauss centrée sur 0, c'est la moyenne de x^2), alors on retrouve toutes les autres moyennes par une formule (plus compliquée que la version simplifiée donnée plus haut), qui est la même pour toutes les lois intégrables. Autrement dit, les lois intégrables sont caractérisées par le fait que toutes les moyennes et toutes les corrélations sont engendrées par une seule donnée, la fonction à deux points.

Or les distributions statistiques des valeurs propres des matrices aléatoires ont cette propriété et sont un exemple de système intégrable. Quelle est ici la fonction à deux points?



LE «DEMI-CERCLE DE WIGNER»

L'histogramme de la densité de valeurs propres d'une matrice aléatoire (ici de dimension 500×500) tend vers une courbe – la «courbe spectrale» – quand la dimension tend vers l'infini. Lorsque les nombres de la matrice sont tirés au hasard selon la loi de Gauss, la courbe spectrale tend vers un demi-cercle (moyennant des facteurs de normalisation appropriés). La courbe spectrale n'est pas universelle: si la loi de probabilité est différente, la courbe spectrale n'est pas la même.

Donnons-nous deux nombres x et y . Pour chaque tirage d'une matrice aléatoire de dimension $n \times n$, considérons son spectre, constitué de n valeurs propres $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$. La fonction à deux points, que l'on notera $K(x, y)$, est la moyenne, sur l'ensemble des tirages, du rapport:

$$[(x-a_1)(x-a_2)\dots(x-a_n)]/[(y-a_1)(y-a_2)\dots(y-a_n)].$$

On montre que cette fonction $K(x, y)$ engendre toutes les corrélations. Par exemple, la covariance $C(x, y)$ est directement reliée à $[K(x, y)K(y, x) - 1]/(x-y)^2$. De même, toutes les autres corrélations s'expriment par des formules simples en fonction de $K(x, y)$.

Dans l'étude des systèmes intégrables, une stratégie très efficace pour les chercheurs est de tester leurs idées sur les matrices aléatoires, en espérant (et cela marche très souvent) que des relations qui sont vraies pour les matrices aléatoires le sont aussi pour tous les systèmes intégrables. De nombreuses propriétés de ces derniers ont été découvertes ainsi.

En somme, les matrices aléatoires se sont révélées des objets d'étude fascinants. Leurs propriétés caractéristiques se manifestent dans une grande diversité de phénomènes sans liens connus ou directs avec les matrices. En mathématiques et en physique théorique, les recherches à leur sujet ont eu des impacts inattendus et considérables. La richesse de ce domaine a attiré et continue d'attirer de nombreux et brillants chercheurs, dont des lauréats de la médaille Fields comme l'Australien Terence Tao, le Franco-Russe Maxim Kontsevitch ou l'Américain Edward Witten. Il faut dire que le sujet est loin d'être épuisé, ne serait-ce que parce qu'il reste à comprendre l'ubiquité des matrices aléatoires et à répondre aux multiples questions que leur étude a soulevées, dont celle du lien avec l'hypothèse de Riemann n'est pas la moindre. ■

BIBLIOGRAPHIE

B. Eynard et al., Lecture on random matrices, 2015 (<https://arxiv.org/abs/1510.04430>).

G. W. Anderson et al., An Introduction to Random Matrices, Cambridge University Press, 2009.

B. Eynard et N. Orantin, Algebraic methods in random matrices and enumerative geometry, 2008 (<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00340602/>).

M. L. Mehta, Random Matrices, Elsevier/Academic Press, 2004.

B. Hayes, Le spectre du Riemannium, Pour la Science, n° 312, octobre 2003.

H. Kunz, Matrices aléatoires en physique, Presses polytechniques et universitaires romandes, 1998.

Atos - Joseph Fourier Prize 2018

The international prize rewarding
scientific excellence in
High Performance Computing,
Artificial Intelligence and
Quantum Computing.

Register for the competition
in France
from March 21st to June 8th 2018

Go to:
atos.net/atos-joseph-fourier-prize

Chercheurs, déposez votre dossier pour le Prix Joseph Fourier 2018 avec ATOS et GENCI, pour accélérer la recherche et l'innovation dans la simulation numérique, l'intelligence artificielle et le calcul quantique.

A l'occasion du 250^{ème} anniversaire de la naissance du célèbre mathématicien et physicien français dont les travaux ont largement contribué à la modélisation mathématique des phénomènes physiques, aujourd'hui au coeur des technologies du numérique, participez au Prix Atos Joseph Fourier 2018 !

Récompensant une personne ou une équipe pour l'excellence de travaux réalisés au sein d'un laboratoire français, public ou privé, le Prix Atos - Joseph Fourier 2018 vise à accélérer la recherche et l'innovation dans trois domaines clés pour la société :

- la simulation numérique
- l'intelligence artificielle
- le calcul quantique

Le Prix Atos - Joseph Fourier 2018 dotera chaque domaine d'un lot de 10 000 euros et distinguera les participants en leur accordant jusqu'à 200 000 heures de temps machine sur des supercalculateurs de GENCI.

Les dossiers seront évalués par un Jury de personnalités indépendantes, représentantes du monde scientifique et industriel français, qui désignera les lauréats du Prix Atos - Joseph Fourier 2018. **Les dossiers devront être déposés avant le 8 juin 2018. La remise des prix se tiendra en juillet 2018.**



L'ESSENTIEL

> Le succès d'une grossesse dépend du développement et du fonctionnement du placenta, un organe atypique qui à la fois sépare et connecte la mère et le fœtus.

> Le placenta est le premier organe que l'embryon produit. Curieusement, le système immunitaire de la mère

ne perçoit ni l'un ni l'autre comme étrangers. Certaines cellules maternelles aideraient même le placenta à se former et à se fixer à l'utérus.

> On s'aperçoit aussi que les dysfonctionnements de l'interface fœtomaternelle causent non seulement des complications durant

la grossesse, mais des troubles plus tard dans la vie.

> Les chercheurs commencent à comprendre certains mécanismes en jeu. Ils essaient aussi d'expliquer comment certains virus, comme Zika, franchissent le placenta.

Le placenta, cet inconnu

Le placenta, l'organe le plus mystérieux de l'anatomie humaine, est bien plus qu'une simple centrale d'approvisionnement du fœtus. À la fois lien avec la mère et barrière, il conditionnerait la vie entière de l'enfant.

Pendant des dizaines d'années, les responsables de la santé publique ont cru que le virus Zika ne causait que des maladies bénignes. Toutefois, depuis l'épidémie survenue en 2015 au Brésil, il ne fait aucun doute que le virus se transmet d'une femme enceinte à son fœtus, avec de lourdes conséquences. Dans certains cas, l'enfant meurt avant la naissance; dans d'autres, il naît avec de graves séquelles cérébrales, notamment une tête anormalement petite (microcéphalie). Mais comment le virus peut-il atteindre le fœtus? Cela reste mal compris, car, pour ce faire, il doit traverser le placenta, un organe qui relie l'enfant à sa mère et qui empêche la transmission d'autres virus similaires portés par les moustiques, comme ceux responsables de la dengue ou de la fièvre jaune.

Ces dernières années, cette énigme et d'autres ont donné un nouvel élan à la recherche sur le placenta, le premier et le plus gros organe à se développer chez l'embryon. C'est d'ailleurs un produit de ce dernier, et non de la mère;

entre autres fonctions, il fournit au fœtus les nutriments et l'oxygène nécessaires et le débarrasse de ses déchets. Pourtant, malgré son rôle majeur au cours de la grossesse, c'est probablement l'un des organes les moins connus du corps humain.

La vulnérabilité du placenta face à Zika n'est pas la seule énigme. Depuis longtemps, les chercheurs se demandent pourquoi le système immunitaire de la mère n'identifie pas le fœtus et le placenta comme des corps étrangers à éliminer. En effet, non seulement il n'agit pas contre le placenta, mais il contribue à son développement et à son fonctionnement.

Les recherches menées dans certains laboratoires, dont le nôtre, commencent à apporter des réponses intéressantes à ces questions. À travers ces découvertes, nous nous rendons compte que certaines complications survenant lors de la grossesse – que l'on pensait dues à des dysfonctionnements d'origine maternelle – sont en fait imputables à des défauts du placenta ou de son interaction avec l'utérus. Il arrive même que certaines variations subtiles

LES AUTEURS



ADRIAN ERLEBACHER
professeur au département
de biologie médicale
de l'université de Californie
à San Francisco



SUSAN J. FISHER
professeure au département
d'obstétrique, de gynécologie
et des sciences de la reproduction
de l'université de Californie
à San Francisco



Ici, le placenta (à gauche) est toujours relié au nouveau-né. En général, la mère l'expulse peu après la naissance et la section du cordon ombilical.

▢ dans le placenta affectent la santé d'une personne plus tard dans sa vie.

Même si le placenta suscite de nombreuses interrogations, deux aspects de cet organe sont bien connus: sa structure et les étapes de son développement. À l'accouchement, le placenta pèse un peu plus de 500 grammes et présente deux faces distinctes: la partie attachée à la paroi utérine de la mère avant l'accouchement, qui ressemble à une éponge gorgée de sang, et celle en regard du bébé, qui comporte un réseau de vaisseaux sanguins convergeant vers le cordon ombilical (voir la photo ci-contre).

UNE INVASION RAPIDE

Le placenta se développe vite, ce qui lui permet de remplir les fonctions d'autres organes en développement jusqu'à ce que ceux-ci soient pleinement fonctionnels: comme le foie, il métabolise les nutriments; comme les poumons, il échange l'oxygène contre le dioxyde de carbone; et, comme les reins, il traite et rejette les déchets.

Moins d'une semaine après la fécondation, des cellules spécialisées, nommées trophoblastes, émergent à la surface de l'embryon. La première mission de ces cellules (lesquelles produisent aussi des hormones qui préviennent le corps de la mère de la présence de l'embryon) est d'entrer en contact avec la paroi utérine et de s'y implanter. Les trophoblastes se divisent alors rapidement et forment des extensions qui s'insinuent dans la paroi. Ils s'organisent en deux couches: l'une, composée de cellules nommées cytotrophoblastes, fait face à l'embryon. L'autre, constituée de cellules qui fusionnent entre elles (des syncytiotrophoblastes), recouvre la première et devient la surface du placenta. Finalement, le placenta prend la forme d'un disque attaché à la paroi utérine par une structure ramifiée.

Durant les deuxième et troisième semaines suivant la fécondation, ces ramifications commencent à se remplir de cellules de soutien et de vaisseaux sanguins. Ces structures deviennent matures à peu près au moment où la femme découvre qu'elle est enceinte. On les nomme alors villosités chorales.

Dans la course qu'entreprend le placenta pour devenir fonctionnel très tôt pendant la grossesse, sa capacité à détourner le flux sanguin maternel est primordiale. Cet exploit est rendu possible grâce au parcours extraordinaire des cytotrophoblastes. Dans un premier temps, ces cellules s'attachent à la paroi utérine, puis elles y migrent en profondeur. Il y a presque vingt ans, l'une de nous (Susan Fisher) a découvert que les cytotrophoblastes se transforment pendant ce processus, de telle façon qu'ils imitent les cellules tapissant les vaisseaux sanguins. Ce mimétisme leur permet de s'introduire dans les artères chargées d'oxygène de la mère (voir l'encadré pages 50-51).

Une fois à l'intérieur, elles remontent le revêtement interne de chaque conduit, le remplaçant au fur et à mesure.

Du fait de cette invasion, les artères de l'utérus s'élargissent et perdent le tonus qui, habituellement, limite la quantité de sang transporté. À la fin du premier trimestre, les artères s'ouvrent sur les espaces entre les villosités chorales, libérant les grandes quantités de sang maternel (ainsi que les nutriments et l'oxygène qu'il contient) nécessaires à la croissance de l'enfant. Les cytotrophoblastes envahissent aussi les veines utérines, permettant au sang fœtal de revenir du placenta vers le corps de la mère, ce qui complète le circuit tout en évacuant le dioxyde de carbone et les autres déchets hors du fœtus.

Le sang des artères de la mère baigne la surface du placenta à seulement quelques couches cellulaires du propre sang de l'enfant. Cette proximité maximise les échanges de nutriments, de gaz et de déchets. Ces dernières années, des chercheurs ont aussi établi que le placenta libère de grandes quantités d'ADN fœtal dans le sang de la mère, ce qui rend possibles les tests génétiques prénataux à partir d'une simple prise de sang de la mère. De tels tests remplacent peu à peu les procédures anciennes plus invasives telles que le prélèvement des villosités chorales ou l'amniocentèse (prélèvement de liquide amniotique).

Si les gènes du fœtus orchestrent une majeure partie du développement du placenta, le microenvironnement qui entoure l'organe joue aussi un rôle vital. Ces vingt dernières années, les recherches ont révélé à quel point le succès d'une grossesse dépend des échanges entre les cellules maternelles du tissu utérin et les ramifications du placenta. Les zones où le placenta et l'utérus se rencontrent – l'interface fœtomaternelle – comportent diverses sortes de cellules immunitaires nommées leucocytes (voir l'encadré page 52), qui ont migré depuis le sang de la mère. Les trophoblastes du fœtus assurent le fonctionnement du placenta en maintenant un contact constant avec ces leucocytes et d'autres cellules utérines.

LA FACE CACHÉE DES CELLULES TUEUSES

Le comportement des cellules immunitaires maternelles est surprenant. Le placenta, dont la moitié du matériel génétique provient du père, est un corps étranger pour la mère. Or le système immunitaire ne le reconnaît pas comme un envahisseur et ne le détruit pas, alors qu'il se déclenche contre une greffe d'organe. On sait aujourd'hui que certains changements dans le système immunitaire de la mère aident son corps à tolérer le placenta. Des processus locaux se produisant au sein de l'utérus interviennent aussi. Par exemple, en 2012, l'un de nous (Adrian Erlebacher) a montré que,



Ce côté du placenta, observé avec le cordon ombilical juste après la naissance, faisait face à l'enfant pendant la grossesse. L'autre côté, qui ressemble à une éponge gorgée de sang, était attaché à la paroi utérine de la mère.



de l'interface foetomaternelle. De telles erreurs causent un éventail varié de complications. Les plus importantes sont rassemblées sous le nom de «grands syndromes obstétricaux», notamment les naissances prématurées (l'accouchement se produit avant 37 semaines révolues de grossesse), le retard de croissance intra-utérin (le bébé est plus petit que prévu) et la prééclampsie (la mère développe soudainement une haute pression artérielle qui entraîne des dégâts vasculaires).

QUAND L'INTERFACE DÉFAILLE

De récentes études ont permis d'élucider l'origine de certaines de ces complications. On pensait par exemple que la prééclampsie, qui touche environ 8% des premières grossesses, était une toxémie: une forme d'intoxication du sang de la mère due à des toxines que le placenta aurait libérées dans l'utérus. On pense désormais que cette complication provient d'un déploiement insuffisant des cytotrophoblastes dans les artères utérines pendant la première moitié de la grossesse. Le sang est alors acheminé en trop faible quantité jusqu'au fœtus, ce qui restreint sa croissance. Le placenta – qui s'est alors développé de façon anormale – libère effectivement des substances toxiques pour la mère, en particulier dans son sang, mais ces toxines ne semblent pas être la cause de la maladie, comme on le croyait jusqu'alors; elles en sont plutôt une conséquence. Si elle n'est pas traitée, la prééclampsie entraîne de sérieux dégâts chez la mère et l'enfant, voire leur mort.

On ignore pourquoi le placenta cesse de fonctionner correctement en cas de prééclampsie. Le dysfonctionnement pourrait provenir des cytotrophoblastes ou de certaines cellules maternelles, ou encore d'une combinaison des deux. En effet, contre toute attente, les cellules tueuses naturelles de la mère seraient aussi impliquées. En 2014, dans un article de synthèse sur le rôle de ces cellules durant la grossesse, Ashley Moffett et Francesco Colucci, immunologistes de la reproduction à l'université de

parmi les leucocytes présents, ceux qui habituellement rejettent les organes greffés sont incapables de se rassembler dans la paroi utérine près du placenta.

Toutefois, le corps de la mère fait plus que simplement tolérer le placenta. Il promeut la croissance invasive des tissus fœtaux. Au début des années 1980, par exemple, des chercheurs ont découvert que des leucocytes particuliers, les cellules tueuses naturelles, sont présents en grand nombre du côté utérin de l'interface foetomaternelle. Habituellement, ces cellules spécialisées tuent les tumeurs et les cellules infectées par des virus. Mais dans les années 1990, une équipe menée par Anne Croy, qui travaille désormais à l'université Queen's, au Canada, a fait une découverte contre-intuitive: ces cellules soutiennent aussi le développement du placenta – et en particulier le remodelage des artères utérines par les cytotrophoblastes. Elles produiraient des substances qui favoriseraient la perte des cellules maternelles tapissant les artères et, par conséquent, la colonisation des vaisseaux sanguins par les cellules placentaires.

Vu le rythme effréné du développement placentaire et les nombreux types de cellules formant la paroi utérine, il n'est pas surprenant que des erreurs se produisent durant la formation

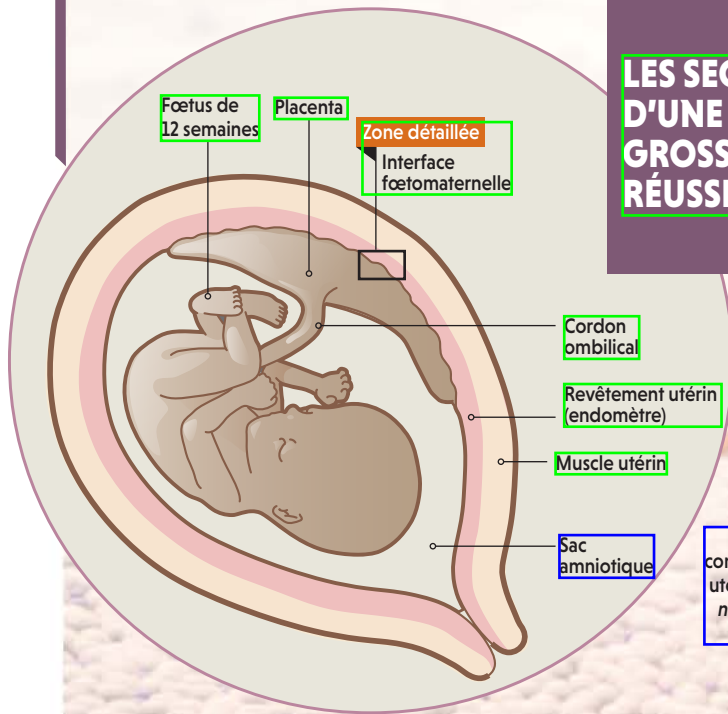


Le microenvironnement qui entoure le placenta joue un rôle vital dans son développement



LES SECRETS D'UNE GROSSESSE RÉUSSIE

Le succès d'une grossesse dépend des activités qui se déroulent à l'interface du corps de la femme enceinte et de son fœtus, où le placenta (issu des cellules embryonnaires) touche la paroi utérine. Pour fonctionner correctement – c'est-à-dire transporter l'oxygène, les nutriments et les fluides du sang maternel vers le fœtus (un embryon devient un fœtus huit semaines après la fécondation) –, cette interface nécessite une certaine coordination du placenta, de l'utérus et, comme le montrent de récentes études, du système immunitaire de la mère. Le sang maternel commence à affluer vers le placenta dix à douze semaines après la fécondation.



Cellules déciduales constituant le revêtement utérin (*toutes les cellules ne sont pas à l'échelle sur ce schéma*)

Artère spiralée

L'INVASION DE L'UTÉRUS

1

Remodelage des artères

Le placenta comporte des structures ramifiées nommées villosités chorales formées de cellules dites trophoblastes. La surface de ces villosités est constituée de trophoblastes ayant fusionné – des syncytiotrophoblastes –, des cellules qui recouvrent une couche de trophoblastes n'ayant pas fusionné – les cytotrophoblastes. Certains cytotrophoblastes traversent la couche de cellules fusionnées et envahissent les artères spiralées de l'utérus, où elles imitent les cellules des vaisseaux sanguins de la mère.

2

Échange d'éléments

Les artères transformées de la mère s'ouvrent sur les espaces situés entre les villosités chorales (dont la plupart flottent et ne sont pas attachées au revêtement utérin par des cytotrophoblastes). Elles baignent ainsi les syncytiotrophoblastes dans du sang maternel, facilitant les échanges d'éléments entre la mère et le fœtus. Les veines utérines transportent le sang désoxygéné hors de ces zones.

Sang maternel oxygéné

Villosités chorales flottantes

Cytotrophoblaste

Syncytiotrophoblaste

Transfert de nutriments et d'oxygène

Sang fœtal

Ancrage de la villosité chorale par le déploiement des cytotrophoblastes

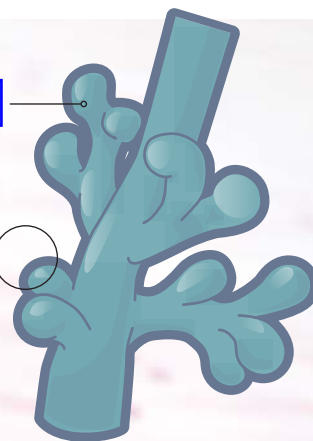
Transfert de déchets, du dioxyde de carbone et d'hormones

DES RAMIFICATIONS UTILES

À l'interface fœtomaternelle, la taille et la complexité des villosités chorales du placenta augmentent à mesure que ce dernier croît et développe des ramifications. Celles-ci se couvrent à leur tour de minuscules ramifications longues d'un dixième de micromètre, ce qui augmente considérablement la surface des villosités. Seule une mince couche de cellules placentaires sépare le sang maternel – libéré dans les espaces entre les villosités chorales – du sang fœtal circulant dans les vaisseaux des villosités chorales. Cette organisation maximise les échanges d'oxygène de nutriments, d'hormones et de déchets. Tant que le placenta n'est pas irrigué, le fœtus reçoit des nutriments sécrétés par les cellules du revêtement utérin.



Villosité chorale



DES ENIGMES

De nombreuses zones d'ombre demeurent sur la façon dont le placenta se développe et fonctionne. Notamment, on ne connaît toujours pas l'élément déclencheur de l'accouchement – un processus pendant lequel les muscles utérins de la mère, restés au repos tout au long de la grossesse, se contractent avec la force nécessaire pour expulser le bébé et le placenta. De plus, après la naissance de l'enfant, comment le placenta, qui était pourtant fermement attaché à l'utérus et à ses vaisseaux sanguins, se détache-t-il soudain ? Une autre énigme est le moyen par lequel le virus Zika et d'autres agents inflammatoires traversent le placenta (qui en temps normal bloque le passage des agents pathogènes et des toxines) pour rejoindre le fœtus, où ils causent de lourds dégâts. Les chercheurs explorent aussi l'idée selon laquelle le placenta et l'utérus disposeraient d'un microbiote – un écosystème miniature de bactéries et de virus, voire de champignons, qui, quand il est perturbé, serait responsable de complications lors de la grossesse.

3 Le système immunitaire en renfort

Le placenta envahit aussi la paroi utérine, où, parmi les cellules déciduales qui la constituent, résident les cellules immunitaires maternelles – en particulier des cellules tueuses naturelles et des macrophages. Ces cellules joueraient un rôle important pour faciliter l'invasion.

Cellules immunitaires de la mère

Veine

Macrophage

Cellule tueuse naturelle

Sang désoxygéné



LE PARADOXE DE LA GROSSESSE

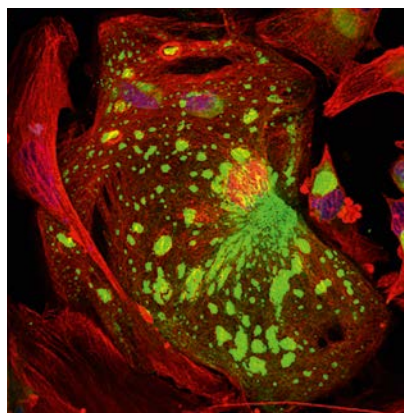
La grossesse est un paradoxe immunologique : dès l'implantation de l'embryon et jusqu'à la naissance, le système immunitaire de la mère accepte cet intrus. Ces dernières années ont révélé qu'une population particulière de cellules immunitaires constitue un acteur majeur de cette tolérance : des cellules tueuses naturelles spécifiques de l'utérus, notées dNK et qui, contrairement aux autres cellules tueuses naturelles (NK) de l'organisme, ne tuent pas de cellules.

Bien avant l'implantation de l'embryon, la paroi utérine se prépare, à travers l'imprégnation hormonale, pour la mise en place de l'interface maternofoetale, qui servira de site d'ancrage du placenta. Dès ce moment, les cellules du système immunitaire inné – des leucocytes incluant macrophages, cellules dendritiques et dNK – infiltrent la future interface. Au premier trimestre, les cellules dNK représentent jusqu'à 70% des leucocytes de l'interface maternofoetale. Le dialogue privilégié entre les cellules du système immunitaire maternel et les trophoblastes issus de l'embryon (des cellules spécialisées du placenta) permet au placenta et au fœtus de se développer en harmonie avec le système immunitaire maternel.

En conditions normales, les cellules dNK ne sont pas tueuses bien qu'elles soient équipées d'une machinerie fonctionnelle pour cela. Au contraire, elles orchestrent les différentes étapes du développement du placenta. Les trophoblastes contribuent également au développement du placenta en apprivoisant le système immunitaire maternel et en limitant l'état d'inflammation. En 2015, en analysant les mécanismes

moléculaires qui différencient les cellules NK bénéfiques de l'utérus de celles, cytotoxiques, de la circulation sanguine maternelle, nous avons montré que les fonctions cytotoxiques des cellules NK sont finement contrôlées par des récepteurs particuliers – des protéines qu'elles portent à leur surface : alors que les cellules NK cytotoxiques expriment surtout des formes activatrices de ces récepteurs, les cellules dNK en expriment principalement des formes inhibitrices. De plus, le microenvironnement de l'interface maternofoetale aide à maintenir l'expression de ces formes inhibitrices et la fonction tolérante des cellules dNK.

Ainsi, en l'absence de pathologie placentaire, la mère et le fœtus vivent en harmonie grâce à des mécanismes spécifiques et transitoires. Mais une multitude d'agents pathogènes sont susceptibles de fragiliser cet équilibre. On connaît encore mal leur mode de transmission de la mère au fœtus et leur action à l'interface maternofoetale, mais des pistes se dessinent, notamment grâce à l'étude de deux virus : le cytomé-



Le virus Zika (en vert) se réplique dans les cellules stromales de l'interface maternofoetale (en rouge, le réseau de microtubules de ces cellules et en bleu, leurs noyaux).

galovirus (CMV), dont l'infection, endémique, concerne des milliers de nouveau-nés chaque année, et le virus Zika, transmis par le moustique et qui a provoqué une crise majeure ces deux dernières années. Tous deux ont la capacité de nuire au développement du placenta et du fœtus. L'infection de la femme enceinte par le CMV ou Zika peut causer des malformations congénitales graves, des pathologies du placenta et toute une série d'autres problèmes de santé pour les nouveau-nés.

Les leçons apprises du CMV suggèrent que plusieurs voies de transmission de la mère au fœtus seraient impliquées selon le terme de la grossesse : notamment, le virus circulant dans le sang maternel atteindrait les villosités flottantes du placenta et y pénétrerait ; des particules virales ayant colonisé des cellules de la mère infecteraient aussi directement les trophoblastes de l'embryon en passant d'une cellule à l'autre (transcytose) ; une infection ascendante – *via* les sécrétions cervicales et non le sang maternel – est aussi possible. Par ailleurs, en 2013, nous avons montré que lorsque l'infection de l'interface maternofoetale a lieu durant le premier trimestre, les cellules dNK deviennent cytotoxiques. Il reste cependant à déterminer le rôle de cette activation dans le développement de l'infection, de même que celui des modifications du microenvironnement de l'interface maternofoetale.

Quant à l'étude de Zika, elle suggère que l'interface maternofoetale sert de plateforme pour la réplication et l'amplification du virus avant sa dissémination dans les cellules du placenta et du fœtus. En 2016, nous avons en effet apporté la preuve que, durant le premier trimestre de la grossesse, le virus Zika est capable de se répliquer et d'endomager à la fois l'interface maternofoetale, le placenta et le cordon ombilical. Ses cibles sont multiples : des cellules du revêtement utérin (cellules stromales, macrophages, cellules de Hofbauer), les trophoblastes de l'interface maternofoetale et même les cellules mésenchymateuses du cordon ombilical.

Il reste encore beaucoup à comprendre sur le fonctionnement de l'interface maternofoetale. Néanmoins, il ne fait plus aucun doute que celle-ci est le siège d'un dialogue programmé, très élaboré, constitué de questions et de réponses moléculaires. Ce dialogue s'instaure entre la mère et le fœtus dès le début de la grossesse, et sa perturbation peut être délétère dès les premiers stades de la vie.

NABILA JABRANE-FERRAT

Directrice de recherche du CNRS au Centre de physiopathologie de Toulouse-Purpan (Inserm, université Paul-Sabatier)

H. El Costa et al., *Scientific Reports*, vol. 6, article 35296, 2016.

J. Siewiera et al., *Nature Communications*, vol. 6, article 10183, 2015.

J. Siewiera et al., *Plos Pathogens*, vol. 9(4) : e1003257, 2013.



naissance. Mais où bat cette horloge? Dans le fœtus, le placenta ou l'utérus? Le développement anormal du placenta tôt durant la grossesse dérèglerait-il cette horloge? Cela reste un des mystères de la biologie humaine.

D'une façon générale, les symptômes des grands syndromes obstétricaux et les mécanismes impliqués se recoupent. Par exemple, le déploiement insuffisant des cytotrophoblastes, associé à la prééclampsie, est aussi une caractéristique du retard de croissance intra-utérin et de certains cas de naissance prématurée. Une meilleure compréhension de la façon dont les dysfonctionnements de l'interface fœtomaternelle produisent ces diverses complications aiderait à gérer ces dernières.

L'OMBRE DURABLE DU PLACENTA

Ces complications ont des conséquences immédiates sur les nouveau-nés, allant de problèmes de santé traitables en unité intensive néonatale à des déficiences neurologiques permanentes. Cependant, leurs effets ne se limitent pas à l'enfance; il arrive qu'ils se manifestent des décennies plus tard sous la forme de maladies chez l'adulte, et il y a des raisons de penser que des dysfonctionnements du placenta soient impliqués dans leur survenue.

L'idée que les conditions de vie dans l'utérus puissent causer des maladies plus tard dans la vie – hypothèse dite de l'origine fœtale – n'est pas nouvelle. L'épidémiologiste britannique David Barker l'a proposée dans les années 1980 pour expliquer le nombre élevé d'individus atteints de maladies cardiovasculaires et de diabète dans les régions pauvres d'Angleterre. Il avait remarqué que les adultes touchés avaient plus souvent été en insuffisance pondérale à la naissance que les personnes saines, signe possible d'une sous-alimentation pendant la grossesse. Certains chercheurs pensent que la malnutrition et un placenta défectueux affecteraient la façon dont les gènes d'un fœtus orchestrent son développement – mais les mécanismes responsables de ce processus sont inconnus.

Par ailleurs, des études épidémiologiques indiquent clairement que les enfants nés d'une mère ayant contracté certaines infections, telle la grippe, durant la grossesse ont un risque plus élevé de présenter des troubles neurodéveloppementaux et psychiatriques comme l'autisme, la bipolarité ou la schizophrénie. Une étude menée en 2016 chez la souris suggère comment la grippe pourrait modifier le développement cérébral de façon si subtile que les conséquences ne se manifesteraient que des décennies plus tard. Des travaux antérieurs avaient montré que des agents imitant les virus, responsables d'inflammations systémiques chez des souris gestantes, causaient des comportements autistes chez leur progéniture. Dans l'étude

Cambridge, suggèrent que si le placenta et la mère sont trop similaires d'un point de vue immunologique, les cellules tueuses naturelles utérines ne seront pas capables de soutenir pleinement le remplacement des cellules maternelles qui tapissent les artères utérines par les cellules placentaires.

Un autre grand syndrome obstétrical – la naissance prématurée – a récemment attiré l'attention, car, selon l'Organisation mondiale de la santé, sa fréquence augmente dans tous les pays disposant de données fiables. Ainsi, on estime que chaque année, 15 millions d'enfants naissent prématurément dans le monde, soit plus de un bébé sur dix. Or s'il arrive qu'une infection intra-utérine entraîne un accouchement précoce, la plupart des naissances prématurées n'ont aucune cause clairement identifiée. En fait, on ne sait toujours pas quel mécanisme déclenche l'accouchement à la fin d'une grossesse. Il est probable qu'une sorte d'horloge compte les 280 jours de gestation humaine. On sait en revanche que, dès que l'alarme se déclenche, une cascade inflammatoire s'active dans l'utérus, laquelle est probablement la cause directe des contractions utérines et de la

Dès cinq semaines après la fécondation, le placenta est une structure ramifiée, mais il reste assez pâle, car il n'est pas encore irrigué par le sang maternel. Cette photo est celle d'un embryon issu d'un avortement; normalement, à ce stade, le placenta entoure encore entièrement l'embryon et son sac amniotique.

> de 2016, Dan Littman, de l'université de New York, Jun Huh, de la faculté de médecine de l'université du Massachusetts, et leurs collègues ont montré que l'agent qui déclenche l'inflammation est une petite protéine messagère du système immunitaire – l'interleukine-17 – produite par les cellules immunitaires de la mère. Grâce à des techniques d'imagerie avancées, ils ont observé que cette protéine était directement responsable d'infimes changements structuraux dans le cerveau des fœtus affectés.

Mais comment l'interleukine-17 maternelle franchit-elle le placenta pour atteindre le cerveau du fœtus alors que de nombreuses autres molécules de taille similaire en sont incapables? Deux hypothèses en particulier sont à l'étude: selon l'une, le placenta transporterait activement cette protéine du sang maternel vers le système circulatoire fœtal, lui donnant ainsi accès au cerveau; selon l'autre, les cellules immunitaires de la mère qui produisent la protéine franchiraient directement le placenta jusqu'au fœtus.

POURQUOI ZIKA INFECTE-T-IL PLUS LES FOETUS BRÉSILIENS?

L'épidémie de Zika illustre les dégâts qu'un virus infectant la mère peut infliger lorsqu'il parvient à franchir le placenta. Toutefois, à l'heure actuelle, l'étude du mode d'action de ce virus soulève plus de questions qu'elle n'apporte de réponses. Ce n'est pas très surprenant: le lien entre l'infection par le virus Zika pendant la grossesse et les troubles observés chez les nouveau-nés n'a été établi que récemment. Même le nombre de malformations congénitales est incertain et semble varier selon les régions. Dans une étude parue en janvier 2017 sur la population américaine, des chercheurs des départements américains de santé publique et du Centre américain de contrôle et de prévention des maladies n'ont détecté de malformations congénitales que chez 6% des fœtus dont la mère avait été infectée par Zika. Mais une étude parue un mois plus tôt sur la population brésilienne a montré que près de la moitié des fœtus infectés présentaient des séquelles. De plus, certains enfants brésiliens ont développé des troubles neurologiques *a posteriori*, alors qu'ils avaient été diagnostiqués comme sains. Ainsi, les conséquences les plus lourdes de l'infection – en particulier la microcéphalie – semblent se manifester davantage au Brésil qu'ailleurs. Certains chercheurs suspectent une substance chimique présente dans l'environnement brésilien d'affaiblir le placenta et de le rendre plus sensible à Zika. Mais une infection simultanée avec un microbe local pourrait aussi être à l'œuvre.

Le mécanisme par lequel le virus Zika rejoint le fœtus reste aussi à préciser. Traversait-il le placenta, infectant chaque cellule sur son passage quel que soit son type? Ou est-il

Des anomalies du placenta seraient impliquées dans des maladies chez l'adulte

véhiculé par un type cellulaire particulier, comme les cellules immunitaires de la mère? On sait que certains agents pathogènes remontent du vagin vers l'utérus, accédant ainsi aux tissus fœtaux. Quelle que soit la façon dont le virus Zika atteint le fœtus, une fois arrivé, il s'y établit solidement. En effet, les pathologistes moléculaires du Centre américain de contrôle et de prévention des maladies ont découvert que Zika est capable de persister plusieurs mois dans le placenta et de se répliquer dans le cerveau d'un enfant même après sa naissance.

Zika n'est pas le seul agent pathogène qui s'attaque au fœtus. Chaque année dans le monde naissent quelque 100 000 bébés atteints de la rubéole congénitale, source de surdité, d'une déformation des yeux, de maladies cardiaques et d'autres troubles importants. Le paludisme, l'herpès et la fièvre Ebola causent aussi des dégâts létaux s'ils sont contractés pendant la grossesse. Les mécanismes par lesquels ils infectent le fœtus restent à déterminer, mais des pistes se dessinent. Certains pathogènes infecteraient plus facilement que d'autres les trophoblastes placentaires, en particulier au début de la grossesse. Les mécanismes immunitaires de l'interface fœtomaternelle sont probablement aussi impliqués, les cellules immunitaires utérines ayant deux fonctions contradictoires. D'un côté, elles protègent le fœtus et le placenta des infections. De l'autre, elles empêchent le système immunitaire maternel d'attaquer le placenta.

Pour combler ces lacunes, l'Institut américain Eunice Kennedy Shriver pour la santé des enfants et le développement humain a lancé, il y a trois ans, le *Human placenta project*. Son objectif est de comprendre cet organe encore mal connu qui «influence sur la santé d'une femme et de son enfant non seulement durant la grossesse, mais tout au long de leur vie». Au regard des impacts du placenta sur la santé, sa compréhension devrait être une priorité de la recherche en santé. ■

BIBLIOGRAPHIE

E. Maltepe et S. J. Fisher, **Placenta : The forgotten organ**, *Annu. Rev. Cell Dev. Biol.*, vol. 31, pp. 523-552, 2015.

A. Moffett et F. Colucci, **Uterine NK cells : Active regulators at the maternal-fetal interface**, *J. Clin. Investig.*, vol. 124(5), pp. 1872-1879, 2014.

A. Erlebacher, **Immunology of the maternal-fetal interface**, *Annu. Rev. Immunol.*, vol. 31, pp. 387-411, 2013.

J. Brosens et al., **The « Great obstetrical syndromes » are associated with disorders of deep placentation**, *American Journal of Obstetrics and Gynecology*, vol. 204(3), pp. 193-201, 2011.

E. D. Carosella et N. Rouas-Freiss, **Comment la mère tolère son fœtus**, *Pour la Science*, n° 410, pp. 46-52, 2011.

À DÉCOUVRIR ÉGALEMENT
le hors-série Pour la Science



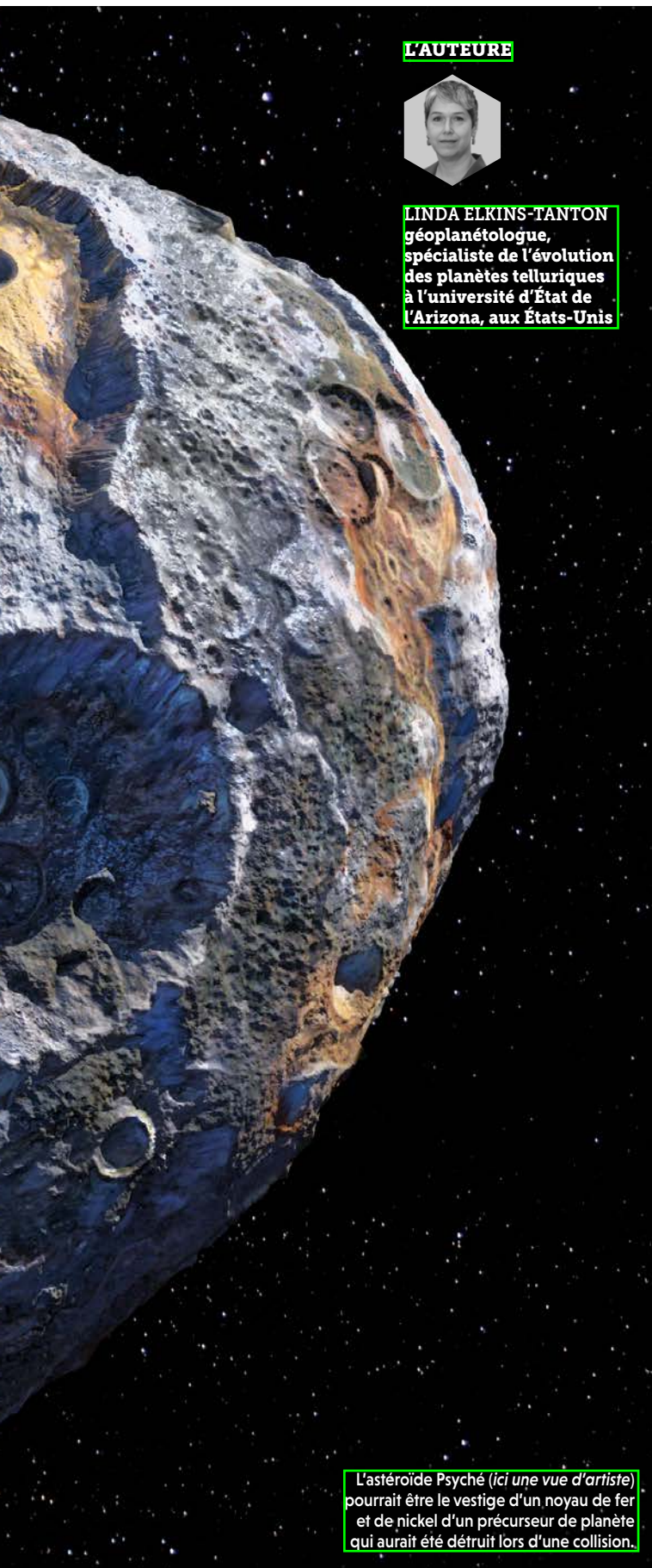
En vente chez
votre marchand de journaux
ou sur boutique.pourlascience.fr

POUR LA  **SCIENCE**  **.fr**



La naissance fulgurante des planètes

Une naissance lente et progressive : tel était le scénario des origines pour les planètes du Système solaire. Mais des études récentes, notamment de la météorite Allende, racontent une autre histoire, bien plus rapide et agitée.



L'AUTEURE



LINDA ELKINS-TANTON
géoplanétologue,
spécialiste de l'évolution
des planètes telluriques
à l'université d'État de
l'Arizona, aux États-Unis

L'astéroïde Psyché (ici une vue d'artiste)
pourrait être le vestige d'un noyau de fer
et de nickel d'un précurseur de planète
qui aurait été détruit lors d'une collision.

L'ESSENTIEL

> Jusqu'il y a tout juste dix ans, les astrophysiciens pensaient que le Système solaire s'était formé suivant un processus de croissance lent et régulier, allant de petites particules de poussière aux grosses planètes.

> Des analyses récentes de météorites, vestiges de la naissance du Système solaire, indiquent au contraire

que sa formation a été le fruit d'un processus chaotique et rapide impliquant de nombreuses collisions.

> Pour vérifier ce scénario, une sonde partira en 2022 vers Psyché, un étrange astéroïde entièrement métallique qui serait le fragment dénudé d'un ancien noyau planétaire.

Alors que je sortais d'une salle de cours au MIT (Institut de technologie du Massachusetts), où je venais de discuter avec les étudiants de la façon dont se forment les planètes, mon collègue Ben Weiss m'a invitée dans son bureau. Spécialiste du magnétisme dans les roches spatiales, il voulait me montrer les nouvelles données concernant l'un de ces cailloux, une météorite du nom d'Allende. Il était très excité, car ces résultats avaient le potentiel de chambouler presque tout ce que les géologues planétaires pensaient savoir des débuts du Système solaire.

Cet épisode remonte à 2009 et, cet automne-là, l'équipe de Ben Weiss a montré qu'Allende (qui s'est écrasée au Mexique en 1969 et qui contient certains des plus vieux matériaux connus du Système solaire) portait dans sa structure des signes de l'existence d'un champ magnétique ancien. Cette découverte était une surprise, car les astrophysiciens pensaient que les champs magnétiques étaient l'apanage des grandes planètes, comme la Terre, où se manifeste un effet de dynamo magnétique. Ce dernier est dû aux mouvements turbulents de convection du métal chaud et liquide à l'intérieur de ces planètes. Or Allende était probablement un fragment d'un planétésimal (un embryon de planète). Et d'après ce que l'on pensait à l'époque, un planétésimal ne pouvait pas atteindre une température suffisante pour que le métal qu'il contenait puisse fondre. Comment était-il alors possible, se demandait Ben Weiss, que cet ancien vestige du Système solaire ait produit une dynamo magnétique?

Mes étudiants venaient de m'assaillir de questions sur l'évolution planétaire m'incitant à revoir certaines vérités enseignées dans les manuels, et il se trouvait que j'avais les grandes lignes d'une idée nouvelle qui pouvait aider Ben Weiss. Je me suis approchée de son tableau blanc, et j'ai commencé à esquisser mon raisonnement.

On sait depuis longtemps que les planétésimaux contenaient des éléments radioactifs, des atomes instables de courte durée de vie, notamment de

► L'aluminium 26. Lorsque celui-ci se désintègre, il libère un peu d'énergie, la même qui a servi de source de chaleur pour les planétésimaux. Or si l'on suppose que la chaleur produite par l'aluminium 26 a suffi pour que le planétésimal fonde naturellement depuis l'intérieur, les conséquences sont nombreuses pour l'évolution du corps.

Le métal liquide contenu dans le planétésimal se serait alors séparé du reste de la roche, aurait migré vers le centre du corps (car le métal est plus dense que la roche) et y aurait formé un noyau liquide. Celui-ci, mû par la rotation du caillou spatial, aurait engendré une dynamo magnétique. Entre-temps, les températures glaciales de l'espace environnant auraient refroidi l'extérieur du planétésimal. Et des roches et des poussières froides issues du disque primitif du Système solaire auraient continué à s'ajouter à cette écorce non fondue.

DAVANTAGE D'ALUMINIUM RADIOACTIF

Ainsi, les premières briques du Système solaire, les planétésimaux, auraient contenu plus d'énergie qu'on ne le supposait dans le scénario classique de formation des planètes. Ce processus était-il à revoir? A-t-il été beaucoup plus rapide qu'on ne le pensait, de sorte que l'aluminium 26 était encore présent en abondance dans les planétésimaux? Dans ce cas, cet isotope radioactif a constitué une source de chaleur importante, bien plus que si ces corps s'étaient formés en un temps plus long.

Les manuels décrivent encore souvent la formation du Système solaire comme un processus calme et ordonné qui a débuté il y a 4,567 milliards d'années. L'histoire commence avec un nuage de gaz et de poussière en rotation qui s'est aplati en un disque autour d'une jeune étoile en phase de croissance. Ce mélange de gaz et de poussière a formé une multitude de petits agglomérats dont la taille a peu à peu augmenté jusqu'à atteindre des dizaines ou des centaines de kilomètres de diamètre. En s'entrechoquant, ces planétésimaux se sont agrégés et ont donné naissance à des corps plus imposants, à peu près de la taille de Mars, nommés embryons planétaires.

C'est seulement à partir de cette étape que la température dans ces planètes en devenir a commencé à augmenter notablement. En grandissant, ces embryons ont acquis une gravité suffisante pour nettoyer leurs orbites des débris environnants (soit en les absorbant, soit en les éjectant) et sont ensuite entrés en collision les uns avec les autres pour donner naissance aux planètes. Finalement, l'intérieur de ces planètes s'est réorganisé en deux parties distinctes: le noyau métallique, liquide et turbulent, et un manteau de silicates fondu, océan de magma qui allait se refroidir progressivement.

Cette mécanique bien huilée correspond à l'ancienne vision des choses. Mais, alors que Ben Weiss et moi commençons à étudier Allende et le rôle de l'aluminium 26, d'autres données indiquaient déjà que le Système solaire primordial avait été, en réalité, le théâtre de changements rapides et violents. De nos jours, cette séquence sage où l'on passe, dans l'ordre, de la poussière aux cailloux, puis aux planétésimaux, aux embryons et, enfin, aux planètes, est en train d'être supplantée par un autre scénario. La période de formation des planétésimaux,

Des planètes se sont formées, déchiquetées et reconstruites en moins de 10 millions d'années

dont on supposait il y a encore peu qu'elle s'étirait sur des centaines de millions d'années, aurait duré seulement 3 millions d'années.

A cette fenêtre de temps très réduite, il fallait ajouter le fait que si les petits composants initiaux renfermaient davantage d'énergie (comme l'énergie apportée par la radioactivité de l'aluminium et les premières collisions entre planétésimaux) qu'on ne le pensait, la différenciation en un noyau et un manteau se serait faite sans attendre. Ainsi, des planétésimaux relativement petits ont pu subir des processus que l'on croyait auparavant réservés aux planètes: fusion et dégazage, apparition d'une dynamo magnétique, volcanisme...

En outre, de nouvelles simulations indiquaient que les corps du Système solaire n'ont pas fait qu'augmenter en taille au cours du temps: souvent, lors des collisions, de gros objets ont éclaté pour en donner d'autres plus petits. En effet, si des masses sphériques de taille planétaire se sont formées au cours de ces premiers temps par accréation de petits corps, par la suite, des collisions entre planétésimaux les ont parfois dénudés ou détruits. Leurs débris ont ensuite heurté d'autres corps sphériques et s'y sont agglomérés pour, finalement, leur conférer une taille de planète. Des planètes ont ainsi pu se former, se déchiqueter et se reconstruire en moins de 10 millions d'années.

Si les planétologues ont réussi à assembler cette nouvelle vision d'un jeune Système solaire

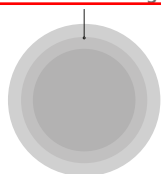
LA CONSTRUCTION DES PLANÈTES DU SYSTÈME SOLAIRE

Les planètes telles que la Terre et ses voisines ont commencé à se former quand le nuage de gaz et de poussière entourant le Soleil a constitué des grumeaux, les planétésimaux. On a longtemps considéré que ces corps étaient des graines de planète en devenir, qui accumulaient progressivement de la matière. Mais les chercheurs pensent aujourd'hui qu'ils s'entrechoquaient avec violence en tous sens et que ces processus énergétiques ont donné rapidement naissance aux planètes.

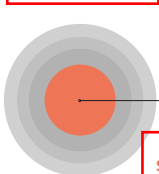
Les grains métalliques d'une couche externe fondue pointent dans la même direction que le champ magnétique et conservent la même orientation une fois que la dynamo s'est arrêtée et que la couche externe s'est refroidie.

À L'INTÉRIEUR D'UN PLANÉTÉSIMAL

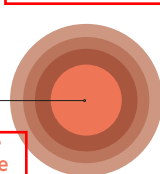
Couches de métal et de roche mélangées



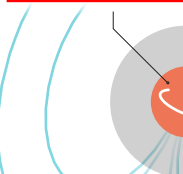
Couches externes non fondues



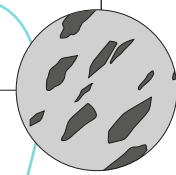
Toutes les couches fondent



Noyau métallique en rotation



Champ magnétique



Partiellement différencié

Roche silicatée autour d'un noyau métallique

Entièrement différencié

PLANÉTÉSIMAL NON DIFFÉRENCIÉ

Un tel corps, d'un diamètre d'une dizaine à quelques centaines de kilomètres et une structure en oignon, contient des éléments radioactifs qui réchauffent son intérieur sans le fondre.

PLANÉTÉSIMAUX DIFFÉRENCIÉS

Si les éléments radioactifs créent davantage de chaleur, le corps fond de l'intérieur vers l'extérieur. Le métal fondu (fer et nickel) coule vers le centre. Parfois, l'écorce externe n'est pas assez chaude pour se différencier. Tous les planétésimaux différenciés ont un noyau de métal liquide.

FORMATION D'UN CHAMP MAGNÉTIQUE

Le métal en mouvement devient une dynamo magnétique, ce qui se produit quand les planétésimaux et leur noyau de métal liquide sont en rotation. Ces noyaux génèrent des champs magnétiques pointant dans des directions particulières, tout comme celui de la Terre.

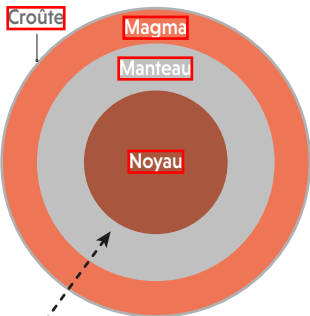
DES PLANÉTÉSIMAUX AUX PLANÈTES

ACCRÉTION

Aux débuts du Système solaire, les particules de poussière s'entrechoquent et s'agglutinent en planétésimaux pouvant atteindre des centaines de kilomètres de diamètre. En à peine 500 000 ans, l'intérieur de certains de ces corps se différencie partiellement ou totalement.

EMBRYONS

Après de nombreuses collisions, certains planétésimaux ont assez grossi (leur diamètre atteint des milliers de kilomètres) pour former ensuite des embryons planétaires, dont la taille avoisine celle de Mars. Leur intérieur est différencié.

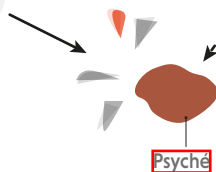
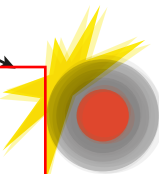


PLANÈTES

Quand les embryons sont assez gros, leur gravité perturbe la matière environnante. Parfois, des débris les heurtent. Les impacts géants créent de vastes océans de magma et libèrent des gaz qui forment une atmosphère primitive. D'autres fois, la gravité dévie les corps voisins vers des orbites lointaines. Ces gros objets dont l'orbite est nettoyée gagnent enfin leur statut de planète.

IMPACTS

Dans cette période initiale de formation du Système solaire, les planétésimaux, nombreux, entrent souvent en collision en formant des corps de taille supérieure, mais certains de ceux-ci se scindent en plus petits débris.



Aujourd'hui, l'astéroïde Psyche est peut-être le vestige d'un noyau métallique de planétésimal, mis à nu par des collisions. Psyche est la cible d'un projet de mission spatiale d'exploration.

très actif, c'est en grande partie grâce à l'aide d'outils permettant de calculer l'âge des météorites ainsi que celui de nuages de poussière planétaires (semblables à celui du Système solaire primordial) ailleurs dans le cosmos.

Au moyen de télescopes toujours plus puissants, on a observé la croissance de jeunes étoiles dans d'autres parties de la Voie lactée; et dans certains cas, on a scruté le disque de gaz et de poussière à partir duquel l'étoile et ses planètes se développent. En estimant l'âge des étoiles autour desquelles gravitent des planètes, et en comparant ces mesures avec celles relatives aux étoiles entourées seulement de disques de poussière et de gaz, les chercheurs ont déterminé que ces disques ne perdurent, en moyenne, que 3 millions d'années.

Par conséquent, les planétésimaux n'ont eu que 3 millions d'années en moyenne pour se développer. La poussière et le gaz qui n'ont pas contribué à la formation de ces corps ont été soit happés par l'étoile soit dispersés dans l'espace interstellaire. Il ne restait alors plus aucun matériau disponible pour la construction planétaire. Les théoriciens pensaient que le processus d'accrétion avait duré des centaines de millions d'années: on peut dire que celui-ci a connu un sérieux coup d'accélérateur!

D'autres voies de recherche ont livré des échelles de temps comparables. Depuis une quinzaine d'années, les scientifiques ont développé des instruments capables d'identifier les éléments contenus dans les roches spatiales et estimer leur concentration avec une précision de quelques parties par million, voire mieux. Comme nous connaissons bien les temps que mettent les éléments radioactifs à se désintégrer, nous pouvons déterminer quand les planètes et les planétésimaux ayant perdu ces fragments se sont formés et ont subi des transformations.

Ainsi, les équipes d'Alex Halliday, aujourd'hui à l'université d'Oxford, de Thorsten Kleine, à l'université de Münster, et bien d'autres ont alors commencé à analyser des échantillons de diverses météorites. Ces chercheurs ont montré que des planétésimaux se sont formés dans les premiers millions d'années ayant suivi le début du refroidissement du disque de poussière, que de nombreuses planètes telluriques seraient nées dans les dix premiers millions d'années, et que même la Terre s'était probablement pour l'essentiel constituée et différenciée en un noyau et un manteau en quelques dizaines de millions d'années.

Cette chronologie a été déterminée en utilisant l'horloge que constitue la désintégration des éléments radioactifs. Dans sa version la plus simple, un élément instable se désintègre en un élément stable suivant une loi bien connue. En comparant les quantités de ces deux éléments présentes aujourd'hui dans un



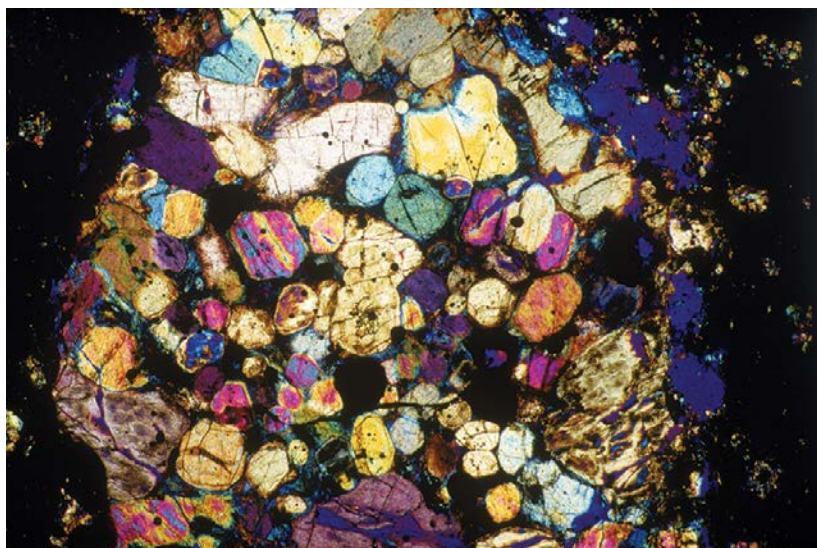
échantillon, on mesure depuis quand ces horloges « tournent ». Les météorites datées de cette façon proviennent de morceaux d'astéroïdes tombés sur Terre, qui sont eux-mêmes des vestiges des planétésimaux primitifs.

Une application bien connue de ces horloges est la datation de la formation du noyau terrestre. L'un des isotopes radioactifs du hafnium a une grande affinité pour les minéraux silicatés et est resté préférentiellement dans le manteau lorsque celui-ci et le noyau se sont différenciés. Mais l'isotope de hafnium se désintègre en un isotope du tungstène qui se combine facilement avec les métaux dont est constitué le noyau planétaire. Cette désintégration se produit à un rythme régulier: la moi-

La météorite Allende est de type chondrite carbonée. Sa matrice gris foncé contient des chondres de couleur claire et des inclusions blanches de calcium-aluminium. Les chondres et les inclusions sont datés d'environ 4,567 milliards d'années. Ils correspondent aux plus vieux matériaux connus du Système solaire et déterminent l'âge de ce dernier.

En grossissant, les petits agrégats de poussière finissent par atteindre la barrière du mètre

tié d'une quantité donnée de hafnium se transforme en tungstène en 9 millions d'années. Ainsi, lors de la différenciation, les métaux ont emporté le tungstène déjà formé par la désintégration d'une partie du hafnium. Après la formation du noyau, les atomes de



Coupe d'un échantillon de la météorite Allende, observée au microscope en lumière polarisée. L'étude du matériau de la météorite a révélé des traces d'un champ magnétique dont était doté le planétésimal parent.

hafnium restant dans le manteau ont continué à se désintégrer en tungstène. En mesurant les concentrations de hafnium et de tungstène restés dans le manteau, on a pu estimer que la formation du noyau terrestre s'est achevée environ 30 millions d'années après la naissance du Système solaire.

De la même façon, des mesures isotopiques réalisées sur des météorites ferreuses ont montré qu'elles provenaient d'objets formés dans les 500 000 ans qui ont suivi les premières condensations de gaz et de poussière du disque protoplanétaire. Si les météorites ferreuses sont des fragments du noyau de planétésimaux qui ont volé en éclats à la suite d'impacts, cela voudrait dire que les planétésimaux ont effectivement dû se former, fondre et créer des noyaux de fer dans cette minuscule fenêtre temporelle.

FORMATION PLANÉTAIRE ACCÉLÉRÉE

Des données expérimentales montrant clairement que le Système solaire s'est formé beaucoup plus vite qu'on ne le pensait, les spécialistes devaient désormais expliquer comment les planètes ont pu apparaître aussi vite. La balle était de nouveau dans le camp des théoriciens. Par quel mécanisme la poussière et les cailloux, de taille comprise entre quelques micromètres et quelques centimètres, tous en orbite autour du jeune Soleil, ont-ils réussi à s'assembler pour former des objets jusqu'à 10 millions de fois plus gros (des planétésimaux de 100 kilomètres de diamètre) en seulement 500 000 ans?

La réponse est tout sauf évidente. La physique classique indique que de petits agrégats de poussière qui entrent en collision peuvent facilement se lier grâce aux forces électromagnétiques, un peu comme l'électricité statique tend à créer des moutons de poussière

domestique. Par ailleurs, un effet d'amortissement des impacts, l'énergie du choc étant absorbée par compression et perte de porosité, aide les amas à rester collés plutôt qu'à rebondir les uns sur les autres et à se séparer.

Mais, en grossissant, ces corps finissent par atteindre un obstacle: la «barrière du mètre». En effet, à partir d'une certaine taille, ces cailloux deviennent trop gros pour être tenus par les forces électromagnétiques, et ils sont encore trop peu massifs pour être maintenus en un seul bloc par l'attraction gravitationnelle. Les impacts, même à très faible vitesse, entraînent la destruction plutôt que l'accrétion de ces agglomérats. Il semble alors impossible d'obtenir des corps de un mètre de diamètre ou plus. Pourtant, nous savons que cette barrière du mètre a été franchie: la planète sur laquelle nous nous tenons aujourd'hui le prouve. D'autres processus doivent donc être en jeu.

Plusieurs idées ont été proposées pour résoudre cette énigme. La plupart font intervenir des mécanismes qui compriment et concentrent le matériau du disque protoplanétaire. Les pistes font notamment intervenir des effets de turbulence qui projettent les particules les unes sur les autres. Ces forces tourbillonnaires pourraient inclure des phénomènes tels que les ondes de Kelvin-Helmholtz, qui se développent entre le gaz et la couche de poussière du disque. La compression de certaines régions riches en matériau les unes sur les autres pourrait former des objets plus gros.

Anders Johansen, de l'université de Lund, en Suède, a proposé un mécanisme d'instabilité de courant. Indépendamment d'Hal Levison, de l'institut de recherche du Sud-Ouest, à San Antonio, au Texas, il a travaillé, avec Michiel Lambrechts, sur un autre modèle, dit d'«accrétion de galets». Ses calculs indiquent que même les plus petits morceaux de poussière et de gravier se seraient accumulés, par des effets gravitationnels et par friction avec le gaz, sur certaines orbites pour venir s'ajouter à un planétésimal en croissance, et cela suffisamment vite pour que des planétésimaux naissent très tôt dans l'histoire du Système solaire.

Si ces scénarios expliquent comment les planétésimaux se sont formés en un temps relativement court, ils sont insuffisants pour déclencher la différenciation de ces corps en un noyau et un manteau. Si les planétésimaux s'étaient initialement formés à partir de matériaux du disque primordial où métaux et silicates étaient intimement mêlés, alors seules des températures élevées et une fusion interne au moins partielle auraient assuré que le métal coule vers le centre et forme un noyau. Des calculs montraient notamment que la chaleur libérée quand ces objets relativement petits se fracassent les uns sur les autres est insuffisante pour atteindre le point de fusion. Par conséquent, les

LA NAISSANCE ACCÉLÉRÉE DES PLANÈTES

Les scientifiques pensaient que la formation des planètes dans le Système solaire avait été un processus lent et régulier, qui aurait commencé il y a environ 4,5 milliards d'années et se serait étendu sur plus de 500 millions d'années (*chronologie en bleu ci-dessous*). De nouvelles données, fournies par des météorites, par les taux de désintégration radioactive

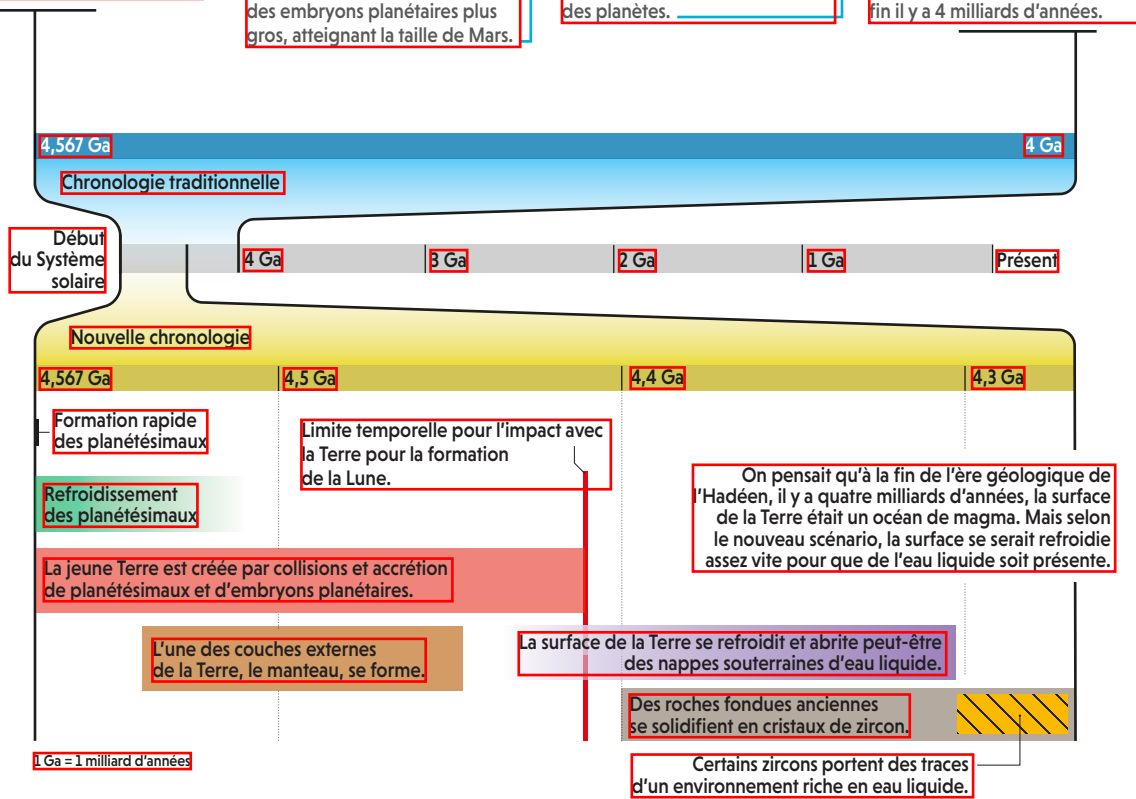
des éléments et par les observations des disques protoplanétaires autour des étoiles lointaines, indiquent que le Système solaire (y compris la Terre dans ses jeunes années) a évolué beaucoup plus vite (*chronologie en jaune*), en moins de 3 millions d'années, dans un tumulte de violentes collisions entre planétésimaux qui ont grandi, se sont détruits et reconstruits.

Il y a 4,567 milliards d'années, un nuage de gaz et de poussière s'est aplati en un disque autour d'une jeune étoile en formation, le futur Soleil. Le gaz et la poussière ont constitué de nombreux petits cailloux.

Chaque caillou a grossi progressivement jusqu'à faire quelques dizaines ou quelques centaines de kilomètres de diamètre, formant des planétésimaux. Ces derniers se sont agglomérés pour donner des embryons planétaires plus gros, atteignant la taille de Mars.

Ces embryons planétaires sont devenus assez massifs pour nettoyer leurs orbites des débris qui les encombraient. Les embryons, qui ont continué à grossir avec la poursuite des collisions, sont devenus des planètes.

La structure interne des planètes (dont la Terre) s'est différenciée en un noyau métallique et un manteau silicaté. Puis les planètes ont commencé à se refroidir. Le processus de formation des planètes a pris fin il y a 4 milliards d'années.



❑ chercheurs étaient bien en peine de dire où les planétésimaux avaient pu trouver l'énergie requise pour la fusion du métal.

C'est à ce stade qu'interviennent les idées sur l'aluminium radioactif. Chaque fois qu'un de ces atomes se désintègre, il produit une minuscule quantité de chaleur. En additionnant ces petites contributions, il serait possible d'obtenir une puissante source d'énergie dans le Système solaire primordial. Comme l'aluminium est l'un des six éléments les plus abondants dans les matériaux rocheux (avec le silicium, le magnésium, le fer, l'oxygène et le calcium), l'aluminium 26, qui a une demi-vie

d'environ 700 000 ans, aurait facilement chauffé au moins certains planétésimaux jusqu'à atteindre des températures de fusion.

Mais qu'est-ce qui les aurait empêchés de fondre complètement sachant que les nouvelles observations indiquent clairement que certains des planétésimaux avaient des écorces extérieures non fondues, comme c'est par exemple le cas du corps dont est issu Allende ? Deux effets s'opposent concernant la chaleur du planétésimal. Plus un planétésimal est massif et grand, plus son intérieur contient d'aluminium 26 et produit de la chaleur. Mais, à l'inverse, plus un planétésimal est gros, plus sa

surface laisse échapper de la chaleur sous forme de rayonnement vers l'espace.

En prenant en compte cette compétition entre production et perte de chaleur, ainsi que la courte demi-vie de l'aluminium 26, nous avons estimé la taille du planétésimal qui a donné naissance à Allende. Pour accumuler assez d'énergie et atteindre la température de fusion, le corps aurait eu au moins 10 kilomètres de rayon (peut-être jusqu'à 200 kilomètres) et se serait formé en seulement 2 millions d'années après la naissance du Système solaire.

Jusqu'alors, la plupart des chercheurs envisageaient que les planétésimaux fondaient intégralement ou restaient entièrement primitifs. Mais Ben Weiss et moi avons suggéré une configuration hybride formée d'un noyau fondu et d'une écorce externe non fondue préservant le matériau le plus primitif du Système solaire. Cette structure était celle qui expliquait le mieux les caractéristiques de la météorite Allende: sa composition de matériau primitif non altéré par un chauffage important et les indices de la présence d'un champ magnétique.

La surface primitive du planétésimal n'a pas fondu car l'espace environnant la refroidissait et parce que la poussière froide du disque protoplanétaire continuait à s'y agglomérer au fil du temps. N'ayant pas été touchée par le

Il semble aujourd'hui que ces planétésimaux hybrides étaient, en réalité, très communs. Les chercheurs ont trouvé pas moins de quatre autres planétésimaux précurseurs de météorites qui auraient abrité un noyau à dynamo magnétique. Par ailleurs, cette idée est confortée par le fait que d'autres sources possibles de magnétisation ont été écartées: Allende et ses homologues n'ont pas été magnétisées par un champ produit dans le Soleil, ni par le disque de poussière lui-même, ni par des panaches transitoires dus à des impacts. Si le Système solaire des tout débuts était vraiment peuplé de centaines ou même de milliers de planétésimaux différenciés, filant à toute allure et en tous sens et générant une chaleur intense et des dynamos magnétiques comme de minuscules Terres, cela implique que tout le Système solaire nouveau-né renfermait beaucoup plus de chaleur que les géologues ne le pensaient.

DES COLLISIONS RÉVISÉES

D'autres idées ont également affaibli la représentation classique d'une croissance linéaire des planètes. Pendant des années, pour des raisons de simplicité et de faisabilité numérique, toutes les simulations de formation des planètes supposaient que dans chaque collision de planétésimaux, tout le matériau des deux protagonistes se combinait pour former un nouvel objet plus gros. Cette fusion totale était la règle même quand les planétésimaux se formaient à partir de la poussière. Mais récemment, Erik Asphaug, de l'université d'État de l'Arizona, a proposé une nouvelle modélisation du processus de collision. Selon ses résultats, certaines collisions seraient constructives et produiraient des objets plus massifs, tandis que d'autres impacts seraient destructeurs: l'impacteur arracherait du matériau à l'objet cible et poursuivrait sa route en provoquant d'autres dégâts plus loin.

Dans ce contexte, c'est seulement lorsque le Système solaire a atteint l'âge d'une dizaine de millions d'années que les choses ont commencé à se stabiliser, des objets étant devenus assez gros pour le rester et survivre. En effet, à mesure que les planétésimaux sont entrés en collision et ont formé des embryons planétaires plus gros, leur masse et donc leur gravité ont augmenté. À partir d'une certaine taille, la gravité était suffisante pour qu'à chaque fois que l'orbite d'un embryon planétaire croisait celle d'un autre objet, ce dernier était soit attiré et accreté en vertu de l'attraction gravitationnelle soit projeté sur une autre orbite.

Ainsi, les planètes en cours de croissance ont commencé à nettoyer leurs orbites, une orbite bien dégagée constituant l'un des critères pour accéder au rang de planète. Dès lors, les corps de petite taille ont eu de moins en moins d'espace où occuper des orbites stables et non perturbées par les planètes de plus en plus imposantes; c'est

Le Système solaire jeune renfermait plus de chaleur que ne le pensaient les géologues

chauffage, l'écorce a conservé une trace du champ magnétique produit par la partie interne de la structure du planétésimal, le noyau de métal fondu et sa dynamo magnétique.

Nous ne sommes pas les premiers à avoir envisagé une différenciation partielle. Le géologue John Wood avait proposé une telle structure dans sa thèse au MIT, en 1958. Mais personne n'avait poussé l'hérésie jusqu'à suggérer qu'Allende, l'archétype des météorites primitives non fondues, aurait pu voir le jour dans une telle structure hybride, ou que celle-ci était fréquente, et même déterminante, aux débuts du Système solaire.

ainsi que la ceinture d'astéroïdes est devenue l'un de ces rares refuges.

Nous avons maintenant une meilleure idée de comment les planètes se sont formées, mais certaines questions restent en suspens. Par exemple, Ben Weiss, Erik Asphaug, moi-même et d'autres voulons comprendre comment, précisément, la structure et la composition de la Terre ont émergé dans cet environnement énergétique et chaotique.

Il nous est impossible (contrairement à ce qui est suggéré dans certains films de science-fiction à succès ou dans le célèbre roman de Jules Verne) d'aller regarder de près ce qui se passe au centre de la Terre. Le noyau est trop profond et les pressions y sont trop élevées pour y prélever le quelconque échantillon. Mais il est possible qu'un certain astéroïde, vestige d'un ancien planétésimal, soit un substitut intéressant. Il y a près de quatre ans, avec plusieurs de mes collègues, nous avons commencé à concevoir une mission spatiale pour explorer cette possibilité.

Nous nous sommes réunis dans une salle du laboratoire JPL de la Nasa, conçue pour favoriser la créativité en mettant à disposition du matériel de dessin et de construction: carton, roues, fil de fer, Legos, papier, marqueurs, mousse... Nous voulions explorer un objet qui aurait le potentiel de confirmer ou d'infirmer nos hypothèses. Et nous avons convenu que la meilleure destination était un monde fait de métal: l'astéroïde métallique Psyché.

MISSION VERS PSYCHÉ, UN MONDE MÉTALLIQUE

Les météorites ferreuses qui arrivent sur Terre sont souvent altérées lors de leur entrée dans l'atmosphère. Il serait donc intéressant d'aller voir un astéroïde intact de près. Psyché est, avec ses 200 kilomètres de diamètre, l'un des plus gros astéroïdes connus. Il occupe une orbite située entre Mars et Jupiter. Toutes les informations dont nous disposons (grâce aux ondes qui se réfléchissent sur l'objet et captées par les radiotélescopes au sol) indiquent qu'il est constitué presque exclusivement de fer et de nickel. Psyché aurait l'aspect d'un noyau planétésimal mis à nu, lors d'une de ces collisions non frontales qui perturbaient les objets aux jeunes temps du Système solaire.

En scrutant de près Psyché, nous pourrions déterminer l'orientation des particules à l'intérieur de l'astéroïde: telles de minuscules aiguilles de boussole, elles nous révéleraient s'il recelait une dynamo magnétique. Il pourrait aussi subsister quelques vestiges de son extérieur rocheux pour nous dire à quoi ressemblait le manteau profond des planétésimaux. S'il y a eu des impacts de surface sur le métal à nu, nous pourrions comparer leurs formes à celles des cratères d'impact des astéroïdes rocheux ou glacés.



Chacune des personnes présentes dans la salle de réunion a apporté son expertise et des compétences bien précises: Ben Weiss pour la mesure des champs magnétiques dans les météorites, William Bottke pour la dynamique des corps en orbite, Erik Asphaug pour les effets des collisions, Bruce Bills pour le calcul du champ gravitationnel des corps célestes, Daniel Wenkert pour la gestion de données et des opérations, Damon Landau pour le calcul des trajectoires. John Brophy organisait nos réunions et j'apportais ma connaissance des compositions, de la fusion, de la solidification et des processus de différenciation. Nous étions unis par notre enthousiasme et notre passion pour l'exploration: l'humanité n'a jamais visité un corps métallique, et nous ne savons même pas à quoi Psyché ressemble exactement.

Plusieurs années ont passé depuis cette réunion, et nos jeux avec de la mousse et des pièces de Lego se sont concrétisés en un projet porté par une équipe d'environ 75 personnes. Le fruit de notre travail est une petite sonde, alimentée par une combinaison de cellules solaires, avec un propulseur ionique. L'engin transportera un magnétomètre pour détecter les champs magnétiques, un spectromètre à rayons gamma pour identifier les éléments composant l'astéroïde et deux caméras.

En janvier 2017, notre projet a été sélectionné par la Nasa pour intégrer le programme Discovery, qui finance de petites missions d'exploration du Système solaire aux objectifs très ciblés (à l'exception du satellite *Kepler* qui a traqué des exoplanètes en orbite autour d'autres étoiles). Le lancement était initialement prévu pour 2023, mais il a été avancé à 2022 afin de profiter d'une assistance gravitationnelle de la planète Mars. La sonde devrait alors se placer autour de l'astéroïde Psyché en 2026, pour 21 mois d'observations scientifiques. Et si tout va bien, nous aurons alors sous nos yeux les images d'un étrange vestige de la construction planétaire, témoin d'une histoire chaotique et bien moins tranquille que prévue. ■

En 2026, une sonde se mettra en orbite autour de l'astéroïde Psyché (vue d'artiste). Ses instruments de mesure analyseront le champ magnétique et la composition de ce corps qui est probablement le vestige métallique d'un noyau de planétésimal. Cette mission spatiale devrait nous renseigner sur la différenciation au sein des planètes et notamment sur le noyau terrestre, qui est inaccessible.

BIBLIOGRAPHIE

L. T. Elkins-Tanton et B. P. Weiss (éd.), **Planetesimals. Early Differentiation and Consequences for Planets**, Cambridge University Press, 2017.

K. Batygin et al., **Le Système solaire, une exception née du chaos**, *Pour la Science*, n° 473, mars 2017.

E. Asphaug, **Astéroïdes et comètes: des tas de cailloux**, *Pour la Science*, n° 273, juillet 2000.

CE MAGAZINE VOUS PLAÎT ?

OFFRE
1 AN

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

3 FORMULES
AU CHOIX

	FORMULE PAPIER	FORMULE PAPIER + HORS-SÉRIE	FORMULE INTÉGRALE
Le magazine papier (12 numéros par an)	✓	✓	✓
Le Hors-Série papier (4 numéros par an)		✓	✓
L'accès en ligne illimité www.pourlascience.fr			✓
L'édition numérique du magazine (12 numéros par an)			✓
L'édition numérique du Hors-Série (4 numéros par an)			✓
L'accès aux archives numériques depuis 1996			✓
VOTRE TARIF D'ABONNEMENT	59 € Au lieu de 82,80 €	79 € Au lieu de 114,40 €	99 € Au lieu de 174,40 €
VOTRE RÉDUCTION	- 29 %	- 31 %	- 43 %

BULLETIN D'ABONNEMENT

A renvoyer accompagné de votre règlement à :

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



**OUI, je m'abonne
pour 1 an à
POUR LA
SCIENCE**

1 / JE CHOISIS MA FORMULE (merci de cocher)

- ☐ **FORMULE INTÉGRALE** **99 €**
Au lieu de 174,40 €
12 n° du magazine papier
4 Hors-Séries papier
Accès illimité aux contenus en ligne
- ☐ **FORMULE PAPIER + HORS-SÉRIE** **79 €**
Au lieu de 114,40 €
12 n° du magazine papier
4 Hors-Séries papier
- ☐ **FORMULE PAPIER** **59 €**
Au lieu de 82,80 €
12 n° du magazine papier

* Par rapport au prix de vente en kiosque, l'accès numérique aux archives. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 31/12/2018 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter boutique.pourlascience.fr. Conformément à la loi « Informatique et libertés » du 6 janvier 1978, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification aux données vous concernant en adressant un courrier à Pour la Science. Photos non contractuelles.

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

PAG18486PC

☐ M. ☐ Mme
Nom : Prénom :
Adresse :
Code postal : Ville :
Téléphone :

Email : (indispensable pour la formule intégrale)@.....
J'accepte de recevoir les informations de Pour la Science et de ses partenaires ☐ OUI ☐ NON

3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science
☐ Carte bancaire
Numéro
Date d'expiration Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB)

Signature obligatoire :

Groupe Pour la Science – Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris Cedex 14 – Sarl au capital de 32 000 € – RCS Paris B 311 797 393 – Siret : 311 797 393 000 23 – APE 5814 Z



PLUS SIMPLE, PLUS RAPIDE
ABONNEZ-VOUS SUR BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR



Comment les serpents ont perdu leurs pattes

© Joe Sartore/Getty Images

L'ESSENTIEL

> La forme fuselée du corps des serpents est une énigme.

> Les traits de certains fossiles suggèrent qu'elle a évolué quand les ancêtres des serpents se sont mis à fouir le sol afin de s'y aménager des terriers.

> La biologie du développement révèle les mécanismes génétiques par lesquels les serpents ont acquis leurs centaines de vertèbres.

> Toutefois, le registre fossile des serpents est si restreint que la discussion se poursuit.

L'AUTEURE



HONGYU YI
paléontologue, professeure associée
à l'Institut de paléontologie des vertébrés
et de paléanthropologie de l'Académie
des sciences de Chine, à Pékin



L'étude de plusieurs fossiles de serpents et du développement embryonnaire des espèces actuelles suggère que les serpents ont acquis leur corps fuselé dans un milieu terrestre.

Une charade chinoise invite à deviner qui court sans jambes, nage sans nageoires et plane sans ailes. La réponse? Le serpent bien sûr! Plus de 3000 espèces actuelles ont en effet en commun d'avoir un corps sans membres capable de se mouvoir au sol, dans l'eau et en l'air d'un arbre à l'autre. Leurs plus anciens ancêtres présentaient en revanche des membres de formes variées. D'où la question: comment les serpents ont-ils perdu leurs pattes?

La spécialisation des membres est souvent liée à un type d'habitat. L'apparition de nageoires chez les baleines est par exemple le résultat de l'adaptation de leurs ancêtres au milieu marin; de même, les ailes ont évolué quand les oiseaux ont commencé à se mouvoir dans les airs. Et dans le cas des serpents? Les biologistes de l'évolution en débattent depuis des décennies, sans doute en partie parce qu'alors que les serpents sont aujourd'hui très répandus, le registre fossile des premiers d'entre eux est très réduit. Néanmoins, le débat s'est concentré sur deux hypothèses: selon la première, les serpents auraient perdu leurs pattes en s'adaptant à la vie marine; selon la seconde, ils l'auraient fait en s'adaptant à la vie dans les milieux souterrains.

Ah, si nous pouvions nous transporter au début de l'évolution des serpents! Nous pourrions alors observer leurs ancêtres dans leurs habitats du Crétacé, il y a 145 millions à 66 millions d'années, et savoir s'ils excelaient plutôt à la nage ou plutôt au creusement de terriers. Toutefois, nous n'avons que leurs restes fossiles et il est parfois difficile de reconstruire l'écologie et le comportement d'un animal à partir de ses os seulement, tout particulièrement s'ils sont endommagés ou fragmentaires, ce qui est souvent le cas avec les fossiles.

Ces dix dernières années, cependant, les progrès des techniques d'imagerie nous ont permis de dépasser ce qui nous limitait jusque-là dans notre compréhension de l'origine des serpents. L'observation de crânes fossilisés à l'aide de rayons X de haute énergie a révélé des traits cachés, qui nous renseignent sur l'écologie des serpents anciens. Dans le même temps, ➤

des recherches en biologie évolutive du développement ont élucidé certains des mécanismes génétiques par lesquels les membres des serpents ont pu disparaître et leurs vertèbres se multiplier. Notre vision de l'origine des serpents est certes loin d'être complète, mais nous cernons de mieux en mieux comment ils se sont transformés.

PREMIER SERPENT SANS PATTES

Le premier serpent sans pattes connu, *Dinilysia patagonica*, a émergé il y a quelque 85 millions d'années, à la fin du Crétacé, alors que les dinosaures dominaient encore le monde. Particulièrement bien conservé, son squelette, quasi complet, était pris dans le grès de couleur rouille du plateau patagonien. D'une taille comparable à celle d'un homme, il n'a ni membres, ni ceinture scapulaire (soutien des épaules) ou pelvienne. Sa découverte dans un dépôt sédimentaire terrestre nous apprend par ailleurs qu'il vivait sur terre.

Pour autant, d'autres serpents de la même époque géologique présentaient des membres. *Najash rionegrina*, une espèce terrestre d'Argentine vieille de 92 millions d'années dont les représentants ne sont guère plus longs qu'un spaghetti, disposait de petits membres postérieurs constitués d'éléments osseux partant de la hanche jusqu'à la cheville. Bien trop petits et délicats pour supporter le poids de l'animal, ils lui auraient plutôt servi à s'accrocher au partenaire pendant l'accouplement.

D'autres serpents à pattes du Crétacé supérieur vivaient dans les océans. Dans la région de Jérusalem, des dépôts d'origine marine ont livré des fossiles de serpents marins, qui nageaient dans une mer où vivaient aussi des requins. Deux de ces formes fossiles – *Pachyrhachis* et *Haasiophis* – présentaient des membres postérieurs presque complets comprenant les os de la cuisse, de la jambe et du pied. Leur fonction est inconnue. Les membres de *Pachyrhachis* et de *Haasiophis* n'étant pas reliés au tronc par une ceinture pelvienne, leurs pattes n'étaient que de peu d'utilité pour la nage.

En somme, ces fossiles montrent que l'évolution des serpents était déjà lancée au Crétacé supérieur. Le corps long et sinueux doté de membres déjà réduits était déjà bien établi et les serpents se diversifiaient rapidement en une multitude de formes exploitant toute une variété de niches écologiques. Pour comprendre les origines de ce plan anatomique de base – ou plan d'organisation – caractéristique des serpents, les chercheurs doivent donc examiner des fossiles plus anciens.

Jusqu'à récemment, les chercheurs n'avaient que peu de fossiles antérieurs au Crétacé supérieur à étudier, mais, ces cinq dernières années, plusieurs trouvailles du début du Crétacé, voire du Jurassique, ont été faites.

Trop fragmentaires pour révéler les proportions du corps, elles proviennent de sédiments terrestres européens ou nord-américains. Ces restes, s'il s'agit bien de serpents, font débiter le registre fossile du groupe 70 millions d'années plus tôt et montrent que les plus anciens individus connus vivaient sur terre et non en mer.

Toutefois, le nombre grandissant d'indices pointant vers une origine terrestre des serpents n'explique pas pourquoi ils ont évolué vers une forme fuselée. Le mode de vie souterrain est facilité par une réduction des membres. Les lézards et les serpents modernes qui vivent sous terre creusent leurs tunnels simplement en poussant la terre meuble de leur tête – des pattes ne feraient que les gêner. Pour autant, il reste difficile d'affirmer que telle ou telle forme fossile de serpent creusait des terriers : les fossiles datant du début du Crétacé et du Jurassique

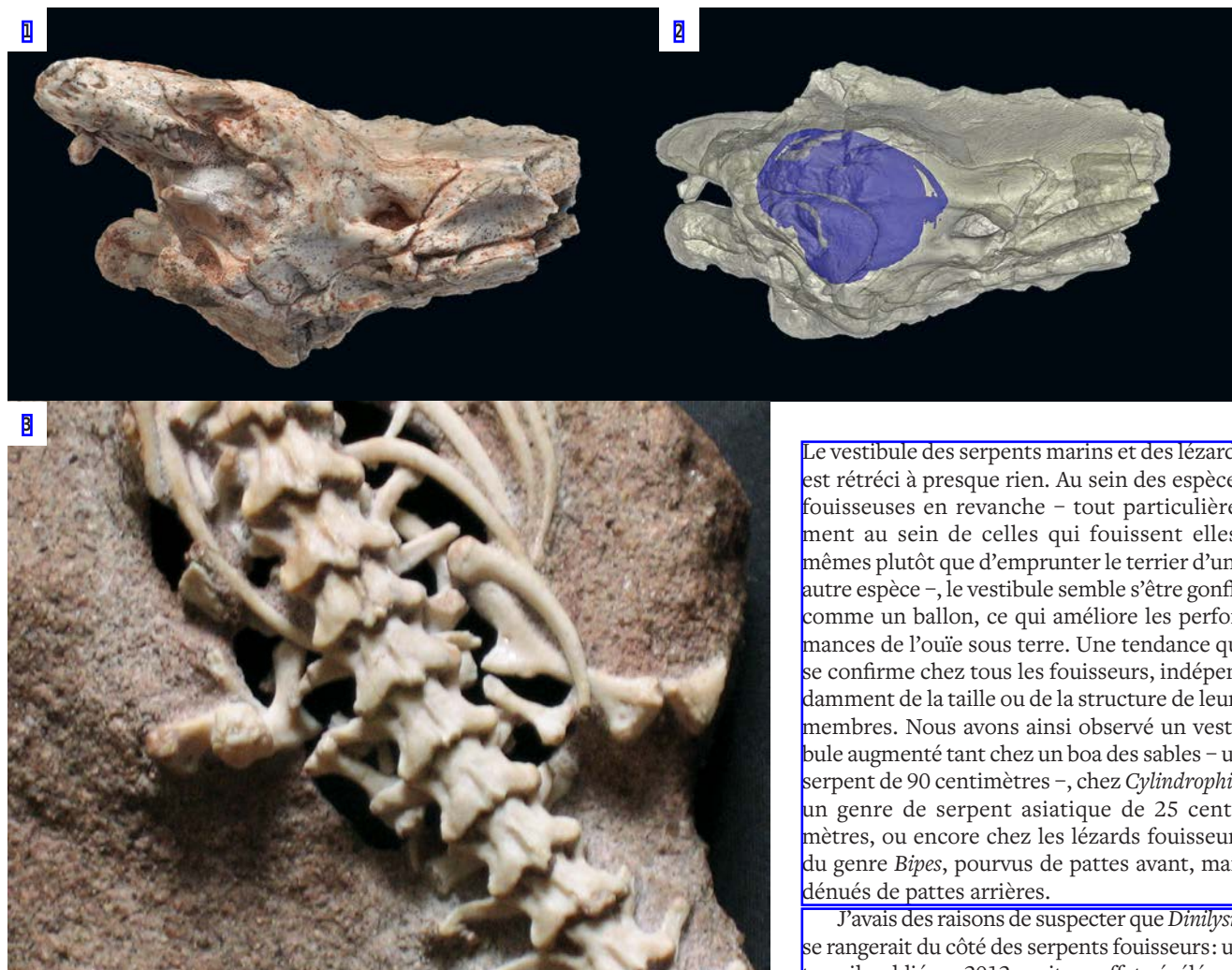
Le plus ancien serpent sans pattes connu était plus gros que les reptiles fouisseurs actuels

sont trop incomplets. La courte queue de *Najash*, ressemblant à celle des serpents creuseurs de terriers actuels, suggère qu'il creusait. *Dinilysia*, le plus ancien serpent sans pattes connu, était pour sa part bien plus gros que les reptiles fouisseurs modernes. Creusait-il quand même ? J'ai décidé de répondre à cette question.

UNE OREILLE INTERNE EN FORME DE BALLON

Le jour de Noël 2014, j'ai transporté dans l'avion de Buenos Aires à New York une boîte à chaussures pleine de crânes de *Dinilysia*. Les formalités administratives nécessaires avant cet emprunt nous avaient pris presque un an à mes collègues argentins et à moi-même... Mon but ? Réaliser au scanner des images en 3D de très haute résolution de l'oreille de ces serpents fossiles.

Pourquoi l'oreille ? En collaboration avec Mark Norell du Muséum d'histoire naturelle américain, j'avais en effet développé une méthode afin de distinguer les serpents



Ce crâne (1) est celui de *Dinilysia*, le serpent sans pattes le plus ancien connu. L'imagerie 3D par rayons X a révélé que le vestibule de son oreille interne était élargi (2). Ce trait de l'oreille interne caractérise les animaux fouisseurs. D'autres serpents ancestraux d'âge comparable, tel *Najash*, avaient encore pour leur part de petits membres postérieurs (3).

fouisseurs des serpents marins à partir de leur oreille. Nous voulions la tester sur *Dinilysia*.

A l'aide d'une technique d'imagerie par rayons X de pointe, nous avons déjà produit des images numériques 3D de haute définition de crânes de dizaines de lézards et de serpents modernes. Nous avons ensuite superposé ces images par ordinateur, afin d'obtenir des modèles virtuels tridimensionnels de l'oreille interne des espèces correspondantes. Nous nous sommes particulièrement concentrés sur le vestibule, c'est-à-dire sur la partie centrale du labyrinthe osseux, qui contient le liquide lymphatique et les otolithes, les concrétions minérales de l'oreille interne, qui aident à percevoir la gravité et le mouvement.

L'étude statistique de la forme des modèles virtuels a révélé des différences significatives entre les vestibules des spécialistes terrestres du fouissage, ceux des généralistes terrestres non fouisseurs et ceux des formes aquatiques.

Le vestibule des serpents marins et des lézards est rétréci à presque rien. Au sein des espèces fouisseuses en revanche – tout particulièrement au sein de celles qui fouissent elles-mêmes plutôt que d'emprunter le terrier d'une autre espèce –, le vestibule semble s'être gonflé comme un ballon, ce qui améliore les performances de l'ouïe sous terre. Une tendance qui se confirme chez tous les fouisseurs, indépendamment de la taille ou de la structure de leurs membres. Nous avons ainsi observé un vestibule augmenté tant chez un boa des sables – un serpent de 90 centimètres –, chez *Cylindrophis*, un genre de serpent asiatique de 25 centimètres, ou encore chez les lézards fouisseurs du genre *Bipes*, pourvus de pattes avant, mais dénués de pattes arrière.

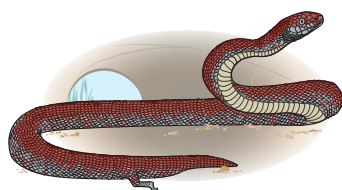
J'avais des raisons de suspecter que *Dinilysia* se rangerait du côté des serpents fouisseurs : un travail publié en 2012 avait en effet révélé son grand vestibule par une image aux rayons X de son crâne. Mais personne ne savait à quoi il ressemblerait en trois dimensions. J'étais confiante : notre méthode réglerait la question du comportement locomoteur de ce serpent ancien.

Et c'est bien ce qui s'est passé : notre travail a révélé que le vestibule de *Dinilysia* est grand et qu'il a la même forme de ballon que ceux des serpents fouisseurs actuels. Il est en fait quasiment indistinguable de celui de *Xenopeltis*, un genre de serpent fouisseur d'Asie du Sud-Est qui se nourrit surtout de petits rongeurs et d'autres petits serpents. Notre méthode nous conduit à estimer avec une probabilité de 95% que *Dinilysia* était un serpent fouisseur. Selon nous, comme *Xenopeltis*, il chassait en surface et s'enterrait dans les sols mous pour s'abriter.

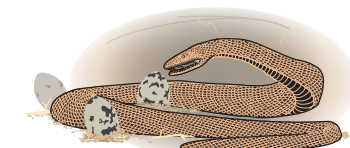
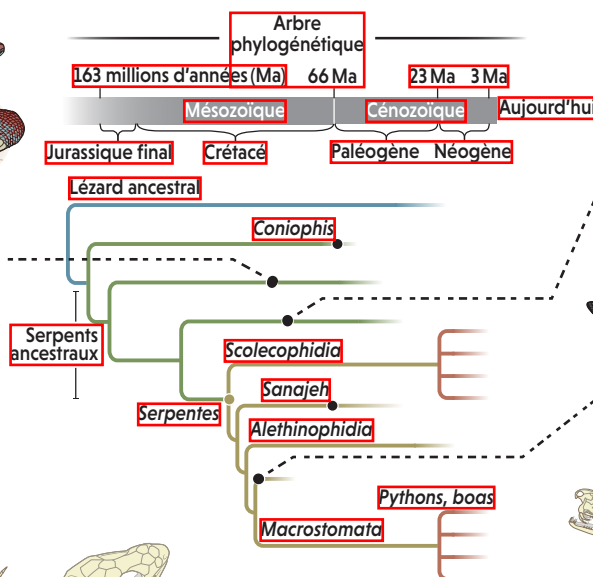
Quand on les place dans un arbre phylogénétique, ces découvertes mettent en lumière le rôle du changement d'habitat dans la transformation de certains lézards en serpents. *Dinilysia* n'a pas fait partie des premières lignées qui se sont séparées des lézards. En fait, ce genre est apparenté de près à l'ancêtre des serpents d'aujourd'hui. Il en est plus proche

L'ÉVOLUTION DES SERPENTS

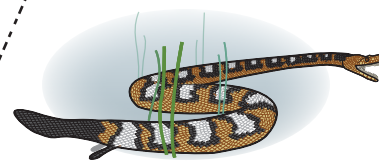
La transformation des lézards anciens en serpents est l'une des plus spectaculaires de l'histoire des vertébrés. Des découvertes récentes aident à reconstruire de quelle façon le plan d'organisation des serpents – un tronc à nombreuses vertèbres et dénué de membres – a émergé.



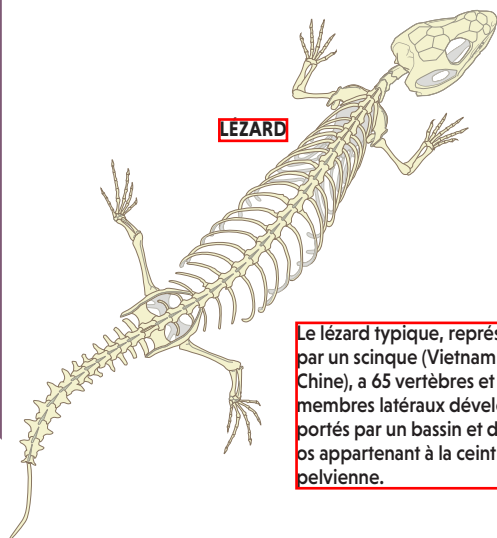
Découvert en Argentine, *Najash rionegrina* est un serpent terrestre de 92 millions d'années. Sa paire de petits membres postérieurs aurait fonctionné comme une sorte de grappin lors de l'accouplement.



Dinilysia patagonica, une espèce fouisseuse qui vivait il y a 85 millions d'années en Argentine, est la plus ancienne forme de serpent sans pattes connue et... la plus proche des serpents actuels. Elle suggère que c'est en s'adaptant au mode de vie souterrain que les serpents ont perdu leurs pattes.

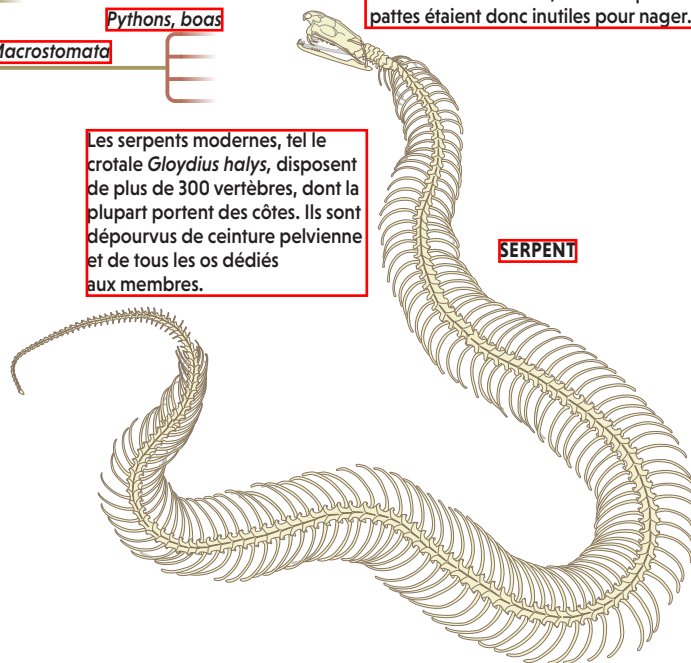


Découvert près de Jérusalem, *Pachyrhachis problematicus* est un serpent fossile marin de 98 millions d'années. Comme il était probablement dénué de hanches, ses deux petites pattes étaient donc inutiles pour nager.



LEZARD

Le lézard typique, représenté ici par un scinque (Vietnam et Chine), a 65 vertèbres et quatre membres latéraux développés portés par un bassin et d'autres os appartenant à la ceinture pelvienne.



SERPENT

Les serpents modernes, tel le crotale *Gloydius halys*, disposent de plus de 300 vertèbres, dont la plupart portent des côtes. Ils sont dépourvus de ceinture pelvienne et de tous les os dédiés aux membres.

que *Najash*, qui était toujours doté de pattes arrières, tout en restant plus primitif que les genres modernes. Cette découverte soutient l'idée que les lignées qui ont conduit aux serpents modernes ont perdu leurs membres en s'adaptant à la vie souterraine.

Le fait que la vie fouisseuse ait prédominé chez les ancêtres des serpents actuels n'implique pas qu'un beau jour des lézards du Crétacé aient décidé de vivre sous terre, puis qu'ils aient graduellement perdu leurs pattes.

L'évolution est un phénomène aléatoire. L'orientation vers une vie souterraine n'a été que l'un des nombreux événements qui ont influencé la mise en place du plan d'organisation des serpents. Ce nouveau mode de vie a probablement supprimé certaines contraintes s'exerçant sur le génome des serpents primitifs, lesquelles étaient auparavant indispensables à leur survie. Une fois ces contraintes levées, les membres et le tronc ont pu changer. C'est bien pour cette raison que le registre fossile des



Leur colonne vertébrale compte plus de 300 vertèbres, contre 33 chez les humains



serpents contient toute une variété de types de membres et de longueurs du corps.

Le séquençage du génome et l'édition des gènes ont aussi apporté leur part à la compréhension de l'évolution des serpents. Tous les vertébrés partagent de nombreux gènes. Les grandes différences séparant les plans d'organisation des oiseaux, des poissons et des autres vertébrés proviennent de mutations situées dans une toute petite partie du génome. En théorie, le passage du corps membré du lézard au corps allongé et sans membres du serpent résulte de changements dans seulement quelques régions clés du génome.

QUAND LE CORPS S'ALLONGE

L'étude fine du développement embryonnaire des vertébrés révèle les étapes qui ont conduit à la formation d'un élément anatomique caractéristique chez les serpents : leur colonne vertébrale comporte plus de 300 vertèbres, contre 33 chez un humain et 65 chez un lézard. La tête et le tronc des vertébrés membrés se forment à partir de blocs de cellules dont chacun donnera une vertèbre : les somites. Ces structures embryonnaires transitoires se ressemblent d'abord, puis se différencient pour former les diverses régions de la colonne vertébrale, du cou à la queue.

Un gène curieusement nommé *Lunatic fringe* (littéralement « frange folle ») favorise la multiplication des vertèbres chez les serpents. Avec d'autres gènes à l'origine de la formation des somites, il crée des groupes de cellules à l'extrémité caudale de l'embryon. Une fois qu'un certain nombre de cellules se sont accumulées, un somite se forme et remonte le long du corps comme une perle sur un fil. Ensemble, les gènes responsables de la formation des somites constituent ce que l'on nomme l'horloge moléculaire de la somitogenèse, car ils s'activent et se désactivent de manière périodique pour produire les somites. Plus cette horloge bat vite et plus de somites sont produits à partir du même nombre

de cellules. Un indice corrobore cette description : avec des collègues, Céline Gomez, maintenant au Centre Sanger, en Angleterre, a notamment montré que le gène *Lunatic fringe* s'exprime plus souvent chez le serpent des blés que chez les lézards ; or son horloge de la somitogenèse bat aussi plus vite que celle des lézards.

Les vertèbres ne sont pas les seuls os à développement atypique chez les serpents, puisque c'est aussi le cas des côtes. Pour comprendre pourquoi, prenons les cas de la souris et de l'alligator. Seules les vertèbres thoraciques de ces animaux portent des côtes ; ni les vertèbres cervicales, ni celles des hanches n'en portent, car un gène nommé *Hox10* y empêche leur formation. Chez les serpents, en revanche, excepté les trois vertèbres les plus proches de la tête et celles de la queue, toutes portent des côtes.

Les chercheurs ont longtemps pensé que la souris et l'alligator, avec leurs colonnes vertébrales où les vertèbres du cou et des hanches se distinguent de celles du thorax, étaient de bons modèles du tronc des animaux anciens à pattes. La colonne vertébrale homogène des serpents serait le fruit de l'évolution de cette forme ancestrale – une spécialisation peut-être liée à la perte des membres. Ils soupçonnaient donc que les gènes *Hox*, qui gouvernent la différenciation des vertèbres chez d'autres animaux, étaient, d'une façon ou d'une autre, perturbés chez les serpents.

Une étude récente de certains fossiles pointe vers un autre scénario. En 2015, Jason Head, alors à l'université du Nebraska à Lincoln, et David Polly, de l'université de l'Indiana à Bloomington, ont modélisé l'évolution du squelette du tronc chez les tétrapodes, c'est-à-dire chez les animaux à quatre membres (ou qui l'ont été). Pour commencer, ils ont établi par des méthodes statistiques que les serpents ont en fait autant de régions distinctes dans la colonne vertébrale que les lézards. Les changements de forme des vertèbres induits par les gènes *Hox* seraient juste plus subtils chez les serpents. Ils ont ensuite déterminé que, contrairement à la théorie la plus commune, les tétrapodes ancestraux avaient des côtes associées à la plupart des vertèbres situées au-delà des hanches. Les fossiles d'anciens cousins de mammifères et d'alligators ont des côtes attachées aux vertèbres du cou et de la taille. Par conséquent, la disparition ou la réduction des côtes dans ces régions chez les alligators modernes, les oiseaux et les mammifères s'est produite indépendamment chez les uns et les autres. Elle n'est donc pas héritée d'un ancêtre commun.

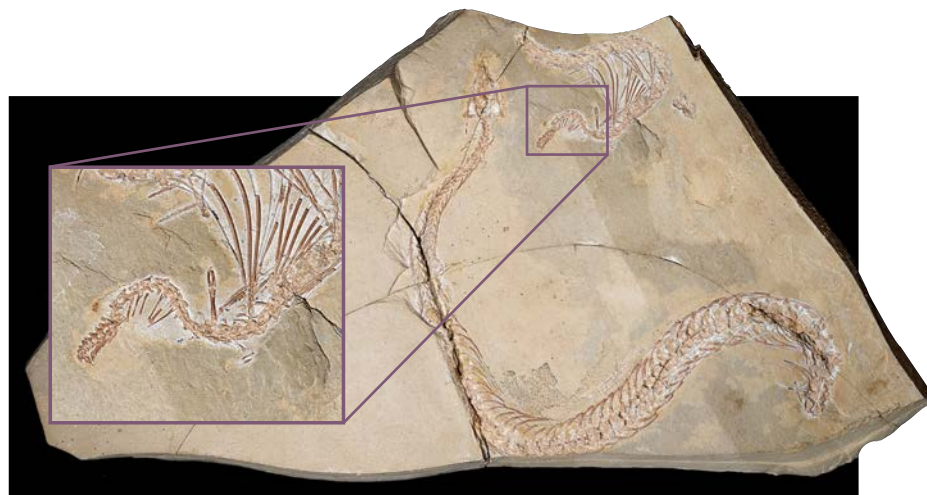
Ainsi, l'examen de fossiles et d'espèces actuelles a révélé quel caractère du tronc les serpents ont hérité de leurs ancêtres membrés (la répartition des côtes) et lequel est propre aux serpents (un corps très allongé).

L'ORIGINE DES SERPENTS MODERNES RESTE DÉBATTUE

L'origine des serpents a toujours été très discutée et elle le reste à notre avis. Dans cet article, Hongyu Yi apporte sur cette question une ligne de raisonnement fondée sur l'oreille interne, et plus particulièrement son vestibule – celui de serpents et de lézards actuels et celui de *Dinilysia*, un serpent fossile sans pattes du Crétacé argentin. Hongyu Yi note que le vestibule de *Dinilysia* est similaire à celui de *Xenopeltis*, un serpent actuel du Sud-Est asiatique, et qu'il est très différent de celui des espèces marines. Elle conclut alors que *Dinilysia* vivait comme *Xenopeltis*. Avec une très forte probabilité, elle considère que *Dinilysia*, qui a précédé les serpents modernes, était fouisseur et, donc, que la vie souterraine a été l'environnement ayant conduit à la perte des pattes chez les serpents.

Pour autant, Alessandro Palci, du Muséum australien du Sud, à Adélaïde, en Australie, et ses collègues ont montré en 2017 qu'un vestibule semblable à celui de *Dinilysia* n'existe pas que chez les serpents dits fouisseurs, mais aussi chez certains serpents semi-aquatiques. Ce type de vestibule manque en outre chez les fouisseurs authentiques que sont les scolécophidiens. En fait, l'échantillon de serpents actuels utilisé par Hongyu Yi ne semble pas assez large pour que sa conclusion soit certaine.

Un défaut d'échantillonnage apparaît aussi dans le cas de la signification de la queue. Hongyu Yi pense qu'une queue courte est caractéristique d'un mode de vie fouisseur. Or *Najash*, autre serpent ancien, présente cette caractéristique et aurait donc été fouisseur. Autrement dit,



Le fossile d'*Eupodophis descouensi* présente deux petites pattes arrière (carré ci-dessus), ce qui amène à le considérer comme une forme de transition entre les lézards anciens et les serpents du Crétacé.

encore un serpent ancien qui était fouisseur. Pourtant, il existe au Moyen-Orient, dans le Crétacé supérieur, des serpents qui méritent une attention particulière. Il s'agit de serpents marins, bien adaptés à la nage, qui présentent de petites pattes postérieures. Hongyu Yi en cite deux, *Pachyrhachis* et *Haasiophis*, mais omet le troisième, *Eupodophis*. Or, l'une des caractéristiques d'*Eupodophis* est d'avoir une queue très courte. Cette particularité anatomique ne se rencontre donc pas que chez les serpents fouisseurs, mais aussi chez une espèce aquatique.

Les caractéristiques de l'oreille interne et de la queue, utilisées pour suggérer que c'est un mode de vie fouisseur

ces faux fouisseurs; il vit dans des marécages, des rizières et se cache dans des sols mous; il s'agit d'un semi-fouisseur à tendance aquatique.

Du reste, pourquoi Hongyu Yi oppose-t-elle milieu terrestre et milieu marin? Elle considère que les serpents anciens du Jurassique et du Crétacé étaient terrestres et en particulier que *Dinilysia* et *Najash* étaient fouisseurs. Nous avons vu que les arguments en faveur d'une vie fouisseuse pour ces deux serpents ne sont pas convaincants. *Dinilysia* était en fait probablement semi-aquatique et semi-fouisseur, comme l'ont suggéré Adriana Albino, de l'université de Mar del Plata en Argentine, et Michael Caldwell de l'université de l'Alberta, au Canada. Quant à *Najash*, il a été trouvé dans des dépôts d'origine fluvio-lacustre, ce qui n'est pas un argument définitif, mais jette un doute sur un mode de vie purement fouisseur. Enfin, si l'on peut dire que les autres fossiles anciens, jurassiques et crétacés, proviennent de sédiments terrestres, au sens d'opposés à marins, cela ne veut pas dire qu'ils n'étaient pas plus ou moins aquatiques. En effet, les gisements qui les ont fournis sont d'origine aquatique (fluviales, lacustres, lagunaires). Il ne faut pas oublier que le milieu d'eau douce existe!

De tout cela, que conclure? Que même si la méthode proposée par Hongyu Yi intéresse, en l'état actuel du registre fossile, trancher quant à la perte des membres qui a produit les serpents modernes reste difficile. La discussion entre paléontologues se poursuit.

En l'état actuel du registre fossile, la discussion entre paléontologues continue

qui a conduit à la perte des pattes, ne permettent pas, en fait, de conclusion solide. Quant au mode de vie du serpent actuel pris comme «modèle», il convient de relativiser. L'usage du qualificatif «fouisseur» chez les serpents est souvent abusif. Il existe de vrais fouisseurs qui creusent leurs galeries (comme les scolécophidiens) et d'autres qui, bien qu'appelés fouisseurs, ne creusent pas mais se contentent de s'abriter dans des cavités préexistantes, sous la litière, ou se déplacent dans des sols très mous. Or *Xenopeltis* qui est pris par Hongyu Yi comme analogue de *Dinilysia*, est l'un de

JEAN-CLAUDE RAGE

Paléontologue, directeur de recherche émérite au CNRS

L'étude du développement d'espèces actuelles a aussi récemment fourni une piste pour comprendre comment les serpents ont perdu leurs membres. En 2016, Evgeny Kvon, du laboratoire national Lawrence, à Berkeley, et ses collègues ont identifié un « interrupteur » génétique du développement des membres chez le serpent et la souris. Les chercheurs ont inséré un fragment de gène de serpent dans le génome d'une souris de laboratoire et produit ainsi un animal de science-fiction : une « souris serpentine » dotée d'un corps normal, mais de membres réduits.

Le fragment de gène en question est un segment d'ADN connu comme la séquence régulatrice ZRS. Celle-ci, lorsqu'elle est active chez la souris, joue un rôle critique dans la formation des membres postérieurs. Une seule mutation de ce fragment suffit pour causer une anomalie des membres. En raison de son importance pour la survie, la séquence ZRS est restée quasiment inchangée tout au long de l'évolution des tétrapodes, mais s'avère très variable chez les serpents.

Les variants de ZRS découverts chez les serpents correspondent à la diversité observable de la forme de leurs membres. Les serpents modernes les plus proches des formes anciennes, tels les pythons et les boas, ont toujours une séquence ZRS propice au développement de membres, mais plus courte que celle d'autres vertébrés membrés. Ces deux types de serpents constricteurs sont dotés de rudimentaires pattes postérieures ressemblant à des ergots. En revanche, les serpents modernes les plus éloignés des formes anciennes, tel le serpent des blés, ont perdu l'intégralité de la séquence ZRS et n'ont strictement plus aucun os de membre.

La découverte de variants génétiques correspondant aux variations de la forme des membres donne un nouvel éclairage sur les serpents fossiles. *Najash* a conservé sa ceinture pelvienne, son fémur, son tibia tronqué et sa fibula mais, à l'instar de *Pachyrhachis*, il n'a aucun ossement d'orteil. Ces deux genres révèlent que pendant la transition des lézards anciens vers les serpents, les gènes régulateurs des membres ont été modifiés tout en restant fonctionnels chez certains serpents ancestraux. Pour sa part, le genre *Dinilysia* n'avait plus aucun os de membre ni ceinture pelvienne. Il constitue donc l'un des premiers cas de perte complète de la séquence amplificatrice des membres au cours de l'évolution des serpents.

Au Crétacé supérieur, alors que s'écrivait le dernier chapitre de l'histoire des dinosaures, les serpents ont subi des changements importants de leur plan d'organisation et peut-être une évolution rapide de leur génome. Nous ne faisons que commencer à sonder les bases

génétiques des caractères visibles dans le registre fossile. Le genre *Haasiophis* n'avait par exemple pas de ceinture pelvienne, mais présentait un fémur complet, un tibia et un péroné bien développés ainsi que les os de la cheville et du pied. On ne trouve aucun équivalent chez les serpents modernes, mais la présence d'*Haasiophis* dans les archives fossiles suggère que plusieurs séquences similaires à ZRS régulaient la formation des membres dans le passé ancien.

UN CHAÎNON MANQUANT ?

Des indices sur l'origine des serpents continuent d'apparaître. En 2015, une équipe menée par David Martill, de l'université de Portsmouth, en Angleterre, a annoncé avoir étudié un serpent quadrupède qui, il y a 120 millions d'années, vivait dans ce qui allait devenir le Brésil. *Tetrapodophis amplexus* était doté de quatre membres complets, munis de doigts et d'orteils, qui lui auraient servi de moyen d'accrochage pendant l'accouplement. Bien que très court, ce serpent possédait plus de 200 vertèbres. Son long tronc et sa courte queue suggèrent qu'il était fouisseur, ce qui va dans le sens de l'hypothèse d'une origine terrestre des serpents. Étant donné son ancienneté, son écologie et l'état de ses membres, ce spécimen semble avoir tous les caractères des serpents de transition que cherchent les paléontologues.

En 2016, toutefois, lors du congrès de la Société de paléontologie des vertébrés à Salt Lake City, certains chercheurs ont remis en cause la description du fossile faite par ses découvreurs. Pour eux, *Tetrapodophis* ne serait pas un serpent, mais plutôt un lézard marin. Il est donc susceptible de relancer le débat sur l'origine, marine ou terrestre des serpents.

Outre *Tetrapodophis*, les chercheurs explorent plusieurs énigmes non résolues de l'évolution des serpents. Nous souhaiterions par exemple déterminer si les serpents sont d'abord apparus sur les continents septentrionaux ou méridionaux et si leurs premières espèces furent diurnes ou nocturnes. Nous aimerions aussi savoir comment l'évolution des serpents les a dotés de mâchoires assez grandes pour avaler des proies plus larges que leur tête et comment certains sont devenus venimeux.

Les réponses ne rendront que plus intéressante une histoire évolutive déjà passionnante ! Les cultures populaires et les religions abondent de légendes expliquant la perte des membres du serpent. Le serpent de la Bible, par exemple, aurait été forcé par Dieu à ramper pour le punir d'avoir poussé Adam et Ève à manger le fruit défendu. Toutefois, la sélection naturelle n'a en réalité aucun objectif. Ses innovations ne répondent pas à un dessein : elles ne sont que le résultat des interactions sans fin des animaux et de leur environnement. ■

BIBLIOGRAPHIE

A. Palci et al., **The morphology of the inner ear of squamate reptiles and its bearing on the origin of snakes**, *Royal Society Open Science*, vol. 4, 170685, 2017.

E. Kvon et al., **Progressive loss of function in a limb enhancer during snake evolution**, *Cell*, vol. 167, pp. 633-642, 2016.

J. Head et P. D. Polly, **Evolution of the snake body form reveals homoplasy in amniote Hox Gene function**, *Nature*, vol. 520, pp. 86-89, 2015.

D. Martill et al., **A four-legged snake from the early Cretaceous of Gondwana**, *Science*, vol. 349, pp. 416-419, 2015.

H. Yi et M. Norell, **The burrowing origin of modern snakes**, *Science Advances*, vol. 1, article e1500743, 2015.

A. Albino et M. Caldwell, **Hábitos de vida de la serpiente cretácica *Dinilysia patagonica* Woodward**, *Ameghiniana*, vol. 40, pp. 407-414, 2003.

Au XVIII^e siècle, tandis que des professeurs expliquaient le mouvement des planètes autour du Soleil, comme sur cette gravure d'une peinture d'époque du Britannique Joseph Wright of Derby, des savants s'interrogeaient sur un cas particulier fictif de ce mouvement : la chute d'un corps ponctuel sur son centre d'attraction, lui aussi ponctuel.



L'ESSENTIEL

> En mathématiques et en physique, il existe des points singuliers qui posent des problèmes à la théorie.

> Au XVIII^e siècle, les mathématiciens D'Alembert et Euler ont rencontré une telle singularité lors de l'étude de la chute d'un corps ponctuel, mais n'ont pas ou mal perçu sa nature exceptionnelle.

> Ils proposèrent chacun une solution fondée sur des arguments peu rationnels.

> Il fallut plus d'un siècle pour que des savants se convainquent de l'inutilité d'une telle recherche : en cette singularité, la théorie atteint ses limites...

L'AUTEUR



JACQUES GAPAILLARD
professeur honoraire
à l'université de Nantes
où il a enseigné
les mathématiques
et l'histoire de l'astronomie

Le trou noir des Lumières

Au XVIII^e siècle, d'illustres savants se sont trouvés confrontés à une singularité mathématique. Sans soupçonner qu'elle constituait un sérieux obstacle théorique, ils n'hésitèrent pas à passer outre de façon *a priori* plausible ou, au contraire, carrément extravagante.

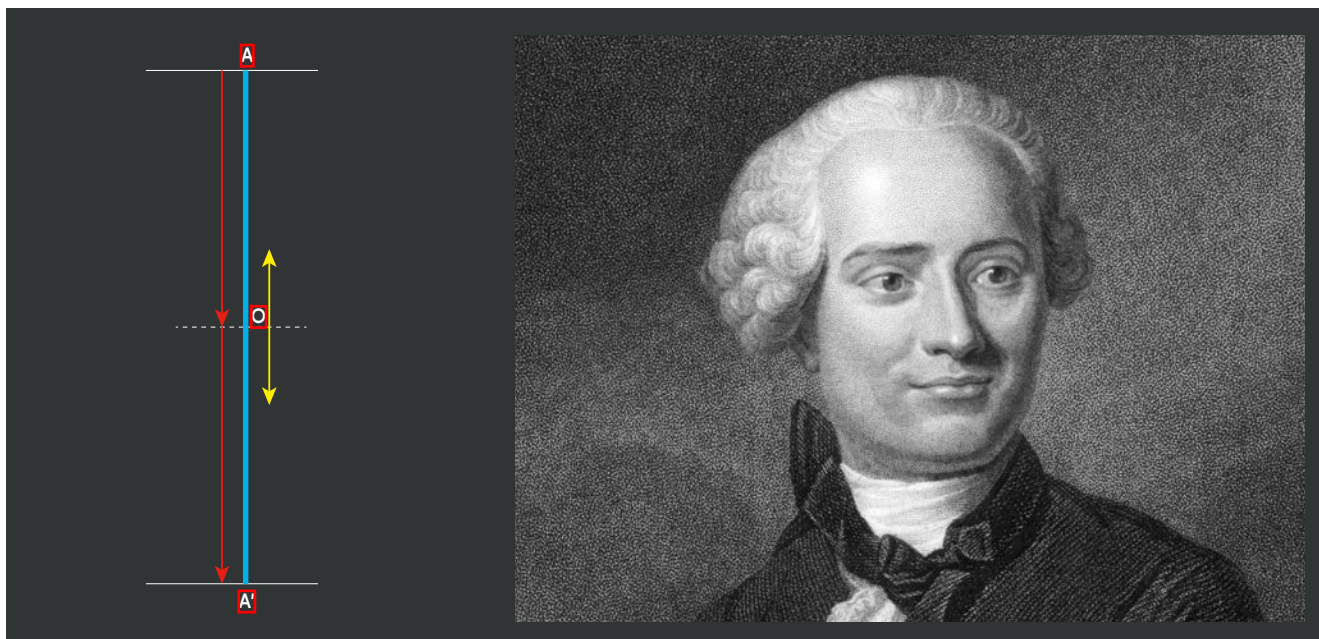
En astrophysique, un trou noir est une région si dense de l'espace-temps que rien ne s'en échappe, pas même la lumière. Ces objets célestes si particuliers présentent des singularités

de l'espace-temps : des points ou des régions que la théorie mathématique de la gravitation – la relativité générale – ne sait pas décrire. Des singularités existent dans nombre de champs mathématiques. On en rencontre notamment dans l'étude des courbes et des surfaces, ou dans celle des fonctions d'une variable complexe, ou encore des équations différentielles. Aujourd'hui, les scientifiques savent que ces points sont en général hors du domaine de validité de leur théorie. Mais cela n'a pas toujours été le cas, et les premières confrontations à des singularités ont même conduit à d'étranges solutions issues de raisonnements peu rationnels. C'est ainsi qu'au XVIII^e siècle, des mathématiciens aussi reconnus que Jean Le Rond D'Alembert et Leonhard Euler

ont rencontré une singularité dans un problème très simple de mécanique théorique classique – qui ressemble à celui d'un trou noir ponctuel dans un espace de dimension 1 – et n'ont pas bien pris la mesure de la difficulté qui lui était liée...

UNE DÉLICATE QUESTION

Le problème en question traitait de la chute d'un corps ponctuel sur un autre. En mécanique théorique classique, dite aussi newtonienne ou rationnelle, il est commode et habituel de considérer la fiction d'un point matériel, c'est-à-dire d'un point géométrique doté d'une masse. D'après la loi de Newton de la gravitation, un tel point matériel, situé en un point fixe O de l'espace, dit centre d'attraction, exerce sur un autre point matériel P, à la distance r de O, une force d'attraction d'intensité proportionnelle à $1/r^2$. Du moins est-ce le cas aussi longtemps que $r \neq 0$. Mais si r vient à s'annuler, l'attraction exercée sur P n'est plus définie et, pour elle, O est le siège d'une singularité.



❏ Ici, le centre d'attraction O est regardé comme une pure abstraction géométrique, où aucun objet matériel n'est supposé se trouver. Il s'agit donc d'une situation dépourvue de réalité physique. Néanmoins, rien n'interdit de considérer le problème mathématique posé par le mouvement d'un point matériel P soumis à une attraction en $1/r^2$ qui émanerait de O.

Dans ces conditions, Newton avait déjà pratiquement établi, dans ses *Principia* (1687), que si P se trouve en dehors de O à un instant donné, avec une vitesse non nulle et non dirigée selon la droite OP, il décrira ultérieurement dans l'espace un arc de parabole ou d'hyperbole, ou encore il accomplira des révolutions sur une ellipse à l'instar des mouvements planétaires autour du Soleil, toutes ces coniques ayant un foyer en O. Mais le cas qui nous occupe ici est celui de la chute libre où P, abandonné hors de O avec une vitesse initiale nulle, se dirige directement vers ce point. Le calcul montre que sa vitesse croît alors au-delà de toute limite pour devenir infinie lorsqu'il atteint O, à l'issue d'un temps fini.

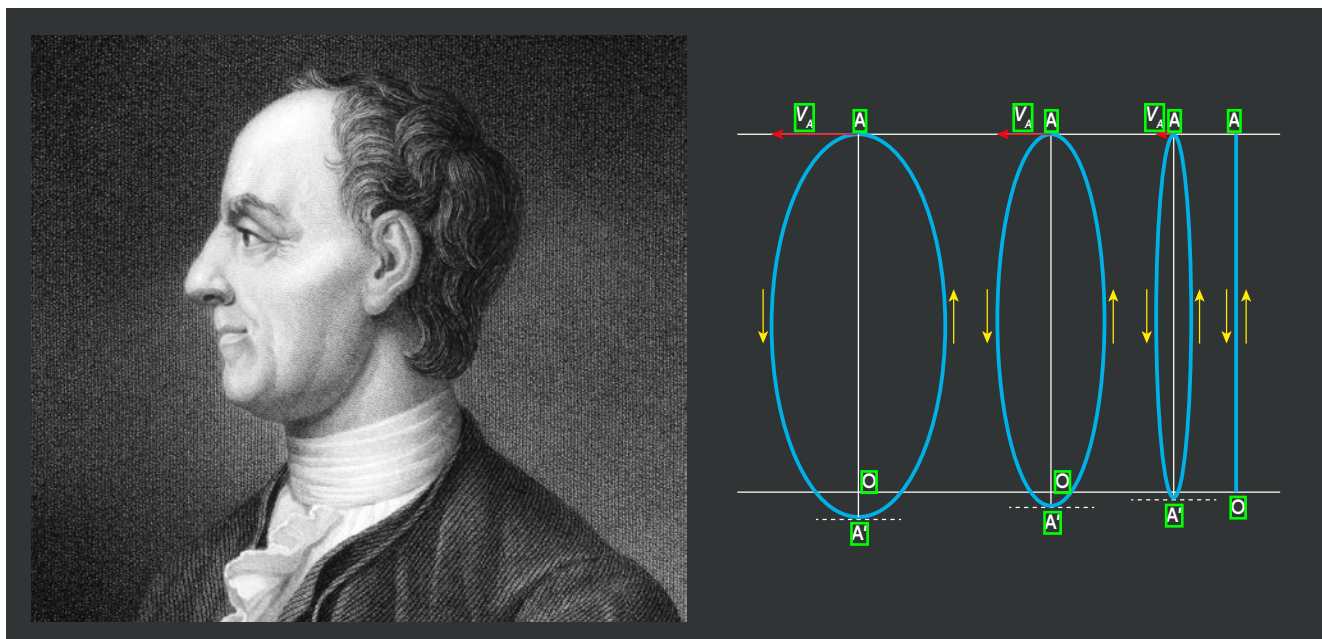
Et après? Que se passe-t-il une fois que P est parvenu en O? Il semble d'abord que P ne puisse faire autrement que continuer en ligne droite au-delà de O, où il est arrivé avec un formidable élan. Quoi de plus intense, en effet, que l'élan conféré par une vitesse infinie? Mais d'un autre côté, à mesure que P s'approche de O, son attraction vers ce point voit, elle aussi, son intensité dépasser toute limite pour devenir infinie quand P atteint O, d'où il ne paraît pas pouvoir s'échapper. Alors, entre une vitesse prodigieuse et une attraction qui ne l'est pas moins, laquelle va l'emporter sur l'autre?

Un grand spécialiste de la mécanique classique, Paul Appell, tranche la question à sa manière. Dans son *Cours de mécanique rationnelle* (1888), il avance un argument qu'il reprendra dans son célèbre *Traité de mécanique rationnelle* (1893) et qui consiste à observer que le cas du point matériel P atteignant le centre d'attraction n'est pas envisageable, car «le mobile s'approchera de O avec une vitesse croissant indéfiniment, circonstance qui ne peut évidemment pas se réaliser physiquement: il y aura un choc avant que la distance des deux corps s'annule». Mais cet argument ne résout en rien le problème purement théorique tel qu'il a été posé ci-dessus, où le centre d'attraction, rappelons-le, est un simple point géométrique.

UNE ÉVIDENCE DE D'ALEMBERT

Dans le tome VII de ses *Opuscules mathématiques* (1780), D'Alembert, le plus grand mathématicien français de son époque, déclare au sujet de ce délicat problème: «Il est évident [que le point P] doit alors continuer son chemin au-delà [du centre d'attraction], en s'en éloignant jusqu'à une distance égale à celle d'où il est parti, et qu'il reviendra ensuite sur ses pas, en faisant les mêmes vibrations.» Autrement dit, le mobile P effectuera une suite d'oscillations rectilignes et symétriques de part et d'autre du centre O d'attraction, à la manière d'un mouvement pendulaire (voir le schéma ci-dessus). C'est en effet la solution qui doit s'imposer à D'Alembert à partir du moment où il admet, apparemment sans hésiter, que le mobile franchira ce centre en poursuivant sa course rectiligne. Sans aucune considération pour une

Pour Jean Le Rond D'Alembert, il était évident qu'un point matériel lâché en A et soumis à un centre d'attraction O ponctuel traverserait ce point, continuerait sa route jusqu'au symétrique A' de A par rapport à O, puis rebrousseait chemin, oscillant indéfiniment entre A et A'.



Leonhard Euler avança une solution autre que celle de D'Alembert : il imagina d'abord que le point matériel avait une vitesse V_A non nulle perpendiculaire à OA , de façon que sa trajectoire soit une ellipse de foyer O et de grand axe AA' . Puis il diminua la vitesse V_A jusqu'à l'annuler, ce qui aplatit l'ellipse, tandis que A' se rapprochait de O . Mais quant à affirmer qu'en passant à la limite, le mouvement orbital sur l'ellipse va se réduire à un va-et-vient rectiligne entre A et O , c'est une tout autre affaire.

attraction vers O où son intensité devient pourtant infinie, il ne retient que l'aspect dynamique d'un mouvement rendu irrésistible par sa vitesse également infinie en ce point.

Ce n'est d'ailleurs pas la première fois que D'Alembert se fie à une prétendue évidence. Dans un discours prononcé en 1771 à l'Académie des sciences, il envisage un tir vertical effectué au pôle et déclare que le boulet retombera toujours, «quelque prodigieuse vitesse qu'on lui imprime». Mais dans le même volume des *Opuscules*, où il publie les démonstrations des résultats qu'il s'était borné à énoncer en 1771, au sujet de ce qu'il avait dit du tir vertical au pôle, il se contente d'affirmer que c'est une évidence. Or c'est faux ! Dès que le boulet est projeté avec une vitesse initiale égale ou supérieure à la vitesse de libération d'environ 11,2 kilomètres par seconde, il s'éloigne sans retour, jusqu'à l'infini.

Toujours est-il qu'au sujet de notre problème, le lecteur de D'Alembert doit recevoir son résultat pendulaire comme une vérité première qu'il n'est pas même utile de chercher à démontrer. Et pourtant, il s'est trouvé un savant, et pas des moindres, pour soutenir une tout autre solution.

Dans ce même mémoire de 1780 où il a livré sa réponse oscillatoire, D'Alembert poursuit en évoquant une solution très différente du même problème, trouvée par Leonhard Euler. Le mathématicien suisse, le plus célèbre du XVIII^e siècle, avait en effet devancé son collègue français avec un résultat pour le moins inattendu et qui est loin d'avoir convaincu ce dernier : «Il est vrai que M. Euler, dans sa *Mécanique* [...], croit qu'un corps qu'on laisserait tomber directement au [centre O des accélérations], lorsque

la force centrale est en raison inverse du carré de la distance, doit revenir sur ses pas quand il est arrivé en $[O]$. Mais il est visible que ce grand géomètre s'est trompé sur ce point.»

D'Alembert n'est sans doute pas mécontent de pouvoir contester un résultat d'Euler avec lequel il est en froid à cette époque, résultat qu'il qualifie d'absurde. On peut en effet s'interroger sur la manière dont Euler est parvenu à une conclusion aussi contre-intuitive, avec un brusque retournement d'une vitesse infinie. Car cette solution n'a d'égard pour aucune des deux quantités infinies litigieuses, qu'il s'agisse de la vitesse du point P en O dans le sens de la chute, ou de l'attraction qu'il subit en ce point.

UN TÊMÉRAIRE PASSAGE À LA LIMITE POUR EULER

Reprenant un procédé déjà utilisé par Newton, Euler aborde le problème au premier tome de sa *Mechanica* (1736), rédigée en latin. Il suppose d'abord qu'à l'instant initial où il est en A , le mobile P a une vitesse V_A dirigée perpendiculairement à OA , telle que sa trajectoire soit une ellipse de grand axe AA' et dont O est l'un des foyers (voir le schéma ci-dessus). Puis Euler imagine que la vitesse V_A , toujours perpendiculaire à OA , diminue jusqu'à s'annuler. Alors l'ellipse va s'aplatir tandis que A' se rapprochera de O et, à la limite, elle va se confondre avec le segment OA . C'est par ce passage à la limite, non seulement géométrique mais étendu au mouvement de P , qu'Euler obtient son curieux résultat. Assurément, il s'est fié à un passage à la limite bien téméraire, et cela d'autant plus que, tout comme D'Alembert, Euler ne place en O aucune masse ponctuelle qui, au moins dans une

certaine mesure, pourrait justifier un rebond de P en ce point. De plus, c'est accorder clairement un pouvoir répulsif au centre d'attraction, paradoxe que des ennemis de la mécanique newtonienne dénonçaient déjà dans le mouvement orbital elliptique. Certains s'étonnaient, en effet, que chaque planète doive passer la moitié de son temps à s'éloigner du Soleil qui est censé l'attirer.

L'AMBIGÜITÉ DE LAPLACE

Que deux théoriciens comme D'Alembert et Euler, qui sont parmi les plus habiles de leur temps, parviennent à deux conclusions aussi opposées sur une question de mécanique du point apparemment banale, est assurément l'indice d'un sérieux problème. Il ne semble pas douteux que leurs successeurs auront bientôt mis fin à ce scandale scientifique. Or en 1799, Pierre-Simon Laplace, mathématicien majeur du tournant du siècle, s'est effectivement exprimé sur ce sujet au premier tome de son *Traité de mécanique céleste*.

Après avoir rappelé comment le procédé de l'ellipse qui s'aplatit peut servir à calculer la durée de la chute libre rectiligne jusqu'au centre d'attraction à l'aide d'un passage à la limite qui fonctionne, il poursuit par cette mise au point : « Il y a cependant une différence essentielle entre le mouvement elliptique [*sic*] vers le foyer et le mouvement dans une ellipse infiniment aplatie. Dans le premier cas, le corps, parvenu au foyer, passe au-delà, et s'en éloigne à la même distance dont il était parti; dans le second cas, le corps parvenu au foyer revient au point d'où il était parti. Une vitesse tangentielle à l'aphélie [le point A], quelque petite qu'elle soit, suffit pour produire cette différence qui n'influe pas sur le temps que le corps emploie à descendre vers le foyer. »

À première lecture, et même après correction du lapsus d'« elliptique » substitué à « rectiligne », ce texte paraît assez obscur. Il semble bien, en effet, que Laplace accomplisse le tour de force de concilier l'inconciliable en déclarant, sans les nommer, que D'Alembert (« premier cas ») et Euler (« second cas ») ont tous les deux raison ! En effet, tout en n'opposant aucune objection à la solution de D'Alembert, Laplace présente une sorte de justification de celle d'Euler. Et, à cet effet, il introduit le curieux concept d'ellipse infiniment aplatie, entendant par là une ellipse aussi aplatie qu'on le désire, mais qui n'est pourtant pas une ellipse totalement aplatie, dégénérée en un segment de droite comme chez Euler. Laplace entretient toutefois l'ambiguïté de son propos en évoquant « le corps parvenu au foyer », alors qu'en toute rigueur il n'y passera pas, puisque sa trajectoire reste une ellipse. Finalement, de ce surprenant discours, et malgré le lapsus signalé plus haut, les lecteurs de Laplace ont seulement retenu qu'il se

ET SI ON POSE L'ÉQUATION ?

L'équation différentielle qui décrit le problème de chute d'un corps dont discutent Euler et D'Alembert est facile à écrire. Il suffit d'appliquer le principe fondamental de la dynamique au mobile ponctuel : son accélération est proportionnelle à la somme des forces qui agissent sur lui, ici l'attraction en $1/r^2$ qu'il subit de la part du point O. On obtient une équation du type : $d^2r/dt^2 = -k/r^2$, où k est une constante positive. Sa résolution est en revanche bien plus compliquée. Il est assez simple d'en déduire une expression du temps t en fonction de la distance r , mais l'inverse se révèle impossible avec les fonctions usuelles, et le calcul n'apprend rien sur ce qui se produit en O, si ce n'est que le mobile y parvient avec une vitesse infinie...

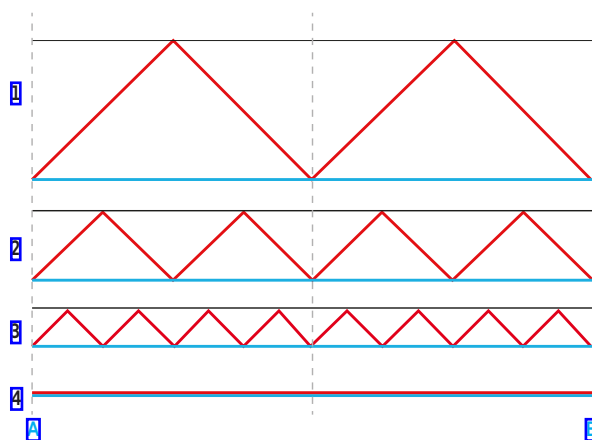
rangeait à l'opinion de D'Alembert, laquelle est longtemps restée l'opinion dominante.

Au second tome de son *Histoire des mathématiques* (1758), Jean-Étienne Montucla s'est également intéressé au mouvement rectiligne du point matériel P vers le centre d'attraction O. Se référant à Newton et sans nommer Euler, il regarde lui aussi ce mouvement comme le cas limite d'un mouvement elliptique et en conclut : « Le corps ne passera pas au-delà [du centre]. » Mais il ajoute aussitôt : « On peut même assurer qu'il ne rebroussera pas chemin. Car on ne saurait assigner aucune cause qui le réfléchisse en sens contraire. » Montucla est donc clairement opposé à la solution d'Euler, mais aussi, par anticipation, à celle de D'Alembert car, pour lui, le point P parvenu en O doit y rester !

Cette opinion inattendue, et peut-être plus dérangeante encore que celle d'Euler puisqu'elle implique une annihilation instantanée d'une vitesse infinie, s'appuie sur une remarque mathématique. Montucla observe en effet que si P, à la distance r de O, s'en approche sous l'action d'une force f proportionnelle à $1/r^2$, sa vitesse V croît moins vite que cette force quand r tend vers 0, car, selon lui, elle est seulement proportionnelle à $1/r$. Cette dernière assertion est erronée, car V varierait approximativement comme $1/\sqrt{r}$, mais cette correction ne fait qu'appuyer davantage son argument qui est d'en conclure que, dans la lutte entre l'attraction et la vitesse infinies en O, c'est la première qui l'emporte. On devine que, parmi les

LIMITE ET LIMITE

Dans sa solution du problème de la chute d'un point matériel sur un point attractif, Euler invoquait un audacieux « passage à la limite ». Or ce procédé ne fonctionne pas toujours : la figure ci-dessous montre les trois premières étapes d'un processus qui, poursuivi indéfiniment, conduit les lignes brisées rouges à se confondre, à la limite, avec le segment bleu AB. Mais si la longueur de AB est a , celle de chaque ligne rouge entre A et B est $a\sqrt{2}$. Dans ce cas, le passage à la limite ne permet donc pas d'obtenir la longueur de AB à partir de celle des lignes rouges.



contemporains de Montucla, il s'en trouvait sans doute bien peu pour admettre la possibilité d'un tel arrêt. Sa conclusion fut pourtant reprise au siècle suivant, fondée sur une vitesse qui deviendrait imaginaire si P dépassait O . Mais cet argument avait déjà servi à soutenir la solution d'Euler et, de toute façon, cette vitesse imaginaire était illusoire car les calculs étaient faux!

UN TROU NOIR PONCTUEL

Le débat théorique évoqué ici est resté marginal, car le mouvement gravitationnel rectiligne, sans application en astronomie, ne semble pas avoir beaucoup préoccupé les auteurs d'ouvrages sur la mécanique, et moins encore le problème posé par la chute jusqu'au centre d'attraction. Aussi le fin mot de l'affaire ne sera-t-il que tardivement révélé, au moins par Paul Painlevé au premier tome de son *Cours de mécanique professé à l'École polytechnique*, publié en 1930.

À propos du mobile ponctuel parvenu au centre d'attraction avec une vitesse infinie, il se contente de noter qu'après cet événement, «la discussion ne peut être poursuivie». Ici, aucune tentative de justifier mathématiquement l'arrêt du mouvement au centre d'attraction, comme ce fut le cas, en particulier, de la part de Montucla qui semble avoir eu raison avant tout le monde. L'arrêt du mobile est inhérent à la théorie même. Painlevé déclare simplement qu'après l'arrivée du mobile au centre d'attraction, la mécanique rationnelle n'a plus rien à dire. En ce qui la concerne, le mouvement du mobile s'arrête nécessairement là, et toutes les spéculations au sujet de ce mouvement après cet événement sont dépourvues de valeur scientifique.

Euler et D'Alembert n'avaient pas prévu un tel dénouement, mais il faut reconnaître que même jusqu'à l'époque de Painlevé, après deux siècles de mécanique newtonienne triomphante, seulement tempérés par les succès de la théorie de la relativité au début du xx^e siècle, cet aveu d'impuissance à prédire ce qu'il adviendrait du mobile une fois le centre atteint n'était pas facilement envisageable.

La cause précise de l'échec de la mécanique à prédire ce qu'il adviendra au centre d'attraction réside en ce qu'elle interdit que la trajectoire d'un point matériel passe par un point où sa vitesse et la force qui le sollicite ne seraient pas dûment définies, ce qui exclut d'éventuelles valeurs infinies. Tout simplement parce que de telles données imparfaites en ce point ne constituent pas des conditions initiales exploitables pour déterminer le comportement ultérieur du mobile. Cela dit, l'efficacité de la mécanique rationnelle n'est pas en cause. L'objection de Paul Appell rapportée plus haut revient à dire que la «délicate question» posée

au départ n'est pas pertinente du point de vue de la mécanique rationnelle. En effet, avec l'abstraction d'un point où rien n'existe et qui exerce pourtant une force attractive sur les corps matériels, le cadre du problème s'écarte délibérément du monde réel où doit opérer cette théorie. Dans ce cadre fictif, le centre d'attraction est une singularité qui, pendant

Euler et D'Alembert n'avaient pas prévu un tel dénouement

longtemps, n'a guère troublé les théoriciens, mais qui sort du champ opératoire de la mécanique rationnelle. Pour elle, le mouvement du point matériel en chute libre doit nécessairement s'arrêter en ce point singulier qui se comporte alors comme une sorte de trou noir ponctuel, avec «absorption» finale et définitive du mobile par cette singularité.

Un tel trou noir purement mathématique semble bien éloigné des trous noirs dont s'occupe l'astrophysique moderne et dont l'existence, dans le cadre de la mécanique newtonienne, avait déjà été prévue au $xviii^e$ siècle, en particulier par Laplace au second tome de son *Exposition du système du monde* (1796). Ces trous noirs sont généralement de dimension non négligeable, comme ceux d'origine stellaire. Ils peuvent même être gigantesques, comme les trous noirs supermassifs dont l'existence est soupçonnée au cœur des galaxies. Mais l'astrophysique envisage aussi la possibilité de trous noirs quasi ponctuels, comme les microtrous noirs primordiaux aux propriétés quantiques qui seraient apparus aux premiers instants de l'Univers.

En fait, la principale différence réside dans la façon d'appréhender ces singularités. Le point matériel, parvenu au centre d'attraction sur lequel il s'est précipité avec une vitesse infinie, y subit une sorte de mort mathématique. Les savants du $xviii^e$ siècle ignoraient qu'en prédisant son mouvement au-delà, ils lui inventaient une vie après la mort. Aujourd'hui, que les trous noirs rencontrés soient gigantesques ou ponctuels, les scientifiques sont conscients des limites de leurs théories. Et si certains cherchent à savoir ce qui survient au cœur d'un trou noir ou à la naissance de l'Univers, c'est en invoquant de nouvelles théories. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Le Rond D'Alembert, **Opuscules mathématiques (tome VII)**, 1780.
gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k62457r/f113

L. Euler, **Mechanica (tome I)**, 1736.
<http://eulerarchive.maa.org/pages/E015.html>

P.-S. Laplace, **Traité de Mécanique céleste (tome I)**, 1799.
gallica.bnf.fr/ark:/12148/btv1b8615811x.image

R

ENDEZ-VOUS

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

LES CARRÉS MAGIQUES D'AIRES

On s'intéresse aux carrés magiques depuis plus de deux millénaires. Des amateurs d'énigmes leur ont récemment associé des exigences géométriques, ce qui enrichit spectaculairement le domaine.

L'AUTEUR



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



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

En juin 2013, cette rubrique était consacrée aux carrés magiques géométriques, les « carrés géométriques », une merveilleuse invention de Lee Sallows. Cet ingénieur britannique en a développé la théorie pour réaliser une impressionnante collection de solutions réunies dans son livre *Geometrie Magic Squares. A Challenging New Twist Using Colored Shapes Instead of Numbers* (Dover, 2013).

Lee Sallows a introduit la géométrie dans l'arithmétique des carrés magiques de la façon suivante (voir l'encadré 1) : les formes géométriques de chaque case d'un tableau carré sont différentes, mais de même aire ; les formes des cases de toutes les lignes, toutes les colonnes et des deux diagonales constituent les pièces d'un même puzzle, par exemple un même rectangle.

En décembre 2016, William Walkington, un passionné britannique de divertissements mathématiques, a découvert une géométrisation plus directe des carrés magiques. Il a nommé son invention *area magic squares*, que nous traduirons par *carrés magiques d'aires*. Ces objets géométrico-arithmétiques suggèrent une famille de problèmes qui exigent des techniques spécifiques d'attaque dont seul un petit nombre est aujourd'hui maîtrisé. Ces problèmes donneront du fil à retordre à des générations d'amateurs de récréations mathématiques : un nouveau chapitre du domaine ludique des carrés magiques vient de s'ouvrir !

Un carré magique classique est un tableau de nombres entiers, tous différents, possédant n lignes et n colonnes, ayant la rare propriété qu'en additionnant les nombres de chaque ligne ou de chaque colonne, on trouve toujours la même somme S . On exige aussi que le total des nombres de chacune des deux diagonales soit égal à S ; si ce n'est pas le cas, le carré est seulement « semi-magique ». Pour un carré de taille $n \times n$, cela conduit donc à $2n+2$ sommes de n nombres qui doivent toutes valoir S . On s'amuse parfois à satisfaire des contraintes supplémentaires : que les entiers utilisés soient consécutifs, ou que ce soient tous des nombres premiers, etc.

L'idée des carrés magiques d'aires est de prendre un carré magique classique, de taille $n \times n$, et de lui associer le découpage d'une surface carrée en n^2 formes correspondant aux n^2 cases du carré magique, avec la contrainte que chacune des n^2 formes du découpage doit avoir une aire proportionnelle au nombre correspondant du carré magique utilisé (voir l'encadré 1, dessin b).

UNE MÉTHODE GÉNÉRALE DE CONSTRUCTION

Est-il toujours possible d'associer un carré magique d'aires à un carré magique usuel donné ? Est-ce difficile ?

La réponse est qu'il existe une méthode simple et systématique permettant d'associer, à chaque carré magique usuel connu, un carré ➤

CARRÉS GÉOMAGIQUES ET CARRÉS MAGIQUES D'AIRES

1

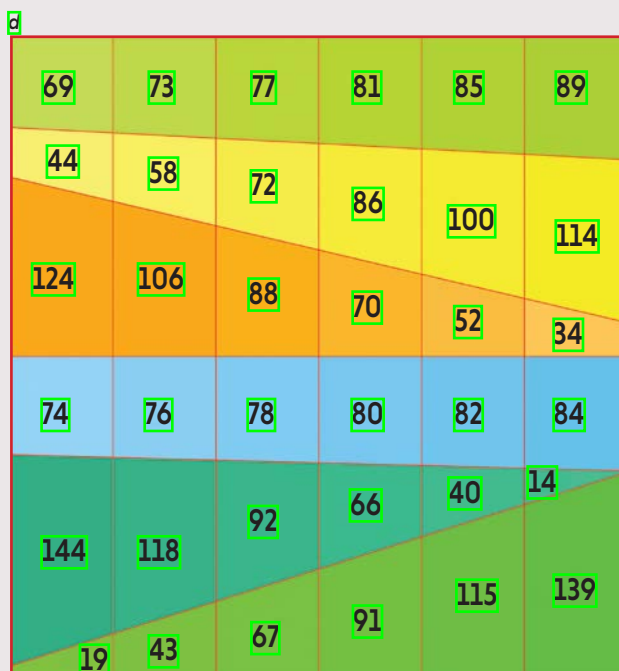
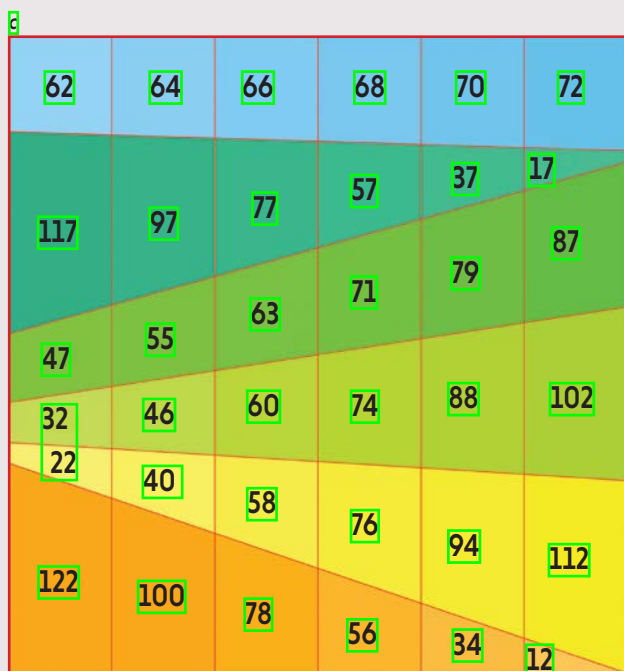
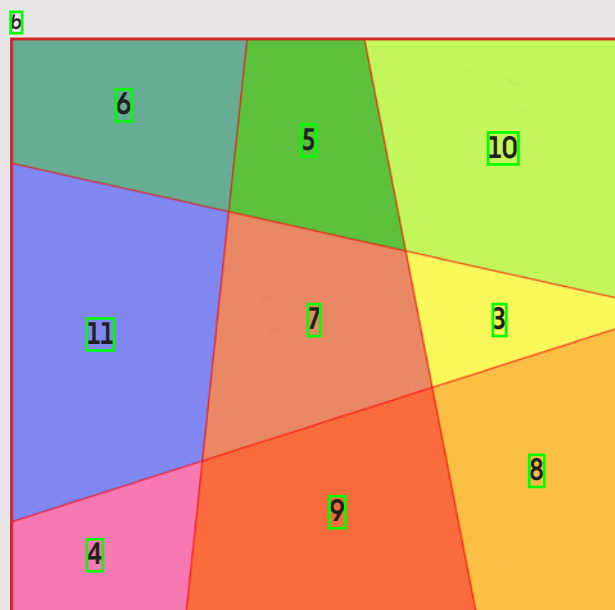
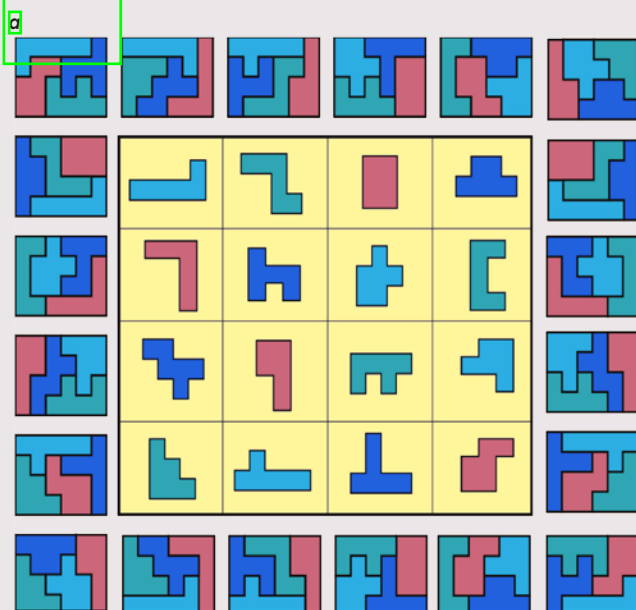
Dans le tableau central de formes donné en a, chacune des quatre rangées définit un puzzle aboutissant au rectangle de taille 6×4 . Il en va de même pour chacune des quatre colonnes et pour les deux diagonales de ce tableau – un carré géomagique – découvert par Lee Sallows.

Dans le carré b, les lignes de découpe en 9 quadrilatères sont telles que l'aire de chacun est proportionnelle au nombre écrit : c'est un carré magique d'aires. Ce découpage a été trouvé par William Walkington par tâtonnement. Il n'était pas certain que la figure dessinée, qui est correcte quand on calcule avec deux décimales,

le reste encore quand on exige plus de précision.

Un programme de Walter Trump par une méthode d'approximation a précisé les coordonnées des points de la construction assurant une exactitude des contraintes sur les aires avec une précision de 14 décimales.

On a depuis prouvé que les équations exprimant les contraintes ont une solution exacte correspondant au dessin (donc avec une infinité de décimales), bien qu'aucune expression simple n'en ait été proposée. En c et d sont représentés des carrés magiques d'aires d'ordre 6 calculés par William Walkington.



magique d'aires utilisant ses nombres. La méthode est absolument générale et semble donc résoudre le problème d'une manière rapide et définitive. Nous allons voir cependant qu'elle n'est pas totalement satisfaisante; c'est pourquoi nous ajouterons une contrainte supplémentaire dans la définition, ce qui rendra alors le problème plus délicat et fixera des défis intéressants.

En quoi consiste la méthode générale? On part d'un carré magique quelconque et du tableau dessinant les cases où sont placés les nombres. On déplace quelques segments verticaux délimitant ces cases afin que dans chaque ligne horizontale du carré magique initial, les cases carrées deviennent des rectangles aux aires proportionnelles aux nombres présents dans les cases (on peut, de la même façon, agir sur les colonnes de formes et déplacer des segments horizontaux).

Ces manipulations sont toujours possibles, justement parce que la somme des nombres d'une même ligne (ou d'une même colonne) est constante. Prenons un exemple de carré magique 3×3 où la somme est 15 (voir l'encadré 2, dessin a). On prend donc comme unité sur chaque segment horizontal $1/15$ de la longueur du côté du carré à découper, et on déplace les segments verticaux pour que les bases des rectangles aient pour longueur $4/15, 9/15, 2/15$ pour les cases de la première ligne. Pour la seconde ligne, les bases seront $3/15, 5/15, 7/15$; et pour la troisième, elles seront $8/15, 1/15, 6/15$. On obtient bien ce qu'on recherchait: les cases ont des aires proportionnelles aux nombres inscrits à l'intérieur (voir l'encadré 2, dessin b).

Il est bien clair que pour tout carré magique initial, la méthode produira un carré magique

2

TRANSFORMATIONS DES CARRÉS MAGIQUES D'AIRES

Dans la transformation par la méthode des rectangles, on déplace quelques segments internes délimitant les cases du tableau a de façon que les aires des rectangles obtenus soient proportionnelles aux nombres écrits en leur centre. On peut jouer sur les segments verticaux (b) ou faire coulisser des segments horizontaux (c). On peut ensuite déformer les cases du carré sans en changer les aires: on déforme certaines des lignes, en prenant garde de ne changer aucune aire. Ici huit côtés de rectangles ont été remplacés par des lignes plus compliquées (d). Dans la définition complète d'un carré magique d'aires, on exigera que le découpage consiste en lignes continues (et sans superpositions) joignant les bords opposés du carré mis en pièces (e).

Malheureusement, la méthode des rectangles

et sa généralisation ne produisent pas de tels découpages, et il faut donc chercher d'autres méthodes. Lorsque, en plus d'être continues et sans superpositions, on impose aux lignes de découpage d'être des segments de droite, les carrés magiques d'aires sont alors qualifiés de linéaires.

Au XVII^e siècle, le mathématicien français Frénicle de Bessy a énuméré exactement 880 carrés magiques d'ordre 4 utilisant les entiers de 1 à 16. Le carré magique d'aires associé à l'un d'eux (f) est obtenu par découpage du carré de base par trois lignes continues en bleu liant les côtés haut et bas du carré, et trois lignes continues en rouge liant les côtés droit et gauche (ce carré magique d'aires n'est pas linéaire).



d'aires – et même un second si, au lieu de jouer sur les lignes de cases, on joue sur les colonnes en faisant glisser quelques segments horizontaux (voir l'encadré 2, dessin c).

La méthode, comme Lee Sallows en a fait la remarque, se généralise et donne une infinité de carrés magiques d'aires associés à chaque carré magique particulier. Il suffit de partir du résultat de la mise en rectangles, et de modifier certains côtés des rectangles en remplaçant les droites par des lignes qui ne changent pas les aires. Si, par exemple, la ligne dévie vers la droite et diminue l'aire de la pièce à droite de la ligne, on s'arrange pour qu'elle dévie aussi vers la gauche de façon à « rendre ce qu'elle a pris ». Ainsi, dans le dessin d de l'encadré 2, on est parti du carré magique d'aires obtenu par la méthode de la « mise en rectangles » et on a appliqué huit fois l'idée de la déformation qui ne change pas les aires; le carré magique d'aires obtenu est compliqué, mais correct.

Le défaut de la méthode des rectangles et de la méthode des déformations de segments est que les lignes qui délimitent les colonnes de formes sont des lignes brisées: les segments déplacés ne se rejoignent pas directement et, en conséquence, les lignes de découpe verticales n'apparaissent pas continues. Peut-on éviter ces inélégantes ruptures ?

ÉVITER LES INÉLÉGANTES LIGNES DE DÉCOUPAGE

L'exemple b de l'encadré 1 montre que oui et, puisque c'est possible au moins dans certains cas, ajoutons à la définition des carrés magiques d'aires formulée plus haut qu'on exigera que le découpage des formes provienne de $n-1$ courbes continues joignant le côté gauche du carré découpé à son côté droit, et d'autant de courbes continues joignant le côté haut du carré au côté bas, et cela sans que les deux types de courbes se superposent par endroits. Je vous épargne la longue et indigeste définition mathématique complète, car le dessin e de l'encadré 2 rend l'idée claire.

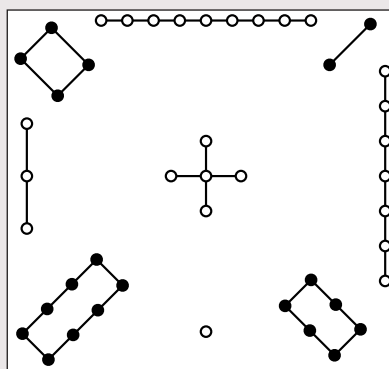
Le plus ancien carré magique que l'on connaisse est chinois: c'est celui de Luo Shu, du 11^e siècle avant notre ère, et on le nomme « diagramme des neuf palais » (voir l'encadré 3). En plus des propriétés évoquées, il possède celle d'utiliser une fois exactement chaque nombre de 1 à 9. En ajoutant une unité à chaque case de ce carré millénaire, on obtient un carré magique utilisant une fois exactement chaque nombre de 2 à 10. En recommençant, on aura un carré magique utilisant une fois exactement les nombres de 3 à 11, et ainsi de suite.

Ces carrés magiques les plus simples et les plus élégants possible intéressent particulièrement les amateurs. Bien sûr, une fois l'idée des carrés magiques d'aires formulée, ils ont voulu en trouver qui soient associés à ces

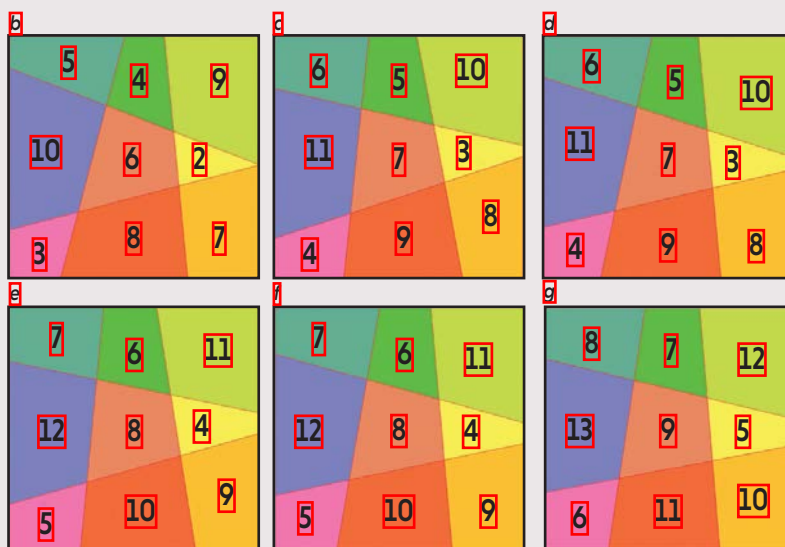
3

LES CARRÉS MAGIQUES D'AIRES LINÉAIRES

Le carré magique de Luo Shu est connu en Chine depuis plus de 2 000 ans. Il est lié aux traditions mathématiques et divinatoires et c'est une configuration géométrique particulièrement appréciée dans le Feng Shui, l'art du placement des objets dans les lieux d'habitation. Il est composé des neuf entiers de 1 à 9. On le représente souvent avec des points liés (a). La recherche d'un carré magique d'aires linéaire (où les lignes de découpe



sont des segments de droite) fondé sur le Luo Shu a été vaine. Heureusement, on trouve des carrés magiques d'aires linéaires pour les entiers entre 2 et 10 (une solution, b), pour les entiers entre 3 et 11 (deux solutions, c et d), pour les entiers entre 4 et 12 (deux solutions, e et f), pour les entiers entre 5 et 13 (deux solutions, dont une seule est représentée ici, g).



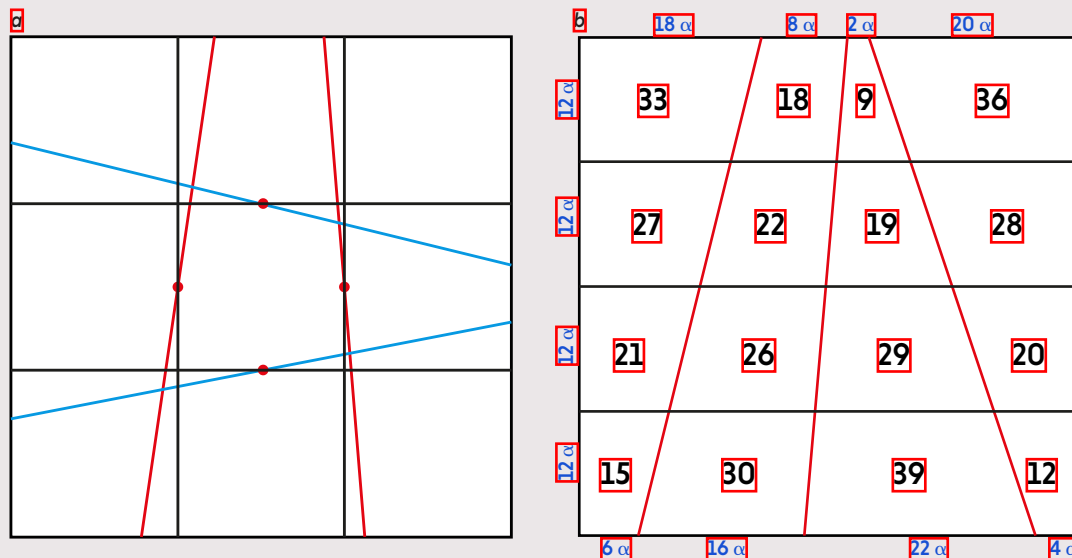
modèles de base. Et pour plus de simplicité encore, ils ont voulu en trouver qui soient linéaires (n'utilisant pour le découpage que des droites comme dans l'exemple b de l'encadré 1). Est-ce toujours possible ?

La réponse est venue d'un programme informatique de recherche systématique. Les résultats ont été indiqués dans l'encadré 3.

CONSTRUCTION DE CARRÉS D'AIRES MAGIQUES LINÉAIRES

4

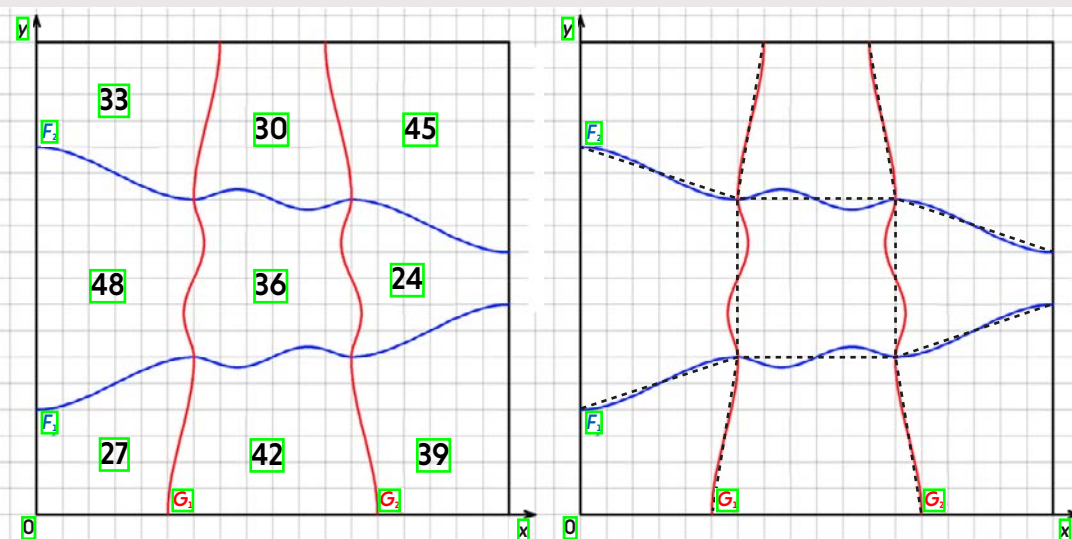
Pour construire des carrés magiques d'aires linéaires de type 3×3 , on trace des droites de découpage pouvant pivoter autour des points rouges (a). Quand ces droites pivotent, la somme des aires des quadrilatères d'une même colonne ou d'une même ligne reste inchangée. On obtient donc, à l'exception des diagonales, un découpage qui satisfait la définition d'un carré magique d'aires linéaire. Le carré magique d'aires montré en b a été trouvé par Walter Trump ; ses points de construction ont des coordonnées entières si le paramètre α est entier.



EN PRENANT DES COURBES BIEN LISSES...

5

La complexité de la figure ci-dessous à gauche (et des formules utilisées pour l'obtenir) n'est qu'apparente. On part d'un carré magique d'aires ayant exactement les mêmes 12 points de construction (deux sur le côté en haut du carré, quatre sur chacune des lignes bleues, et deux en bas) qui sont reliés par des segments de droite (ci-dessous à droite). On remplace ensuite ces segments par des courbes bien lisses et se recollant parfaitement, sans changer les aires des neuf morceaux du découpage (les lignes utilisées ayant localement des centres de symétrie).



$$F_1(x) = \begin{cases} H(54, 3, 5, x) & \text{quand } 0 \leq x < 6 \\ J(x) & \text{quand } 6 \leq x < 12 \\ H(54, 15, 7, x) & \text{quand } 12 \leq x < 18 \end{cases}$$

$$G_1(y) = \begin{cases} H(108, 3, 11/2, y) & \text{quand } 0 \leq y < 6 \\ J(y) & \text{quand } 6 \leq y < 12 \\ H(108, 15, 13/2, y) & \text{quand } 12 \leq y < 18 \end{cases}$$

$$F_2(x) = 9 - F_1(x)$$

$$G_2(y) = 9 - G_1(y)$$

$$H(a, x_0, y_0, x) = (x - x_0)(x - x_0 - 27)/a + y_0$$

$$J(x) = (9 - x)[(9 - x)^2 - 9]^2/180 + 6$$

La méthode pour parvenir à des résultats, soit négatifs (inexistence de certains types de carrés), soit positifs (détermination des coordonnées des points permettant la construction) repose sur une idée assez simple quand il s'agit des carrés magiques d'aires à neuf cases, et qui est la base du programme informatique donnant les solutions présentées dans l'encadré 3.

UNE MÉTHODE POUR LES CARRÉS MAGIQUES D'AIRES LINÉAIRES DE 9 CASES

On considère quatre droites qui pivotent autour des points situés au milieu des quatre droites découpant le carré en neuf cases de même taille (voir l'encadré 4). On remarque par exemple que lorsque la droite pivotant autour du point milieu situé en haut bouge, la somme des aires des trois quadrilatères du haut reste constante et égale à $\frac{1}{3}$ de l'aire totale du carré. Il en va de même pour les trois quadrilatères situés à droite, dont la somme des aires reste constante quand on fait pivoter la ligne de découpe de gauche, et de même encore pour les trois quadrilatères situés en bas ou à gauche.

On en déduit que la somme des aires des trois quadrilatères de la colonne centrale reste aussi constante quand les quatre lignes pivotent, de même que la somme des aires des trois quadrilatères de la ligne centrale. À l'exception des conditions sur les diagonales, qu'il faut traiter à part, en faisant tourner les quatre droites et en évitant les situations créant des intersections non voulues, on a donc toujours un carré magique d'aires linéaire.

En outre, tous les carrés magiques d'aires linéaires pour un découpage en neuf du carré seront des cas particuliers de ce schéma. Seuls quatre paramètres (les angles des droites pivotantes) déterminent une configuration, et donc l'exploration systématique de toutes les possibilités devient envisageable. C'est elle qui a permis de découvrir les résultats mentionnés. On trouvera plus de détails sur la méthode sur le site internet de l'Allemand Walter Trump, à l'adresse: www.trump.de/magic-squares/area-magic/Third-Order%20Linear%20Area%20Magic%20Squares.pdf

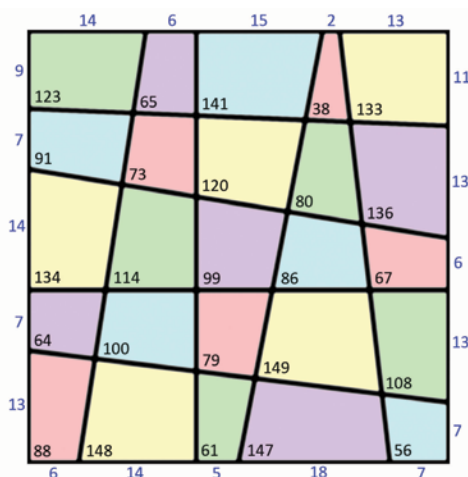
Si on n'exige plus que les nombres utilisés soient consécutifs, les carrés magiques sont bien plus nombreux. On peut donc imposer aux découpages des contraintes encore plus fortes et, par exemple, n'accepter que les découpages où toutes les courbes joignant le côté droit au côté gauche du carré soient parfaitement horizontales. Le dessin b de l'encadré 4 représente un tel carré magique d'aires d'ordre 4, trouvé par Walter Trump. En prenant un nombre entier pour le paramètre α , on a un carré magique d'aires dont toutes les coordonnées des points de construction sont

Toutes sortes d'idées ont été explorées, mais le champ ouvert est sans limites

des nombres entiers, ce qui rend facile la vérification de son exactitude.

Plus esthétiques, mais plus difficiles à calculer, les carrés magiques d'aires où les lignes de découpage sont de belles courbes continues non rectilignes ont aussi été l'objet de recherches. L'encadré 5 en montre une avec les équations des courbes utilisées.

Pour trouver des carrés magiques d'aires d'ordre 5, Walter Trump a proposé d'en assouplir un peu la définition: il ne recherche que ceux dont les coordonnées des points de construction sont des entiers, mais il exige pour les aires une condition moins forte que celle de la définition complète: «L'entier le plus proche de l'aire de chacune des formes doit être égal au nombre correspondant du carré magique servant de base.» Il dénomme ces constructions des carrés magiques d'aires arrondis (*rounded area-magical-square*). On a représenté ci-dessous un carré magique d'aires arrondi d'ordre 5.



On le voit, toutes sortes d'idées ont été explorées, mais le champ ouvert est sans limites, et la moisson de configurations associant magiquement arithmétique et géométrie ne fait que commencer. ■

BIBLIOGRAPHIE

W. Trump, *Area magic squares*, <https://bit.ly/2J7u9sP>, consulté le 26/1/2018.

W. Walkington, *Area magic squares and tori of order 3*, <https://bit.ly/2J3zKkd>, consulté le 26/1/2018.

W. Walkington, *Area magic squares and tori of order 4*, <https://bit.ly/2pSUamZ>, consulté le 26/1/2018.

J. Van Delden, *Area magic squares of order 3*, 5 mars 2017 (PDF téléchargeable sur <https://bit.ly/2GKkha6>).

L. Sallows, *Geometric Magic Squares. A Challenging New Twist Using Colored Shapes Instead of Numbers*, Dover, 2013.

L'AUTEUR



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

APOLLON ET LA PETITE SOURIS

Le dieu Apollon, figure emblématique du panthéon grec, est souvent associé à des attributs ou des symboles glorieux qui rendent hommage à sa gloire et à sa puissance. Pourtant, c'est parfois de souris qu'il est accompagné...

U

ne galerie au Louvre, un salon, un bassin et un bosquet à Versailles, plusieurs statues au Vatican... Apollon, dans ses représentations les plus célèbres, est toujours à son avantage, beau, athlétique, paré des meilleurs atours. Il y a de quoi: le dieu grec, fils de Zeus et de Lété, jumeau d'Artémis, est le patron des arts, de la beauté. Chef des neuf muses, il est aussi le dieu de la guérison et capable de divination: il rendait ses oracles *via* la pythie, à Delphes.

En peinture ou en sculpture, il est le plus souvent doté d'attributs glorieux,

notamment un arc d'argent ou une lyre (voir la statue page ci-contre). Les animaux qui le symbolisent sont tout aussi prestigieux: le cygne, le loup... Pourtant, en quelques occasions, c'est une souris qui l'accompagne, par exemple sur des pièces de monnaie trouvées en Anatolie (voir ci-contre). Pourquoi une telle association digne d'une fable de La Fontaine? Les raisons sont multiples et d'ordre médical.

On en trouve la première trace dans l'*Iliade*, d'Homère. Le dieu, souvent violent, fait s'abattre la peste sur les Grecs d'Agamemnon, avec ses flèches d'argent et reçoit l'épithète (ou épiclese) *Smintheus*, c'est-à-dire «roi des souris». Déjà, à l'époque, les rongeurs étaient connus pour transmettre des maladies.

C'est ainsi qualifié qu'il est honoré dans un temple de la ville de Hamaxitos, en Troade, dans le nord-ouest de l'Anatolie. Cette cité aurait été érigée par des colons crétois qui décidèrent de l'endroit



grâce à des souris sorties de la terre, conformément aux prédictions de l'oracle... de Delphes, et donc d'Apollon. D'ailleurs, à en croire les *Histoires variées* de Claude Élien, un historien romain de la fin du II^e siècle, «les souris sont les plus prophétiques des animaux». Apollon mérite donc bien son titre de «roi des souris»! Qu'en est-il de la médecine?

DEUX SOURIS, MATIN ET SOIR

D'abord, rappelons qu'Apollon est le père d'Asclépios, le dieu de la médecine formé à cet art par le centaure Chiron. Durant toute l'Antiquité, la souris faisait partie de la pharmacopée.

Sur deux pièces
trouvées en Anatolie,
le dieu Apollon
est accompagné
de souris. C'est
moins glorieux
que la lyre...



Ainsi, au 1^{er} siècle, le romain Pline l'Ancien affirme dans son *Histoire naturelle*: «Pour ceux qui craignent la paralysie, on préconise comme très utile la graisse de loir ou de souris bouillie.»

A la même époque, dans *De Materia Medica*, Dioscoride recommande en cas de salivation importante de mettre dans la bouche d'un enfant une souris vivante. Selon le médecin et pharmacologue grec, la souris a une autre indication: les souris coupées sont bénéfiques lorsqu'on les applique sur des piqûres de scorpion.

La tradition est beaucoup plus ancienne. Dans le papyrus Brugsch, ou papyrus de Berlin 3027, daté de 1450 avant

notre ère, on découvre qu'en Égypte antique, pour soulager la douleur des premières dents qui percent, «on fait manger à l'enfant et à sa mère une souris cuite. Les os de celle-ci sont placés à son cou dans une étoffe de lin à laquelle on fait sept nœuds.» Doit-on voir dans ces liens entre rongeurs et dentition infantile l'origine du mythe de la petite souris qui, encore aujourd'hui, vient «acheter» les dents de lait cachées sous l'oreiller?

Peut-être. Toujours est-il que l'on se rassure de la disparition de la souris de la liste des médicaments, ces pratiques peu orthodoxes n'ayant bien sûr pas résisté à l'avènement de la médecine moderne!

Dans les faits, ce n'est pas tout à fait vrai... En effet, l'usage médical de la souris aurait perduré jusqu'au début du 20^e siècle dans les campagnes d'Angleterre et du Pays de Galles. Contre la salivation excessive, mais aussi l'incontinence et la coqueluche, on recommandait de manger une souris écorchée, frite, bouillie ou servie en tarte. Apollon n'était assurément pas le dieu de la cuisine! ■



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

LES AUTEURS



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

LES TRANSFORMATIONS DU TRANSFORMATEUR

**Comment miniaturiser les transformateurs?
En augmentant de plusieurs ordres de grandeur
la fréquence du courant électrique à convertir...**

Jusqu'où réduira-t-on la taille ou le poids des chargeurs utilisés pour recharger les batteries de nos ordinateurs portables ou de nos téléphones? Ces dispositifs comportent des transformateurs fournissant une tension électrique de quelques volts alors qu'ils sont branchés sur les 220 volts du secteur. Leur miniaturisation se heurte alors aux limites qu'imposent les phénomènes physiques sur lesquels ils sont fondés. Quels sont ces phénomènes et quelles sont ces limites?

DEUX BOBINES ET UN NOYAU DE FER

Un transformateur électrique permet de modifier l'amplitude d'un courant ou d'une tension alternative entre la source d'électricité et la « charge », c'est-à-dire l'appareil qui lui est branché et qui consomme de l'énergie électrique. Il est en général composé de deux bobines de fil de cuivre qui entourent un noyau de métal magnétique en forme de cadre ou de tore (voir l'encadré page ci-contre). Son fonctionnement exploite l'induction électrique, qui combine deux phénomènes

physiques: d'une part, tout courant électrique crée un champ magnétique; d'autre part, tout champ magnétique variable induit un champ électrique.

Pour mieux comprendre un tel dispositif et saisir pourquoi il est difficile à miniaturiser, imaginons pas à pas la fabrication d'un transformateur idéal.

En guise de « circuit primaire » du transformateur, formons une boucle avec du fil de résistance négligeable et appliquons à ses bornes une tension électrique continue. Bien que la résistance électrique soit nulle, l'intensité du courant ne devient pas infinie, mais démarre de zéro puis croît linéairement avec le temps. Pourquoi?

Lorsque le courant se met à circuler, apparaît autour de la boucle un champ magnétique. La variation de ce dernier crée au voisinage du fil un champ électrique proportionnel à la vitesse de variation du champ magnétique, conformément aux lois de l'induction mentionnées plus haut. Ce champ électrique s'oppose à l'établissement du courant: c'est la loi de Lenz. L'effet sur toute la boucle est alors l'apparition d'une tension induite égale et opposée à la tension appliquée.

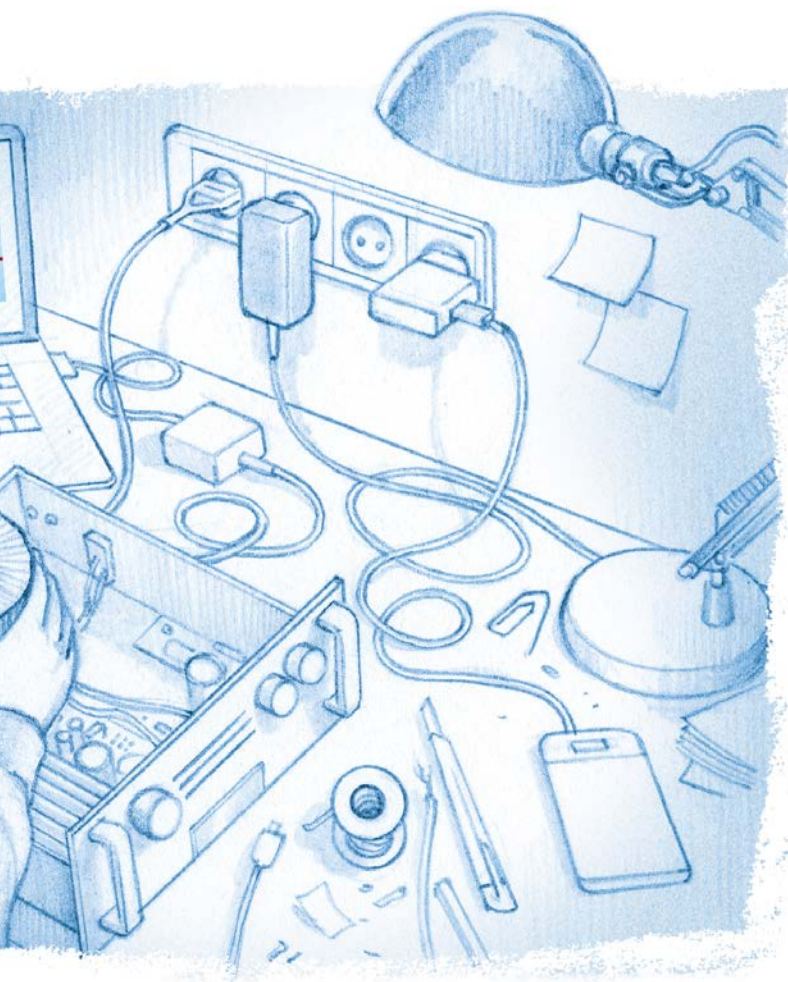
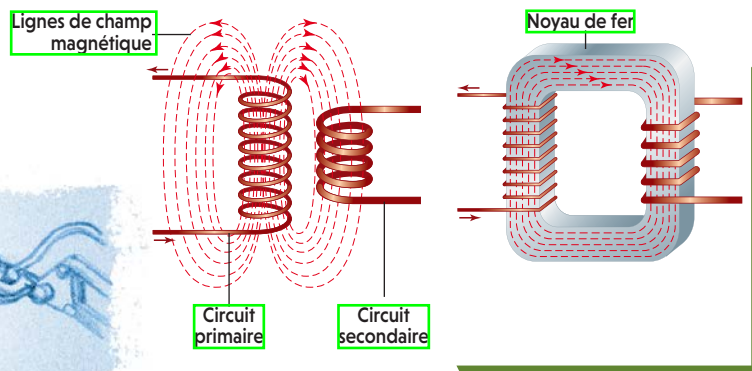


En guise de « circuit secondaire », plaçons quasiment au même endroit que la boucle primaire une boucle en circuit ouvert, où aucun courant ne circule. Puisque cette boucle secondaire subit le même champ électrique, il apparaît à ses bornes une tension égale à celle induite dans la première, donc exactement opposée à la tension du circuit primaire. Nous avons ainsi réussi à transférer une tension d'un circuit à l'autre, sans contact.

DU PRIMAIRE AU SECONDAIRE

Un transformateur électrique comporte un bobinage primaire et un bobinage secondaire. Le courant circulant dans le bobinage du circuit primaire engendre un champ magnétique concentré dans l'axe du solénoïde, mais qui atteint aussi le solénoïde du circuit secondaire. Celui-ci étant alors soumis à un champ magnétique alternatif (la tension primaire est supposée alternative), un courant alternatif y est induit. L'amplitude de la tension secondaire correspondante est égale à l'amplitude de la tension primaire multipliée par le rapport des nombres de spires des deux solénoïdes. Ici, le transformateur réduit donc la tension.

Pour que le transformateur puisse transférer efficacement l'énergie électrique du circuit primaire au secondaire, il ne doit pas y avoir de pertes de lignes de champ magnétique. C'est pourquoi les bobinages sont généralement enroulés autour d'un noyau de matériau ferromagnétique, qui canalise et concentre le champ magnétique.



Les transformateurs électriques sont le plus souvent des dispositifs assez encombrants...

conduit le courant certes très bien, mais pas parfaitement. Aussi, pour éviter l'échauffement excessif des fils par effet Joule, il est nécessaire d'utiliser des fils d'autant plus épais que l'on souhaite y faire circuler un courant important. Les bobinages ne peuvent donc pas occuper la même position, ce qui contribue à l'encombrement...

CANALISER LE CHAMP ET AUGMENTER LA FRÉQUENCE

Autre conséquence de la séparation entre le bobinage primaire et le bobinage secondaire: ces deux circuits ne subissent pas le même champ magnétique. Les lignes du champ magnétique créé par le bobinage primaire ressemblent à celles d'un barreau aimanté; ces lignes sortent d'une extrémité du bobinage et reviennent à l'autre pour se refermer (voir l'encadré ci-dessus). Où que l'on place le bobinage secondaire, le champ magnétique auquel il sera soumis ne ressemblera pas à celui induit au niveau du

Soyons plus malins: faisons, pour le circuit secondaire, deux tours complets de fil au lieu d'un. Le champ électrique agit sur chacune des deux boucles ainsi formées et la tension dans le secondaire sera alors le double de celle du primaire. Nous avons réalisé notre premier transformateur!

Ce résultat se généralise, y compris lorsque le circuit primaire est alimenté par une tension alternative: le rapport

des tensions entre le circuit secondaire et le circuit primaire est égal au rapport des nombres de tours des bobinages correspondants.

Cela donne l'impression qu'il est aisé de manipuler les tensions... sauf que nous avons considéré des fils parfaitement conducteurs et parfaitement minces afin de les placer exactement au même endroit. Or les transformateurs sont souvent réalisés avec du cuivre, matériau qui

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



▢ bobinage primaire, ce qui réduira l'efficacité du dispositif.

Il existe heureusement une solution à cette difficulté: canaliser les lignes de champ en utilisant un matériau magnétique. Les plus répandus sont le fer doux ou la ferrite. Tous deux ont la propriété de s'aimanter fortement sous l'effet d'un champ magnétique, mais de perdre cette aimantation induite lorsque le champ s'annule. Ces matériaux usinés sous forme d'un tore ou d'un cadre, le noyau, se comportent alors comme des tuyaux à champ magnétique: enroulés autour d'un même noyau, les deux bobinages seront traversés par les mêmes champs magnétiques variables, ce qui induira donc les mêmes champs électriques, comme dans notre transformateur idéal, même s'ils sont éloignés.

SATURATION MAGNÉTIQUE

Pourquoi ne peut-on pas miniaturiser ce dispositif, notamment lorsqu'on n'a pas besoin de puissance importante et que l'on peut se contenter de fils fins? Parce qu'une seconde limite intervient: la saturation du matériau magnétique.

Le problème est le suivant. Si l'on veut réduire la taille du transformateur en conservant les mêmes caractéristiques électriques, une étude quantitative montre qu'il faut augmenter le nombre de spires lorsqu'on diminue le diamètre des bobinages. Cela se traduit notamment par une augmentation du champ magnétique dans le noyau.

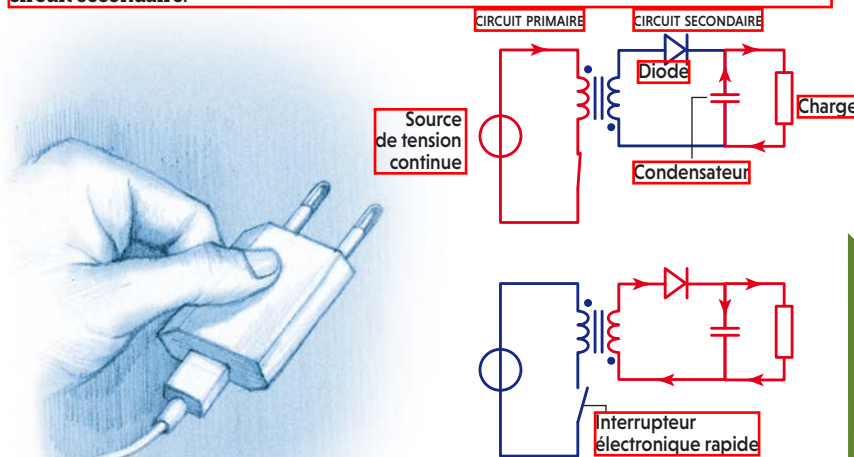
Or, à l'échelle microscopique, l'aimantation sous l'effet d'un champ magnétique est due à l'alignement progressif, sur la direction du champ, des aimants élémentaires constitués par certains électrons du matériau ou les boucles microscopiques de courant formées par les mouvements des électrons autour des atomes. Quand tous ces aimants sont alignés, le matériau atteint une aimantation maximale. Et si le champ augmente encore, le matériau ne peut alors plus canaliser davantage de lignes de champ: l'efficacité du transformateur décroît fortement.

Cela se comprend aussi d'un point de vue énergétique: soumis à une tension alternative, le matériau magnétique reçoit à chaque alternance l'énergie magnétique du premier bobinage, la stocke, puis la cède au second. La limite est ainsi donnée par la quantité d'énergie magnétique que le matériau peut stocker.

Le combat est-il perdu? Non! Puisqu'il y a une relation entre tension induite et variation du champ magnétique, au lieu d'augmenter le champ magnétique

CONVERTISSEUR FLYBACK

Les tout petits chargeurs de téléphones disponibles aujourd'hui intègrent un « convertisseur Flyback », un transformateur fonctionnant à très haute fréquence. Le circuit primaire, alimenté par une tension continue, est muni d'un interrupteur électronique qui s'ouvre et se ferme à haute cadence. Dans la phase où cet interrupteur est fermé, la tension appliquée entraîne l'augmentation progressive du courant (symbolisé en rouge) dans le circuit primaire. Le circuit secondaire est alors ouvert, car le courant induit est bloqué par une diode. Par conséquent, le champ magnétique augmente et le matériau magnétique accumule de l'énergie. Dans la seconde phase, l'interrupteur s'ouvre. Le courant s'annule (en bleu) dans le bobinage primaire et le secondaire prend le relais: le courant induit dans le secondaire circule dans le sens passant de la diode. Le matériau magnétique cède alors son énergie au circuit secondaire.



lorsque la taille du bobinage diminue, augmentons la cadence de ses variations.

C'est la solution adoptée dans de nombreux dispositifs modernes, par exemple dans le convertisseur Flyback qu'utilisent notamment les petits chargeurs de téléphones (voir l'encadré ci-dessus). La fréquence des grandeurs électriques qui traversent le transformateur est alors de plusieurs dizaines de kilohertz, au lieu des 50 hertz du secteur.

Dans ces dispositifs, la tension du secteur est au préalable redressée en tension continue. Cette dernière est appliquée au circuit primaire du transformateur comportant un interrupteur électronique qui s'ouvre et se ferme alternativement à un rythme très rapide. À chaque cycle, l'énergie transférée au circuit secondaire est donc au plus égale à l'énergie magnétique stockée à saturation dans le matériau magnétique comme auparavant, mais la limite du transfert d'énergie est ici déterminée par le temps de réponse du matériau magnétique à un champ magnétique alternatif (elle de l'ordre de quelques mégahertz). C'est l'un des obstacles à une miniaturisation plus poussée des transformateurs. ■

BIBLIOGRAPHIE

W. T. McLyman,
**Transformer and Inductor
Design Handbook**,
4^e édition, CRC Press, 2011.

P. M. Fishbane et al.,
**Physics for Scientists
and Engineers**, 3^e édition,
Pearson Prentice Hall, 2005.

E. Hecht, **Physique**,
De Boeck, 1999.



Une thèse révolutionnaire pour un grand livre de science

l'insoutenable
EINSTEIN L'A APPRIVOISÉE DANS SA THÉORIE DE LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE MAIS ELLE NARGUE
gravité de
LA PHYSIQUE QUANTIQUE : LA GRAVITÉ, FORCE POURTANT LA PLUS
l'univers
IMMÉDIATE À NOS SENS, RÉSISTE À L'INFINIMENT PETIT...
gabriel chardin
COMMENT AVOIR UNE VISION UNIFIÉE DE L'UNIVERS, DE SA NAISSANCE À SES DERNIERS INSTANTS?



[ESSAI LE POMMIER!]

Gabriel Chardin - 480 p. - 25 €

La gravité : Einstein
l'a apprivoisée,
la physique quantique
s'y casse les neurones...
Comment dès lors
avoir une vision unifiée
de l'Univers?
Gabriel Chardin
propose, carrément,
un nouveau modèle
d'Univers...

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



L'AUTEUR



HERVÉ LE GUYADER
professeur émérite de biologie
évolutive à Sorbonne
Université, à Paris

LA LEÇON DU PONGO DE TAPANULI

En 2017, une troisième espèce d'orang-outan a été identifiée, portant à sept le nombre d'espèces de grands singes. Mais qu'entend-on par espèce?

Dans la langue anglaise, deux mots nomment les singes. *Monkeys* correspond aux singes arboricoles du Nouveau Monde (les platyrrhiniens tels les ouistitis, singes hurleurs, singes-araignées...) et aux singes à queue de l'Ancien Monde (les cercopithécoïdes tels les cercopithèques, babouins, macaques...). *Apes* désigne les primates qui, avec l'espèce humaine, constituent le taxon des hominoïdes, à savoir les gibbons, orangs-outans, gorilles et chimpanzés. Les *great apes* ou grands singes sont quant à eux l'ensemble de ces primates sans les gibbons. Dans les ouvrages de zoologie des années 1970, on en comptait trois espèces et de multiples sous-espèces. Depuis quelques mois, avec la découverte d'une nouvelle espèce d'orang-outan, on est arrivé à sept espèces et onze sous-espèces! Pourquoi ces animaux à populations réduites apparaissent-ils si diversifiés? Cela tient peut-être à la manière dont on conduit les déterminations.

Les premiers critères utilisés pour décrire les espèces et sous-espèces de grands singes étaient la répartition géographique et les différences anatomiques. Depuis la fin du xx^e siècle, cependant, avec l'avènement du séquençage des gènes, puis des génomes, l'étude moléculaire complète ces critères. Dans le cas des grands singes, les analyses moléculaires poussées, réalisées à partir du séquençage de génomes complets, ont ainsi systématiquement confirmé le travail des anatomistes.

EN QUÊTE D'ESPÈCES

Grâce à ces travaux, on sait que les chimpanzés forment le groupe frère d'*Homo sapiens*, avec deux espèces: le chimpanzé commun *Pan troglodytes*, majoritairement sur la rive nord du Niger, et le chimpanzé pygmée ou bonobo, *P. paniscus*, qui occupe la rive sud (voir l'encadré pages 94 et 95). Le zoologiste américain Harold Coolidge décrivit cette dernière dès 1933, mais à partir de l'anatomie d'un seul individu, ce qui

Son visage est plus plat que celui des autres orangs-outans, et son crâne plus petit.



Son poil est épais et crépu, alors que celui de son voisin, l'orang-outan de Sumatra, est long et lâche.



Orang-outan de Tapanuli
Taille: 1,10 à 1,40 m
Longévité: 50 à 60 ans

EN CHIFFRES

800

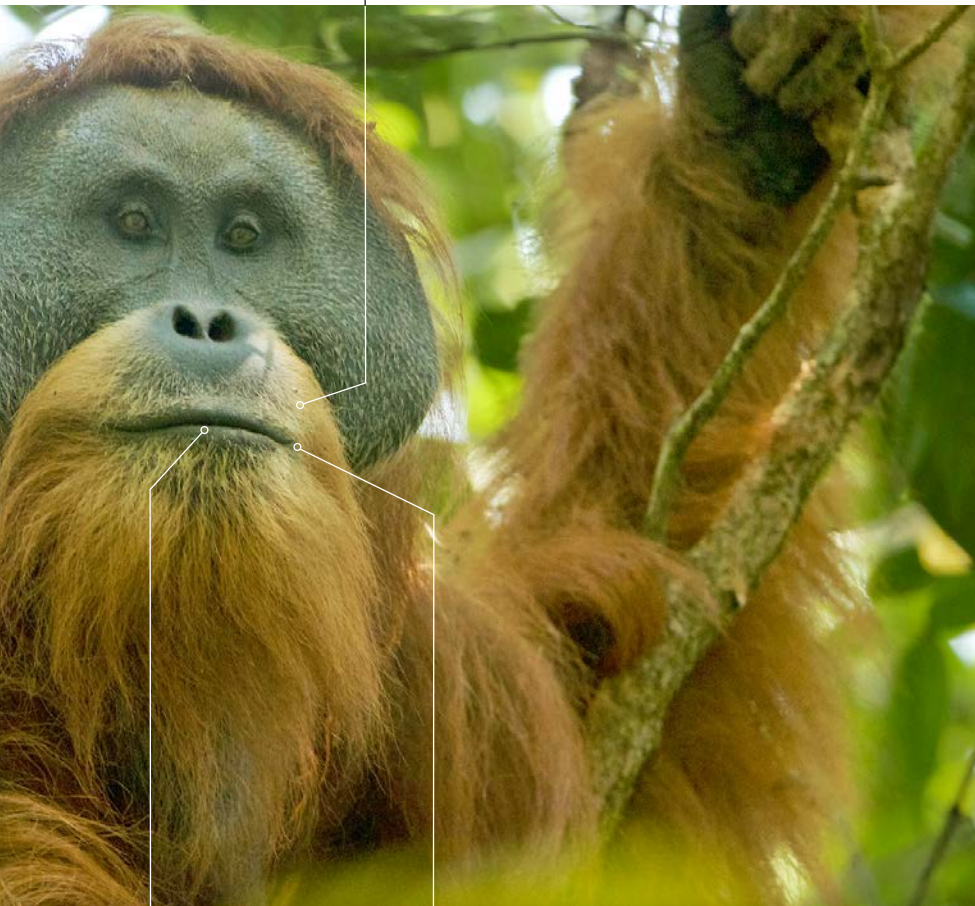
individus de l'espèce *Pongo tapaniliensis* ont été répertoriés. À peine découverts, ces orangs-outans sont classés en danger critique. À cause de la déforestation et de la chasse, on estime qu'ils seront moins de 300 en 2060.

200 000

gorilles de l'Ouest (*Gorilla gorilla*) vivent encore en Afrique. Toutefois, les populations de leurs deux sous-espèces diminuent. *G. g. diehli*, notamment, compte moins de 250 individus. Les gorilles de l'Est ne vont pas mieux : leur population, inférieure à 5 000 individus, décline de 5 % par an...

2,6 millions

de kilomètres carrés en Afrique : les chimpanzés communs ont la plus grande surface de répartition parmi les grands singes. Leur population, qui compte environ 200 000 individus, diminue elle aussi, tout comme celle de leurs cousins les bonobos, dix fois moins nombreux.



Les mâles dominants (tel celui-ci) sont moustachus, et les femelles barbes, contrairement à celles de l'espèce de Bornéo.

Il se nourrit d'aliments inhabituels chez les autres orangs-outans, comme des chenilles ou des cônes de conifères.

Le long cri du mâle monte plus haut que celui des orangs-outans de Sumatra, et est beaucoup plus long et pulsé que celui des orangs-outans de Bornéo.

divisa la communauté des zoologistes à l'époque : certains suivirent leur confrère, d'autres ne virent là qu'une sous-espèce de la première. Très vite, des primatologues comme l'Américain Robert Yerkes remarquèrent des différences comportementales notables entre les chimpanzés du nord et du sud du Niger. Pourtant, il fallut attendre 1988 pour que l'anthropologue américain Brian Shea et Coolidge proposent des données morphologiques convaincantes, confirmées en 1994 par les premières données moléculaires. Par ailleurs, dès le xix^e siècle, des sous-espèces de *P. troglodytes* ont été décrites. On en compte quatre à présent. Les deux espèces de

gorilles sont elles aussi connues depuis longtemps : des zoologistes les ont décrites dès le début du xx^e siècle.

Quant aux orangs-outans, jusqu'à récemment, on en reconnaissait deux espèces : l'orang-outan de Bornéo (*Pongo pygmaeus*), décrit par Linné en 1760, et celui de Sumatra (*P. abelii*), décrit en 1827 par le naturaliste français René-Primevère Lesson au retour de sa circumnavigation à bord de *La Coquille*, sous le commandement de Louis Isidore Duperrey.

De nombreux caractères anatomiques, tout comme la séparation géographique, plaident en faveur de cette classification. Parallèlement, trois sous-espèces avaient été identifiées chez l'orang-outan de Bornéo : celle du Nord-Est (*Pongo pygmaeus morio*), celle du Nord-Ouest (*P. p. pygmaeus*) et celle du Sud-Ouest (*P. p. wurmbii*).

L'ensemble des techniques utilisées pour déterminer ces espèces et sous-espèces fonctionnait si bien que l'on pensait avoir fait le tour de la question. Or, en 2017, une troisième espèce a été décrite,

❑ L'orang-outan de Tapanuli (*P. tapanuliensis*), trouvé dans une forêt du nord de Sumatra, au sud de l'aire de répartition de l'orang-outan de Sumatra (seulement 100 kilomètres séparent les aires de répartition des deux espèces), dans une région mal étudiée, car peu accessible.

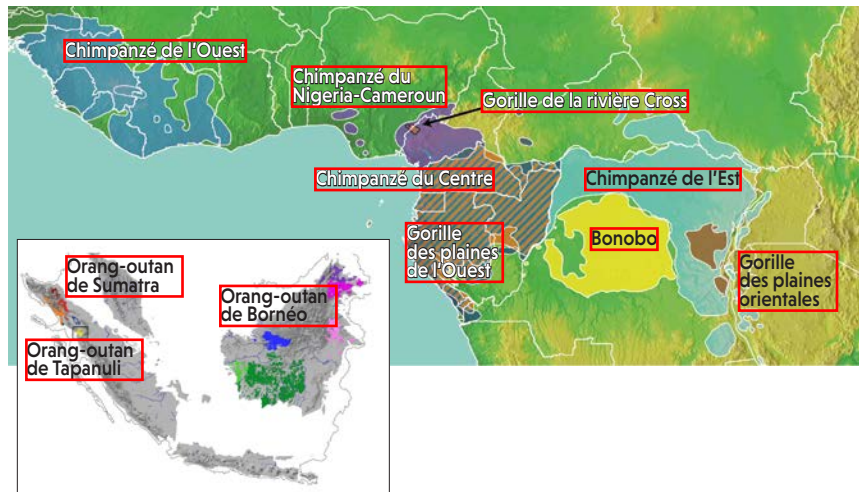
L'article, très documenté, signé par un consortium de 37 chercheurs de multiples origines (Suisse, Allemagne, États-Unis, Grande-Bretagne, Espagne, Indonésie, Australie...), se fonde sur de nombreux caractères pour asseoir leur démonstration: l'anatomie et la morphologie, bien sûr, mais aussi la génomique et la phylogénie moléculaire, et même le comportement, avec l'étude des différences dans les vocalisations. En d'autres termes, les chercheurs ont réalisé en une fois ce qui avait été fait de façon séquentielle sur les gorilles et les chimpanzés. Tout est-il donc éclairci? Pas vraiment, car, comme souvent en science, répondre à une question en soulève de nombreuses autres.

DES ANIMAUX INTERFERTILES AU SEIN D'UN MÊME GENRE

Les analyses de génomes entiers permettent de reconstruire de manière fine l'histoire des espèces: grâce à elles, non seulement on connaît la phylogénie – les liens de parenté des espèces –, mais on a aussi accès à l'évolution quantitative des populations en présence, ainsi qu'à leurs échanges de gènes. Or ces résultats montrent que les échanges de gènes ont été continus dans le groupe des chimpanzés, dans celui des orangs-outans

RÉPARTITION DES GRANDS SINGES ET ARBRE DE PARENTÉ

Contrairement aux humains, les espèces de grands singes vivent dans de petites régions qui se recouvrent peu, en Afrique et en Indonésie. Les chimpanzés comptent deux espèces: les bonobos, au sud du fleuve Niger, et les chimpanzés communs au nord, répartis en quatre sous-espèces. Les gorilles désignent aussi deux espèces: les gorilles de l'Ouest (*Gorilla gorilla*) et de l'Est (*G. beringei*). Le gorille de l'Ouest comprend deux sous-espèces aux habitats disjoints: le gorille des plaines de l'Ouest,



que chez les grands singes, au sein d'un même genre (*Pan*, *Gorilla* ou *Pongo*), les animaux sont interfertiles.

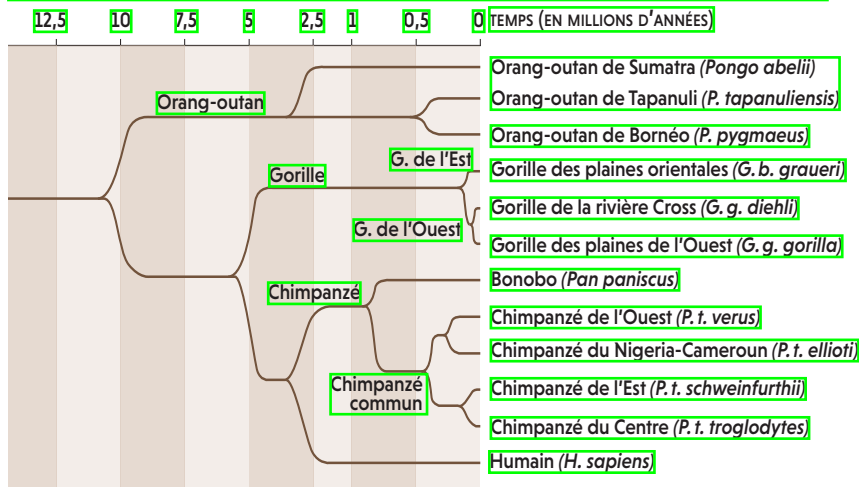
On est donc loin de la définition classique de l'espèce édictée par le biologiste allemand Ernst Mayr au milieu du xx^e siècle, à savoir que «les espèces sont des groupes de populations naturelles, effectivement ou potentiellement interfécondes, qui sont génétiquement isolées d'autres groupes similaires». Les biologistes qui ont décrit la nouvelle espèce d'orang-outan, bien conscients du problème, proposent, au moins pour les primates, une définition plus intégrative: «Une espèce est une population (ou un groupe de populations) présentant, par rapport à d'autres, des différences héréditaires précises.» Mais ne dit-on pas la même chose? Certes non, et tout tient à l'utilisation de «génétiquement isolées» et de «différences héréditaires».

En effet, malgré la confusion classique, tout ce qui est héréditaire n'est pas forcément génétique – bien que tout ce qui est génétique soit héréditaire. Chez les primates en particulier existe un «deuxième système d'héritage», celui de la culture. En effet, comme l'a montré Andrew Whiten, primatologue de l'université de St-Andrews (Grande-Bretagne) en 2017, l'héritage culturel, fondé sur

Tout ce qui est héréditaire n'est pas génétique, bien que tout ce qui est génétique soit héréditaire

(dans une moindre mesure) et dans celui des gorilles. De nos jours, les échanges sont bien sûr nuls lorsque les populations sont isolées géographiquement, comme chez les gorilles ou les orangs-outans, mais les croisements en zoos montrent

présent au Cameroun, en République du Congo, au Gabon et en Guinée équatoriale, et le gorille de la rivière Cross, qui vit de part et d'autre de la frontière entre le Nigeria et le Cameroun. Le gorille de l'Est est également séparé en deux sous-espèces : le gorille des plaines orientales, qui se trouve en République démocratique du Congo, et le gorille des montagnes (*G. b. beringei*, non représenté), qui se compose de deux populations distinctes, l'une sur les montagnes des Virunga, à la frontière du Rwanda, de l'Ouganda et de la République démocratique du Congo, l'autre dans le sud-ouest de l'Ouganda. Les trois espèces connues d'orangs-outans, quant à elles, sont cantonnées à deux îles indonésiennes, Bornéo et Sumatra. L'étude de leur ADN mitochondrial a montré qu'il y a plus de différences entre eux qu'entre *H. sapiens* et les chimpanzés.



l'apprentissage social, satisfait à certains principes fondamentaux de l'évolution des caractères biologiques à héritage génétique. Par exemple, les traditions des grands singes varient géographiquement quand ils sont en liberté et entre les groupes quand ils sont en captivité ; l'héritage culturel se transmet verticalement des mères aux petits ; des caractères culturels se transmettent horizontalement entre populations ; les individus s'investissent dans leur transmission, en particulier pour l'utilisation d'outils.

Ces données proviennent d'études éthologiques sur le terrain, telles celles entreprises par la Britannique Jane Goodall sur les chimpanzés et l'Américaine Dian Fossey sur les gorilles de l'Est. Les tout derniers catalogues des variants culturels des grands singes ont été récemment mis à jour et donnent : 39 variants chez les *Pan* ; 24 chez les *Pongo* ; 23 chez les *Gorilla*. Ils concernent l'utilisation d'outils (cassage de noix, pêche de fourmis et de termites...), le traitement de la nourriture (nettoyage de fruits à piquants...), des comportements sociaux (techniques d'épouillage...). Andrew Whiten propose de ne pas séparer les deux systèmes d'héritage lors de l'étude des grands primates et se fait l'apôtre de la coévolution gènes-culture.

BIBLIOGRAPHIE

A. Nater et al., **Morphometric, behavioral and genomic evidence for a new orangoutan species**, *Current Biology*, vol. 27(22), pp. 3487-3498, 2017.

A. Whiten, **Culture extends the scope of evolutionary biology in the great apes**, *PNAS*, vol. 114 (30), pp. 7790-7797, 2017.

A. D. Foote et al., **Genome-culture coevolution promotes rapid divergence of killer whale ecotypes**, *Nature Communications*, article 11693, 2016.

J. Prado-Martinez et al., **Great ape genetic diversity and population history**, *Nature*, vol. 499, pp. 471-475, 2013.

Une telle théorie est à approcher avec précaution et chaque espèce doit être vue comme un cas singulier. Andrew Whiten prend comme exemple l'orque ou épaulard (*Orcinus orca*) qui, selon les populations, ont des sources différentes de nourriture, poissons ou phoques. Or cela nécessite l'apprentissage de deux techniques différentes de pêche. On comprend alors qu'une orque apte à chasser le phoque aura des difficultés à rejoindre un groupe principalement ichtyophage.

L'IMPACT DE LA CULTURE

Dans ce cas, conclut Andrew Whiten, des comportements culturels ont probablement influencé l'évolution biologique de ces populations en entraînant la sélection de certains gènes suivant les écotypes. Chez les primates, en revanche, dont les migrations comme les transferts horizontaux de faits culturels ne sont pas rares, les comportements culturels ont sans doute eu peu d'effet sur l'évolution génétique.

Néanmoins, certains primatologues défendent l'idée qu'une corrélation importante existerait entre les qualités culturelles et les capacités cognitives sélectionnées : les orangs-outans de Sumatra présenteraient des répertoires culturels plus élaborés que ceux des orangs-outans de Bornéo. De même, leurs capacités cognitives testées dans la nature comme en captivité seraient meilleures. Or les orangs-outans de Sumatra présentent un cerveau de 2 à 10% plus grand que celui de leurs cousins de Bornéo... Y aurait-il eu une sélection corrélée de techniques et d'intelligence ?

Dans la lignée humaine, la comparaison *Homo sapiens* – *H. neanderthalensis* fournirait un exemple analogue. Et s'il n'y avait pas eu une telle augmentation de la population humaine et si des isolats humains avaient persisté, peut-être notre espèce aurait-elle aussi pu connaître une spéciation équivalente au bout de plusieurs centaines de milliers d'années.

Le point important ici est qu'en introduisant la culture dans la distinction des espèces et sous-espèces de primates, les biologistes en viennent à adapter les critères de définition de l'espèce aux organismes concernés. Jacques Monod avait proclamé : « Ce qui est vrai pour *Escherichia coli* est vrai pour l'éléphant. » On peut l'admettre pour les mécanismes de base de la biologie moléculaire (réplication, transcription, traduction) et la (presque) universalité du code génétique. Mais il n'en est manifestement rien pour la définition de l'espèce... ■

L'AUTEUR



HERVÉ THIS
physicochimiste,
directeur du Centre
international de
gastronomie moléculaire
AgroParisTech-Inra, à Paris

FAUT-IL FOUETTER LA SAUCE HOLLANDAISE ?

Pour confectionner certaines sauces, on fouette vigoureusement avant d'ajouter la matière grasse et de refouetter. Des expériences montrent que le premier geste n'est pas vain.

Pour la confection de crème anglaise, de sauce hollandaise, de sauce béarnaise et de tous leurs dérivés, qui se comptent par centaines dans la cuisine française classique, on commence par fouetter du jaune d'œuf, éventuellement avec une solution aqueuse, avant d'ajouter un corps gras. Par exemple, pour la crème anglaise, on fouette vigoureusement le jaune avec le sucre avant d'ajouter le lait. Le foisonnement subsiste-t-il quand on ajoute la matière grasse ? L'expérience suivante montre que la question n'est pas anodine.

Partons d'un blanc d'œuf, solution aqueuse de protéines, et fouettons. Une mousse se forme, parce que le fouet pousse des bulles d'air dans l'eau, et que ces bulles sont tapissées des protéines partiellement dénaturées par le cisaillement du fouet. Ajoutons maintenant de l'huile à cette première préparation foisonnée et fouettons : l'huile divisée en gouttelettes par les fils du fouet s'émulsionne : les gouttelettes s'en-tourent de protéines et se dispersent dans la mousse. On obtient ainsi un système hybride, entre émulsion et mousse. Puis, avec l'ajout supplémentaire d'huile, les bulles d'air disparaissent progressivement, remplacées par les gouttes d'huile. Le foisonnement initial serait-il alors inutile ?

Il y a plusieurs années, des expérimentations avec des crèmes anglaises avaient montré que la mousse subsistait ; et les tests sensoriels montrent que l'on distingue une crème anglaise foisonnée de la même crème que l'on n'a pas initialement fouettée, moins « moelleuse ».

Toutefois, la crème anglaise est une préparation où la teneur en matière grasse est faible (le lait entier ne contient que 40 grammes de matière grasse par litre). Que se passe-t-il si on l'augmente ?

Le premier foisonnement d'une sauce hollandaise introduit des bulles d'air. En fouettant quand on ajoute le beurre, ces bulles sont-elles remplacées par des gouttelettes de matière grasse ?



Lors de notre dernier séminaire de gastronomie moléculaire, nous avons réalisé l'expérience pour des sauces hollandaises. Dans le foisonnement initial (notons toutefois que ce foisonnement se fait tout en chauffant, ce qui conduit à la coagulation des protéines), la présence de nombreuses bulles d'air changeait la couleur, du jaune orangé à du jaune blanchi.

Quand on ajoute le beurre, l'œil ne suffit plus. Au microscope, on voit que les bulles d'air subsistent dans la deuxième étape, preuve que la coagulation des protéines fait toute la différence entre l'expérience initiale de blanc d'œuf fouetté et émulsionné, d'une part, et la production de sauces chauffées, d'autre part. D'ailleurs, les goûts des béarnaises foisonnées ou non sont très différents.

Mais s'il y avait encore plus de matière grasse que dans les recettes classiques ? J'ai expérimenté d'ajouter jusqu'à un litre d'huile à une hollandaise achevée : la sauce a parfaitement tenu et le microscope a montré que les bulles d'air subsistaient, quoique raréfiées au milieu des gouttelettes de matière grasse.

Évidemment, la sauce produite n'est nullement une sauce béarnaise, malgré les prescriptions du *Codex alimentarius*, ce cahier des charges international pour la vente des produits alimentaires : il est inadmissible que ce dernier admette que l'on

désigne sous le nom de béarnaises ou de hollandaises des sauces qui ne contiennent pas de beurre. Des béarnaises sans beurre ? C'est au mépris de tout l'art culinaire, car les triglycérides du beurre et ceux de l'huile n'ont pas les mêmes comportements de fusion, de sorte qu'ils ne conduiront pas aux mêmes consistances de sauce. Plus important encore, le goût est différent... ■

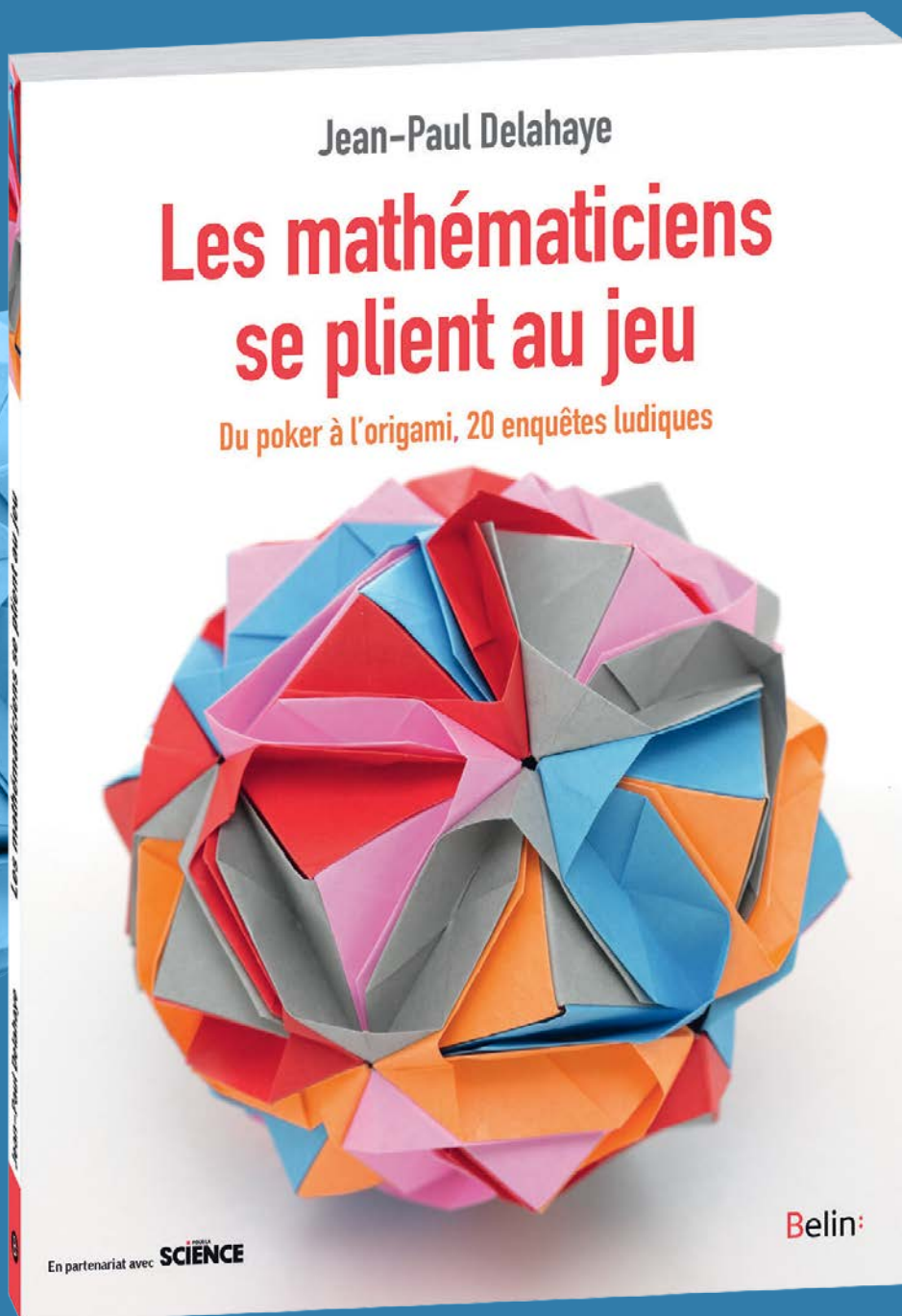
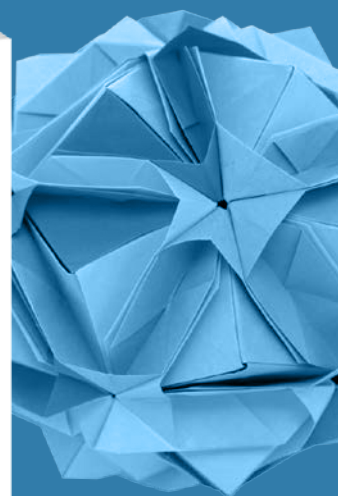
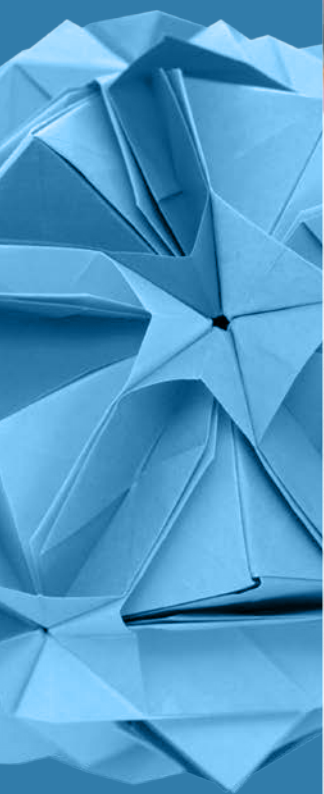
LA RECETTE



Pour comparer deux sauces hollandaises, l'une foisonnée et l'autre non :

- 1 Dans un cul-de-poule, placer deux jaunes d'œuf et un volume d'eau correspondant à deux demi-coquilles d'œuf, puis mélanger et répartir dans deux casseroles.
- 2 Sur un feu doux, fouetter vivement le contenu d'une casserole.
- 3 Chauffer chaque casserole en ajoutant, lamelle par lamelle, 200 grammes de beurre dans chaque préparation et en fouettant.
- 4 Pour un test triangulaire, réunir une dizaine de personnes, et leur soumettre les deux sauces : chaque membre du jury reçoit trois cuillerées, avec une même sauce pour deux des cuillers, et l'autre sauce pour la troisième cuiller. On demande seulement de dire (à l'aveugle, donc, et avec la présentation des cuillers dans un ordre connu seulement de l'organisateur du test) quelles sont les deux sauces identiques.
- 5 Pour transformer l'expérience en cuisine, ajouter finalement du sel, du poivre, un peu de jus de citron ou d'acide citrique.

Le dernier succès de Jean-Paul Delahaye sous le signe du jeu



A

PICORER



Retrouvez tous
nos articles sur
www.pourlascience.fr

P.34

ZÊTA

La fonction zêta de Riemann s'annule en des points dont la répartition renseignerait sur celle des nombres premiers. Or il existe une concordance extraordinaire et inexpliquée entre les positions des points connus et une loi statistique liée aux matrices aléatoires. Certains mathématiciens pensent qu'il y a là une voie prometteuse pour démontrer enfin l'hypothèse de Riemann relative aux zéros de la fonction zêta.

P.17

VATÉRITE

Cette forme de carbonate de calcium, très rare dans la nature et précieuse pour les pharmacologues, vient d'être découverte sur les feuilles de plantes du genre *Saxifraga*.

P.8

« On peut dire que Stephen Hawking a rendu crédible toute la discipline de la cosmologie quantique »

THIBAUT DAMOUR
professeur à l'IHES

P.80

9

Le « diagramme des neuf palais » de Luo Shu est le plus ancien carré magique connu. Il date du II^e siècle avant notre ère.

P.56

BARRIÈRE DU MÈTRE

Les planètes se sont formées à partir de poussières qui se sont agglomérées en cailloux grâce aux forces électromagnétiques. Mais ces forces semblent insuffisantes pour que se forment des corps dont le diamètre dépasse le mètre. Et pourtant, les planètes existent...

P.66

Dinilysia patagonica

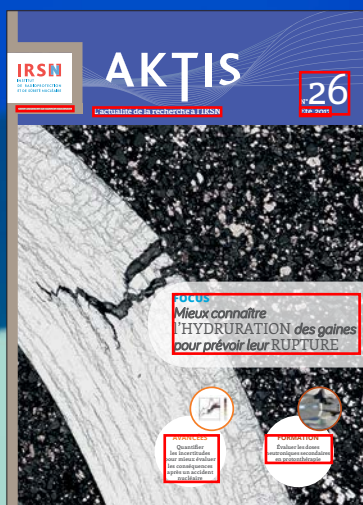
C'est le plus ancien serpent dépourvu de pattes que l'on connaisse. Vieux de quelque 85 millions d'années, ce reptile grand comme un homme devait probablement se cacher dans les sols mous.

P.92

7

C'est le nombre d'espèces de grands singes depuis la découverte de l'orang-outan de Tapanuli, en 2017. Il existe ainsi deux espèces de chimpanzés, deux de gorilles et trois d'orang-outans. Et parmi leurs proches parents, il ne faut pas oublier... *Homo sapiens* !

L'actualité de la recherche à l'IRSN



Si vous souhaitez imprimer ou télécharger la version papier, cliquez ici

PDF



ÉDITO

Besoin simple et réalité complexe !

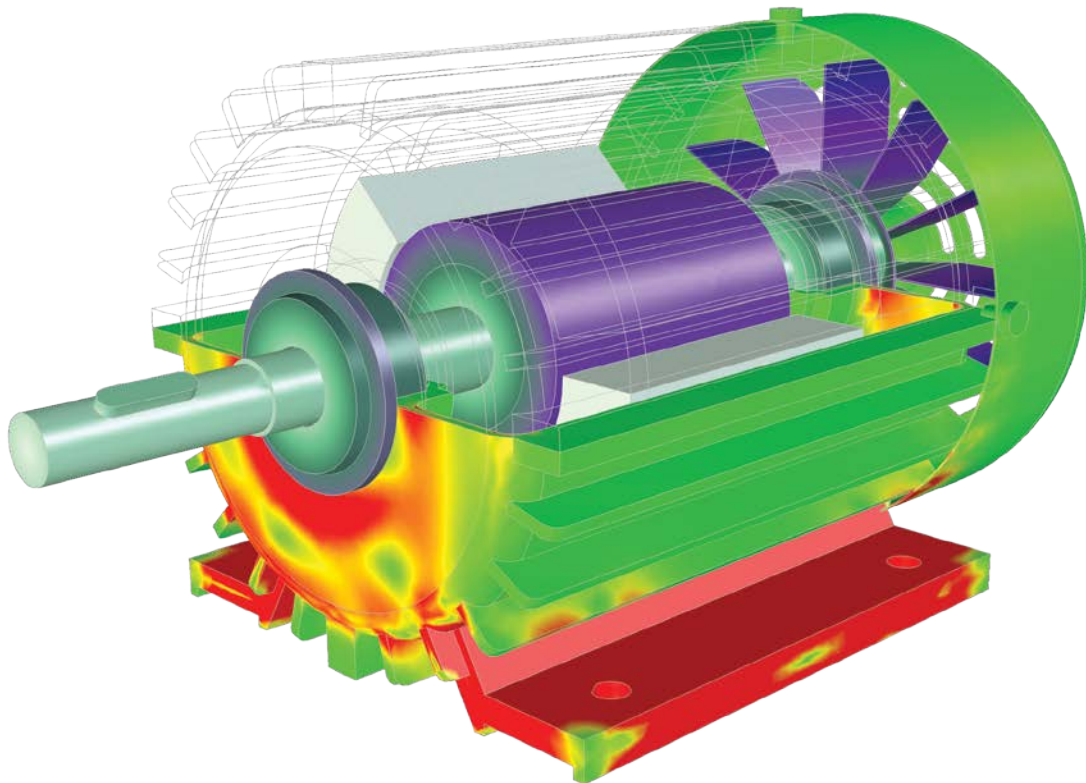
Sept ans après l'accident de Fukushima, la distribution du corium (magma créé par la fusion du cœur) dans les réacteurs accidentés n'est encore que partiellement connue. La progression du corium au moment de l'accident a pu affecter l'intégrité de l'enceinte de confinement et créer une voie de rejet supplémentaire vers l'environnement. Aujourd'hui, sa répartition et sa composition sont des données indispensables pour assurer un démantèlement dans des conditions optimales de sûreté. Elles ne peuvent être apportées, de manière détaillée, que par des investigations et prélèvements robotisés qu'il faut mener dans un milieu particulièrement hostile.

La simulation pourrait être une alternative mais les outils

Cette approche de modélisation multi-échelle touche des sujets de plus en plus larges, comme en témoignent les articles sur les matériaux nanoporeux ou sur la chimie du ruthénium en réacteur. Son intérêt, en complément de l'expérimentation, en fait un élément clé de la recherche de l'Institut et un challenge pour les enjeux de sûreté les plus importants.

Avant de vous souhaiter une bonne lecture de ce numéro 28 d'Aktis, je tiens à remercier Matthieu Schuler pour son action volontaire et son engagement sans relâche au sein de l'IRSN au profit de la sûreté et la sécurité nucléaire et la radioprotection. Directeur de la stratégie, du développement et des partenariats, il a notamment supervisé depuis 2011 la

Inventé au 19^{ème} 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^{ème} siècle, deux scientifiques ont inventé séparément le moteur à induction AC. Aujourd'hui, c'est un composant commun en robotique. Comment y sommes nous arrivé, 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