

**CHLORDÉCONE
UN POLLUANT
INDESTRUCTIBLE ?**

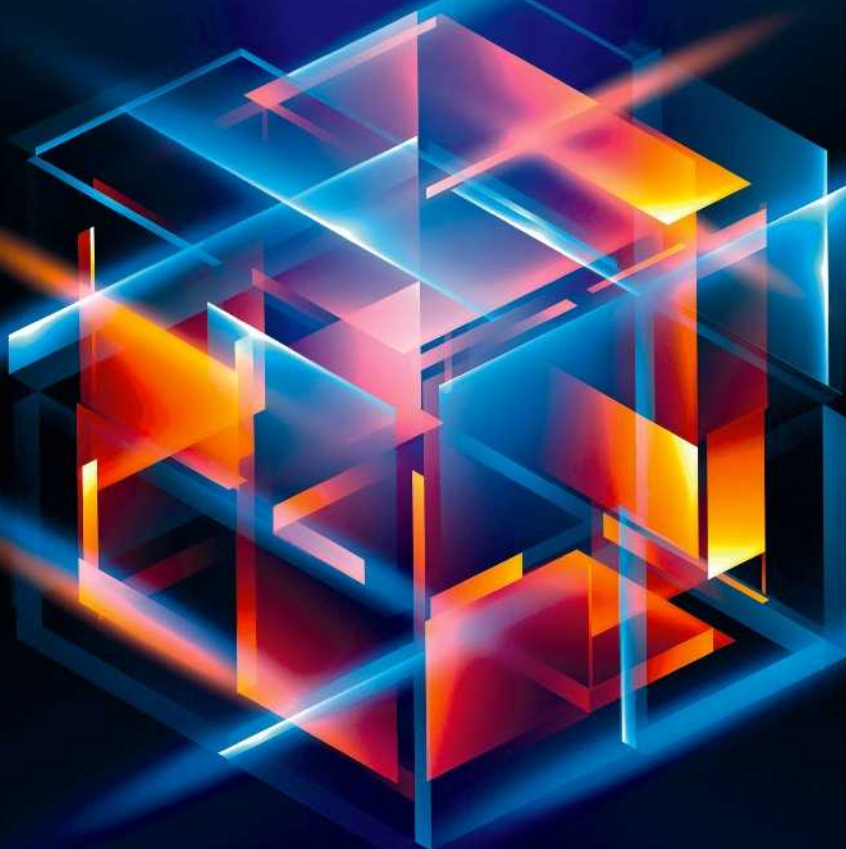
GÉOSCIENCES
**COMMENT
NAISSENT LES
TORNADES DE FEU**

BIOLOGIE
**HASARD ET GÈNES,
LA THÉORIE
QUI DÉRANGE**

MARS 2020
N° 509



Quelle réalité cache la **MÉCANIQUE QUANTIQUE?**





Tous les enfants
font des rêves
mais pour certains
c'est vital de les réaliser.

*Depuis 1987, l'Association Petits Princes réalise les rêves
des enfants gravement malades.*

*Pour leur donner l'énergie de se battre contre la maladie,
nous avons besoin de vous.*



Devenez bénévole ou faites un don
www.petitsprinces.com - 01 43 35 49 00



**MAURICE
MASHAAL**
Rédacteur
en chef

LA MESURE, UNE ÉPINE DANS LE PIED QUANTIQUE

La naissance de la mécanique quantique, dans les années 1920 à 1930, ne s'est pas faite sans douleur. L'étrangeté de ses lois avait suscité parmi les physiciens de vifs débats sur la nature de cette théorie et sur la réalité physique qu'elle est censée décrire. Une interprétation a fini par s'imposer, sous l'impulsion notamment du Danois Niels Bohr: c'est l'«interprétation de Copenhague», dite aussi «orthodoxe».

Cette interprétation a régné sans partage pendant plus de cinquante ans, mais elle n'en laissait pas moins un arrière-goût d'insatisfaction.

Et depuis quelques années, à la faveur du renouveau des réflexions sur les fondements de la physique quantique, cette insatisfaction gagne du terrain. La principale pierre d'achoppement concerne la notion de mesure et le rôle de l'observateur, comme nous l'explique en détail le physicien et philosophe Hervé Zwirn (voir pages 24 à 31).

En fait, la question de ce qu'est exactement une mesure constitue un angle mort de la mécanique quantique. Du coup, l'idée que cette dernière donne de la réalité reste aussi contre-intuitive que problématique. Pour remédier à cette difficulté et à d'autres, plusieurs chercheurs ont proposé des visions différentes de la théorie quantique. Ce numéro vous en présente deux, radicalement opposées.

Le «solipsisme convivial» que prône Hervé Zwirn considère la mesure comme un acte perceptif propre à chaque observateur, dans lequel le système mesuré n'est pas modifié. Dans cette interprétation pour le moins surprenante, chacun a sa réalité, mais des observateurs qui communiquent entre eux ne peuvent constater de désaccord. Le chercheur Ward Struyve, lui, décrit la théorie due à Louis de Broglie et David Bohm (voir pages 32 à 39), proposée il y a longtemps et qui continue de se développer. Cette théorie conduit aux mêmes prédictions que la mécanique quantique, mais avec l'avantage de reposer sur une conception classique de la réalité physique.

L'enjeu de ces réflexions et travaux n'est pas seulement philosophique: une nouvelle théorie pourrait un jour en émerger et conduire à la résolution d'énigmes plus palpables. La question de la gravitation quantique, par exemple? ■

SOMMAIRE

N° 509 /
Mars 2020

ACTUALITÉS

P. 6

ÉCHOS DES LABOS

- Les lymphocytes B, nouveaux alliés dans l'immunothérapie
- Starlink, un cauchemar pour les astronomes
- Une percée dans la conjecture de Collatz
- Marcher sur les nageoires
- La structure intime des axones révélée
- Des indices sur le passé des populations africaines
- Les rayures de tigre d'Encelade expliquées
- Lumière sur les elfes célestes
- Le stress donne bien des cheveux blancs

P. 16

LES LIVRES DU MOIS

P. 18

AGENDA

P. 20

HOMO SAPIENS INFORMATICS

Le pari du tournant éthique
Gilles Dowek

P. 22

QUESTIONS DE CONFIANCE

Une viralité parfois utile
Virginie Tournay

GRANDS FORMATS



P. 40

CHIMIE

LA CHLORDÉCONE, UN POLLUANT EN TRANSFORMATION

Oriane Della-Negra
et Pierre-Loïc Saaidi

On considérait comme indestructible la chlordécone, un insecticide toxique utilisé pendant plus de vingt ans dans les bananeraies des Antilles françaises. On vient de découvrir qu'en fait une dégradation naturelle est à l'œuvre. Reste à étudier les produits de transformation mis en évidence.



P. 56

BIOLOGIE

« IL FAUT RENONCER AUX LOIS DE MENDEL »

Entretien avec
Jean-Jacques Kupiec

Et si le vivant naissait d'un comportement aléatoire des molécules et des cellules ? Voilà une quarantaine d'années que Jean-Jacques Kupiec défend ce principe avec force arguments théoriques et expérimentaux. Les explications de ce biologiste hors norme à l'occasion de la sortie de son dernier livre, *Et si le vivant était anarchique*.



P. 48

PORTFOLIO

L'UNIVERS RADIOGRAPHIÉ PAR CHANDRA

Belinda J. Wilkes

Cela fait deux décennies que *Chandra*, un télescope spatial sensible aux rayons X, scrute le cosmos. L'occasion de revenir, en images, sur quelques-unes de ses découvertes les plus marquantes.



P. 62

GÉOSCIENCES

COMMENT NAISSENT LES TORNADES DE FEU

Jason Forthofer

Lorsque des vents tournoyants se combinent à un incendie, ils forment une tornade de feu. Un phénomène très dangereux et imprévisible, mais dont on comprend mieux aujourd'hui la physique.



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



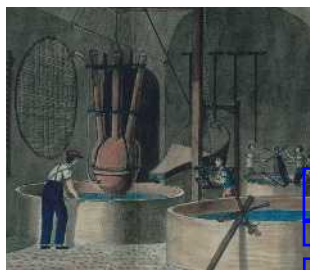
Inscrivez-vous
www.pourlascience.fr



En couverture :
© Shutterstock.com / Dmitriy Rybin

Les portraits des contributeurs
sont de Seb Jarnot

Ce numéro comporte un encart
d'abonnement *Pour la Science*, jeté en
cahier intérieur, sur toute la diffusion
kiosque en France métropolitaine.



P.72

HISTOIRE DES SCIENCES

**CRÉER DES COULEURS
AU SIÈCLE**

DES LUMIÈRES

Domènec Cardon

En 1744, Antoine Janot, audacieux teinturier du Languedoc, composa le tout premier recueil de recettes pour teindre des draps de laine et doté d'échantillons. Tombé dans l'oubli, ce mémoire est enfin publié et inspire les teinturiers d'aujourd'hui.

P.24

PHYSIQUE

L'OBSERVATEUR, UN DÉFI POUR LA PHYSIQUE QUANTIQUE

Hervé Zwirn

La théorie quantique est-elle compatible avec l'existence d'une réalité objective, indépendante de l'observateur? Cette question reste en suspens depuis la naissance de la mécanique quantique. Une interprétation récente, le « solipsisme convivial », propose une réponse originale, qui confère à l'observateur un rôle essentiel.

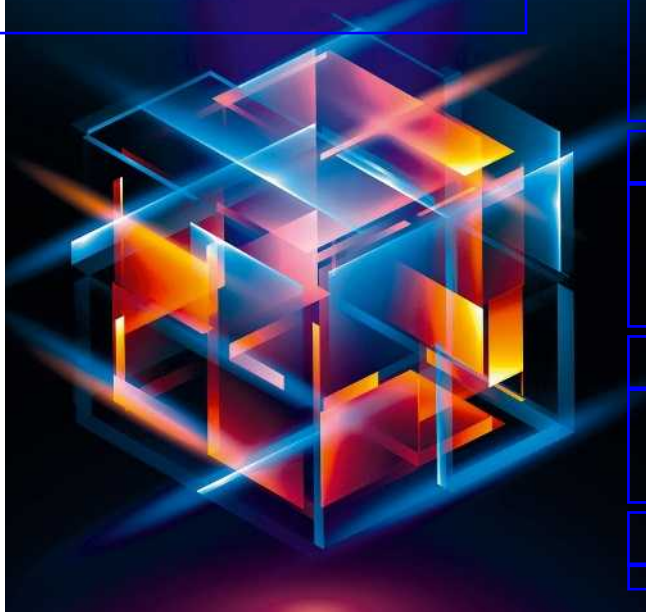
P.32

PHYSIQUE

UNE RÉALITÉ CLASSIQUE DERRIÈRE L'ÉTRANGÉTÉ QUANTIQUE?

Ward Struyve

Les lois de la mécanique quantique défient l'intuition et l'idée que nous avons de la réalité physique. Mais la théorie de De Broglie-Bohm, proposée il y a plusieurs décennies et revenue dans l'actualité, a l'ambition de les réconcilier.



RENDEZ-VOUS

P.80

LOGIQUE & CALCUL
**DES BALISES QUI
ÉMETTENT DU BON
HASARD**

Jean-Paul Delahaye

Des sources publiques de nombres aléatoires, infalsifiables et contrôlables *a posteriori*, sécuriseraient de nombreux protocoles, comme les tests de médicaments, les tirages au sort du loto ou le choix des jurés d'assises.



P.86

ART & SCIENCE
Où se cache

le trifluorométhyle?

Loïc Mangin

P.88

IDÉES DE PHYSIQUE
De la profondeur

avec du rouge et du bleu

*Jean-Michel Courty
et Édouard Kierlik*

P.92

CHRONIQUES
DE L'ÉVOLUTION

**La mouche de l'aubépine
s'est pommée**

Hervé Le Guyader

P.96

SCIENCE & GASTRONOMIE
Astringence

contre amertume

Hervé This

P.98

À PICORER

A

CTUALITÉS

P.6 Échos des labos

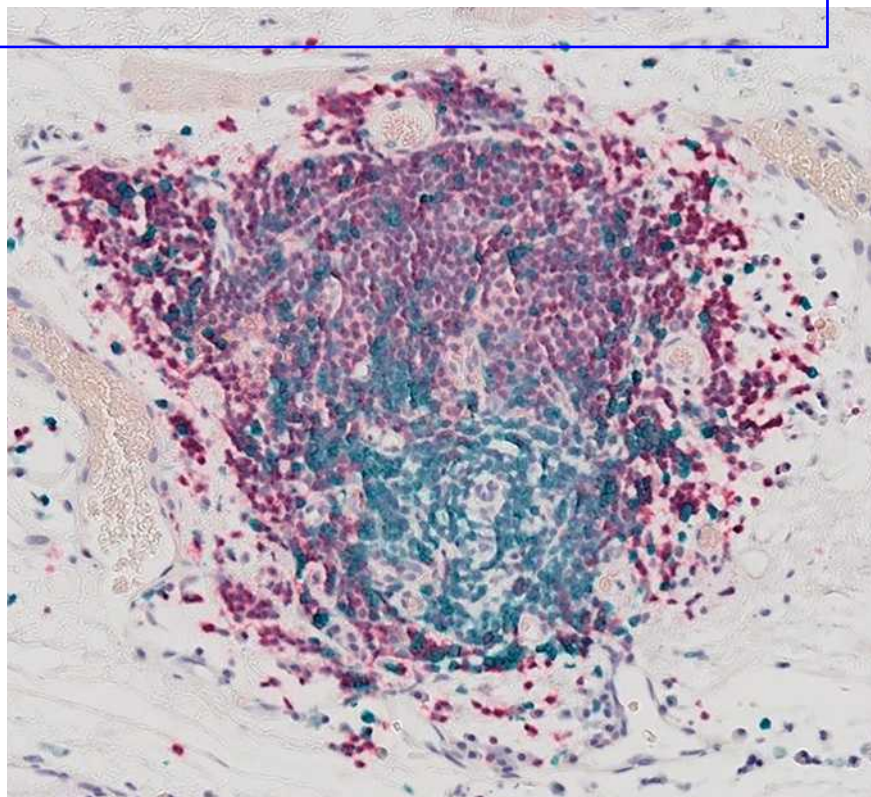
P.16 Livres du mois

P.18 Agenda

P.20 Homo sapiens informaticus

P.22 Questions de confiance

LES LYMPHOCYTES B, NOUVEAUX ALLIÉS DANS L'IMMUNOTHÉRAPIE



Les structures lymphoïdes tertiaires (SLT) sont des agrégats cellulaires riches en lymphocytes B (violet) trouvés à proximité des tumeurs.

Des agrégats de cellules riches en lymphocytes B dans certaines tumeurs seraient un facteur prédictif de la survie du patient et de sa réponse à l'immunothérapie.

L'arsenal de lutte contre le cancer comporte différentes armes. Certaines, comme la radiothérapie et la chimiothérapie, visent directement les cellules tumorales pour les détruire. D'autres agissent de façon indirecte. C'est le cas de l'immunothérapie, dont l'objectif est de stimuler le système immunitaire du patient afin que celui-ci s'attaque aux cellules anormales.

Dans cette dernière approche, les chercheurs s'étaient jusqu'à présent surtout focalisés sur les lymphocytes T, des cellules immunitaires connues pour leurs

capacités à détruire des virus ou des cellules cancéreuses. Trois équipes viennent cependant de mettre en avant l'intérêt de prendre en compte les lymphocytes B, une autre classe de cellules immunitaires qui intervient dans la mémorisation des nouveaux agents pathogènes rencontrés et module les réponses immunitaires.

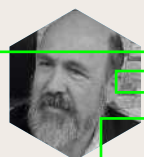
Actuellement, sans que l'on sache encore précisément pourquoi, seuls certains patients répondent bien à l'immunothérapie contre le cancer. « Par exemple, dans le cas des sarcomes des tissus mous, qui sont des cancers rares, agressifs et résistants à la chimiothérapie,

seuls 15% des patients environ répondent à l'immunothérapie », explique Hervé Fridman, professeur d'immunologie à l'université de Paris. Son équipe s'est précisément intéressée à ces cancers, qui s'attaquent par exemple aux muscles ou aux vaisseaux sanguins. Les chercheurs ont classé 608 tumeurs en fonction des caractéristiques de leur microenvironnement tumoral (les éléments biologiques qui entourent la tumeur) : les tumeurs pauvres en cellules immunitaires et peu vascularisées; les tumeurs fortement vascularisées; les tumeurs riches en cellules immunitaires.

Starlink, un cauchemar pour les astronomes

L'entreprise SpaceX a annoncé le lancement d'une constellation d'au moins 12 000 satellites, baptisée *Starlink*, d'ici le milieu de la décennie. Fabrice Mottez nous en détaille les conséquences inquiétantes pour les astronomes, en raison de la forte pollution lumineuse engendrée.

Propos recueillis par LUCAS GIERCZAK



FABRICE MOTTEZ
astronome, directeur
de recherche du CNRS
au Laboratoire univers
et théories (Luth),
à l'observatoire de Paris

Comment ces satellites perturbent-ils les observations astronomiques ?

Les satellites forment de petits points lumineux dans le ciel. Sur les photos astronomiques, ils laissent alors des traînées rectilignes. Jusque-là, quand les astronomes trouvaient ces parasites sur leurs photos, ils jetaient simplement ces dernières : le problème était gérable du fait de la relative rareté des satellites dans le ciel. Mais si le nombre de satellites explose, comme c'est prévu, la plupart des clichés risquent d'être gâchés. Le problème n'est donc pas lié directement aux technologies développées par SpaceX : c'est un problème de nombre. Par ailleurs, les astronomes ont mesuré la luminosité des satellites *Starlink* ; elle est proche de celle de l'étoile polaire. De fait, les satellites de la constellation apparaissent clairement même sur des clichés pris en plein Paris !

L'entreprise SpaceX a-t-elle trouvé des solutions ?

Gwynne Shotwell, l'une des dirigeantes de SpaceX, a reconnu que l'entreprise n'avait pas envisagé le problème lors de la conception. Par la suite, cependant, SpaceX a tenté de le régler : les ingénieurs ont décidé de recouvrir la face que les satellites présentent à la Terre – toujours la même – d'un revêtement plus sombre. L'effet a été limité, mais un revêtement plus sombre ou intégral ferait surchauffer le satellite, empêchant le bon fonctionnement de l'électronique de bord. Et même si leur luminosité était atténuée au point de rendre les satellites invisibles à l'œil nu, ils réapparaîtraient toujours sur les photos prises par les astronomes, amateurs comme professionnels. Le problème de pollution lumineuse n'est donc pas réglé, et c'est sans parler de la crainte d'une multiplication des collisions entre satellites ou d'une explosion incontrôlable de la densité de débris spatiaux, ainsi que des questions de monopole dans la colonisation de l'orbite basse. ■

Qu'est-ce que *Starlink* ?

Il s'agit d'un projet de l'entreprise américaine SpaceX, fondée par Elon Musk, pour fournir à des particuliers une connexion internet à haut débit partout sur Terre grâce à une constellation de satellites. Il faut pour cela que chaque point de la planète soit couvert à tout instant par un satellite. Ainsi, soit les satellites sont placés loin de la Terre pour que chacun d'eux couvre une portion importante de la surface terrestre, soit ils sont mis en orbite basse, et doivent alors être beaucoup plus nombreux. C'est cette seconde solution qu'a choisie SpaceX, pour transmettre des signaux le plus vite possible. L'entreprise est donc en train de lancer des petits satellites (260 kilogrammes, environ un mètre cube et des panneaux solaires de 2 mètres par 8) en orbite basse.

Combien de satellites sont prévus ?

C'est là que le projet *Starlink* inquiète. En février 2018, deux prototypes ont été lancés et, depuis, les satellites sont mis en orbite par lots de 60. Le lancement du 29 janvier dernier porte leur nombre dans le ciel à 242, et, à terme, vers 2025, la flotte devrait comporter environ 12 000 satellites, un nombre qui pourra être augmenté à 42 000. Ces chiffres semblent énormes ; ils le sont ! Le nombre de satellites actifs s'élève à environ 2 000 aujourd'hui. Il faut y ajouter 3 000 satellites « abandonnés », envoyés surtout dans les années 1970 et 1980, toujours en orbite car leur fin de vie n'était pas prévue. Au total, 5 000 satellites constellent donc le ciel actuellement. Les 12 000 satellites de SpaceX à venir représentent ainsi une multiplication considérable de leur nombre.

Dans ce dernier groupe, ils ont observé la présence d'agrégats de cellules riches en lymphocytes B, des agrégats nommés « structures lymphoïdes tertiaires » (SLT). L'équipe a montré que la présence des lymphocytes B détermine le pronostic, indépendamment du nombre de lymphocytes T. Les patients présentant des tumeurs riches en SLT ont un taux de survie plus élevé que ceux présentant des tumeurs immunologiquement pauvres ou fortement vascularisées. Leur taux de réponse à une immunothérapie (le pembrolizumab) est lui aussi élevé (50%).

Les deux autres équipes ont obtenu des résultats similaires, à savoir que la présence de SLT riches en lymphocytes B dans la tumeur favorise une meilleure survie et prédit une meilleure réponse à l'immunothérapie, pour des patients atteints de cancer du rein d'une part et de mélanome d'autre part. Par ailleurs, au cours du traitement, on observe davantage de SLT chez les patients qui répondent bien à l'immunothérapie.

De nombreuses questions restent encore à résoudre : ces résultats sont-ils valables pour d'autres types de cancers ? Quels facteurs régissent le développement des SLT ? Pourquoi sont-elles présentes dans certains cancers et pas dans d'autres ? Quels sont les mécanismes à l'œuvre dans leur action antitumorale ? L'hypothèse des chercheurs est que les SLT sont des sites dans lesquels les lymphocytes B « apprennent » aux lymphocytes T, notamment les lymphocytes T CD8⁺, à reconnaître les antigènes tumoraux. « Mon hypothèse est que les lymphocytes B produisent des anticorps contre les tumeurs, explique Hervé Fridman. Mais pour cela, la proximité de l'antigène est essentielle, puisque l'on constate que des SLT distantes de la tumeur n'ont pas d'impact. »

Ces résultats permettent en tout cas d'affiner la personnalisation du traitement pour les patients. Un essai clinique, coordonné par Antoine Italiano, de l'Institut Bergonié (centre régional de lutte contre le cancer de la Nouvelle-Aquitaine) et incluant des patients présentant des tumeurs immunologiquement riches, est en cours. ■

ALINE GERSTNER

B. A. Helmink et al., *Nature*, vol. 577, pp. 549-555, 2020 ; F. Petitprez et al., *ibid.*, pp. 556-560 ; R. Cabrita et al., *ibid.*, pp. 561-565

MATHÉMATIQUES

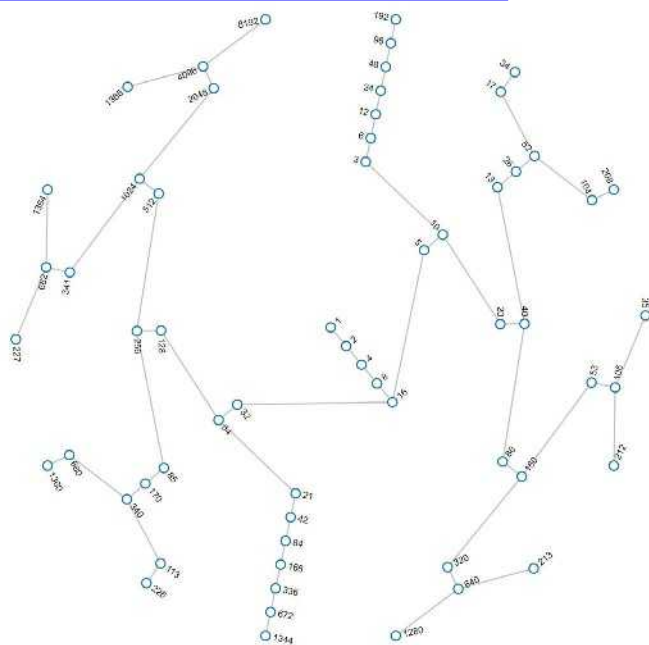
UNE PERCÉE DANS LA CONJECTURE DE COLLATZ

Ce problème mathématique à l'énoncé élémentaire défie les chercheurs depuis plus de quatre-vingts ans. Un résultat de Terence Tao ouvre une brèche.

En mathématiques, une conjecture s'énonce parfois très facilement tout en donnant du fil à retordre aux chercheurs. C'est le cas de la «conjecture de Collatz», ou «conjecture de Syracuse», qui a la réputation d'être le problème non résolu le plus simple de toutes les mathématiques. Proposée par l'Allemand Lothar Collatz en 1937, cette énigme part de la procédure suivante. Prenez un entier strictement positif; s'il est pair, divisez-le par 2; s'il est impair, multipliez-le par 3 et ajoutez 1. Répétez cette procédure – nommée «fonction de Collatz» – avec le nouvel entier obtenu, et ainsi de suite. La conjecture de Collatz affirme que vous finirez par tomber sur le nombre 1. Par exemple, si l'on part de 1, on obtient successivement les nombres: 1, 4, 2, 1, 4, 2, 1... et l'on reste bloqué dans cette boucle. En partant de 3, on trouve 3, 10, 5, 16, 8, 4, 2, 1... Aucune régularité n'émerge, mais on retombe toujours sur 1: c'est ce qu'affirme la conjecture. Terence Tao, de l'université de Californie à Los Angeles, vient de franchir un pas important en montrant que la conjecture est «presque vraie» pour «presque tous» les nombres.

Les mathématiciens ont numériquement vérifié la conjecture de Collatz pour tous les entiers jusqu'à environ 10^{20} , sans avoir réussi à fournir une preuve. Mais ils ont obtenu des résultats partiels: pour la plupart, ceux-ci donnent un résultat sur «presque tous» les entiers. Ce mot a un sens mathématique précis, qu'on définit souvent de la façon suivante. Pour un entier N et une propriété (P) , on compte le nombre $N(P)$ d'entiers plus petits que N et vérifiant (P) . On considère alors le rapport $N(P)/N$; si cette proportion tend vers 1 lorsqu'on fait croître N à l'infini, on dira que «presque tous» les entiers vérifient (P) .

C'est ce type de résultat que vient d'obtenir Terence Tao, dans une version modifiée et forte. Considérons n'importe quelle fonction f associant à chaque entier un nombre réel, en supposant seulement qu'en prenant des entiers N tendant vers l'infini, les nombres $f(N)$ tendent aussi vers l'infini; autrement dit, f tend vers l'infini. Mais la fonction f peut cependant avoir une croissance très lente, comme la fonction logarithme, de sorte que $f(N)$ peut être



EN BREF

UN CHAMPIGNON HORS D'ÂGE

Les champignons se fossilisent moins bien que les plantes. D'ailleurs, le plus vieux fossile de champignon connu remontait à 460 millions d'années seulement. Mais Steeve Bonneville, de l'université libre de Bruxelles, et ses collègues ont découvert (et identifié chimiquement) des restes fossiles de mycélium – le réseau dense de filaments microscopiques développés sous terre par les champignons – dans des roches africaines âgées de 715 à 810 millions d'années.

Sc. Adv., 22 janvier 2020

DE L'HYDROGÈNE MÉTALLIQUE ?

D'un point de vue de la conduction électrique, l'hydrogène gazeux est un isolant. Sous fortes pressions et à basse température, il devient liquide puis solide. En 1935, des chercheurs ont suggéré qu'avec une pression extrême, l'hydrogène solide deviendrait même conducteur ou « métallique ». Dans la quête ardue pour le vérifier, Paul Loubeyre, du CEA, et ses collègues auraient récemment créé cet état de la matière grâce à une pression de plus de 4 millions d'atmosphères.

Nature, 29 janvier 2020

L'INTELLIGENCE DES SEICHES

Les éthologues savent que les céphalopodes sont intelligents, et pas seulement « Paul le poulpe »... Cela se confirme avec les seiches : Pauline Billard, de l'université de Caen-Normandie, et ses collègues ont montré qu'elles utilisent leur mémoire pour optimiser leur alimentation. Habituees à recevoir systématiquement des crevettes – leur aliment préféré – au dîner, elles mangent moins de crabe le jour. Mais lorsque l'apport en crevettes est aléatoire, elles font des réserves et mangent plus de crabe.

Biology Letters, 5 février 2020

ÉVOLUTION

MARCHER SUR LES NAGEOIRES



Reconstitution de *Tiktaalik roseae*, un poisson qui vivait il y a 375 millions d'années et qui avait déjà des traits propres aux tétrapodes.

Il y a plusieurs centaines de millions d'années, des poissons osseux se sont aventurés sur les continents. Mais comment ces animaux aquatiques supportaient-ils leur propre poids et se hissaient-ils sur la terre ferme ? Neil Shubin, de l'université de Chicago, et ses collègues ont examiné le rôle des rayons des nageoires dans ce moment crucial de l'histoire évolutive.

Les paléontologues ont analysé plusieurs espèces et notamment *Tiktaalik roseae*. Ce poisson vivait il y a 375 millions d'années et aurait été capable de faire de brèves excursions sur les plages de l'époque. Les chercheurs ont choisi de l'étudier car il présente une mosaïque de caractères propres à la fois aux poissons osseux et aux tétrapodes, ce qui en fait un représentant idéal de la transition entre les modes de vie de ces deux groupes.

En comparant des modèles 3D des nageoires pectorales (celles qui ont évolué

pour donner les pattes antérieures des tétrapodes) de différentes espèces, obtenus par tomodensitométrie, les chercheurs ont constaté qu'au cours de l'évolution, les rayons sont devenus plus solides et qu'une asymétrie s'est développée entre les rayons du côté ventral et ceux du côté dorsal, les seconds devenant plus nombreux et plus larges que les premiers.

Chez *Tiktaalik roseae*, l'asymétrie est très forte, ce qui a donné une partie charnue, comme une paume, que l'animal devait utiliser pour se maintenir sur les sols boueux des rivières. Cette asymétrie suggère aussi la présence de puissants muscles sous les nageoires qui auraient aidé à supporter le poids de l'animal lorsqu'il se hissait à l'air libre. ■

WILLIAM ROWE-PIRRA

T. A. Stewart et al., PNAS, vol. 117, n° 3, pp. 1612-1620, 2019, <https://www.pnas.org/content/117/3/1612>

ARCHÉOLOGIE

DES CARRIÈRES LIÉES À PIANTARELLA

Les « villas maritimes » sont de pompeuses résidences romaines de villégiature sur la mer. Une seule est connue en Corse : la villa de Piantarella, qui domine les bouches de Bonifacio. Mais s'agit-il vraiment d'un lieu de villégiature ? Une équipe de chercheurs de l'université libre de Bruxelles, de celle d'Aix-Marseille et de la DRASSM s'est emparée de la question, et propose que la villa soit plutôt le lieu de résidence d'un administrateur des carrières de granite situées dans l'archipel des Lavezzi tout proche et de l'autre côté du détroit en Sardaigne. Ces carrières avaient l'avantage de se trouver à quelques heures de bateau d'Ostie, donc de Rome. Les chercheurs ont montré que les traces d'extraction romaines sur l'île de Cavallo sont d'ampleur ; une autre habitation romaine construite sur



L'un des fronts de taille de la carrière romaine de Cavallo.

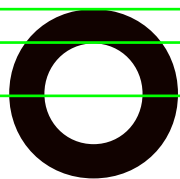
l'île aurait répondu aux besoins d'administration, tandis qu'une structure rectangulaire de 10 par 6 mètres serait les restes d'une cabane de carriers. L'enquête se poursuit. ■

FRANÇOIS SAVATIER

Communiqué de l'université libre de Bruxelles, 15 janvier 2020, <https://bit.ly/2RZ9RlZ>

NEUROSCIENCES

LA STRUCTURE INTIME DES AXONES RÉVÉLÉE



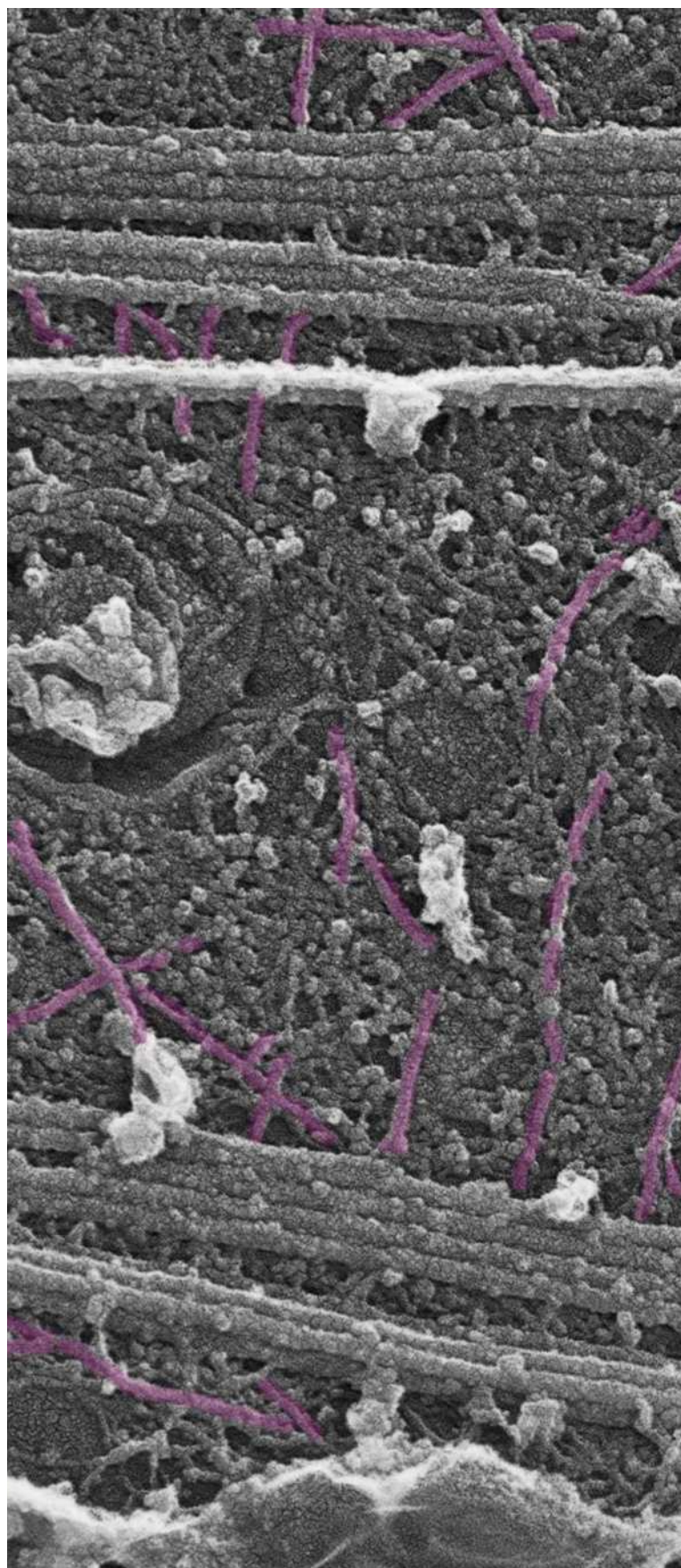
Observer l'intérieur du long bras des neurones – l'axone – à l'échelle des molécules : c'est la prouesse qu'ont récemment accomplie Christophe Leterrier, de l'Institut de neurophysiopathologie (CNRS/Aix-Marseille Université), à Marseille, et ses collègues.

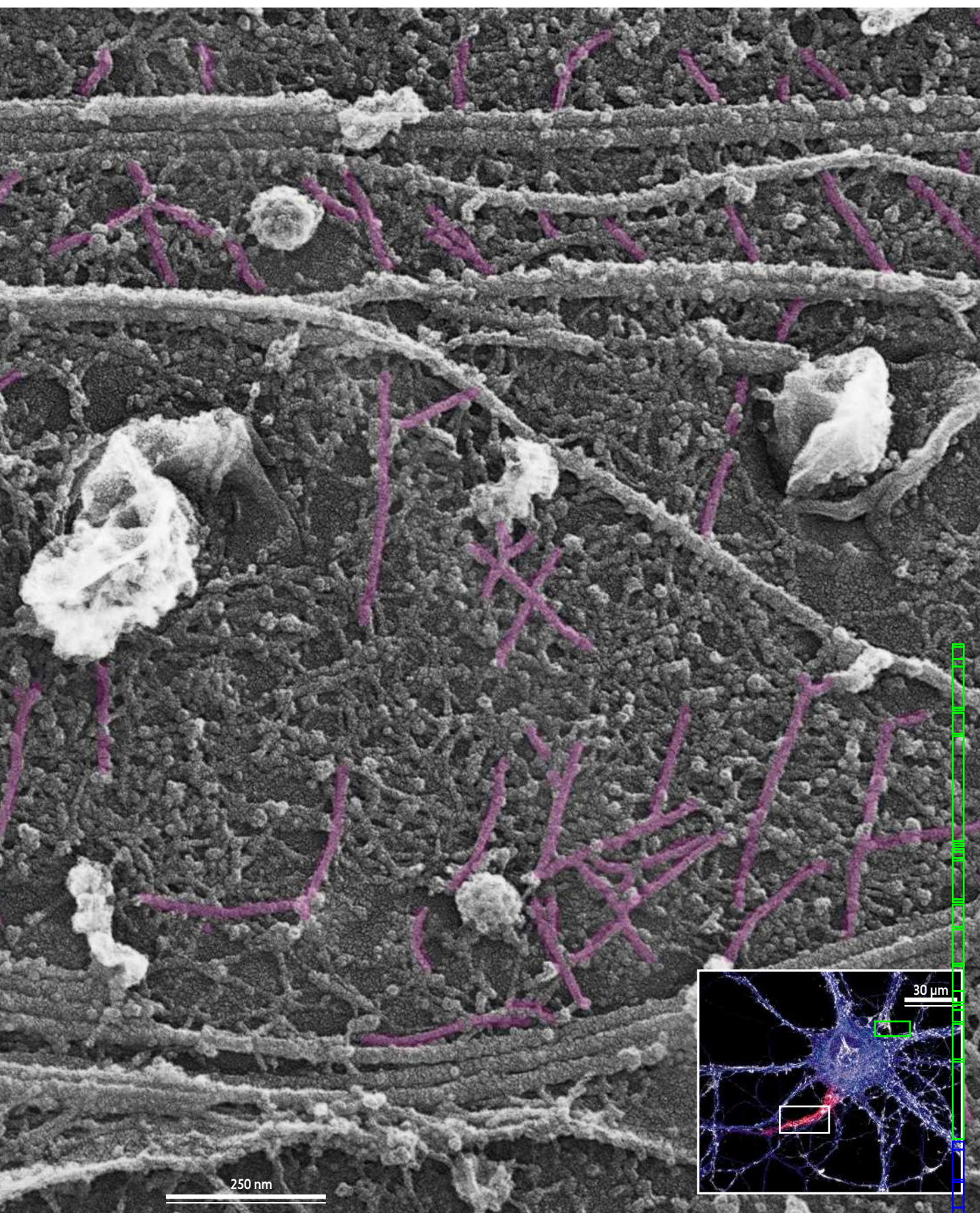
Grâce à la microscopie électronique, on sait depuis longtemps qu'à l'intérieur de ces fibres nerveuses, atteignant parfois plusieurs mètres, de longs polymères du cytosquelette – des microtubules – servent de rails au transport de vésicules. Ces dernières années, cependant, la microscopie optique à super-résolution a révélé qu'un autre composant du cytosquelette, l'actine (*en blanc dans le neurone en médaillon*), forme une structure peu commune dans l'axone : des anneaux espacés par un réseau d'une autre protéine, la spectrine (*en rouge*).

Toutefois, l'organisation de cette structure restait inaccessible par ces approches. Pour l'étudier, l'équipe de Christophe Leterrier, avec Stéphane Vassilopoulos de l'Institut de myologie (Inserm/Sorbonne Université), a mis au point un protocole pour les combiner. Sur les images de microscopie électronique obtenues (*ci-contre*), par superposition, elle a ainsi non seulement retrouvé les longs rails de microtubules (*les longues molécules horizontales*), mais aussi les anneaux d'actine (*en violet*) parmi le dense réseau de spectrine. Elle a aussi déterminé que ces anneaux étaient constitués de longs filaments entrelacés et étaient connectés les uns aux autres par le réseau de spectrine, lui-même composé de petites tiges parallèles entre elles et perpendiculaires aux anneaux, l'ensemble étant relié par ailleurs aux microtubules. Une structure robuste qui explique comment de si longues fibres résistent dans l'organisme. ■

MARIE-NEIGE CORDONNIER

S. Vassilopoulos *et al.*, *Nature Communications*, vol. 10, article 5803, 2019





© S. Vassilopoulos et al., Nature Communications, vol. 10, article 5803, 2019 (CC-BY-4.0) ; © Christophe Leterrier / CC (en médaillon)

PALÉOGÉNÉTIQUE

DES INDICES SUR LE PASSÉ DES POPULATIONS AFRICAINES

Le séquençage de quatre génomes africains datant de 8 000 et 3 000 ans raconte une histoire inattendue.

Dans les années 1990, l'équipe de Pierre de Maret, de l'université libre de Bruxelles, découvrait 18 fossiles humains dans la grotte de Shum Laka, au Cameroun. Bien plus tard, ces chercheurs se sont rendu compte que cette grotte, située au frais derrière une chute d'eau et à 1600 mètres d'altitude, pouvait avoir rendu possible quelque chose de presque impossible: la conservation, sous un climat tropical humide, d'ADN ancien. Ils ont alors invité des généticiens de l'université Harvard à en rechercher dans les squelettes de Shum Laka. Et c'est ainsi que, tout récemment, quatre génomes vieux de 8000 et de 3000 ans ont pu être séquencés.

Ce très rare ADN africain ancien est d'autant plus sensationnel que Shum Laka se trouve dans les Grassfields, région du nord-ouest du Cameroun où la linguistique historique situe l'origine des cultures paysannes bantoues qui, à partir d'il y a 3000 ans, ont colonisé les deux tiers de l'Afrique. Les causes et le déroulement de cet événement majeur de l'histoire humaine étant énigmatiques, les chercheurs ont espéré identifier enfin un échantillon génétique des premiers Bantous. En fait, ils avaient tout autre chose...

Les génomes vieux de 3000 ans sont ceux d'un garçonnet et d'une fillette apparentés, âgés de 8 et 4 ans. Ils se révèlent beaucoup plus proches de ceux des chasseurs-cueilleurs actuels d'Afrique centrale (les pygmées Baka, Bakola ou Bedzan du Cameroun, les Mbutis de République centrafricaine) et même de ceux des chasseurs-cueilleurs d'Afrique australe (les Sans), qu'ils ne le sont des génomes bantous actuels. Il en va de même des génomes datant de 8000 ans, appartenant à un garçonnet et à un adolescent apparentés âgés de 4 et 15 ans: curieusement, même si 5000 ans les séparent, ils sont de lointains cousins des deux premiers. Ainsi, les gènes de Shum Laka sont manifestement issus du vieux fond génétique d'Afrique de l'Ouest, qui préexistait à la séparation des chasseurs-cueilleurs africains et des Bantous.

En comparant statistiquement les génomes entiers, les chercheurs ont simulé, à partir des souches humaines connues, le mélange de



Ces Sans namibiens, comme les Bantous, descendent des chasseurs-cueilleurs, présents partout en Afrique avant l'expansion bantoue.

gènes à l'origine des génomes de Shum Laka. Ce travail suggère que la souche ancienne dont ils font partie avec les pygmées est la première de quatre lignées qui, il y a entre 200000 et 25000 ans, ont divergé au sein de la population archaïque d'*Homo sapiens*. Parmi les trois autres, l'une est inconnue, une autre a donné les Sans et la dernière des Africains de l'est, qui ont contribué aux populations bantoues et sont à l'origine des Eurasiens.

Les individus de Shum Laka ont un ADN qui provient à 64 % du vieux fond génétique ouest-africain. Les Bantous ont aussi hérité en partie de ce fond, ce qui expliquerait une étonnante découverte: le chromosome Y de l'adolescent porte le rarissime haplotype A00 (un groupe de gènes transmis ensemble), l'un des plus anciens connus de la lignée humaine moderne. Or cet haplotype ne se rencontre aujourd'hui presque que dans les Grassfields, devenus bantous...

Que conclure? Bien que réduit, l'échantillon d'ADN ancien issu des quatre individus de Shum Laka nous fait apercevoir la diversité génétique de l'Afrique ancienne et nous a permis de reconstruire les très anciennes divergences entre groupes humains qui ont donné naissance à la diversité actuelle. ■

F. S.

M. Lipson et al., *Nature*, vol. 577, pp. 665-670, 2020

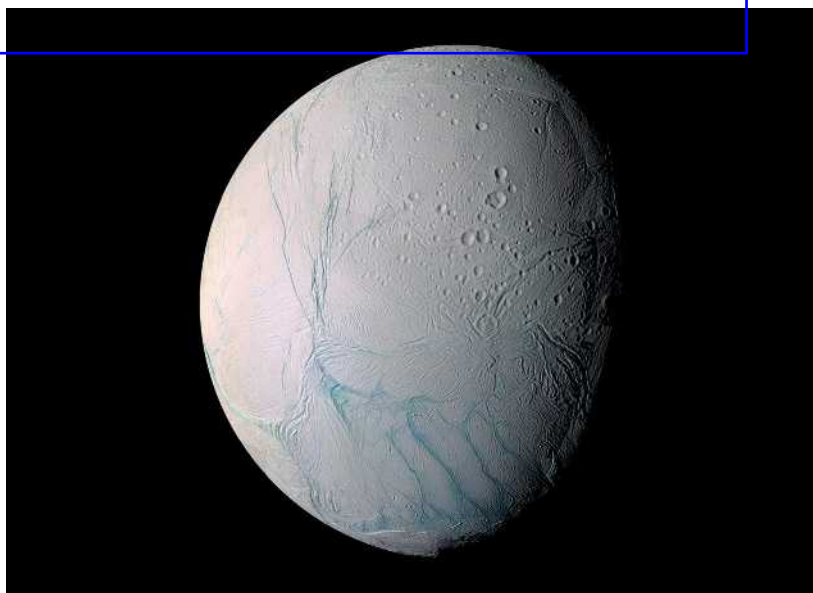
LE GÉNOME DU CORONAVIRUS SÉQUENCÉ

En décembre 2019, dans la ville de Wuhan, en Chine, une épidémie de pneumonie causée par un nouveau coronavirus, 2019-nCoV, a été détectée. Depuis, la maladie s'est propagée à travers le monde: on compte plus de 30 000 personnes infectées et 638 morts (au 7 février 2020). Afin de développer des tests de diagnostic efficaces, voire d'identifier des moyens de lutte contre l'épidémie, un effort important a été mené pour étudier le génome du coronavirus. L'institut Pasteur à Paris en a réalisé le séquençage complet en seulement cinq jours après réception des premiers échantillons. Premier résultat: les différents génomes analysés dans le monde présentent peu de diversité. Le virus n'a donc pas eu besoin de muter pour s'adapter et se propager. ■

SEAN BAILLY

Communiqué de l'institut Pasteur :
http://bit.ly/PLS509_nCoV

LES RAYURES DE TIGRE D'ENCELADE EXPLIQUÉES



Encelade présente, sur son pôle sud, quatre stries rectilignes parallèles, nommées « rayures de tigre » (en bas de l'image), par lesquelles s'échappe de l'eau sous forme de vapeur et de glace.

DES AGRÉGATS DANS L'EAU

Dans les océans, à cause des variations de pression, de température et de salinité, la densité de l'eau est inhomogène. Cela influencerait sur le comportement des particules en suspension dans l'eau, comme la « neige marine », formée de débris microscopiques agglomérés provenant des couches de surface. Roberto Camassa, de l'université de Caroline du Nord à Chapel Hill, aux États-Unis, et ses collègues ont découvert un nouveau phénomène, une force horizontale qui agrège les particules dans certains milieux liquides stratifiés en densité. Ils ont observé que des billes de plastique de quelques dixièmes de millimètre de diamètre, placées dans un bac d'eau avec un gradient de salinité – et donc de densité –, se regroupent, en quelques heures, en un seul gros paquet en forme de disque horizontal ! Ils ont ensuite expliqué cette force en mettant les mouvements du fluide en équations. ■

L. G.

R. Camassa et al., *Nature Communications*, vol. 10, article 5804, 2019

En 2005, la sonde *Cassini* a photographié d'étonnantes stries à la surface d'Encelade, une lune glacée de Saturne. Longues d'une certaine de kilomètres de long, parallèles et régulièrement espacées, ces quatre « rayures de tigre », au pôle sud du satellite, laissent s'échapper de l'eau sous forme de vapeur et de glace provenant de l'océan liquide caché sous la croûte de glace de la lune. Comment ces fractures se sont-elles formées? Douglas Hemingway, de l'université de Californie à Berkeley, et ses collègues ont montré que l'influence de Saturne aurait indirectement provoqué la formation de l'une des fissures, qui aurait ensuite donné naissance aux autres.

La croûte glacée d'Encelade est d'épaisseur très variable. La cause: les forces de marée exercées par Saturne sur la lune. Elles déforment cette dernière, conduisent à des échauffements et, surtout, sont plus fortes au niveau des pôles où la glace n'a une épaisseur que de cinq kilomètres, contre une vingtaine à l'équateur. De plus, au gré de variations irrégulières de température du satellite, une partie de l'eau de la croûte fond en profondeur ou se solidifie à nouveau. Comme l'eau se dilate en se solidifiant, le phénomène engendre des contraintes mécaniques supplémentaires sur la croûte. Celles-ci auraient, d'après l'équipe, fragilisé la croûte au point qu'une première rayure de tigre se serait ouverte au pôle sud en expulsant de l'eau liquide, libérant presque toute la surpression interne. Mais une partie de cette eau serait retombée à proximité de la rayure sous forme de glace ou de neige en s'accumulant sur les bords de la première fissure. La force exercée sur la croûte glacée par ce poids accumulé aurait donné naissance, en cascade, aux autres rayures de tigre. ■

L. G.

D. J. Hemingway et al., *Nature Astronomy*, en ligne le 9 décembre 2019

GÉOSCIENCES

LUMIÈRE SUR LES ELFES CÉLESTES

Les éclairs sont un spectacle impressionnant. Pourtant, pendant un orage, de nombreux autres événements se déroulent à l'abri de notre regard, dans les nuages ou au-dessus d'eux. Ces « phénomènes lumineux transitoires », beaucoup plus difficiles à observer, sont donc moins bien compris que les éclairs. Parmi eux, les flashes de rayons gamma et les « elfes », ces lueurs rouges fugaces qui se forment haut dans l'atmosphère. Torsten Neubert, de l'université technique du Danemark, à Copenhague, et ses collègues ont exploité des données provenant d'un épisode orageux survenu le 10 octobre 2018 en Indonésie. Ils ont proposé un nouveau scénario qui explique ces deux phénomènes, fondé sur les variations rapides du champ électromagnétique se produisant lors d'un éclair.

Les elfes sont des phénomènes lumineux en forme de disque horizontal, rouges mais émettant aussi dans l'ultraviolet, qui apparaissent à environ 90 kilomètres d'altitude, dans l'ionosphère. Les « flashes de rayons gamma terrestres », ou TGF – pour *terrestrial gamma-ray flash* –, sont, eux, de violentes émissions X et gamma, formées dans la partie supérieure des nuages, à moins de 20 kilomètres d'altitude. D'après les chercheurs, les



Les éclairs intranuage donneraient naissance conjointement aux flashes de rayons gamma et aux elfes.

elfes et les TGF auraient la même cause : les éclairs internes à un nuage. Un tel éclair ionise l'air et engendre une impulsion électromagnétique qui accélère les électrons présents. Ces derniers donneraient naissance à un TGF en percutant les molécules de l'air. Puis cette onde électromagnétique se propagerait jusqu'à l'ionosphère, naturellement ionisée, où elle produirait un elfe en y excitant les électrons libres. ■

L. G.

T. Neubert et al., *Science*, vol. 367, pp. 183-186, 2019

EN BREF

DU PLASTIQUE POUR L'ÎLE DE PÂQUES

L'île de Pâques est isolée au sud du Pacifique, mais quand même menacée de pollution par les plastiques dérivants. Dans le cadre du projet ESMOI dédié à l'étude des îles chiliennes, Simon Jan van Gennip, du Laboratoire d'études en géophysique et océanographie spatiales, à Toulouse, et ses collègues ont montré que les courants océaniques y apportent en moins de deux ans les plastiques jetés par les pêcheurs au large du Pérou ou parvenus dans la mer depuis les côtes américaines.

Scientific Reports, 23 déc. 2019

LE PLUS VIEUX CRATÈRE D'IMPACT

Yarrabubba, au centre de l'Australie occidentale, est un cratère d'impact dont l'âge restait mal connu. Chris Kirkland, de l'université de Curtin, en Australie, et ses collègues ont daté les zircons et la monazite choqués retrouvés sur place : 2 229 millions d'années. Cela en fait la plus ancienne structure d'impact connue. Comme l'impact a eu lieu au début de la sortie d'une glaciation mondiale, les chercheurs soupçonnent qu'il a modifié le climat.

Nature Comm., 21 janvier 2020

74 FOSSILES NÉANDERTALIENS EN SIBÉRIE

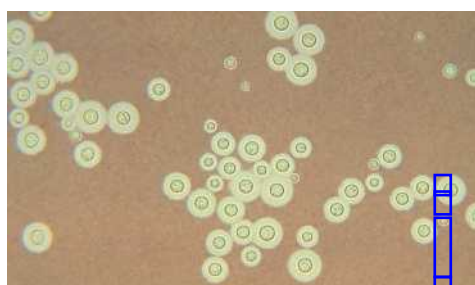
Avec des collègues, Kseniya Kolobova, de l'Académie russe des sciences à Novossibirsk, a mis au jour 74 fossiles néandertaliens et 90 000 outils en pierre et autres artefacts dans la grotte de Chagyrskaya, dans les montagnes de l'Altai, en Sibérie. Les chercheurs affirment que les outils correspondent étroitement au style des outils de Néandertal trouvés en Crimée et dans le nord du Caucase, ce qui suggère que les Néandertaliens de Chagyrskaya sont originaires d'Europe de l'Est.

PNAS, 27 janvier 2020

BIOCHIMIE

DU CUIVRE AUX MÉNINGITES FONGIQUES

Des métalloprotéines des champignons seraient impliquées dans le déclenchement de méningites fongiques graves. Ces protéines sont apparentées aux LPMO (pour *lytic polysaccharide mono oxygenase*), des enzymes capables de dégrader la cellulose grâce à l'ion cuivre Cu^{2+} qu'elles contiennent. Jean-Guy Berrin, de l'Inrae, à Marseille, et ses collègues ont d'abord constaté que les métalloprotéines ne présentent pas l'activité enzymatique de dégradation des LPMO. Ils ont ensuite suggéré qu'elles jouent un autre rôle dans le champignon : elles y assureraient le transport et la régulation du cuivre. L'équipe de Dennis Thiele, de l'université Duke, aux États-Unis a conforté cette piste. Elle a montré que la métalloprotéine Bim1, de type



Les champignons *Cryptococcus neoformans* provoquent des méningites qui peuvent être mortelles pour les personnes au système immunitaire affaibli.

LPMO et *a priori* inactive, régule effectivement le cuivre dans le champignon microscopique *Cryptococcus neoformans*. Le champignon résiste ainsi aux attaques du système immunitaire humain, impliquant des ions Cu^{2+} , et se répand dans l'organisme. ■

MARTIN TIANO

A. Labourel et al., *Nature Chemical Biology*, en ligne le 13 janvier 2020 ; S. García-Santamarina et al., *ibid.*

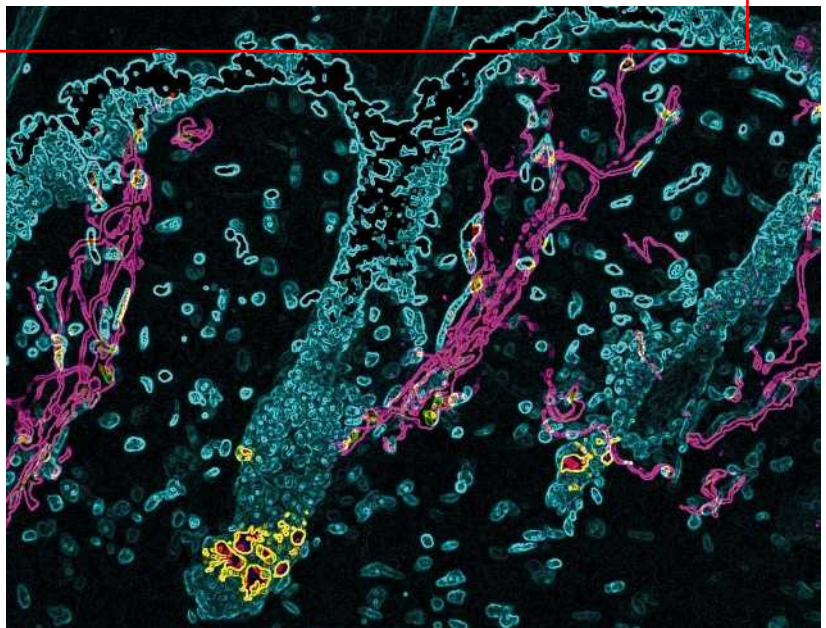
UN MICROBIOTE AU GRÉ DU VOL

De nombreux facteurs influent sur la composition du microbiote d'un hôte. Pour préciser l'importance de la coévolution entre l'hôte et les bactéries de son intestin, Frédéric Delsuc, de l'institut des sciences de l'évolution de Montpellier, et ses collègues ont analysé le microbiote intestinal de près de 900 espèces de vertébrés. Ils constatent que chez les mammifères terrestres, des hôtes à l'alimentation et la phylogénie proches ont des microbiotes similaires. Une exception: les chauves-souris, dont les populations bactériennes intestinales sont très variables – comme chez les oiseaux! Chez ces animaux, les adaptations physiologiques au vol auraient rendu moins cruciale la composition du microbiote. ■

S. B.

S. J. Song et al., *mBio*, vol. 11, e02901-19, 2020

LE STRESS DONNE BIEN DES CHEVEUX BLANCS



Sur cette vue de la racine d'un poil, les cellules souches (en jaune) sont au contact des nerfs du système sympathique (en magenta).

UN ARBRE DES LANGUES DES SIGNES

Les linguistes ont retracé avec précision l'évolution d'un grand nombre de langues... Mais les langues des signes, essentiellement orales, restent plus difficiles à étudier en raison du peu de traces écrites disponibles. Justin Power, de l'université du Texas à Austin, aux États-Unis, et ses collègues viennent de préciser les liens de parenté entre certaines langues de ce type. Pour ce faire, ils ont analysé 76 «alphabets manuels» remontant jusqu'en 1593; ces alphabets associent un geste manuel à chaque lettre et servent d'interface entre une langue des signes et une langue parlée – par exemple pour épeler un nom propre inexistant dans la langue signée. Les chercheurs ont ensuite codé numériquement les caractéristiques de ces configurations manuelles. En adaptant des méthodes informatiques d'ordinaire utilisées en phylogénétique, ils en ont déduit des relations de parenté entre ces langues. ■

L. G.

J. M. Power et al., *Royal Society Open Science*, vol. 7, n° 1, 2020

En cas de stress, «je me fais des cheveux blancs»! Mais est-ce vrai? Bing Zhang, de l'université Harvard, et ses collègues ont confirmé que ce n'était pas une idée reçue. Ils ont prouvé, en identifiant tous les mécanismes en jeu chez des souris, que le stress provoque bien l'apparition de poils blancs.

Pour ce faire, les chercheurs ont d'abord testé sur des souris au pelage complètement noir différents types de stress, par exemple une douleur ou l'exposition chronique à des événements imprévisibles. Tous provoquaient un blanchiment de leur pelage, mais, avec la douleur, il suffisait de quatre semaines pour que tous leurs poils deviennent blancs. Ces poils n'avaient plus de mélanine, molécule qui assure la pigmentation capillaire et qui est produite par les mélanocytes des follicules pileux.

Les chercheurs ont ensuite montré que les souris stressées ne présentaient plus assez de cellules souches de mélanocytes dans leur peau. En effet, sous l'effet de la douleur, ces cellules se différenciaient et mouraient trop vite, sans passer par la phase où elles produisent la mélanine. Ainsi, les poils noirs tombés n'étaient pas renouvelés par des poils à mélanine en raison d'une accélération de la maturation des cellules souches.

Quelle en est la cause? La douleur et le stress provoquent une stimulation du système nerveux sympathique, impliqué dans la régulation des fonctions vitales autonomes, telles que la respiration et le rythme cardiaque. Or ce système, qui permet au corps de réagir quand il est stressé, libère aussi de la noradrénaline, une molécule du stress, près des réserves de cellules souches. Bing Zhang et ses collègues ont alors montré que la noradrénaline ainsi sécrétée stimule la maturation des cellules souches et provoque leur disparition précoce. ■

BÉNÉDICTE SALTHUN-LASSALLE

B. Zhang et al., *Nature*, vol. 577, pp. 676-681, 2020

ARCHÉOLOGIE-HISTOIRE

BIOLOGIE



CÉSAR CONTRE VERCINGÉTORIX

Laurent Olivier
Belin, 2019
622 pages, 26 euros

Ce gros livre touffu, émaillé de titres et sous-titres piquants, raconte l'histoire de la Gaule en 52 avant notre ère. Cette année-là connut un vrai renversement de situation: César la commença en grand chef de guerre et il l'aurait terminée en petit chef de troupes en retraite, si Vercingétorix n'avait voulu anéantir son armée en la piégeant à Alésia.

L'auteur présente les deux personnages, ce qui est plus facile pour le Romain, mieux connu que le Gaulois, puis il raconte le conflit. Il recommande de se méfier des écrits de César, ce qui avait été minutieusement établi par Michel Rameau dans sa thèse de 1952. Mieux, il conseille de le comparer avec l'historien de langue grecque Dion Cassius, qui a utilisé une source hostile à César. Cette confrontation le conduit à présenter la stratégie de Vercingétorix comme une guérilla. Il ne faudrait pas négliger la stratégie, l'installation de troupes sur les versants est et sud du Massif central, ce qui a contraint César à retourner dans la vallée du Rhône pour y défendre la province romaine. Il ne faudrait pas non plus sous-estimer la poliorcétique: vaincus au siège d'Avaricum (Bourges), les Gaulois ont été vainqueurs à Gergovie.

Et nous arrivons à Alésia. Le débat entre les tenants de la localisation à Alise, en Côte-d'Or, et les partisans des Chaux-de-Crotenay, dans le Jura, est longuement analysé pour conclure en faveur du premier de ces deux sites. L'auteur montre que cette discussion académique a été polluée par des interférences politiques, où l'on voit apparaître non seulement Napoléon III, mais encore l'actuelle extrême droite.

Au total, Vercingétorix aurait été utilisé pour forger ce qu'il est convenu d'appeler un « roman historique ». Là se situe le lien entre ce passé lointain et notre présent.

YANN LE BOHEC

PROFESSEUR ÉMÉRITE À L'UNIVERSITÉ PARIS-SORBONNE



LA BELLE HISTOIRE DE LA VIE

Michel Gauthier-Clerc

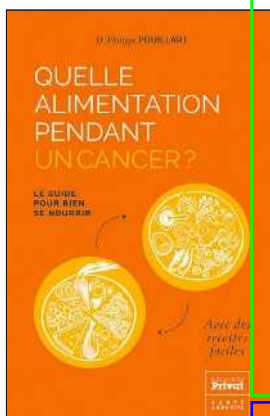
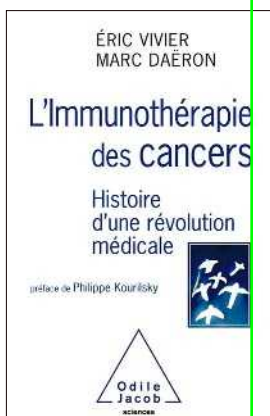
De Boeck, 2019
384 pages, 29 euros

Le titre accrocheur et... banal semble annoncer encore un ouvrage de vulgarisation sur l'histoire de la vie: sortie des eaux, dinosaures, mammouths, etc. Pas du tout! Il cache un contenu tout autre: il s'agit ici de l'histoire des inventions et découvertes essentielles qui ont conduit à la mise au jour des mécanismes du vivant. L'auteur a su présenter chaque découverte, chaque avancée des connaissances d'une façon à la fois claire et approfondie. Il montre comment ont sauté les verrous qui bloquaient le progrès scientifique, soit grâce des changements de paradigme, soit grâce à des avancées techniques.

Les interactions positives ou négatives entre religion et science sont mises en évidence. Les méfaits de l'utilisation abusive de certaines hypothèses ou théories scientifiques, tel l'eugénisme, sont aussi évoqués. Dans chaque cas, l'auteur explique comment les chercheurs ont pu faire leurs découvertes, parfois certes par « accident », mais les accidents en science ne sont que le fruit d'un travail acharné et d'interprétations correctes de résultats non attendus. Du nombre gigantesque des découvertes ayant été faites sur le vivant, l'auteur a su extraire celles qui ont joué un rôle scientifique ou sociétal majeur.

L'approche chronologique court du Paléolithique ancien à 2017. Elle crée un ordre bienvenu des idées, par ailleurs habilement illustrées et résumées de proche en proche. La bibliographie, y compris sur internet, est excellente. À ne pas manquer.

ANDRÉ NEL
MNHN, PARIS



L'IMMUNOTHÉRAPIE
DES CANCERSEric Vivier et Marc Daëron
Odile Jacob, 2019
256 pages, 23,90 euros

Agressive, la « chimio » des cancers est souvent mal tolérée. En contrepoint, les auteurs présentent l'immunothérapie des cancers comme une thérapie consistant à donner au malade les moyens biologiques de se battre contre sa maladie: ils racontent la révolution qui rend au système immunitaire l'initiative contre le cancer.

L'idée est ancienne. Au début du XX^e siècle, des vaccins censés apprendre à l'organisme à détruire les cellules cancéreuses n'avaient pas eu grand succès. Cela change au début du XXI^e siècle: le récit d'une « guérison » d'un cancer du poumon en 2015 après immunothérapie retrouve les accents épiques des premiers succès des antibiotiques. Les anticorps monoclonaux à l'essai (produits d'un type unique de cellule) interviennent sur des sites bien identifiés du système immunitaire où ils lèvent le blocage de la réponse antitumorale, face à des cellules malignes activées par des virus ou des substances toxiques de l'environnement. C'est « la découverte du traitement du cancer par inhibition de la régulation immunitaire négative », qui a valu au Japonais Tasuku Honjo et à l'Américain James Allison un prix Nobel en 2018.

Les nouvelles molécules peuvent être spécifiques de telle ou telle tumeur, et même du patient à qui sont injectées des cellules portant sa signature génétique: on n'est pas loin de la « médecine personnalisée » tant vantée. L'industrie a lancé plusieurs dizaines de produits, qui n'ont cependant d'effets que dans certaines indications et pour un coût élevé. Parmi eux, l'OMS a retenu trois anticorps monoclonaux comme médicaments essentiels, mais pour le moment, les malades du Sud, à l'exception de Cuba, restent à l'écart d'un marché en pleine expansion où la Chine et l'Inde ont seuls pris pied.

Une épopée médicale qui ne fait que commencer et à laquelle les deux spécialistes initient le lecteur.

ANNE-MARIE MOULIN
LABORATOIRE SPHERE, PARISQUELLE ALIMENTATION
PENDANT UN CANCER ?Philippe Poullart
Privat, 2019
264 pages, 16,90 euros

La responsabilité de l'environnement et de l'alimentation dans la genèse des cancers est largement documentée et fait aujourd'hui consensus en matière de prévention. À l'inverse, combattre efficacement les méfaits du cancer dans ses multiples facettes par une alimentation adaptée et personnalisée est loin de faire l'unanimité. Bien que cette approche ait progressivement acquis ses lettres de noblesse, trop de professionnels la négligent encore. Pour autant, face aux multiples effets secondaires des traitements, le choix et la qualité des aliments, les modes de préparation, la convivialité du repas liée à un mode de vie adapté, sont bien des réponses indispensables à la prise en charge du cancer. Il manquait à cet égard un guide accompagnant patients et soignants. C'est le défi qu'a relevé l'auteur, enseignant-chercheur à l'institut polytechnique UniLaSalle de Beauvais.

Son ouvrage constitue une véritable référence. Nourri par une démarche humaniste personnelle liée à une pratique scientifique rigoureuse, il a été réalisé dans le cadre d'un travail de recherche collectif de plusieurs années auquel a été associé un panel de près de 200 personnes atteintes de cancer, qui l'ont alimenté de leurs réflexions et de leur expérience.

Partant du postulat que manger et cuisiner sont d'authentiques prescriptions, l'auteur nous guide dans les arcanes du quotidien pour faire face à toutes les situations auxquelles les patients et leur famille sont confrontés. Chaque item abordé (plus de 100) est accompagné d'un QR-code permettant d'approfondir le sujet et l'ouvrage est complété par de nombreuses suggestions de recettes à télécharger.

BERNARD SCHMITT
CERNH, L'ORIENTLES GRAINES ET LEURS USAGES
Nathalie VidalDelachaux & Niestlé, 2019
444 pages, 39,90 euros

Perles, sculptures, mais aussi nourritures diverses... Les graines remplissent nos ventres et alimentent notre vie culturelle depuis toujours. Archéologue et ethnologue, l'autrice nous offre une vue d'ensemble synthétique de leurs usages. Son très utile ouvrage aligne 900 articles consacrés chacun à une espèce, organisés par familles botaniques. Les photographies et autres illustrations botaniques qui l'agrémentent en font un très beau recueil.

COMMENT NOUS SOMMES
DEVENUS CE QUE NOUS SOMMES
David ReichQuanto, 2019
380 pages, 24,50 euros

Dans ce livre, l'un des pionniers de l'analyse de l'ADN ancien se penche notamment sur la validité des catégories ethniques utilisées aux États-Unis pour décrire le « melting-pot » américain. De façon passionnante, il retrace aussi les métissages à l'origine de l'Europe, de l'Inde, de l'Extrême-Orient et des Amériques et discute des recherches sur les différences biologiques entre populations, notamment des biais idéologiques qui s'y introduisent. Un ouvrage salvateur pour mieux appréhender les discussions scientifiques en cours sur nos origines.

CHRONOLOGIE DE L'HISTOIRE
DES SCIENCESDavid Aubin et Néstor Herrán (dir.)
Hatier, 2019
384 pages, 19,90 euros

Commençant en 3000 avant notre ère et se poursuivant jusqu'à aujourd'hui, cette chronologie illustrée donne une précieuse vision d'ensemble de l'histoire des sciences, avec 144 dates emblématiques. Une frise temporelle simple et lisible orne le bas de chaque page, où est soulignée la date d'une avancée technique ou scientifique significative. Celle-ci est l'objet d'un petit article décrivant l'essentiel de la découverte et de son auteur. Une formule de livre bien vue, dans la collection Bescherelle.

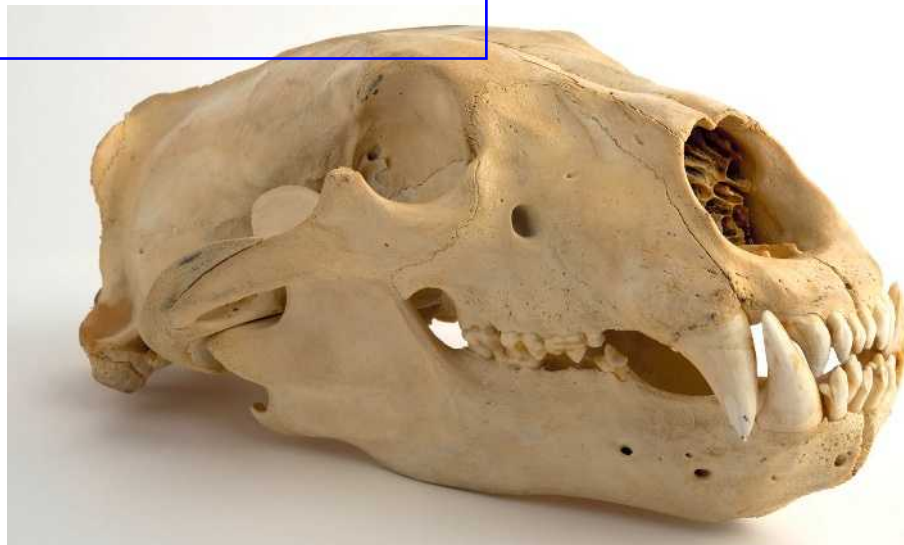
LYON

JUSQU'AU 6 DÉCEMBRE 2020

Musée des Confluences

www.museedesconfluences.fr

Traces du vivant



Le vivant laisse beaucoup de traces de natures diverses, mais celles dont il s'agit ici sont les os, dents et cornes des animaux vertébrés, humains compris. Ces vestiges corporels sont, pour les zoologistes et les paléontologues, des indices de première importance pour classer les vertébrés et comprendre leur histoire et leur évolution, aspect mis en avant dans l'exposition à travers un grand plateau d'anatomie comparée et une mise en scène de squelettes.

Mais les restes osseux des animaux racontent aussi des histoires humaines. En effet, les sociétés humaines utilisent depuis la préhistoire les tissus osseux pour en faire des outils, des instruments de musique, des jouets, des œuvres d'art... Et les os sont par ailleurs l'objet de croyances et de symboliques diverses selon les cultures. Cet aspect humain est également bien représenté dans l'exposition, par des objets ethnographiques notamment. ■

NANCY

DU 16 FÉVRIER AU 6 MARS 2020

Maison de l'Étudiant

Tél. 03 72 74 06 30

La diversité des abeilles



Cette petite exposition photographique fait découvrir la diversité des abeilles, notamment celle des mélipones, des insectes plutôt méconnus de ce côté de l'Atlantique : il existe environ 500 espèces de ces abeilles dépourvues d'aiguillon et qui produisent du miel médicinal, et dont les milieux de vie sont menacés. ■

PRADES-LE-LEZ (HÉRAULT)

JUSQU'AU 28 JUIN 2020

Domaine départemental de Restinclières

www.herault.fr

Océans plastifiés



En s'appuyant sur les recherches scientifiques récentes, cette exposition retrace de façon pédagogique l'invasion des déchets plastiques dans les mers, et présente des solutions pour lutter contre cette pollution. Pour prendre conscience, une fois de plus, de l'urgence d'agir personnellement, collectivement et politiquement. ■

ET AUSSI

Lundi 9 mars, 19 h

Centre Pompidou, Paris

www.bpi.fr

LES PLANTES ONT-ELLES UNE MÉMOIRE ?

Claire Damesin, écophysiologiste du végétal, et Iglia Christova, artiste plasticienne, abordent la question de la mémoire et de sa signification dans le contexte botanique.

Mardi 10 mars, 20 h 30

Espace des sciences,

Rennes

www.espace-sciences.org

LA COQUILLE SAINT-JACQUES

Laurent Chauvaud, écologue au CNRS et auteur de *La Coquille Saint-Jacques, sentinelle de l'océan* (Équateurs, 2019), explique en quoi ce mollusque bivalve constitue une archive environnementale et un témoin de l'état de santé de la mer.

Jeudi 12 mars, 18 h

La Turbine, Annecy

www.univ-smb.fr/amphis

DE L'ANOREXIE MENTALE À L'OBÉSITÉ

Conférence de Morgane Metral, du Laboratoire interuniversitaire de psychologie à Chambéry, sur les distorsions de la représentation du corps par le cerveau. Également le 17 mars à Chambéry et le 19 à Faverge-Seythenex.

Mercredi 18 mars, 14 h

UFR de droit, Poitiers

emf.fr

POURQUOI LA TERRE EST RONDE ?

L'astrophysicien Alain Riazuelo raconte sans platitude les recherches sur la forme de notre planète, qui ont démarré sérieusement il y a 2 500 ans.

Jeudi 26 mars, 12 h 30

Université Toulouse III

www.univ-tlse3.fr

IA : OPPORTUNITÉ OU RISQUE ?

Les algorithmes d'apprentissage peuvent reproduire les biais cachés dans les données qu'ils alimentent. Jean-Michel Loubes évoque, entre autres, ce danger.

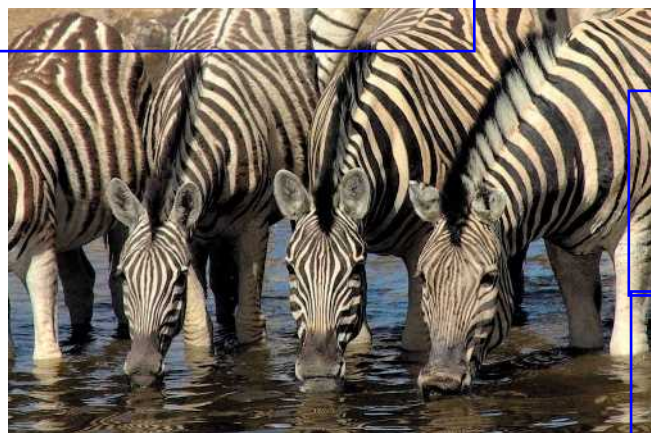
BORDEAUX

JUSQU'AU 31 DÉCEMBRE 2020

Muséum de Bordeaux

www.museum-bordeaux.fr

Afrique, savane sauvage



Dans le cadre de la programmation 2020 intitulée Naturalia Africa, le Muséum de Bordeaux met en scène ses collections de spécimens d'espèces emblématiques de la savane africaine, complétées de prêts des muséums de Nancy et de Montauban. L'exposition met notamment en lumière comment l'activité commerciale du port de Bordeaux a contribué à la constitution de ces collections. Mais le cœur du propos est la savane africaine et les animaux qui la peuplent – un ensemble de milieux exceptionnels où la vie est restée sauvage mais que l'agriculture, la chasse, le braconnage et l'expansion humaine menacent de plus en plus.

© Muséum de Bordeaux

PARIS

PERMANENT

Hôtel Gaillard, Paris 17^e

www.citeco.fr

Citéco, la Cité de l'économie

Ouvert au public depuis juin 2019, Citéco est un musée créé par la Banque de France avec l'ambition de rendre l'économie plus accessible et compréhensible par tous. C'est le seul musée de ce type en France. Il propose un parcours d'initiation à l'économie en six séquences, dont les trois premières décrivent les éléments fondamentaux de l'économie: l'échange, les acteurs et les marchés. Les deux suivantes sont consacrées aux instabilités et aux régulations, tandis que la dernière séquence, intitulée « Trésors », présente des objets liés à la fonction bancaire.

© Charlotte Donker



Chaque séquence propose des manipulations interactives, des jeux, des vidéos, des photos, des objets... Le tout dans un lieu remarquable: l'hôtel Gaillard, un palais de style néo-Renaissance construit à la fin du XIX^e siècle pour le banquier Émile Gaillard et racheté par la Banque de France en 1919.

ENGHIEN-LES-BAINS

JUSQU'AU 11 AVRIL 2020

Centre des arts

www.cda95.fr



Les artisans du rêve

Cette exposition est réalisée en collaboration avec ArtFX, école réputée qui forme aux métiers

de l'animation 2D et 3D, du cinéma d'effets spéciaux et du jeu vidéo – et qui, en septembre de cette année, ouvrira une antenne à Enghien-les-Bains.

Les visiteurs pourront y voir une sélection de courts-métrages illustrant le savoir-faire en matière de cinéma de science-fiction, ainsi que des maquettes et dessins, costumes et éléments de décors constituant les coulisses de la création visuelle.

SORTIES DE TERRAIN

Samedi 7 mars

Champlan (Essonne)

montauger.essonne.fr

Tél. 01 60 91 97 34

ESPÈCES INVASIVES

À l'occasion de la Journée mondiale de la vie sauvage, la Fédération régionale de défense contre les organismes nuisibles propose une conférence et une sortie sur la question des espèces invasives.

Dimanche 8 mars, 9 h 30

Gare de

Savigny-le-Temple-Nandy

(Seine-et-Marne)

www.anvl.fr

Tél. 01 64 22 61 17

PLANTES ET CHAMPIGNONS

Une sortie botanique et mycologique à la journée en forêt de Rougeau, qui n'exclut pas les autres points d'intérêt naturaliste.

Dimanche 15 mars, 9 h

Saint-Galmier (Loire)

www.tpo.fr

Tél. 04 77 41 46 90

AVANT-GOÛT DE PRINTEMPS

Une matinée de promenade aux alentours de Bellegarde-en-Forez à la rencontre des oiseaux des bois et de leurs premiers chants de la saison, ainsi que des premières fleurs.

Mercredi 18 mars, 19 h

Mézières-en-Brenne

(Indre)

destination-brenne.fr

Tél. 02 54 28 12 13

BATRACIENS

Une excursion nocturne de deux heures pour assister au spectacle des tritons, grenouilles, salamandres qui, au printemps, quittent leurs abris pour des points d'eau où ils pourront se reproduire.

Samedi 21 mars, 9 h

Signes (Var)

www.cen-paca.org

Tél. 04 42 20 03 83

LE SIOU BLANC

Une randonnée de cinq heures sur le plateau du Siou Blanc, site remarquable par ses formations karstiques (avens, dolines...).



LA CHRONIQUE DE
GILLES DOWEK

LE PARI DU TOURNANT ÉTHIQUE

**Le succès des entreprises informatiques de demain
reposera-t-il sur l'éthique et la protection des données ?**



Face aux pressions
des citoyens,
les sociétés
informatiques
devront miser
sur la protection
des données
et non sur leur
exploitation
à outrance.

Dans l'histoire de l'industrie, et en particulier informatique, un même scénario semble se répéter encore et toujours : une entreprise maîtrise une technique à la perfection et domine le marché, mais ne voit pas que cette technique perd progressivement de son importance, au profit d'une autre. Cette entreprise se voit alors supplantée par une autre, qui maîtrise mieux la nouvelle technique. Ainsi, IBM, qui maîtrisait la construction des ordinateurs, n'a pas vu le tournant des systèmes d'exploitation et s'est vu supplanté par Microsoft. Microsoft, qui maîtrisait les systèmes d'exploitation, n'a pas vu le tournant du web et s'est vu supplanté par Google. Google, qui maîtrisait le web asymétrique, n'a pas vu le tournant du web symétrique – le web 2.0, les réseaux sociaux, etc. – et s'est vu supplanté par Facebook. Bien entendu, les entreprises détrônées ne disparaissent pas, mais elles réalisent moins de profits et perdent de leur superbe.

Il est difficile de prédire ce que sera le prochain tournant, car le futur est, par

essence, ouvert. Mais il est possible de se faire une idée en examinant les faiblesses des entreprises qui dominent actuellement le marché des systèmes informatiques – depuis les ordinateurs et les réseaux jusqu'aux logiciels et aux services en ligne.

**De nouvelles entreprises
plus cohérentes avec nos
valeurs devraient émerger**

Les moteurs de recherche, les réseaux sociaux, mais aussi les plateformes de diffusion de musique, les sites de commerce en ligne, les fournisseurs d'électricité, etc. collectent aujourd'hui des informations personnelles sur leurs clients, qui leur permettent de tout savoir de la vie de ces derniers ; et le moins que nous puissions dire est que ces entreprises exploitent ces données avec une

certaine désinvolture et un certain mépris des droits fondamentaux de ces clients.

Il est donc possible que le prochain tournant soit celui de l'éthique. Car derrière la critique, parfois maladroite, des entreprises qui exploitent ces données, nous percevons le souhait d'avoir accès à des services informatiques plus respectueux des droits de leurs clients et, plus généralement, des citoyens.

Au-delà de cette question des données personnelles, le déploiement des véhicules autonomes, l'orientation des étudiants à l'entrée de l'université, la justice prédictive, l'informatisation des services publics ou le développement des villes « intelligentes » posent de redoutables – et nouvelles – questions éthiques.

Ce questionnement est très récent, aussi bien du côté des citoyens, qui utilisent au quotidien des systèmes informatiques depuis deux ou trois décennies seulement, que du côté des informaticiens, qui ont perçu, un peu tardivement, l'ampleur de l'impact de ces systèmes, et des éthiciens, autrefois presque exclusivement focalisés sur les questions d'éthique biomédicale.

Si ce pari devait se concrétiser, nous devrions donc voir émerger de nouvelles entreprises, qui utiliseront des techniques nouvelles, plus cohérentes avec nos valeurs.

Malgré des efforts louables, il est probable que les entreprises qui dominent aujourd'hui le marché des objets et services informatiques n'arriveront pas à se saisir de ces questions éthiques. Elles sont trop profondément organisées autour de l'idée, par exemple, de l'exploitation des données qu'elles récoltent, de même qu'IBM était organisée pour construire des ordinateurs ou Microsoft pour développer des systèmes d'exploitation. Et il est difficile, pour une entreprise, de changer d'état d'esprit.

L'éthique, qui nous apparaissait naguère comme une entrave à l'innovation, devrait, au contraire, devenir un avantage compétitif pour les entreprises qui en maîtriseront les enjeux. ■

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

3 mars

Le Bureau des légendes : la genèse

Éric Rochant, créateur, auteur et producteur de la série, s'entretient avec **Mélanie Benard-Crozat**, journaliste.

10 mars

La non-prolifération nucléaire : accords et désaccords

David Bertolotti, directeur des affaires stratégiques, ministère de l'Europe et des Affaires étrangères; **Bruno Feignier**, directeur du programme Matières et non-prolifération, CEA; **Emmanuelle Maître**, chargée de recherche à la Fondation pour la recherche stratégique.

17 mars

Cyberwars : les États contre-attaquent

Adeline C., cheffe de service cyber à la DGSi; **Éric Filiol**, expert en cryptologie et virologie informatique; **Julien Nocetti**, enseignant-chercheur, Écoles de St Cyr Coetquidan, Rennes, chercheur associé à l'IFRI; un expert cyber de la DRSD.

24 mars

Antiterrorisme : la priorité des services de renseignement

Bernard Emié, directeur général, DGSE; **Nicolas Lerner**, directeur général, DGSi; **Floran Vadillo**, chercheur associé, université de Bordeaux.

31 mars

Espionnage et démocratie : un couple sous tension

Didier Bigo, professeur de sociologie politique internationale à Sciences Po Paris et au King's College de Londres; **Olivier Chopin**, docteur en science politique, chercheur associé à l'EHESS; **Bertrand Warusfel**, avocat, professeur à l'université Paris 8.

Accès gratuit dans la limite des places disponibles.

> Réservation obligatoire pour les séances du 17 et 24 mars : cite-sciences.fr, rubrique conférences.

EN PARTENARIAT AVEC



AVEC L'APPUI SCIENTIFIQUE DU



la recherche pour construire un nouveau monde

conférences
vendredi 6 mars
— 18h30

cité
sciences
et industrie

© NASA-Soho

cité
sciences
et industrie

les services secrets sortent de l'ombre

cycle de conférences
— les mardis à 19h

Vendredi 6 mars à 18h30

Une rencontre avec trois chercheuses qui oeuvrent quotidiennement pour repousser les frontières de la connaissance. En première partie, chacune donnera une conférence qui fera le point sur son domaine de recherche. En deuxième partie, une table ronde s'intéressera à la place des femmes dans le monde scientifique.

Avec : Céline Calvez, députée; Inbar Fijalkow, informaticienne, enseignante-chercheuse (Ensea / université Cergy-Pontoise / CNRS); **Caroline Freissinet**, astrochimiste, CNRS; **Pascal Huguet**, directeur de recherche au CNRS, université Clermont Auvergne; **Nicole Vilmer**, astrophysicienne, CNRS.

EN PARTENARIAT AVEC



FEMMES & SCIENCE
STRUCTURE

Accès gratuit

Informations cite-sciences.fr

AVEC LE SOUTIEN DE **SCIENCE**

LA CHRONIQUE DE
VIRGINIE TOURNAY

UNE VIRALITÉ PARFOIS UTILE

Les réseaux sociaux propagent à grande vitesse des messages pas toujours vrais. Mais n'oublions pas que cette viralité de l'information peut aussi servir la prévention des risques et la sécurité civile.



La sécurité de nos territoires est-elle sensible à l'activité des réseaux sociaux? Avec le succès contagieux de l'application Twitter, les espaces numériques et physiques apparaissent de plus en plus interdépendants. En cause, la grande réactivité des usagers face aux événements soudains et la propagation fulgurante de ces contenus qui fait la marque de ce réseau social. La viralité de l'information par le «retweet», le partage en cascade d'un même message, a un impact direct sur le monde physique.

L'actualité de janvier en donne la démonstration. Le président de la République, Emmanuel Macron, et son épouse ont été évacués du théâtre parisien Les Bouffes du Nord pendant quelques instants à la suite d'un tweet signalant leur présence par un journaliste militant qui assistait à la même représentation. Avec, pour conséquence, le rassemblement rapide de manifestants aux abords du théâtre, puis l'intervention des forces de l'ordre qui ont mis en place un périmètre de sécurité.

Dans cet exemple, la communication numérique a porté atteinte à la sûreté présidentielle. Mais, inversement, la réactivité des internautes peut renforcer la sécurité des territoires. Des recherches en intelligence artificielle se sont appuyées sur cette propriété afin de

La réactivité des internautes peut renforcer la sécurité des territoires

mettre au point des systèmes collaboratifs de prévention des risques environnementaux. Le réseau Twitter est en effet fortement mobilisé par les victimes de catastrophes naturelles pour diffuser des témoignages inquiets, souvent accompagnés de photos et de vidéos. Ces contenus sont précieux, car ils rendent compte de l'ampleur en temps réel d'un séisme ou d'une inondation, et de la

façon dont l'événement est ressenti par la population.

De ce point de vue, la plateforme numérique Suricate-Nat installée l'année dernière par le BRGM, l'agence géologique française, constitue un outil de veille qui analyse automatiquement d'immenses volumes de données issues de Twitter grâce à des algorithmes de tri. En identifiant les pics d'activité et la géolocalisation des tweets collectés, les chercheurs déduisent le périmètre des zones de perception des secousses sismiques en quelques minutes. Leur objectif est de perfectionner cette vigie citoyenne pour que les autorités puissent communiquer directement avec les victimes et envoyer rapidement des secours sur place. Véritable sentinelle du territoire, le média numérique soutient la gestion de crise par son accès à l'information en temps réel.

Facilitant tantôt des attroupements improvisés et potentiellement incontrôlables, tantôt des suivis précis de catastrophes, Twitter est ainsi un outil ambivalent en matière de sécurité.

Si la nature de l'information émise joue un rôle clé dans sa capacité à être retweetée, à apaiser ou non un contexte instable, il faut également porter attention à la sociologie des groupes d'utilisateurs de ce média. Ainsi, une étude récente de chercheurs sud-coréens (D. Choi *et al.*, *Scientific Reports*, vol. 10, 310, 2020) a mis en évidence l'importance des «chambres d'échos» (ou bulles d'opinion politique) dans la propagation profonde de rumeurs.

Une chambre d'écho désigne un système fermé d'utilisateurs réunis par des convictions communes, qui favorise ainsi la répétition de mêmes messages par plusieurs sources, ou la diffusion de contenus semblables par une source unique. La détection de ces architectures d'utilisateurs au sein de la twittosphère pourrait freiner la propagation de messages toxiques à un stade précoce ou, au contraire, amplifier toute information de terrain, utile à la résolution des crises. ■

VIRGINIE TOURNAY biologiste de formation, est politologue et directrice de recherche du CNRS au Cevipof, à Sciences Po, à Paris.

DU VENT DANS LES SYNAPSES

DANIEL FIÉVET
15H / 17H LE SAMEDI

DES SCIENCES
DE LA CURIOSITÉ
DE L'AVENTURE



ABONNEZ-VOUS AU PODCAST  DE L'ÉMISSION

L'ESSENTIEL

➤ L'état quantique d'un système physique peut être une superposition d'états distincts, correspondant chacun à une valeur différente de la même grandeur physique.

➤ Pour expliquer pourquoi une mesure donne toujours un résultat univoque, l'interprétation « orthodoxe » de la mécanique quantique suppose que l'appareil de mesure, macroscopique, échappe aux lois quantiques.

➤ Cette exclusion du domaine quantique de l'appareil de mesure étant difficile à justifier, plusieurs interprétations concurrentes ont été proposées.

➤ L'auteur a récemment proposé le « solipsisme convivial », interprétation d'après laquelle chaque observateur ne peut percevoir que l'un des états d'une superposition, et sans que des observateurs distincts puissent constater un désaccord entre eux.

L'AUTEUR



HERVÉ ZWIRN
directeur de recherche au CNRS,
physicien et épistémologue à l'IHPST,
à Paris, et au Centre de mathématiques
et de leurs applications à l'École normale
supérieure Paris-Saclay

L'observateur, un défi pour la physique quantique

La théorie quantique est-elle compatible avec l'existence d'une réalité objective, indépendante de l'observateur ? Cette question reste en suspens depuis la naissance de la mécanique quantique. Une interprétation récente, le « solipsisme convivial », propose une réponse originale, qui confère à l'observateur un rôle essentiel.

La mécanique quantique, élaborée dans les années 1920, est l'une des théories les plus précises dont nous ayons jamais disposé. Elle permet de décrire quantitativement une très grande variété de phénomènes naturels, de la structure de l'atome à la supraconductivité. Mais elle pose des problèmes difficiles quand on veut comprendre la signification profonde de son formalisme mathématique.

Ces difficultés ne s'opposent heureusement en rien à son utilisation pratique quand il s'agit de prédire des résultats expérimentaux et de calculer les valeurs des grandeurs physiques. Les physiciens sont tous d'accord quant à la façon d'utiliser le formalisme à ces fins. La plupart des physiciens se satisfont d'ailleurs de cette situation et ne s'intéressent que de très loin aux problèmes conceptuels posés par les fondements de la théorie quantique.

Cependant, la réflexion autour de ces fondements touche à des problèmes philosophiques

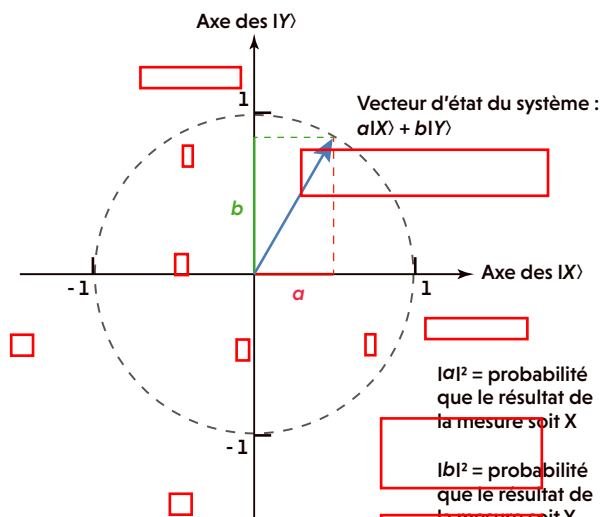
parmi les plus anciens et les plus profonds, tels que le problème du réalisme ou celui de la conscience. Ce que la mécanique quantique a apporté de nouveau est le fait que, si l'on considère que c'est la bonne théorie pour décrire le monde microscopique et qu'elle s'applique aussi au monde macroscopique, alors certaines positions philosophiques concernant la réalité qui nous entoure ne sont plus tenables.

Grâce aux nombreux articles de vulgarisation publiés ces dernières années dans de multiples médias, tout un bestiaire de mots étranges est associé à la théorie quantique dans l'esprit du grand public : indéterminisme, superposition, dualité onde-corpuscule, chat de Schrödinger, principe d'incertitude, non-localité, intrication, etc. Chacun d'eux se réfère à un aspect particulier et souvent contre-intuitif de la mécanique quantique. Nous allons ici nous intéresser à un problème qui est sans doute le plus fondamental de tous, qui provient à la fois de la superposition des états quantiques, de l'indéterminisme des résultats de mesure, de l'intrication des systèmes ➤



LA RÈGLE DE BORN

La théorie quantique décrit l'état d'un système physique par un vecteur d'un certain espace abstrait. En général, ce vecteur s'écrit comme la somme de plusieurs vecteurs (ou états) de base orthogonaux entre eux et de norme (ou longueur) égale à 1, chacun correspondant à une valeur bien déterminée d'une même grandeur physique (position ou énergie par exemple) et étant affecté d'un certain coefficient. La règle



de Born donne la probabilité de trouver telle ou telle valeur lors d'une mesure en fonction des coefficients des vecteurs

de base dans la somme décrivant l'état du système. Elle stipule que la probabilité de trouver une valeur est égale

au carré du coefficient de l'état de base correspondant (plus précisément au carré du module du coefficient, qui peut être un nombre complexe). La somme des carrés des coefficients représente la somme des probabilités des résultats possibles, et doit donc être égale à 1. C'est pourquoi on demande que le vecteur d'état soit de norme égale à 1. Ainsi, si l'on mesure la position d'un électron dans l'état $1/\sqrt{2}(|X\rangle + |Y\rangle)$, on le trouvera soit en X, soit en Y avec une probabilité $1/2$. Si l'on mesure la position d'un électron dont l'état est $1/\sqrt{3}|X\rangle + \sqrt{2/3}|Y\rangle$, on le trouvera en X avec la probabilité $1/3$ et en Y avec la probabilité $2/3$. Le schéma ci-contre illustre la règle de Born pour un système à deux états de base et avec des coefficients réels a et b (en toute généralité, ils sont complexes).

> et qui est souvent exemplifié par le fameux chat de Schrödinger à la fois mort et vivant: le problème de la mesure des grandeurs physiques.

Cette question de la mesure est étroitement liée à celle de la réalité. La plupart des physiciens considèrent que l'on devrait pouvoir comprendre le monde quantique de façon objective, c'est-à-dire sans faire aucune référence à nous-mêmes: nous sommes supposés être des observateurs passifs, qui se contentent de prendre acte de phénomènes se déroulant dans une réalité extérieure et indépendante de nous. Cette attitude est naturelle. La mécanique classique nous a habitués à raisonner ainsi et, dans l'attitude scientifique traditionnelle, on considère l'objectivité comme une valeur déterminante.

Mais si le concept de mesure ne pose aucun problème en physique classique, il soulève de grandes difficultés en physique quantique. Ce sont ces difficultés que je vais analyser. Elles conduisent à remettre en cause l'existence objective, en l'absence de tout observateur, de valeurs définies pour les grandeurs caractérisant un système physique. Je vais ensuite présenter et défendre une idée plutôt surprenante: c'est seulement lorsqu'un observateur prend conscience de sa mesure qu'une valeur définie de la grandeur mesurée émerge, et celle-ci n'implique aucun changement dans l'état physique du système, mais est relative à l'observateur lui-même.

D'une certaine manière, les difficultés d'interprétation de la mécanique quantique ont pour origine fondamentale le «principe de superposition». Expliquons en quoi celui-ci consiste.

Dans la théorie quantique, on représente les états des systèmes physiques par des objets

mathématiques qui sont des vecteurs dans un certain espace aux propriétés convenables (un «espace de Hilbert»). On utilise aussi parfois le terme de «fonction d'onde» pour désigner le vecteur caractérisant l'état du système. Par exemple, l'état de position d'un électron qui se situe dans la région X sera représenté par un vecteur qu'on a l'habitude de noter $|X\rangle$; celui d'un électron situé dans la région Y sera $|Y\rangle$.

L'ORIGINE DES DIFFICULTÉS

Or le principe de superposition stipule que si deux états quantiques sont possibles, alors toute combinaison linéaire (c'est-à-dire une somme pondérée) des deux vecteurs d'état correspondants représente elle-même un état possible. Ainsi, selon ce principe, si $|X\rangle$ et $|Y\rangle$ sont des états possibles (et bien distincts) du système, l'état $a|X\rangle + b|Y\rangle$, où a et b sont des coefficients numériques, est également un état possible.

Prenons l'exemple de la combinaison linéaire $|X\rangle + |Y\rangle$, où les coefficients sont égaux (en fait, pour des raisons de normalisation liées à la règle de Born - voir l'encadré ci-dessus -, un tel vecteur doit avoir une longueur 1 et il faudrait donc l'écrire $1/\sqrt{2}(|X\rangle + |Y\rangle)$ si $|X\rangle$ et $|Y\rangle$ sont eux-mêmes de longueur 1 et orthogonaux; mais, pour simplifier, nous omettrons les facteurs de normalisation). À quoi correspond un tel état? Où se trouve un électron dont l'état est décrit par cette somme?

Aucune réponse conforme à une description usuelle n'est possible. On peut montrer qu'il est tout aussi faux de dire que l'électron est «à la fois» en X et en Y, qu'il est «tantôt» en X et «tantôt» en Y, qu'il est à mi-chemin

LINÉARITÉ ET UNITARITÉ

En mécanique quantique, l'espace des états d'un système est un espace vectoriel aux propriétés adéquates, un « espace de Hilbert ». Ses éléments, qui représentent l'état d'un système, sont des vecteurs. Une fonction linéaire f sur cet espace transforme un vecteur en un autre vecteur avec la propriété suivante : quels que soient les vecteurs V et W et la combinaison linéaire $aV + bW$, où a et b sont des nombres complexes quelconques, on a $f(aV + bW) = af(V) + bf(W)$. L'équation de Schrödinger, qui régit l'évolution au cours du temps du vecteur d'état du système physique considéré, correspond à une transformation linéaire. Cette transformation est de plus unitaire, ce qui signifie qu'elle transforme un vecteur en un autre vecteur de même norme (ou longueur). Il en résulte que l'évolution d'un état superposé (combinaison linéaire de deux vecteurs non proportionnels) ne peut jamais donner un état proportionnel à un seul de ces deux vecteurs. C'est pourquoi l'équation de Schrödinger ne peut « projeter » une superposition d'états sur l'un de ces états, et ne peut donc pas expliquer la « réduction du paquet d'ondes » qui se produit lors d'une mesure et qui assure que le résultat de la mesure soit univoque.

entre X et Y , ou qu'il est en toute autre position définie, quelle qu'elle soit. On est en fait

conduit à considérer qu'un tel électron n'a tout simplement aucune position définie, ce qui est très choquant pour notre intuition, laquelle nous a habitués à avoir la certitude que tout objet occupe une position bien définie dans l'espace à tout moment !

Cette conclusion étrange n'est pas réservée à la position, mais s'applique à toutes les grandeurs physiques, par exemple la vitesse, l'énergie ou le moment cinétique. Dans les superpositions d'états, certaines grandeurs n'ont tout simplement aucune valeur définie.

Si l'on observe un électron qui se trouve dans l'état $|X\rangle$, on le détectera en X . Si l'on observe un électron qui se trouve dans l'état $|Y\rangle$, on le détectera en Y . Mais alors, où détectera-t-on un électron qui se trouve dans l'état $|X\rangle + |Y\rangle$? La réponse est que si l'on observe successivement un grand nombre d'électrons, tous dans ce même état, on en détectera statistiquement la moitié en X et l'autre moitié en Y (en raison de l'égalité des coefficients des deux termes entrant dans la superposition – voir l'encadré sur la règle de Born).

Pourtant, cela ne veut pas dire que la moitié des électrons dans cet état sont situés en X et l'autre moitié en Y avant même qu'on les détecte. Les lois quantiques montrent en effet que si c'était le cas, on n'observerait pas les interférences produites dans certaines situations par un état superposé. Il faut donc considérer qu'aucun de ces électrons n'occupe de position définie avant qu'on le détecte : c'est au moment où on fait le nécessaire pour le détecter que la position se détermine, avec une probabilité $\frac{1}{2}$ d'être en X ou en Y .

DEUX PRÉCEPTES QUI NE CONDUISENT PAS AU MÊME RÉSULTAT

Par ailleurs, la théorie quantique énonce deux postulats relatifs à l'évolution d'un système. Le premier est l'équation de Schrödinger, une équation différentielle qui régit la variation de l'état du système au cours du temps. Elle a la particularité d'être linéaire et unitaire (voir l'encadré ci-contre), ce qui a pour conséquence qu'elle transforme toute superposition d'états en une autre superposition contenant les mêmes états. Elle ne fera donc jamais passer l'état $|X\rangle + |Y\rangle$ à l'état $|X\rangle$ ou à l'état $|Y\rangle$, lesquels correspondent à des états de position bien déterminée. Il s'ensuit que l'équation de Schrödinger ne permettra jamais d'expliquer pourquoi, lorsqu'on observe un électron dont l'état est $|X\rangle + |Y\rangle$, on le trouve soit en X , soit en Y avec une probabilité $\frac{1}{2}$.

L'autre moyen fourni par la théorie quantique pour déterminer l'évolution d'un système est le « postulat de réduction du paquet

d'ondes ». Il s'applique à l'acte de mesure, sur le système, de toute grandeur physique.

Ce postulat stipule que si le système est dans une superposition d'états dont chacun correspond à une valeur bien définie d'une grandeur physique, la mesure de cette grandeur fournira l'une de ces valeurs comme résultat, avec une probabilité déterminée par le coefficient de l'état correspondant dans la superposition, conformément à la « règle de Born » (voir l'encadré page précédente).

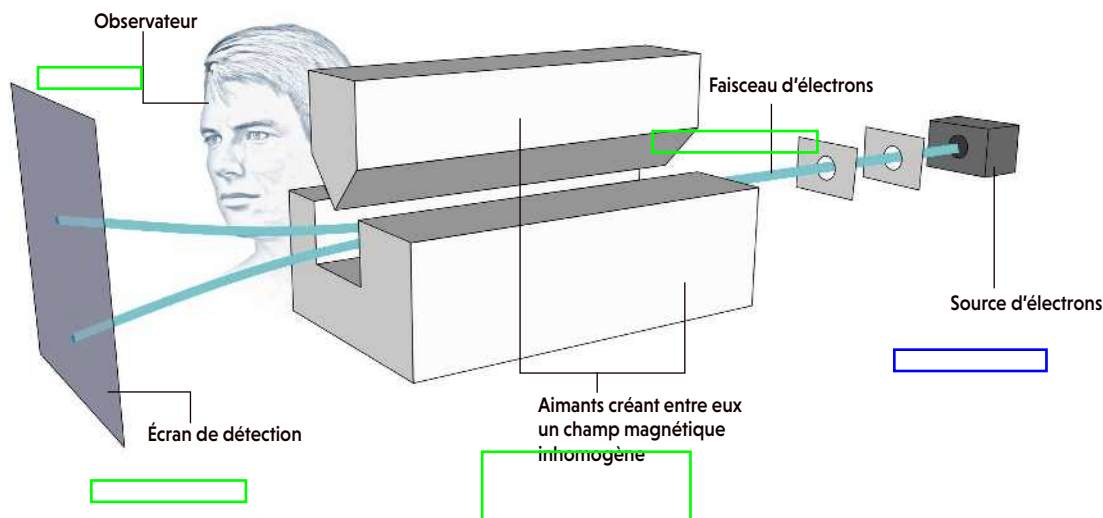
De plus, le même postulat affirme qu'après la mesure, l'état du système se trouve réduit au vecteur qui correspond à la valeur obtenue. C'est la « réduction (ou effondrement) du paquet d'ondes ». Dans notre exemple de superposition d'états de position, les coefficients des deux états étant identiques, le postulat prédit que l'on trouvera l'électron en X ou en Y avec la même probabilité $\frac{1}{2}$, et jamais une autre position, et que si l'on trouve par exemple X , le système passe brutalement, sous l'effet de la mesure, de l'état superposé $|X\rangle + |Y\rangle$ à l'état $|X\rangle$; on dit que l'état superposé est « projeté » sur l'état $|X\rangle$.

Une mesure sur un système physique fait bien sûr intervenir un appareil de mesure. Mais les deux moyens mentionnés ci-dessus de déterminer l'évolution du système fournissent des résultats différents, même lorsqu'on applique l'équation de Schrödinger conjointement au système et à l'appareil qui le mesure. Cela ne serait pas problématique si l'on était capable de dire clairement quand on doit utiliser l'équation de Schrödinger et quand on doit utiliser le postulat de réduction du paquet d'ondes. Au premier abord, la réponse paraît simple : on applique le postulat de réduction du paquet d'ondes lorsqu'on effectue une mesure. Le problème est qu'on ne sait pas définir précisément ce qu'est une mesure dans la théorie quantique !

QU'EST-CE QU'UNE MESURE ?

Or savoir ce qu'est une mesure est la question la plus fondamentale, celle dont la réponse sépare nettement les physiciens en deux camps. Est-ce simplement le fait que la valeur d'une certaine grandeur physique (telle que la vitesse ou la position) soit enregistrée par un appareil indépendamment de tout observateur ? Dans ce cas, l'observateur se contentera de prendre connaissance à un moment ultérieur de la grandeur enregistrée et sera donc un simple témoin passif d'une mesure ; celle-ci ne consiste alors qu'à enregistrer un état de fait préexistant. C'est la situation en mécanique classique, où les valeurs des grandeurs physiques attachées à un système sont à tout moment parfaitement définies et déterminées.

Mais le formalisme de la théorie quantique ne permet ni de penser que la valeur >



> enregistrée était définie avant son enregistrement par l'appareil de mesure, ni de comprendre comment l'interaction avec cet appareil conduit à une valeur définie. La mécanique quantique prédit au contraire qu'après avoir interagi avec le système mesuré, l'appareil de mesure lui-même se retrouve dans un état dit « intriqué » avec le système, ce qui signifie que son état s'est corrélié de manière indissociable avec celui du système (qui est une superposition) et qu'il ne correspond plus à une valeur bien définie de ce que l'appareil de mesure est censé afficher.

UNE RÉALITÉ INDÉPENDANTE DE L'OBSERVEUR ?

Physiciens et philosophes ont fait un grand nombre de propositions pour tenter de résoudre la question en préservant une objectivité stricte, c'est-à-dire une réalité indépendante de ceux qui l'observent. La plus connue, l'« interprétation de Copenhague », est celle que soutenaient deux des principaux fondateurs de la théorie quantique, le Danois Niels Bohr et l'Allemand Werner Heisenberg. Elle a dominé pendant un demi-siècle.

Schématiquement, cette interprétation dite aussi « orthodoxe » consiste à établir une démarcation entre le monde microscopique, où la physique quantique s'applique, et le monde macroscopique, où elle ne s'appliquerait pas. La difficulté évoquée disparaît donc, car l'appareil de mesure, étant macroscopique, n'obéirait pas aux lois quantiques. Mais cette dichotomie microscopique-macroscopique paraît très artificielle et, de nos jours, ce point de vue fait de moins en moins consensus.

C'est pour tenter de rendre compte du fait que l'appareil de mesure finit bien par afficher une valeur définie que le chercheur allemand Dieter Zeh a proposé en 1970 un mécanisme nommé « décohérence ». Étudié plus avant dans les années 1980 par le physicien polonais Wojciech Zurek, du Laboratoire national de Los Alamos, aux États-Unis, ce mécanisme fait

intervenir l'environnement dans lequel sont plongés à la fois le système mesuré et l'appareil de mesure : les interactions avec les très nombreux degrés de liberté du milieu environnant seraient supposées perturber les superpositions d'états au point que celles-ci disparaîtraient en un temps extrêmement court.

Mais en fait, l'idée de décohérence explique seulement pourquoi l'appareil macroscopique ne peut apparaître dans une superposition d'états à aucun observateur, car elle repose essentiellement sur les limites pratiques de nos moyens d'observation, à savoir que nous sommes concrètement incapables de faire toutes les mesures concernant les corrélations du système et de l'appareil avec tous les degrés de liberté de l'environnement. Il faudrait par exemple mesurer toutes les positions de toutes les molécules d'air de la pièce qui contient l'appareil, ce qui est bien entendu totalement irréalisable en pratique.

Le mécanisme de décohérence n'élimine donc nullement le rôle de l'observateur, puisqu'il explique comment apparaît le monde à un observateur dont les moyens sont limités, et non pas comment est « réellement » le monde en l'absence d'un observateur.

En fait, il paraît logiquement inévitable que, sauf à modifier le cadre de la mécanique quantique usuelle, il soit impossible de définir rigoureusement et de façon strictement objective ce qu'est une mesure. L'observateur doit être pris en compte d'une manière ou d'une autre, et il semble que ce ne soit qu'au moment où un observateur prend connaissance du résultat que celui-ci se détermine.

Cela ne devrait pas paraître si choquant. Après tout, la science n'est rien d'autre qu'une description du monde tel qu'ultimement il nous apparaît. Le fait que la mécanique classique qui décrit le monde macroscopique soit compatible avec l'hypothèse que le monde est « réellement » tel qu'il nous apparaît n'est pas une preuve que cela soit encore vrai dans des domaines étrangers à notre expérience quotidienne.

UN EXEMPLE DE MESURE

L'expérience schématisée ici, similaire à la célèbre expérience de Stern-Gerlach réalisée en 1922 et qui a révélé l'existence du spin (un moment cinétique intrinsèque) des électrons, a deux résultats possibles : chaque électron est, selon son état de spin, dévié par le champ magnétique du dispositif soit vers le haut, soit vers le bas, avec la même amplitude. Observer le point d'impact de la particule sur l'écran phosphorescent revient alors à mesurer le spin de cette particule selon la direction verticale. Les règles de la mécanique quantique déterminent sans ambiguïté les probabilités d'observer tel ou tel résultat en fonction de l'état des particules. Mais cette théorie ne définissant pas précisément ce qu'est une mesure, les rôles que tiennent dans le processus l'appareil de mesure et l'observateur restent l'objet d'interprétations divergentes.

LE PROBLÈME DE LA MESURE

Le problème de la mesure en mécanique quantique provient du fait que les trois propositions suivantes semblent incompatibles :

- (1) Le vecteur d'état (ou fonction d'onde) d'un système physique fournit une description complète de ce système.
- (2) Le vecteur d'état évolue toujours dans le temps selon l'équation de Schrödinger,

qui est une équation linéaire.

(3) Lorsqu'on effectue une mesure sur un système physique, on obtient un unique résultat bien déterminé.

Il semble donc nécessaire d'abandonner au moins l'une d'entre elles. L'abandon de (1) conduit aux théories à variables cachées comme celle de David Bohm. L'abandon de (2) conduit aux théories à effondrement spontané telles que celle de Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini et Tullio Weber. L'abandon de (3) conduit à la théorie des mondes multiples de Hugh Everett. Le solipsisme convivial réconcilie ces trois propositions en réinterprétant le concept de mesure.

Déjà dans la première moitié du xx^e siècle, les chercheurs d'origine hongroise John von Neumann et Eugene Wigner, ainsi que l'Allemand Fritz London et le Français Edmond Bauer, avaient émis l'idée selon laquelle c'est la conscience de l'observateur qui est responsable de la réduction du paquet d'ondes. Mais leur conception avait été accueillie très froidement. Il faut dire qu'elle avait l'inconvénient de rappeler étrangement le dualisme de Descartes, qui postulait une action de l'esprit sur la matière, et elle a été abandonnée.

Autour de 1956, en réaction à l'interprétation de Copenhague et pour éliminer le postulat de réduction du paquet d'ondes qu'il trouvait «quelque peu répugnant», le physicien américain Hugh Everett a développé une autre interprétation. Celle-ci suppose que la mécanique quantique s'applique à la totalité des systèmes, aussi bien microscopiques que macroscopiques, mais qu'il n'est nul besoin d'utiliser le postulat de réduction du paquet d'ondes car, lors de chaque mesure, le monde se duplique en autant de mondes et d'observateurs différents qu'il existe de résultats possibles pour la mesure effectuée.

Cette interprétation (qui se ramifie elle-même en diverses variantes et a donné lieu à de nombreuses manières différentes de la comprendre) présente l'inconvénient majeur d'impliquer l'existence simultanée d'une infinité de mondes différents, d'où le nom de «théorie des mondes multiples» sous lequel elle est plus connue.

Dans son ouvrage *Le Réel voilé*, paru en 1994, le physicien et philosophe français Bernard d'Espagnat a critiqué cette prolifération

incontrôlée qui aboutit à une infinité continue de mondes. À la suite de cette critique, j'ai développé en 2000 dans mon livre *Les Limites de la connaissance*, puis dans une série d'articles plus récents, une autre interprétation, le «solipsisme convivial», qui s'abstient du principe de réduction du paquet d'ondes, mais qui ne suppose nullement que l'Univers se multiplie en plusieurs versions à chaque mesure.

Bien qu'il fasse jouer un rôle essentiel à la perception de l'observateur, le solipsisme convivial n'est pas sujet à l'objection faite à von Neumann, Wigner, London et Bauer, car la conscience de l'observateur n'a aucun effet physique sur le système observé. Comme nous allons le voir, ce dernier reste dans une superposition d'états, et c'est uniquement la façon dont nous le percevons qui sélectionne l'une des possibilités.

LE SOLIPSISME CONVIVIAL

Le solipsisme convivial part de l'idée qu'une mesure est la perception d'un état par un observateur. Une mesure n'est alors pas une action physique, mais un acte perceptif. Elle n'a aucun effet sur l'état du système mesuré: cet état reste le même après la mesure et il n'y a donc aucune réduction du paquet d'ondes. C'est un point commun avec la théorie d'Everett, mais la différence est qu'il n'y est nullement postulé que l'observateur (et le monde qui l'entoure) se scinde en autant de versions de lui-même qu'il y a de résultats possibles. Ici, une seule des possibilités est sélectionnée par la perception de l'observateur, lequel voit donc, d'une certaine manière, une sorte de projection de l'état superposé sur l'une de ses composantes.

Cette sélection se fait à travers un mécanisme d'«accrochage» qui prescrit: 1) que la perception de l'observateur «s'accroche» à l'une des branches possibles de l'état superposé; 2) que la sélection se fait en respectant les probabilités données par la règle de Born; 3) qu'une fois accrochée à une branche, la perception d'un observateur donné ne peut s'accrocher qu'à des branches issues de celle-là pour toute mesure ultérieure.

Certaines images animées ou fixes (voir l'illustration page 31), qu'il est possible de voir de différentes façons, peuvent aider à comprendre le phénomène – bien qu'une grande prudence s'impose avec de telles analogies. L'une des plus connues est celle de la danseuse, une silhouette que l'on peut voir tourner sur elle-même tantôt dans le sens des aiguilles d'une montre, tantôt dans le sens inverse (voir par exemple la vidéo www.youtube.com/watch?v=9CEr2GfGilw). C'est une illusion d'optique bistable.

La question «quel est le sens réel dans lequel tourne la danseuse?» n'a dans ce cas pas de sens. Il n'existe pas de direction réelle de rotation. Il y a simplement un ensemble de >

DIVERSES INTERPRÉTATIONS DE LA MÉCANIQUE QUANTIQUE

L'interprétation de Copenhague, ou interprétation orthodoxe

Soutenue presque dès les débuts de la mécanique quantique par Niels Bohr et Werner Heisenberg, elle a longtemps été l'interprétation dominante, adoptée par défaut par la quasi-totalité des physiciens. Elle considère qu'une mesure est une interaction d'un système microscopique avec un appareil macroscopique qui lui, ne doit pas être décrit par la mécanique quantique. Elle est de moins en moins acceptée en raison de la distinction artificielle et vague faite entre microscopique et macroscopique, et parce qu'il n'y a pas de justification à ce

qu'un système macroscopique échappe aux lois quantiques.

L'interprétation de de Broglie-Bohm

Avancée par David Bohm en 1952 en reprenant des idées de Louis de Broglie, elle fait l'hypothèse que la fonction d'onde ne fournit pas une description complète du système et qu'il est donc nécessaire de lui ajouter des variables supplémentaires, des « variables cachées » dont les valeurs sont supposées toujours bien définies et qui déterminent les résultats des mesures. Longtemps rejetée, la théorie de de Broglie-Bohm commence à être défendue par un nombre croissant de physiciens. Mais elle repose sur l'hypothèse de l'existence d'un potentiel quantique qui a une influence non locale et instantanée sur les trajectoires des particules ; de plus, la question de savoir s'il est possible d'en faire une théorie compatible avec la relativité restreinte d'Einstein reste ouverte.

L'interprétation GRW, ou théorie de l'effondrement spontané

Énoncée en 1986 par les physiciens italiens Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini et Tullio Weber (d'initiales GRW), cette théorie modifie l'équation de Schrödinger en lui ajoutant un terme aléatoire et non linéaire qui a pour effet que tout objet microscopique a une probabilité (très faible) de subir une évolution spontanée qui le localise à une position déterminée dans l'espace, ce qui permet effectivement de résoudre le problème de la mesure. Mais ce processus apparaît très *ad hoc* et nécessite d'être numériquement ajusté de façon artificielle pour reproduire les résultats de la mécanique quantique. Par ailleurs, préciser l'ontologie de cette théorie, c'est-à-dire la nature des objets physiques dont elle postule l'existence, se heurte à d'importantes difficultés.

L'interprétation des mondes multiples, ou théorie d'Everett

Émise par Hugh Everett dans sa thèse de 1957, elle suppose que lorsqu'une mesure est effectuée, toutes les valeurs possibles sont en fait obtenues car l'Univers (et donc

l'observateur lui-même) se scinde en autant de mondes différents qu'il y a de résultats possibles. Outre le côté insatisfaisant de postuler une multiplication de mondes en nombre infini, cette interprétation se heurte au problème fondamental de ne pas pouvoir rendre compte des probabilités qui interviennent de manière essentielle dans la règle de Born.

Le solipsisme convivial

Développée par l'auteur, cette interprétation pose qu'une mesure n'est pas un processus physique, mais la perception par un observateur d'un résultat, issu de l'observation de l'état superposé d'un système. Comme dans la théorie des mondes multiples, il n'y a donc aucune réduction physique de la fonction d'onde ; en revanche, nul n'est besoin de recourir à une multiplication infinie de mondes. C'est la seule interprétation qui réconcilie les trois propositions du problème de la mesure (voir l'encadré page 29) sans avoir à modifier le formalisme quantique.

> pixels en mouvement que chaque observateur interprète comme une danseuse tournant dans un sens ou dans l'autre selon sa configuration mentale du moment. Avec toutes les précautions qui s'imposent, on pourrait dire que l'état de cette danseuse est l'analogue de la superposition : |sens horaire> + |sens antihoraire>).

Cet état ne correspond ni à tourner dans un sens ni à tourner dans l'autre, mais représente quelque chose qui n'a pas d'équivalent classique. En revanche, quand nous observons une telle image, nous l'interprétons sous la forme d'une danseuse qui tourne dans un sens déterminé, et ce sens n'est pas forcément le même pour tous les observateurs. Voir la danseuse tourner dans un sens déterminé n'implique nullement que la danseuse tourne réellement dans ce sens et ne modifie en rien l'image elle-même, qui reste une superposition. Cette observation signifie seulement que notre perception a construit une manière déterminée de voir cette image, que nous sommes incapables de percevoir en tant que superposition.

Cette analogie est très limitée, car il y a entre un état quantique superposé et l'état de la danseuse de nombreuses différences, mais cela permet d'avoir une idée approximative de ce qui se passe lorsqu'on perçoit une superposition quantique.

Le solipsisme convivial suppose qu'un état superposé ne peut être perçu en tant que tel et donne lieu, dans l'esprit de l'observateur, à une représentation correspondant à l'une des composantes de la superposition. Mais quelle que soit la composante retenue par la perception de l'observateur, l'état du système n'est en rien modifié et reste une superposition. Dans ce cadre, la perception de chaque observateur n'est pas absolue, mais relative à lui-même. Mais alors, deux observateurs pourraient-ils être en désaccord sur la mesure d'un même système ? La réponse est non, comme je vais l'expliquer.

PAS DE DÉSACCORDS

Pour un observateur donné, disons Alice, tout autre observateur, par exemple Bernard, doit être considéré comme un système quantique susceptible d'être lui-même dans un état superposé. Une communication entre Alice et Bernard est, pour chacun d'eux, l'équivalent d'une mesure de son interlocuteur. Dans ces conditions (et contrairement à ce qui se passe avec l'image animée de la danseuse), les règles du formalisme quantique garantissent qu'il ne sera jamais possible qu'Alice et Bernard, échangeant sur le résultat qu'ils ont chacun constaté après avoir fait une mesure quelconque, puissent être en désaccord même s'il n'est

nullement obligatoire qu'ils aient tous les deux perçu le même résultat. Cela peut paraître étrange, mais c'est l'un des points essentiels du solipsisme convivial, qui amène à renoncer à l'idée que nous pouvons « nous mettre à la place de quelqu'un d'autre pour parler de ses perceptions ». Expliquons-nous.

Alice échangeant avec Bernard, c'est-à-dire mesurant Bernard – qui, du point de vue d'Alice, reste dans un état superposé quel que soit le résultat qu'il a trouvé tant qu'elle n'a pas « mesuré » Bernard – entendra toujours celui-ci lui donner un résultat conforme à ce qu'elle a vu elle-même. Cet état de fait, qui justifie l'adjectif « convivial », provient du fait que, selon le mécanisme d'accrochage, un observateur ne peut obtenir comme résultat possible d'une mesure que ceux qui sont liés à la branche à laquelle il est accroché. Alice ne peut donc obtenir, quand elle parle avec Bernard, qu'un résultat correspondant à « la partie de Bernard » corrélée au même résultat de mesure sur le système que celui qu'elle a déjà obtenu.

Les choses sont même plus strictes que cela, car, compte tenu de la relativité de toute description dans ce cadre, une phrase doit toujours être rapportée à celui qui l'énonce. Il est donc illégitime de parler à la fois de ce qu'Alice et Bernard ont perçu : cela demanderait de se placer du point de vue d'un observateur ayant accès simultanément à leurs deux perceptions, et un tel observateur n'existe pas. L'étrangeté de la phrase selon laquelle Alice et Bernard ne peuvent jamais être en désaccord même s'ils n'ont pas perçu la même chose, est donc due à l'illégitimité, dans ce cadre, de faire référence simultanément à la perception d'Alice et à celle de Bernard. Seule la phrase « Alice a vu ceci et a entendu Bernard lui dire qu'il a vu ceci » est légitime. En revanche, la phrase « Alice a vu ceci alors que Bernard a vu cela » est interdite, car elle n'a pas de sens dans le monde du solipsisme convivial.

DES DIFFICULTÉS APLANIES

Quelle que soit l'étrangeté de cette situation, il est possible de donner un sens mathématique précis à ces idées et de montrer comment elles permettent de résoudre de nombreuses énigmes.

Le formalisme mathématique du solipsisme convivial permet de résoudre le problème de la mesure. Il évite aussi tous les paradoxes liés à la mesure de deux systèmes intriqués, comme la question de savoir laquelle des deux mesures détermine la valeur de l'autre lorsqu'elles sont séparées par un « intervalle du genre espace » (deux mesures séparées dans l'espace et dans le temps de telle façon qu'aucun signal physique, dont la vitesse de propagation est au maximum celle de la lumière, ne puisse relier les deux événements) – un intervalle tel que, selon la théorie



Selon le « solipsisme convivial » développé par l'auteur, l'observateur qui mesure un système ne modifie *a priori* pas l'état quantique de celui-ci. Mais quand cet état quantique est une superposition, l'observateur ne peut percevoir qu'un résultat correspondant à l'un des états de base entrant dans la superposition. Une analogie est donnée par des images telles que celle-ci, qui peut être « lue » de deux façons différentes : soit la danseuse semble nous tourner le dos, soit elle semble nous faire face ; dans une séquence animée, elle semble tourner soit dans un sens, soit dans l'autre.

de la relativité, aucune des deux mesures ne peut être considérée d'une manière absolue comme antérieure à l'autre. Le solipsisme convivial permet aussi de rétablir la localité (l'idée que les influences physiques se font de proche en proche, et non à distance de façon instantanée) en mécanique quantique, alors qu'il est fréquemment admis que cette théorie doit nécessairement être non locale.

Le prix à payer n'est cependant pas négligeable, et c'est principalement cela que beaucoup de physiciens ne sont pas prêts à accepter. Il faut renoncer à penser que le monde est directement conforme à ce que nous percevons et que nous le percevons tous de la même façon. Le monde du solipsisme convivial est étrange : nous n'en avons chacun qu'une perception réduite à une projection ou une coupe et nous ne voyons pas forcément tous la même projection. En ce sens, c'est une sorte de solipsisme, car chacun vit dans un monde de perceptions qui lui sont propres. Mais il est convivial dans la mesure où, contrairement au solipsisme classique, il laisse la place à d'autres esprits et à un monde extérieur, et il est tel que, malgré des perceptions pouvant être différentes, deux observateurs ne pourront jamais constater de désaccord entre eux.

Pour des physiciens attachés à une description plus strictement conforme à nos intuitions habituelles, ce renoncement peut paraître trop important. Pour d'autres, tirant la leçon du constat que la science n'a pas cessé de nous forcer progressivement à renoncer à nos intuitions les plus fortement ancrées, surtout depuis l'avènement de la mécanique quantique, cette nouvelle vision est un moyen de résoudre des énigmes qui résistent depuis longtemps.

BIBLIOGRAPHIE

H. Zwirn, **Nonlocality versus modified realism**, *Foundations of Physics*, vol. 50, pp. 1-26, 2020.

H. Zwirn, **Delayed choice, complementarity, entanglement and measurement**, *Physics Essays*, vol. 30(3), pp. 281-293, 2017 (<http://arxiv.org/abs/1607.02364>).

F. Laloë, **Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?**, CNRS Éditions/EDP Sciences, 2^e édition, 2017.

H. Zwirn, **The measurement problem : Decoherence and convivial solipsism**, *Foundations of Physics*, vol. 46, pp. 635-667, 2016.

B. d'Espagnat et H. Zwirn (dir.), **Le Monde quantique**, Éd. Matériologiques, 2014.

H. Zwirn, **Les Limites de la connaissance**, Odite Jacob, 2000.

B. d'Espagnat, **Le Réel volé**, Fayard, 1994.

L'ESSENTIEL

> La mécanique quantique prédit avec grand succès la statistique des résultats expérimentaux. Mais il n'y a pas de consensus sur la réalité qui la sous-tend.

> Selon la mécanique bohmienne, ou théorie dBB, les particules ont des positions toujours bien définies, mais sont guidées par une onde qui obéit à l'équation

de Schrödinger de la mécanique quantique.

> Cette théorie, qui suppose une réalité univoque et déterministe, conduit aux mêmes prédictions que la mécanique quantique.

> Les recherches se poursuivent pour la rendre compatible avec la théorie de la relativité et la théorie quantique des champs.

L'AUTEUR



WARD STRUYVE
chercheur postdoctorant
à l'Institut de physique théorique
et au Centre de logique et de
philosophie des sciences de la
KU Leuven (Katholieke Universiteit
Leuven), à Louvain, en Belgique

Une réalité classique derrière l'étrangeté quantique?

Les lois de la mécanique quantique défient l'intuition et l'idée que nous avons de la réalité physique. Mais la théorie de De Broglie-Bohm, proposée il y a plusieurs décennies et revenue dans l'actualité, a l'ambition de les réconcilier.

La mécanique quantique représente l'un des plus grands succès de la physique moderne. Elle a permis d'expliquer et de prévoir avec précision une multitude de phénomènes. Et pourtant, l'interprétation de cette théorie reste toujours débattue: ce qu'elle nous dit sur la nature du monde physique, sur son ontologie en d'autres termes, n'est pas très clair.

On dit parfois que ce n'est pas le rôle de la théorie, qu'elle ne sert qu'à rendre compte des résultats expérimentaux et qu'il est vain de lui demander plus. Mais une telle vision manque

cruellement d'ambition. En effet, nous, scientifiques, cherchons à découvrir à quoi ressemble le monde; nous devrions donc considérer les expériences comme des guides et des tests de nos théories, et non comme leur raison d'être.

Or quand on essaye de comprendre la nature du monde sous-jacent à la mécanique quantique, de grandes difficultés surgissent. Pour les surmonter, l'une des voies les plus prometteuses, et probablement la plus simple, est la théorie de De Broglie-Bohm (ou dBB en abrégé). Cette approche tire son nom du physicien français Louis de Broglie (qui se



Des expériences, dont les premières ont été réalisées en 2004 par l'équipe d'Yves Couder et Emmanuel Fort, à l'université Paris-Diderot, ont montré qu'une goutte rebondissant sur un liquide dont la surface est parcourue par une onde se comporte de façon analogue à une particule dans la théorie de De Broglie-Bohm : l'onde pilote la goutte et lui confère un comportement semblable à celui d'une particule obéissant aux lois de la mécanique quantique. De telles expériences illustrent, sur un système de nature classique, des comportements quantiques.

> prononce comme «de Breuil»), avec ses travaux précurseurs de 1924-1927, et de David Bohm, le physicien américain qui l'a développée dans les années 1950 (voir l'encadré page ci-contre). Appelée aussi théorie de l'onde pilote, ou mécanique bohmienne, la théorie dBB revient à l'actualité et fait l'objet d'actives recherches, à la faveur du renouveau des réflexions sur l'interprétation de la mécanique quantique.

UNE EXPÉRIENCE QUI RÉSUME L'ÉTRANGÉTÉ QUANTIQUE

Avant d'y venir, expliquons quelles difficultés d'interprétation la mécanique quantique soulève. On peut commencer par considérer une expérience simple et exemplaire, celle dite des fentes de Young. Elle consiste à diriger des particules, par exemple des électrons, vers un écran opaque percé de deux fentes parallèles et proches. Après avoir traversé les fentes, les particules sont détectées sur un deuxième écran. On peut envoyer les particules une par une et les détecter une par une, ce qui se traduit par l'accumulation, avec le temps, de points d'impact sur l'écran de détection.

Si, au lieu d'électrons, on envoie sur les fentes des objets plus gros, de petites billes par exemple, ces objets suivront approximativement des lignes droites et formeront donc, en s'accumulant sur l'écran de détection, deux petites taches situées dans le prolongement des deux lignes droites reliant la source d'électrons aux fentes. Or ce n'est pas du tout ce que l'on observe avec des électrons ou d'autres particules très microscopiques : sur l'écran de détection, on voit se former des franges, c'est-à-dire une alternance de régions à densité d'impacts faible et élevée (voir la figure page 38).

Un tel motif est une figure d'interférence, caractéristique des phénomènes ondulatoires. Par exemple, des vaguelettes se propageant à la surface de l'eau produisent une figure d'interférence similaire – des régions où l'amplitude des vagues est alternativement petite et grande – lorsqu'elles traversent une barrière comportant deux ouvertures proches.

Comment la mécanique quantique rend-elle compte de l'expérience de la double fente ? Elle décrit l'électron comme une onde, représentée mathématiquement par une «fonction d'onde». Comme pour une onde classique, l'onde de l'électron arrive sur les deux fentes, dont chacune devient alors la source d'une onde secondaire, et ce sont les deux ondes secondaires ainsi produites qui interfèrent.

Mais l'analogie avec une onde classique s'arrête là. Alors que l'onde de l'électron qui atteint l'écran de détection s'étale sur une assez grande région, comme avec les vaguelettes à la surface de l'eau, l'électron ne laisse qu'une trace ponctuelle sur l'écran : à ce stade,



Louis de Broglie (1892-1987), physicien français, a émis entre 1924 et 1927 les premières idées selon lesquelles le comportement quantique des particules peut s'expliquer en supposant l'existence d'une onde qui les guide.



L'Américain David Bohm (1917-1992) a développé dans les années 1950 les idées de Louis de Broglie, ce qui a donné la mécanique bohmienne, ou théorie dBB.

il n'est plus du tout étalé. Afin de rendre compte de cette détection très localisée, la mécanique quantique postule que la fonction d'onde subit un effondrement instantané. Autrement dit, quand l'onde de l'électron atteint l'écran de détection, elle se réduit instantanément à quelque chose de très localisé. Cette réduction est censée se produire lors de la mesure et la probabilité d'observer l'impact en un point de l'écran est déterminée par l'amplitude de l'onde en ce point. Plus cette amplitude est élevée au point considéré, plus il est probable que l'onde s'y réduise.

La mécanique quantique explique ainsi la figure d'interférence qui se construit au fil du temps, avec l'accumulation des impacts d'électrons. Il y a toutefois un problème. On a supposé que l'effondrement de l'onde se produit une fois l'écran de détection atteint. Mais est-ce vraiment le cas ? Il se peut aussi que l'effondrement se fasse à un moment ultérieur, par exemple lorsque quelqu'un regarde l'écran. Dans la version orthodoxe de la mécanique quantique, l'effondrement est supposé se produire lors de la mesure. Mais quels processus physiques faut-il exactement pour qu'on puisse parler de «mesure» ? Faut-il que l'appareil de mesure soit d'un type particulier ? Une mesure implique-t-elle nécessairement un observateur humain ? Et cet observateur doit-il être suffisamment qualifié, par exemple titulaire d'un doctorat en physique ? Tant qu'on ne précise pas en quoi consiste exactement une mesure, on ne sait pas exactement quand l'effondrement se produit et les prévisions sont alors ambiguës.

LA MESURE, UN PROBLÈME ÉPINEUX

En 1935, le physicien autrichien Erwin Schrödinger a mis en exergue le problème de la mesure en imaginant un scénario impliquant un chat. Cette expérience de pensée aujourd'hui célèbre consiste à placer un chat bien vivant dans une boîte contenant un atome radioactif et un dispositif qui, si l'atome se désintègre, libère un poison mortel. Le couplage entre l'état du félin et celui de l'atome fait que la fonction d'onde du système atome-chat ne correspond pas à un état bien défini de l'animal, mais à une somme (une superposition, voir l'article d'Hervé Zwirg dans ce numéro) de l'état «chat vivant» et de l'état «chat mort». Mais alors, avant l'effondrement de la fonction d'onde du chat vers l'état vivant ou vers l'état mort, que peut ressentir cet animal ? Et quand l'effondrement se produit-il ? L'effondrement se produit-il juste au moment où un observateur humain ouvre la boîte et regarde à l'intérieur ?

Le problème de la mesure n'est pas le seul obstacle à la compréhension de la nature du monde quantique. Un autre exemple de difficulté est que le type d'onde introduit en

UNE THÉORIE LONGTEMPS DÉNIGRÉE

Inspiré par la suggestion d'Einstein selon laquelle la lumière ne devrait pas seulement être décrite par des ondes, mais aussi par des entités de nature corpusculaire, Louis de Broglie a, au milieu des années 1920, postulé que la matière devrait être décrite à la fois par des particules ponctuelles et des ondes, et que la vitesse d'une particule est liée à l'onde par la relation $v = \frac{h}{m\lambda}$, où h est la constante de Planck, m la masse de la particule et λ la longueur d'onde (ce qui est l'équation bohmienne du mouvement, voir l'encadré page 36). Mais il n'a pas su donner d'équation régissant l'évolution de cette onde au cours du temps.

Une telle équation d'onde a été formulée par Schrödinger

en 1925, mais dans le cadre d'une théorie uniquement ondulatoire. Cela a posé la question de la prise en compte des détections localisées, comme celles de l'expérience des fentes de Young. Et c'est pour expliquer ces localisations de l'onde que l'Allemand Max Born et d'autres physiciens ont introduit la notion d'effondrement de la fonction d'onde.

De Broglie, lui, n'a pas renoncé aux particules.

Peu après que Schrödinger a proposé son équation d'onde, de Broglie y a vu l'achèvement (provisoire) de son programme de description de la matière par des particules ponctuelles et des ondes, où la vitesse des particules est déterminée par la fonction d'onde, comme il l'avait proposé plus tôt. De Broglie présenta cette théorie au congrès Solvay de 1927, à Bruxelles, où les participants la discutèrent en détail. L'Autrichien Wolfgang Pauli le poussa dans ses retranchements à propos d'une expérience particulière, mais de Broglie n'y répondit pas de façon convaincante.

Cela a en partie conduit de Broglie à abandonner son



Au congrès Solvay de 1927 étaient notamment présents Louis de Broglie, Wolfgang Pauli, Erwin Schrödinger, Albert Einstein, Paul Dirac, Werner Heisenberg, Max Born...

programme, du moins jusqu'au début des années 1950...

Jusqu'à ce que David Bohm redécouvre la théorie de De Broglie et la développe. Bohm a pu montrer l'équivalence de sa mécanique avec la mécanique quantique orthodoxe pour ce qui est des prédictions des résultats des mesures. Mais une grande partie des physiciens sont restés indifférents ou hostiles. Les déclarations de Robert Oppenheimer, l'ancien directeur de thèse de Bohm, sont assez éloquentes à cet égard : « Nous considérons qu'il s'agit de déviationnisme juvénile » et « si nous ne pouvons pas réfuter Bohm,

alors nous devons accepter de l'ignorer ».

Cette attitude consistant à ignorer les travaux de Bohm a prévalu jusqu'à une époque récente. Bien que ces travaux aient amené de Broglie à reprendre ce programme avec quelques étudiants, Bohm lui-même n'est guère revenu sur sa théorie après le début des années 1950. Ce n'est que dans les années 1980, après que des étudiants proches de Bohm ont obtenu des tracés de trajectoires relatives à l'expérience de la double fente, que l'intérêt pour la théorie dBB s'est ravivé.

W. S.

mécanique quantique n'a rien à voir avec les autres types d'ondes rencontrés en physique, les ondes électromagnétiques par exemple. Et c'est un aspect étrange de la mécanique quantique dont les physiciens eux-mêmes n'ont pas toujours conscience... Les ondes classiques se propagent dans l'espace physique, l'espace tridimensionnel qui est considéré comme l'arène où se déroulent les phénomènes. Or il n'est pas possible de considérer la fonction d'onde de la mécanique quantique comme une onde évoluant dans l'espace physique, même si l'expérience des fentes de Young pourrait en donner l'impression.

En effet, pour deux particules, il ne s'agit pas de deux ondes qui se propagent chacune dans un espace tridimensionnel, mais d'une seule fonction d'onde qui évolue dans un espace à $3 \times 2 = 6$ dimensions. Plus généralement, dans le cas de N particules, le système n'est pas décrit par N ondes, mais par une seule onde qui se propage dans un espace à $3N$ dimensions, un « espace de configuration » abstrait qui n'est pas l'espace physique. La réalité du monde n'aurait alors rien à voir avec le monde tridimensionnel qui nous est familier. La

véritable arène des phénomènes physiques serait cet espace de configuration, multidimensionnel, et les observateurs auraient juste l'illusion de vivre dans un espace tridimensionnel.

DES PARTICULES GUIDÉES PAR LEUR FONCTION D'ONDE

Venons-en à présent à la mécanique bohmienne. Comment décrit-elle le monde ? Dans cette théorie, la fonction d'onde n'est pas le seul ingrédient. Il y a aussi, comme en mécanique classique, des particules ponctuelles qui se déplacent dans l'espace physique, tridimensionnel. Mais avec une dynamique bien sûr différente : les particules se déplacent à une vitesse déterminée par la fonction d'onde (voir l'encadré page 36).

Selon cette théorie, si nous voyons des objets tels que des tables et des chaises, ou des chats vivants ou morts, c'est parce que ces entités sont constituées de parties ponctuelles et bien réelles, et non parce que l'onde du système présente telle ou telle forme. En fait, la fonction d'onde nous est cachée : elle ne se révèle que par son effet sur le mouvement des particules – tout comme, en mécanique >

> classique, nous ne voyons pas les forces qui agissent sur les masses, mais seulement leur effet sur ces masses.

Dans l'expérience de la double fente, la fonction d'onde est la même pour chacune des particules incidentes (c'est-à-dire pour chaque réalisation de l'expérience), mais leurs positions initiales peuvent différer. Ce que l'on détecte est la position finale des particules. Dans la théorie dBB, leur fonction d'onde ne se localise pas soudainement, mais continue d'évoluer selon l'équation de Schrödinger, la même qu'en mécanique quantique orthodoxe. Il n'y a pas d'effondrement de la fonction d'onde et aucun problème de mesure n'apparaît. La théorie est déterministe, et les probabilités d'obtenir tel ou tel résultat découlent simplement de notre ignorance des conditions initiales.

Les probabilités quantiques habituelles qui rendent compte de la figure d'interférence sont obtenues lorsque les positions initiales des particules réelles suivent une certaine distribution statistique, la « distribution d'équilibre ». La distribution réelle des particules correspond « typiquement » à cette distribution d'équilibre (un peu comme les particules classiques d'un gaz sans interactions sont, « typiquement », distribuées uniformément dans le volume de leur enceinte). La mécanique bohmienne reproduit donc les prédictions de la mécanique quantique habituelle (dans la mesure où ces dernières sont sans ambiguïté). En ce sens, la théorie dBB est empiriquement équivalente à la théorie quantique orthodoxe. Et grâce à cette équivalence, nous n'avons en général pas besoin de nous préoccuper des trajectoires réelles des particules, la répartition statistique de leurs positions pouvant être déterminée par le formalisme quantique habituel.

DES PRÉDICTIONS IDENTIQUES A CELLES DE LA MÉCANIQUE QUANTIQUE

Quel est l'état actuel de la mécanique bohmienne ? Dans sa version non relativiste, cette théorie est pleinement développée et bien comprise. De nombreux chercheurs y ont contribué, notamment des collaborateurs de Bohm comme Chris Dewdney, Basil Hiley et Peter Holland. Depuis les années 1990, les équipes dirigées par Detlef Dürr, à l'université de Munich, Sheldon Goldstein, à l'université Rutgers, et Nino Zanghì, à l'université de Gênes, ont également joué un rôle majeur. D'importants travaux ont ainsi porté sur la façon dont les probabilités des résultats observés et le formalisme habituel de la mécanique quantique émergent de la théorie dBB, sur la limite classique (le passage d'un comportement quantique à un comportement classique) de celle-ci, sur les propriétés d'un ensemble de particules identiques...

UNE ONDE PILOTE

La mécanique bohmienne suppose que les particules ponctuelles, dont la position est bien définie à tout instant comme en mécanique classique, sont guidées par une onde dite « pilote », dont l'évolution obéit à l'équation de Schrödinger comme en mécanique quantique usuelle. Plus précisément, la mécanique bohmienne stipule que le vecteur vitesse v d'une particule donnée est déterminé par la fonction d'onde via l'équation $v = \text{grad } S/m$, où m est la masse de la particule et S est la phase de la fonction d'onde qui, de façon générale, s'écrit $\psi = A e^{iS}$ où A et S sont des fonctions à valeurs réelles des coordonnées d'espace et de temps. Le symbole grad désigne le gradient : $\text{grad } S$ est, dans l'espace, le vecteur ayant pour composantes $\partial S/\partial x$, $\partial S/\partial y$, et $\partial S/\partial z$, les dérivées de S par rapport aux coordonnées spatiales x , y et z de la particule considérée ; ce vecteur pointe dans la direction orthogonale aux fronts d'onde, les surfaces constituées des points où la phase S a la même valeur.

W.S.

Comme je l'ai indiqué plus haut, la mécanique bohmienne reproduit les prédictions habituelles de la mécanique quantique. L'un des reproches souvent entendus est qu'elle ne fournit pas de nouvelles prédictions. Mais les prédictions de la mécanique quantique sont parfaitement vérifiées par l'expérience, et c'est déjà très bien que la mécanique bohmienne les reproduise. De plus, contrairement au cas de la mécanique quantique habituelle, elle fournit une image claire et sans ambiguïté du monde, et la mesure n'y soulève aucun problème conceptuel.

Par ailleurs, pour les calculs pratiques, les détails des trajectoires bohmiennes n'ont généralement pas d'importance. Dans l'expérience de la double fente, par exemple, il n'est pas nécessaire de calculer les trajectoires réelles des particules pour calculer la figure d'interférence : la mécanique quantique habituelle est tout à fait appropriée.

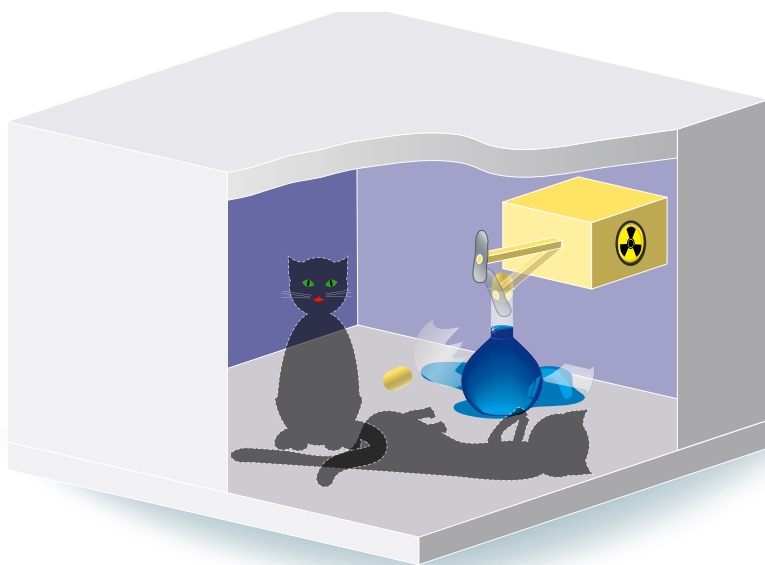
Mais d'autres questions, comme la limite classique, c'est-à-dire le passage d'un comportement quantique à un comportement classique, exigent de la clarté conceptuelle. En mécanique bohmienne, cette question est bien posée, et la limite classique correspond tout simplement à la situation où les trajectoires des particules (ou des degrés de liberté collectifs pertinents, tels que le centre de masse) sont très proches de celles prédites par la mécanique classique.

Un autre exemple de questions pour lesquelles la mécanique quantique orthodoxe paraît mal adaptée est la mesure du temps requis pour sortir d'un domaine ou pour franchir un obstacle (en raison de l'absence dans son formalisme d'un « opérateur temps », alors qu'il existe, par exemple, un « opérateur position ») ; or de telles questions peuvent être posées et abordées directement en mécanique bohmienne.

Il est fréquent que des versions différentes d'une même théorie conduisent à différents outils permettant de résoudre des problèmes concrets. C'est le cas avec la version bohmienne et la version orthodoxe de la mécanique quantique. Des applications concrètes de la théorie dBB ont ainsi vu le jour au cours des vingt dernières années.

DES APPLICATIONS À DIVERS PROBLÈMES DE PHYSIQUE

C'est le cas notamment en chimie quantique, où l'on étudie souvent des systèmes à grand nombre de particules (les électrons d'un atome ou d'une molécule), des systèmes trop complexes pour être décrits de façon mathématiquement exacte et pour lesquels il faut généralement utiliser des techniques numériques. Or la mécanique bohmienne en a inspiré dans ce domaine de nouvelles, plus efficaces que celles fondées sur la mécanique quantique orthodoxe.



LE CHAT DE SCHRÖDINGER

La célèbre expérience de pensée du physicien autrichien Erwin Schrödinger, imaginée en 1935, met en exergue le caractère problématique de certains concepts de la physique quantique. Un chat est enfermé dans une pièce contenant un dispositif où un atome a deux états quantiques de base possibles, E_1 et E_2 . On suppose que s'il est dans l'état E_2 , le dispositif déclenche la libération d'un poison mortel. Il est possible de placer cet atome dans une superposition $E_1 + E_2$ de ses deux états de base ; dans ce cas, les lois quantiques indiquent que l'état du chat devrait être une superposition de son état vivant et de son état mort. Or une telle superposition semble impossible ou dépourvue de sens pour un système macroscopique tel que le chat – lequel pourrait d'ailleurs être remplacé (toujours par la pensée !) par un expérimentateur humain.

Une autre application est la modélisation des interactions d'un système quantique avec un système classique, par exemple la diffusion de particules (quantiques) sur la surface d'un solide. En principe, il faudrait utiliser la mécanique quantique pour décrire la surface, mais c'est irréalisable en pratique. On se contente donc d'une représentation classique de cette surface. Au début des années 2000, des travaux de divers chercheurs (notamment Oleg Prezhdo et Craig Brooksby, à l'université de Washington, Étienne Gindensperger, Christoph Meier et Alberto Beswick, à l'université Paul-Sabatier de Toulouse) ont montré qu'une modélisation où l'on couple le système classique à des particules décrites par la mécanique bohmienne produit des résultats plus précis qu'avec des couplages similaires fondés sur la mécanique quantique habituelle.

Comme je l'ai indiqué, la mécanique bohmienne est une théorie non relativiste. Il faudrait donc la généraliser pour tenir compte des lois de la relativité restreinte d'Einstein. Avec la mécanique quantique ordinaire, cette tâche difficile a été entreprise il y a longtemps. Son résultat a été la théorie quantique des champs, qui est aujourd'hui le cadre général permettant de décrire le monde des particules subatomiques et de leurs interactions.

L'une des principales différences avec la mécanique quantique est qu'en théorie quantique des champs, le nombre de particules n'est

pas fixe : il peut y avoir création ou annihilation de particules. Afin de rendre compte de ces processus de création et d'annihilation, la dynamique bohmienne doit être modifiée. Pour les particules de la classe des fermions (particules dont le spin, dans les unités atomiques, est demi-entier : électron, proton, quarks...), essentiellement deux procédures différentes ont été proposées, la première en 2004 par Detlef Dürr, Sheldon Goldstein, Roderich Tumulka et Nino Zanghì, la seconde en 2007 par Samuel Colin et moi.

Pour les bosons (particules dont le spin est un nombre entier, comme le photon ou la particule de Higgs), en revanche, on n'a pas trouvé de moyen naturel d'introduire des particules ponctuelles. Comme l'avait déjà montré Bohm, il semble qu'il faille décrire fondamentalement les bosons non pas par des particules, mais par des champs dont l'interaction avec les fermions donnerait lieu, en apparence, à la création et à l'annihilation de particules bosoniques.

Mais une théorie plus profonde pourrait mettre en jeu une autre réalité. Par exemple, dans le cas de la théorie des cordes, la formulation bohmienne naturelle ne fait pas intervenir des particules ou des champs, mais de minuscules cordes unidimensionnelles.

Un autre aspect important de la théorie quantique des champs est que celle-ci intègre les symétries imposées par la relativité restreinte (symétries qui traduisent l'invariance de la vitesse de la lumière et des expressions des lois physiques quand on passe d'un référentiel à un autre, en mouvement rectiligne et uniforme l'un par rapport à l'autre). Or l'une des conséquences de la relativité restreinte est qu'il

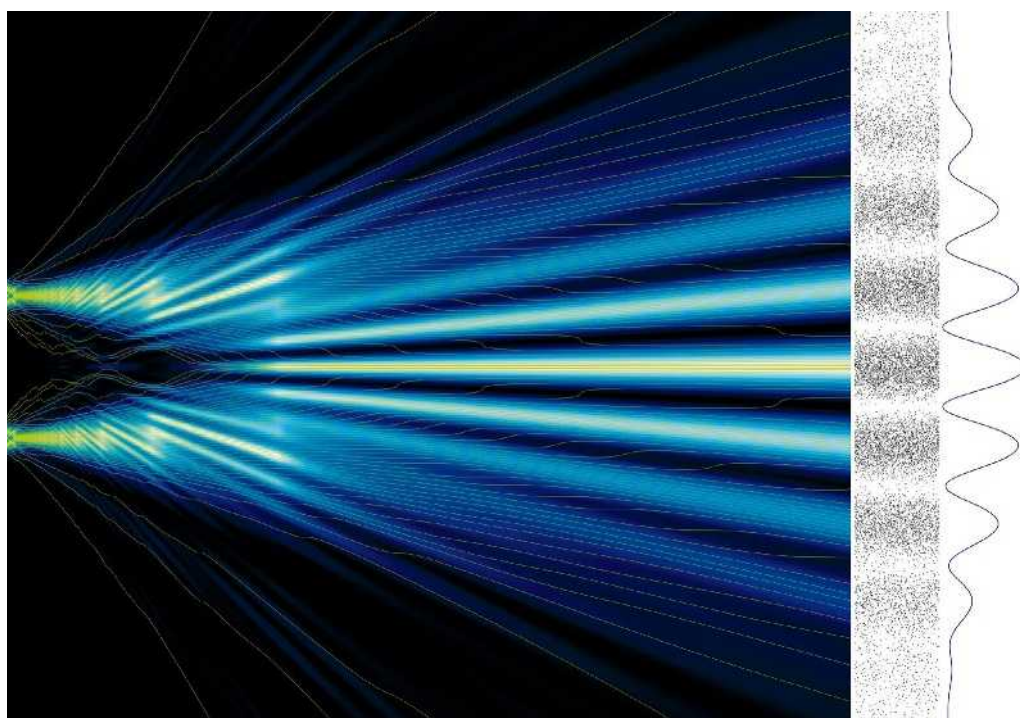
Une théorie bohmienne compatible avec la relativité d'Einstein est à élaborer

n'existe pas de notion absolue de simultanéité : deux événements qui sont simultanés pour un observateur ne le seront pas pour un observateur en mouvement par rapport au premier.

Mais comment accorder cette relativité de la simultanéité à la non-localité, une caractéristique qui semble indésirable, mais inhérente à la physique quantique (voir l'encadré page 39) ? ➤

L'EXPÉRIENCE DES FENTES DE YOUNG AVEC DES ÉLECTRONS

Cette figure indique la densité de probabilité de présence (élevée en clair, faible en sombre) d'électrons traversant de gauche à droite un écran percé de deux fentes voisines (tout à gauche de l'image). Les trajectoires de quelques électrons, telles qu'on les calcule par la mécanique bohmienne, sont tracées en jaune. Dans la partie droite de la figure, chaque point correspond à l'impact d'un électron sur l'écran de détection; la courbe indique la densité des impacts. La densité de probabilité calculée par la mécanique bohmienne est exactement la même que celle calculée par la mécanique quantique usuelle et reproduit très bien les observations.



> La non-localité correspond à une influence instantanée d'un endroit à un autre; mais alors, dans quel référentiel cette influence est-elle instantanée? Existe-t-il un tel référentiel privilégié, auquel cas les symétries relativistes seraient violées? Ces questions difficiles ont été beaucoup étudiées, mais n'ont pas encore de réponse satisfaisante. De toute évidence, la non-localité ne fait pas bon ménage avec la relativité. Et il faut bien voir que ce problème se pose dans n'importe quelle version de la théorie quantique des champs, qu'il s'agisse de la version orthodoxe ou d'une autre, telle que la théorie bohmienne.

GRAVITATION QUANTIQUE À LA BOHM

Un autre domaine d'application de la théorie dBB, qui fait l'objet de mes recherches actuelles, est celui de la gravitation quantique et de ses conséquences en cosmologie. La quête d'une théorie quantique de la gravitation est l'un des principaux problèmes ouverts en physique théorique. Selon la théorie de la relativité générale d'Einstein, la gravitation correspond à une courbure de l'espace-temps. Mais cette théorie décrit comment l'espace-temps interagit avec la matière représentée de façon classique, et non quantique. Que change le fait que la matière doive obéir aux lois quantiques? L'espace-temps lui-même (donc la gravitation) doit-il obéir à des lois quantiques? Et si oui, lesquelles?

Les physiciens ont fait plusieurs propositions d'une théorie quantique de la gravitation. Citons la gravitation quantique dite canonique,

la gravitation quantique à boucles et la théorie des cordes. La gravitation quantique canonique est construite en appliquant à la relativité générale d'Einstein les techniques habituelles utilisées pour passer d'un champ classique (tel que le champ électromagnétique) à sa version quantique. Mais la théorie ainsi obtenue, où l'équation d'onde résultante est l'équation dite de Wheeler-DeWitt, présente des défauts de

Une version bohmienne de la gravitation quantique serait d'un grand intérêt

nature mathématique qui semblent insurmontables. On est alors conduit à construire, à partir de versions à symétrie réduite de la relativité générale, des modèles simplifiés, dans l'espoir que ces derniers permettent de saisir certaines des propriétés de la théorie complète.

La gravitation quantique à boucles résulte également de la quantification de la théorie d'Einstein, mais en procédant sur des variables

différentes. Elle donne aussi naissance à une sorte d'équation de Wheeler-DeWitt. Avec une différence importante par rapport à la gravitation quantique canonique: l'espace-temps y apparaît discrétisé, et non continu. Quant à la théorie des cordes, où les entités élémentaires ne sont pas des particules ponctuelles mais des cordes unidimensionnelles, elle ne découle pas de la quantification de la théorie d'Einstein, mais plutôt de la tentative d'unifier toutes les interactions fondamentales connues.

Il n'existe pas à ce jour d'indices expérimentaux ou observationnels permettant de départager ces théories. De plus, il n'est pas facile de déterminer ce que des théories comme la gravitation quantique canonique ou la gravitation quantique à boucles prévoient. Tout d'abord, elles héritent du problème de la mesure déjà posé en mécanique quantique non relativiste, ce qui se révèle particulièrement gênant quand on cherche à appliquer la gravitation quantique à la cosmologie. Dans ce cas, en effet, le système d'intérêt est l'Univers entier, et il n'existe alors pas d'observateurs extérieurs effectuant des mesures. De plus, il n'y a qu'un seul Univers, et non un ensemble d'entre eux pour lequel les probabilités des différents résultats pourraient être une notion pertinente.

DES PRÉDICTIONS DIFFÉRENTES EN COSMOLOGIE

Et au problème de la mesure s'ajoute le problème du temps. D'après l'équation de Wheeler-DeWitt, la fonction d'onde de l'Univers n'évolue pas dans le temps. Dès lors, comment l'évolution cosmologique constatée découle-t-elle de cette équation? Comment dire, à partir de cette équation, si l'Univers est en expansion ou en contraction?

Depuis les années 1990, Jeroen Vink, aux Pays-Bas, Nelson Pinto-Neto, au Brésil, et plusieurs autres chercheurs ont développé et étudié une version bohmienne de la gravitation quantique canonique. Et j'ai moi-même élaboré vers 2017 une version bohmienne de la gravitation quantique à boucles. Dans ces versions, on a aussi une géométrie de l'espace-temps, mais la déformation et l'évolution de l'espace-temps sont déterminées par la fonction d'onde. Et cela d'une telle façon que même si cette fonction d'onde est statique, l'espace-temps se déforme au cours du temps.

Généralement, la dynamique bohmienne de l'espace-temps diffère de celle prescrite par la relativité générale. Il est apparu par exemple que, contrairement à ce qui se passe dans cette dernière, il est possible d'éviter les singularités d'espace-temps comme celles du début du Big Bang ou de la fin du Big Crunch (l'inverse du Big Bang). Par ailleurs, plusieurs chercheurs

ont envisagé la possibilité que l'«énergie sombre», une énergie de nature inconnue qui expliquerait l'accélération de l'expansion de l'Univers, n'existe pas et que l'expansion accélérée résulte simplement de la dynamique quantique du cosmos. Dans le développement le plus récent de ce programme, Thibaut Demaerel, Christian Maes et moi, à la KU Leuven, avons montré que l'on peut obtenir, sans introduire d'énergie sombre, une telle expansion de l'Univers dans un modèle simplifié de gravitation quantique canonique intégrant une dynamique bohmienne.

Il s'agit là de pistes intéressantes et prometteuses, tant pour la cosmologie que pour la théorie quantique. Alors que la formulation quantique habituelle ne fournit pas aux cosmologistes d'indications claires, une version bohmienne de la gravitation quantique conduira peut-être à de nouvelles prédictions, par exemple sur les fluctuations de température du fond diffus cosmologique, ce rayonnement micro-onde qui baigne l'Univers et qui est un vestige de ses débuts.

Confrontées aux observations, ces prédictions pourraient nous renseigner à la fois sur l'évolution de l'Univers et sur la validité de la théorie quantique utilisée. Ce qui serait d'un grand intérêt puisque, dans les autres domaines, les prédictions de la théorie bohmienne sont les mêmes que celles de la théorie quantique habituelle. ■

NON-LOCALITÉ

Le physicien nord-irlandais John Bell, qui s'intéressait beaucoup aux fondements de la mécanique quantique, était un fervent partisan de la théorie dBB. Mais le fait que la théorie soit manifestement non locale le gênait. Autrement dit, le mouvement d'une particule peut dépendre du mouvement des autres particules, quelle que soit la distance entre elles. Or cela semblait être une caractéristique indésirable, car on pensait généralement que la nature devait être locale, les interactions ne pouvant pas se propager plus rapidement que la lumière.

Bell a tenté, sans succès, de modifier la théorie pour la rendre locale. Qui plus est, il a pu montrer qu'on ne pouvait pas le faire. Il a même prouvé, en 1964, que si certaines prédictions de la mécanique quantique usuelle sont justes, alors il est impossible de conserver la localité. Dans la nature, les systèmes distants peuvent présenter des corrélations que toute théorie locale est incapable d'expliquer.

Malheureusement, et à la frustration de Bell, ce résultat est souvent mal compris. Par exemple, on trouve facilement des affirmations selon lesquelles, d'après les théorèmes de Bell, une description plus riche (en introduisant des variables «cachées») que celle de la mécanique quantique ordinaire impliquerait la non-localité. Ces affirmations sont fausses. La mécanique quantique orthodoxe est non locale, tout comme l'est la mécanique bohmienne, et les travaux de Bell montrent en fait que toute théorie visant à décrire avec succès la nature est condamnée à être non locale.

W. S.

BIBLIOGRAPHIE

X. Oriols et J. Mompart (éd.), **Applied Bohmian Mechanics**, Jenny Stanford Publishing (2^e édition), 2019.

F. Laloë, **Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique?**, CNRS Éditions/EDP Sciences (2^e édition), 2017.

T. Norsen, **Foundations of Quantum Mechanics : An Exploration of the Physical Meaning of Quantum Theory**, Springer, 2017.

J. Bricmont, **Quantum Sens and Nonsense**, Springer, 2017, traduction française à paraître chez Odile Jacob, 2020.

W. Struyve, **Pilot-wave approaches to quantum field theory**, *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 306, article 012047, 2011.

D. Dürr et S. Teufel, **Bohmian Mechanics**, Springer, 2009.

L'ESSENTIEL

> La chlordécone a été utilisée comme insecticide dans les bananeraies de la Guadeloupe et de la Martinique jusqu'en 1993. Elle a notamment contaminé des sols et la population elle-même.

> Cette molécule est reconnue pour sa toxicité depuis les années 1970. Sa stabilité laissait à penser qu'elle persisterait dans les sols antillais pendant des siècles.

> Des études récentes montrent que la dégradation de la chlordécone, probablement induite par des bactéries, se produit déjà aux Antilles.

> Cette dégradation engendre une variété de produits dont la toxicité et le devenir dans l'environnement restent à étudier.

LES AUTEURS



ORIANE DELLA-NEGRA ET PIERRE-LOÏC SAAÏDI
doctorante et maître de conférences
à l'UMR Génétique métabolique
(CNRS, CEA/IBFJ/Genoscope,
université d'Évry-Val-d'Essonne
– université Paris-Saclay)

La chlordécone, un polluant en transformation

On considérait comme indestructible la chlordécone, un insecticide toxique utilisé pendant plus de vingt ans dans les bananeraies des Antilles françaises.

On vient de découvrir qu'en fait une dégradation naturelle est à l'œuvre. Reste à étudier les produits de transformation mis en évidence.

Le 2 décembre 2019, la commission d'enquête parlementaire a rendu public son rapport sur l'impact économique, sanitaire et environnemental de l'utilisation de la chlordécone aux Antilles françaises. Ses conclusions aboutissent à la mise en cause de l'État français dans ce « désastre sanitaire et environnemental ». Interdite aux États-Unis dès 1978, la chlordécone, un pesticide organochlore, a été utilisée dans les bananeraies de Guadeloupe et de Martinique jusqu'en 1993.

Ce perturbateur endocrinien persiste aux Antilles et contamine toute la chaîne alimentaire, plus de vingt-cinq ans après son interdiction. L'exposition chronique de la population antillaise à la chlordécone a été reliée à une surincidence de plusieurs pathologies (cancer de la prostate, prématurité et troubles de développement cognitif et moteur chez les nourrissons). La commission souligne d'ailleurs une prise de conscience trop tardive de l'État et la mise en place d'actions publiques trop lentes qui ne répondent pas aux problématiques de cette crise,

où s'invitent des aspects socioéconomiques et politiques liés à l'insularité de ces territoires et à leur passé colonial. L'enjeu est aujourd'hui de trouver des pistes pour faire face à cette pollution persistante. Or nos travaux ont récemment montré qu'une dégradation naturelle de la chlordécone est à l'œuvre aux Antilles, processus qu'il est intéressant d'explorer et qui apporte une note d'espoir.

L'histoire de la chlordécone démarre en 1958, quand la société Allied Chemical lance sur le marché américain le Kepone, constitué à 94,5% de chlordécone. En 1972, après plusieurs refus, l'usage d'une formulation commerciale contenant 5% de chlordécone est finalement accordé de manière provisoire aux Antilles pour lutter contre le charançon du bananier.

Or en 1975, l'usine de Hopewell, aux États-Unis, où le Kepone est produit, subit une grave pollution, un des plus importants et coûteux désastres environnementaux pour l'époque. Des troubles neurologiques sont constatés parmi les ouvriers de l'usine, dont les analyses de sang ont révélé un taux élevé de chlordécone. Des prélèvements ont alors montré une contamination >

Pour lutter contre les charançons, les exploitants des bananeraies de Guadeloupe et de la Martinique ont utilisé jusqu'en 1993 de la chlordécone, un pesticide persistant et reconnu comme toxique, cancérigène probable d'après le Circ, et dangereux pour l'environnement.



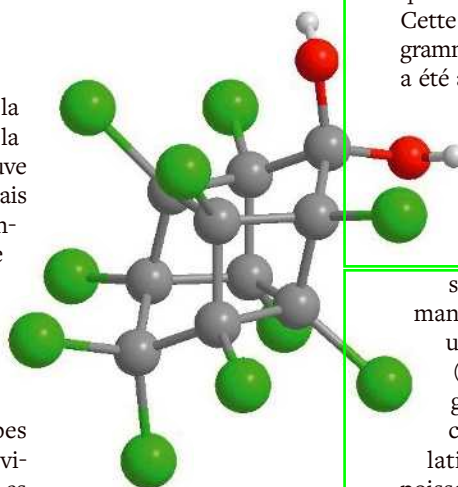
> généralisée du site et même du fleuve voisin sur plus d'une centaine de kilomètres en aval. L'usine est fermée la même année. À la suite de plusieurs études confirmant la persistance et la toxicité de la molécule, l'Agence américaine pour la protection de l'environnement interdit en 1978 la production, la vente et l'utilisation du Kepone aux États-Unis, ce qui entraîne l'arrêt complet de la commercialisation au niveau mondial.

Peu après, au début des années 1980, alors qu'elles arrivaient à épuisement de leurs stocks de Kepone, les Antilles ont été confrontées à deux cyclones qui ont entraîné une forte pression parasitaire. Les planteurs de bananes se sont alors retrouvés dans une impasse technique qui a conduit les autorités françaises à accorder en 1981 une autorisation de commercialisation du Curlone, un nouvel insecticide contenant 5% de chlordécone, produit au Brésil. Plusieurs dérogations successives ont prorogé son usage jusqu'en 1993. Au total, on estime que 300 tonnes de chlordécone ont été épandues à la main sur les sols antillais, ce qui aurait contaminé un quart de la surface agricole utile (voir les cartes pages 43).

UN POLLUANT PERSISTANT

En 2009, la chlordécone a été ajoutée à la liste des polluants organiques persistants de la convention de Stockholm. De fait, on la retrouve encore dans de nombreux sols agricoles antillais ayant servi à la culture bananière. Les concentrations sont variables au sein d'une même parcelle et atteignent localement jusqu'à 20 milligrammes par kilogramme de sol. Malgré sa faible solubilité dans l'eau, la chlordécone est aussi présente dans les systèmes hydriques de la Guadeloupe et de la Martinique, notamment certaines nappes d'eau souterraines exploitées pour l'approvisionnement en eau potable de la population. Les concentrations retrouvées sont de l'ordre de 1 microgramme par litre dans les rivières et atteignent jusqu'à 50 microgrammes par litre dans les eaux souterraines. La contamination des systèmes hydriques déplace lentement une partie de la pollution vers le littoral.

Une telle pollution n'est pas sans conséquence pour la faune et la flore exposées. Un phénomène de bioconcentration opère tout au long de la chaîne alimentaire, avec l'homme pour ultime maillon. Dans le cas des plantes, la contamination se fait par contact direct et par absorption au niveau des racines. La faible solubilité dans l'eau et la forte hydrophobicité de la chlordécone conduisent à un transfert limité via les flux de transpiration vers les autres compartiments des plantes. On observe ainsi un gradient de contamination décroissant, des racines aux parties aériennes. Les légumes-racines se développant sur les sols pollués ont tendance à



La chlordécone tire sa très grande stabilité de sa structure

« bishomocubane » : elle forme une cage comprenant 10 atomes de carbone. Réputée peu dégradable, elle est aussi thermiquement très stable puisqu'elle ne subit aucune décomposition avant d'atteindre son point de sublimation à 350 °C. La chloration de la cage bishomocubane (avec 10 atomes de chlore) lui confère des propriétés hydrophobes et explique sa faible solubilité dans l'eau (de 1 à 3 milligrammes par litre à 20 °C).

accumuler plus de chlordécone (avec des concentrations qui dépassent 30 microgrammes par kilogramme) que les cucurbitacées poussant au ras du sol (entre 1 et 30 microgrammes par kilogramme), alors que les cultures fruitières et maraîchères sont relativement épargnées (avec des concentrations inférieures à 1 microgramme par kilogramme).

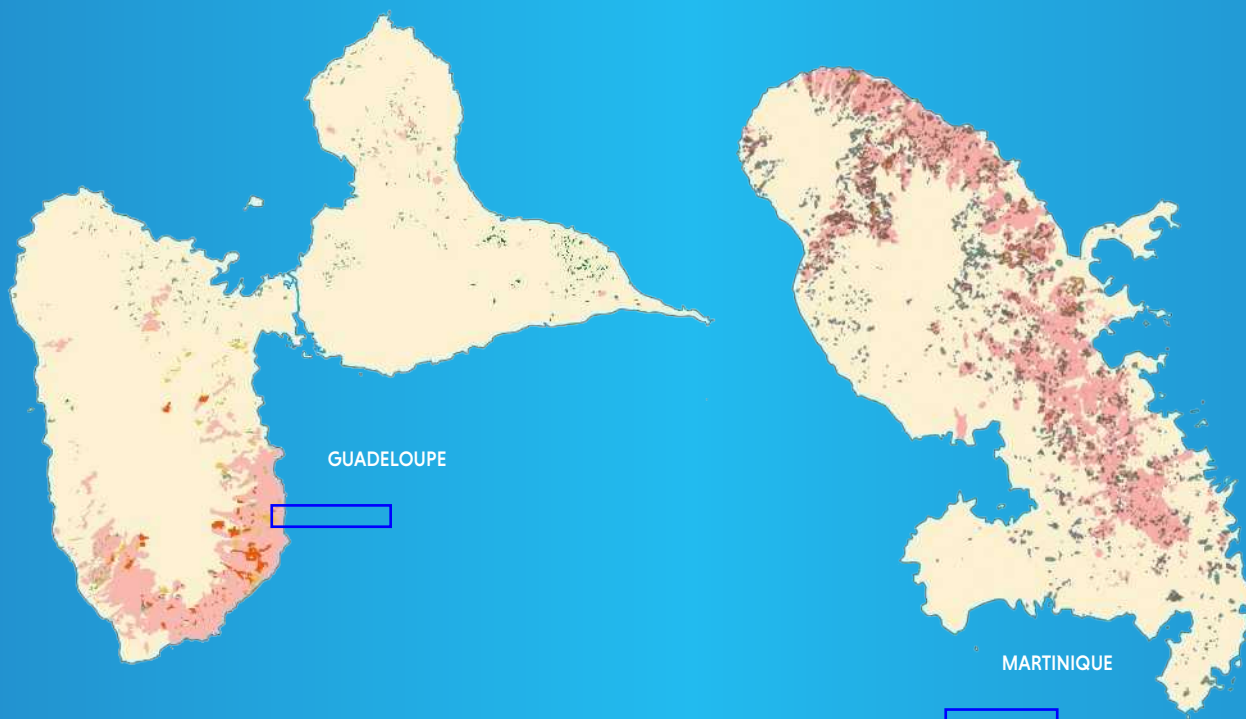
La contamination touche aussi les animaux terrestres. L'équipe de Cyril Feidt, de l'université de Lorraine et de l'Inra (Institut national de la recherche agronomique), a montré que les animaux d'élevage étaient exposés via le contact avec le sol, l'alimentation et les eaux d'abreuvement contaminées. Outre la viande, le lait et surtout les œufs présentent parfois des taux importants de chlordécone. Le confinement des animaux (dans des zones non polluées ou des élevages hors-sol) durant plusieurs semaines avec de l'alimentation saine tend à faire chuter le taux de chlordécone et à les rendre ainsi de nouveau propres à la consommation. Le gouvernement français a mis en place des « limites maximales de résidus » à ne pas dépasser pour que le produit puisse être mis sur le marché. Cette limite est de 20 microgrammes par kilogramme pour les denrées végétales. En 2019, elle a été abaissée à cette même limite pour toutes

les denrées animales. Pour l'eau de consommation, les normes de potabilité s'appliquent, la chlordécone étant incluse au titre de pesticide.

Cette pollution ne s'arrête pas là, puisque la faune et la flore aquatiques sont aussi touchées. Dans les zones de mangrove, les organismes marins présentent une contamination forte et homogène (pouvant être supérieure à 200 microgrammes par kilogramme). Ailleurs, la contamination augmente par bioaccumulation en suivant le réseau trophique, les poissons piscivores présentant les taux les plus élevés (entre 100 et 200 microgrammes par kilogramme).

UNE POPULATION TRÈS TOUCHÉE

Face à l'ampleur de la contamination environnementale, qu'en est-il de la population antillaise ? De nombreuses mesures de protection ont été prises au cours des quinze dernières années : traitement additionnel des eaux de consommation, contrôle des filières d'alimentation locales, arrêts d'interdiction de pêche, analyse des sols des particuliers et recommandations alimentaires, filtres à charbon actif pour traiter l'eau potable, etc. Malgré cela, la dernière étude publiée (étude Kannari de l'Anses et d'autres organismes, réalisée entre 2011 et 2016) indique que plus de 90% des Antillais présentent des quantités détectables de chlordécone dans le sang. L'étendue de la



- Teneur en chlordécone inférieure au seuil de détection
- Teneur comprise entre le seuil de détection et 0,1 mg/kg
- Terrains non analysés dépourvus de culture de bananiers sur la période 1969-1997, avec peu de risque de contamination par la chlordécone
- Teneur comprise entre 0,1 et 1 mg/kg
- Teneur supérieure à 1 mg/kg
- Terrains non analysés avec un risque de contamination par la chlordécone, fondé sur la présence de bananiers entre 1969 et 1997

Les zones les plus contaminées de la Guadeloupe et de la Martinique sont souvent liées aux bananeraies où le produit a été massivement utilisé. Des prélèvements ont permis d'établir une carte des zones touchées.

contamination dans la population est d'autant plus inquiétante que la molécule possède une toxicité liée à une exposition chronique.

Les premières études des années 1970 jusqu'à celles publiées récemment montrent un potentiel cancérigène chez des modèles animaux, ce qui a conduit le Circ (Centre international de recherche sur le cancer) à classer la chlordécone comme cancérigène probable en 1979. Au cours de la dernière décennie, plusieurs études épidémiologiques ont établi un lien entre l'exposition chronique à la chlordécone aux Antilles et une augmentation du risque de survenue et de récurrence du cancer de la prostate. Le mécanisme d'action reste à préciser. Cependant, grâce à plusieurs résultats *in vitro* et *in vivo* chez la souris, Samuel Legeay et ses collègues de l'université d'Angers ont montré que la chlordécone présenterait des effets proangiogéniques: la molécule stimulerait la vascularisation des cellules tumorales, dont le développement serait ainsi favorisé.

L'exposition prénatale constatée aux Antilles, quant à elle, conduit à un risque accru de prématurité. Les conséquences vont même au-delà puisque les nouveau-nés exposés *in utero* sont aussi statistiquement plus sujets à des retards de développement, à la fois psychomoteur et statur pondéral. Dans les suivis à 18 mois, ces troubles sont surtout marqués chez les enfants de sexe masculin.

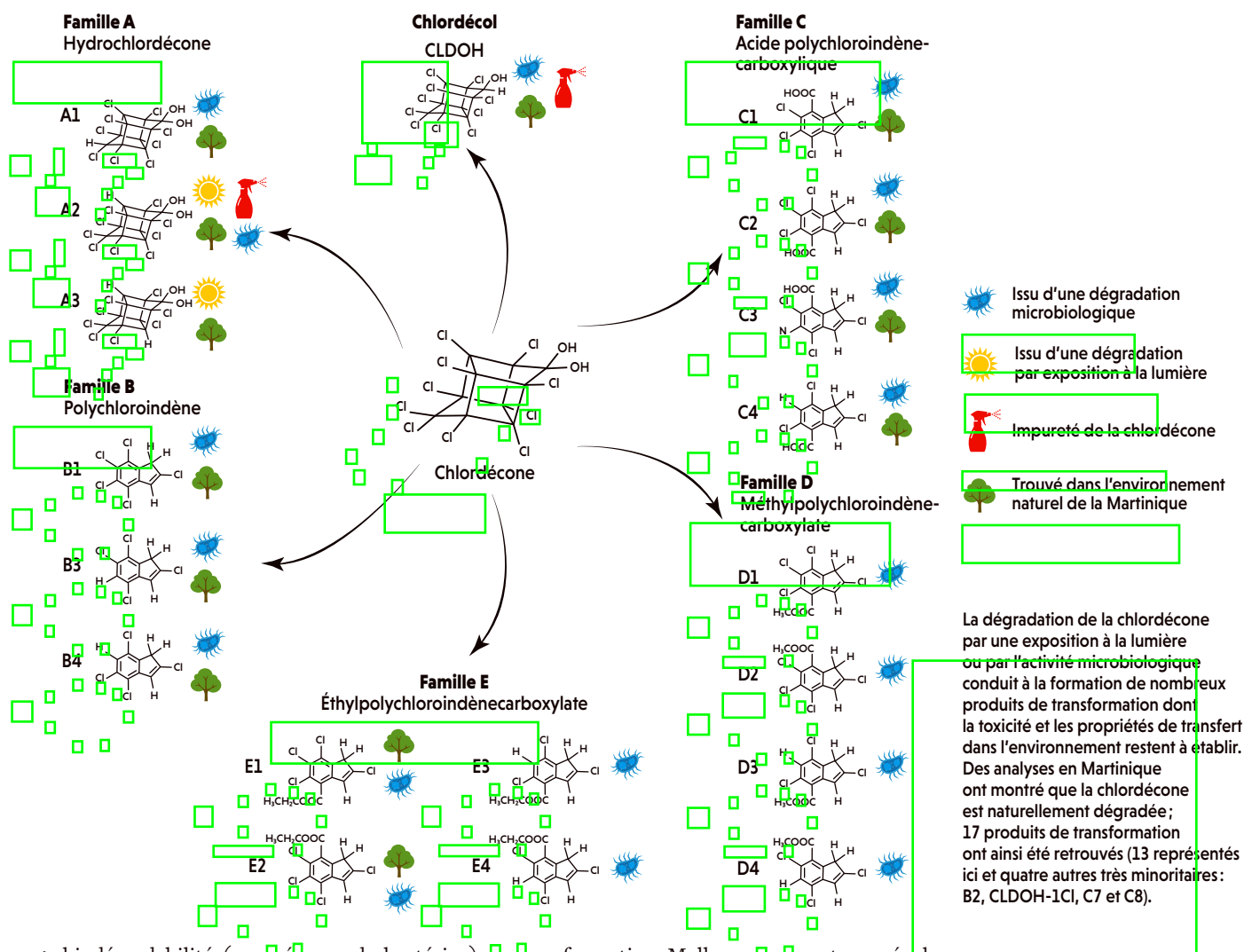
Dès 1979, Bruce Hammond et ses collègues, de l'université de l'Illinois, avaient mis en évidence le caractère de perturbateur endocrinien

de la chlordécone, qui imite notamment l'activité des œstrogènes. Récemment, l'équipe de Luc Multigner, de l'Inserm et de l'université de Rennes, en faisant une synthèse des travaux publiés, a suggéré que ce rôle de perturbateur endocrinien explique une grande part des pathologies liées à la chlordécone.

Il semble donc primordial d'éliminer la chlordécone de l'environnement. Mais plusieurs facteurs contribuent à sa persistance dans les sols antillais: la molécule présente une très faible biodégradabilité intrinsèque; en raison de sa grande hydrophobicité, elle s'adsorbe bien à la surface des matières organiques, très présentes dans les sols tropicaux; enfin, certains sols volcaniques antillais ont une structure minérale fractale qui emprisonne la chlordécone dans leurs micropores, ce qui réduit les processus de transfert ou de dégradation de la molécule.

UNE MOLÉCULE PRÉSUMÉE INDESTRUCTIBLE

Grâce à sa structure en forme de cage sur laquelle sont fixés dix atomes de chlore, la chlordécone est une molécule très stable et difficilement dégradable (voir l'illustration page 42), ce qui lui vaut le surnom de «caillou quasi indestructible». Néanmoins, dès les années 1970, plusieurs équipes américaines, dont celle de Steve Orndorff et Rita Colwell, de l'université du Maryland, ou encore celle de Susan George et Larry Claxton, de l'Agence américaine pour la protection de l'environnement, ont étudié sa



> biodégradabilité (en présence de bactéries). Elles ont suggéré qu'il était possible de transformer la chlordécone en 8-monohydrochlorodécone (A2) ou en 2,8-dihydrochlorodécone (A3), par perte d'un ou deux atomes de chlore, et en chlordécol (CLD-OH) par perte d'un atome d'oxygène.

Cependant, A2 et CLD-OH sont aussi connus pour être des impuretés présentes dans les formulations commerciales de la chlordécone (Kepone et Curlone). Et les hydrochlorodécones A2 et A3 sont aussi produites par photolyse de la chlordécone à l'aide d'un rayonnement ultraviolet ou même après une longue exposition au rayonnement solaire. Comme les méthodes analytiques utilisées dans les années 1970 étaient moins sensibles et moins efficaces qu'aujourd'hui, il est difficile de juger de la pertinence de ces résultats précurseurs.

En 1996, Peter Jablonski, de l'université de l'Illinois du Nord, aux États-Unis, et ses collègues ont observé qu'une archée, *Methanosarcina thermophila* (un microorganisme cellulaire procaryote qui diffère des bactéries), semblait capable de dégrader la chlordécone de façon très significative avec obtention de plusieurs produits de

transformation. Malheureusement, ces résultats n'ont pas pu être confirmés par la suite.

D'un point de vue chimique, il est possible d'attaquer la chlordécone moyennant des conditions relativement dures. Les réactions photochimiques citées plus haut engendrent la perte d'un à deux atomes de chlore, en formant les hydrochlorodécones A2 et A3. Un traitement combinant de l'hydrazine, du lithium et du tert-butanol permet une déchloration complète conduisant à la formation du bishomocubane non fonctionnalisé. L'utilisation du tétrahydroborate de sodium mène à la molécule de chlordécol CLD-OH, tandis que le fer génère des hydrochlorodécones ayant perdu entre un et sept atomes de chlore. L'utilisation de la vitamine B₁₂ couplée à un réducteur en conditions basiques entraîne la formation d'hydrochlorodécones et de polychloroindènes. Pour obtenir une destruction complète, on doit la chauffer à environ 1000 °C. Mais les conditions d'application de toutes ces approches les rendent impraticables pour décontaminer un milieu naturel.

Face à la persistance de la chlordécone aux Antilles, Yves-Marie Cabidoche et ses collègues, de l'Inra et du Cirad (Centre de coopération internationale en recherche agronomique

pour le développement), ont publié en 2009 un modèle prédictif de contamination. À partir des registres d'utilisation de la chlordécone et des premières cartes de contamination, les chercheurs ont estimé que l'élimination de la chlordécone des sols se faisait uniquement par des phénomènes de transfert (ruissellement et surtout infiltration dans le sol). À l'époque, en l'absence de dégradation naturelle avérée, l'équipe a conclu à des durées de contamination allant de plusieurs décennies à sept siècles selon la nature des sols et du niveau de contamination initial.

Devant ce bilan, deux grandes questions se posent : comment mieux protéger la population locale ? N'y a-t-il réellement aucune stratégie de remédiation applicable au cas de la chlordécone ? Alors qu'une partie des chercheurs, aidés des autorités et d'associations, répondent à la première interrogation *via* des actions aux Antilles (études épidémiologiques, contrôle des aliments, campagnes d'information, analyse des sols des particuliers, incitation au « zéro chlordécone », etc.), d'autres scientifiques ciblent la pollution des sols, source primaire de la contamination.

Nos expériences montrent qu'une dégradation naturelle de la chlordécone est déjà en cours aux Antilles

Dans le cas d'une contamination industrielle, la dépollution d'une friche peut être réalisée de différentes façons (traitement chimique *in situ*, excavation du sol contaminé et traitement *ex situ*, phytoextraction...), mais le site, même décontaminé, pourra rarement servir pour un usage agricole, soit à cause de la détérioration du sol due aux traitements, soit du fait des normes drastiques à atteindre qui n'autorisent aucune trace de produits toxiques.

Le cas des Antilles est un défi colossal : au-delà de la superficie à traiter (de l'ordre de 15 000 hectares) et des difficultés techniques à surmonter (les bananeraies ayant été souvent

plantées sur des terrains en pente, peu propices au travail agricole classique), la stratégie de remédiation choisie doit rendre ces terres pleinement cultivables. En effet, on considère qu'un quart environ des surfaces agricoles utiles aux Antilles sont aujourd'hui contaminées par la chlordécone ; s'en priver, pour ces territoires insulaires, serait tout autant catastrophique. Aujourd'hui, ces terres sont toujours exploitées pour les cultures de la banane et de la canne à sucre, cultures qui ne présentent *a priori* aucun risque de contamination (car le polluant se propage peu dans les plantes et reste principalement dans les racines).

En 2013, le BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières) a réalisé un essai de traitement chimique. Les résultats, assez positifs pour certains types de sols, sont à contrebalancer avec le coût des réactifs, leur difficile application, les conséquences agronomiques pour le sol et l'évaluation du risque lié aux produits de transformation obtenus. Les équipes de Magalie Lesueur Jannoyer, du Cirad, de François Laurent, de l'Inra, et leurs collègues ont mené diverses études de transfert de la chlordécone du sol vers les plantes, à la fois pour repérer les cultures les plus à risque d'être contaminées mais aussi pour rechercher des espèces indigènes capables d'extraire le pesticide avec efficacité.

À ce jour, aucune plante ne présente les caractéristiques requises pour qu'un protocole de phytoextraction soit envisageable. En revanche, Thierry Woignier, de l'Institut méditerranéen de biodiversité et d'écologie, et ses collègues ont entamé des études prometteuses sur la séquestration de la chlordécone dans le sol : l'amendement de compost réduit temporairement le transfert sol-plantes et l'ajout de certains types de charbon (charbon activé et biochar) diminue beaucoup la contamination des animaux exposés. Cette stratégie reste malgré tout une solution de repli, car elle maintient une épée de Damoclès sur la population dès lors que la chlordécone est toujours présente dans le sol.

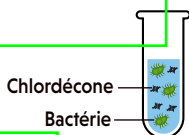
UN PROJET AMBITIEUX

En 2009, le Genoscope a lancé un pari scientifique un peu fou, porté par Jean Weissenbach et Denis Le Paslier : essayer de biodégrader intégralement la chlordécone pour obtenir des composés inorganiques non toxiques (chlorures, carbonates ou dioxyde de carbone) ou des nutriments pour les organismes vivants (source de carbone par exemple). Nous avons d'abord émis l'hypothèse que le nombre élevé d'atomes de chlore de la molécule était à l'origine de sa très faible réactivité. Nous avons donc cherché à favoriser des processus microbiologiques de déchloration. Le plus souvent, ceux-ci se produisent en anaérobiose et conduisent au remplacement d'un atome de chlore par un atome d'hydrogène ; on parle alors de déchloration réductrice. Il faut ➤

ÉLUCIDER LA STRUCTURE DES PRODUITS DE TRANSFORMATION

① DÉGRADATION MICROBIOLOGIQUE

Mise en culture
La chlordécone est mise en présence de bactéries qui induisent sa dégradation.



② DÉGRADATION CHIMIQUE

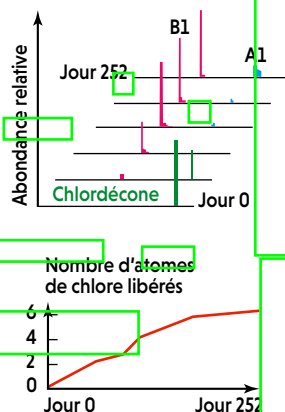
Synthèse chimique ciblée
Les différents produits de transformation sont obtenus à l'aide de différents couples catalyseur-réducteur

> rappeler qu'en l'absence de dioxygène, la croissance bactérienne est généralement plus lente: n'ayant plus de dioxygène pour respirer, les bactéries basculent souvent en mode fermentatif et d'autres respirent sur des oxydants alternatifs. La conséquence immédiate de cette approche est l'allongement de la durée des expériences microbiologiques, qui peuvent s'étendre sur plusieurs mois, voire quelques années.

Nous avons choisi de travailler en milieu de culture liquide défini afin de mieux contrôler les paramètres expérimentaux. Les bactéries testées provenaient d'échantillons environnementaux très variés (terres contaminées des Antilles, sites pollués en organochlorés et boues de stations d'épuration). Un grand nombre d'expériences ont été nécessaires pour sélectionner des bactéries résistantes à de fortes concentrations en chlordécone. En 2014, nous avons isolé des mélanges de bactéries conduisant à une disparition complète de la chlordécone en quelques mois. Puis nous avons montré que deux d'entre elles, du genre *Citrobacter*, étaient chacune capables d'induire une disparition intégrale de la chlordécone. Cependant, l'analyse du génome de ces bactéries n'a, à ce stade, pas permis de déceler les éventuelles enzymes responsables de la dégradation de la chlordécone.

Les chercheurs ont montré qu'il est possible de dégrader la chlordécone soit par voie microbiologique soit par voie chimique. Ils obtiennent alors des produits de transformation qui sont à identifier. En combinant différents outils (chromatographie, spectroscopie

de masse, résonance magnétique nucléaire, etc.), l'équipe des auteurs a collecté de multiples indices qui, ensemble, suffisent pour préciser la structure de ces molécules : le squelette de la chaîne carbonée et les positions des différentes fonctions (-OH, -COOH, etc.)



Chromatographie en phase liquide ou gazeuse et spectrométrie de masse

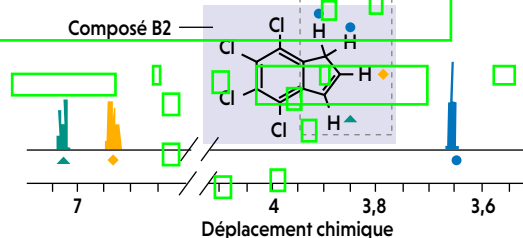
Par cette analyse, on sépare les différents composés, on obtient la formule brute de chaque produit de transformation et des indices sur la présence de certaines fonctions (acide carboxylique -COOH)

Chromatographie ionique

Cette technique permet de suivre la dégradation de la chlordécone via la quantité d'ions chlorures libérés et donne des informations sur le nombre d'atomes de chlore encore présents sur les produits de transformation

Elles permettent de déterminer la structure du squelette carboné des familles B et C et de la position de la fonction acide carboxylique de la famille C.

Spectroscopie par résonance magnétique nucléaire
 Cette méthode utilise les propriétés magnétiques des atomes. On mesure la fréquence de résonance des noyaux des atomes d'hydrogène. Cette fréquence varie selon la position dans la molécule (on parle de déplacement chimique). Ces données permettent de placer les atomes d'hydrogène sur la structure carbonée.



Après avoir étudié le volet microbiologique, nous nous sommes intéressés aux aspects chimiques. S'agit-il d'une minéralisation complète de la molécule ou bien y a-t-il des produits de transformation générés? Pour y répondre de la façon la plus exhaustive, nous avons utilisé plusieurs outils associant un système de séparation (chromatographie gazeuse et chromatographie liquide) et un dispositif de détection (spectromètre de masse). Avec la chromatographie en phase gazeuse, nous avons détecté trois produits de transformation: un majoritaire, le composé B1 ($C_6Cl_4H_2$), de structure très

éloignée de la chlordécone, et deux minoritaires, la monohydrochlordécone A1 et le composé B3 ($C_9Cl_4H_4$), similaire à B1 à un atome de chlore près. Avec la chromatographie liquide, nous avons observé deux couples de produits de transformation supplémentaires de mêmes formules brutes : d'un côté C1 et C2 ($C_{10}Cl_4H_4O_2$), de l'autre C3 et C4 ($C_{10}Cl_3H_5O_2$).

Cependant, ces techniques d'analyse n'étaient pas suffisantes pour établir la structure complète des produits de transformation détectés. Nous avons alors eu recours à la RMN (résonance magnétique nucléaire). Cela nécessitait de produire et d'isoler des quantités de chaque produit de transformation. La dégradation microbiologique de la chlordécone à grande échelle (plusieurs litres de milieu de culture contenant 50 milligrammes par litre de chlordécone) s'est révélée beaucoup trop lente (deux ans pour atteindre une disparition complète de la molécule) pour produire les quantités requises. Nous nous sommes donc tournés vers une autre stratégie utilisant des réactifs chimiques pour dégrader plus rapidement la chlordécone et obtenir les produits de transformation désirés.

Dès lors, trois familles de produits de transformation de la chlordécone, initialement observés au cours des dégradations microbiologiques, ont été caractérisées par RMN. La famille A regroupe les hydrochlordécones (dont A1), la famille B est celle des polychloroindènes (B1, B3 et B4) et la famille C est composée d'acides polychloroindène-carboxyliques (C1, C2, C3 et C4). L'objectif ultime du projet, biodégrader intégralement la chlordécone n'est donc pas encore atteint. La recherche continue pour découvrir les conditions propices à la dégradation de ces huit produits de transformation.

Ces résultats très prometteurs en milieu liquide nous ont aussi incités à mener des expériences plus proches des conditions de terrain. Nous avons ainsi travaillé avec Gwenaél Imfeld et Stéphane Vuilleumier, de l'université de Strasbourg, qui ont réalisé des expériences en utilisant de la terre des Antilles naturellement contaminée en chlordécone et mélangée à un milieu de culture aqueux, le tout placé plusieurs mois en anaérobiose. Cette fois encore, les familles A, B et C ont été retrouvées, accompagnées de deux autres familles baptisées D et E, correspondant respectivement à des méthylpolychloroindénecarboxylates et des éthylpolychloroindénecarboxylates.

Ces résultats suggéraient que des bactéries indigènes antillaises étaient, sous les bonnes conditions, capables de transformer la chlordécone. Était-il possible qu'une dégradation naturelle de la chlordécone ait déjà lieu aux Antilles ? Pour répondre, Thierry Woignier et son équipe ont réalisé en 2018 une campagne

d'échantillonnage de différents compartiments (sol, sédiment, eau) de Martinique. Les analyses que nous avons réalisées ont montré la présence quasi systématique de chlordécone. Plus surprenant, la totalité des échantillons contaminés contenaient aussi le produit de transformation B1, avec des concentrations souvent du même ordre de grandeur que la chlordécone elle-même. Le CLD-OH ainsi que la monohydrochlordécone A1 ont été trouvés plus rarement, mais à des taux parfois élevés (supérieurs à 1 milligramme par kilogramme). Au total, sur les 14 échantillons environnementaux analysés, 17 produits de transformation ont été détectés pour la première fois aux Antilles lors de cette campagne d'analyses.

DE L'ESPOIR ET DES QUESTIONS

Pour confirmer ces résultats surprenants, nous avons réalisé de nouvelles expériences microbiologiques en utilisant comme source de bactéries les échantillons de sol prélevés pour la campagne analytique. Au bout de quelques semaines et ce dans toutes les expériences, la chlordécone ajoutée au milieu avait bel et bien disparu au profit des produits de transformation attendus. L'ensemble des analyses et des expériences menées démontrent de façon indubitable qu'une dégradation naturelle de la chlordécone est déjà en cours aux Antilles. Elle est significative au vu des concentrations de B1 rencontrées et semble relativement répandue du fait de la présence systématique de B1 dans tous les échantillons.

Les résultats de nos travaux contredisent l'idée communément admise de la non-dégradabilité de la chlordécone, puisque la molécule se dégrade naturellement dans l'environnement et engendre une multitude de produits de transformation. Le modèle prédictif de décontamination est à revoir pour prendre en compte ces processus de transformation. Une fois les mécanismes d'action des bactéries compris, il serait possible d'imaginer une stratégie pour stimuler cette dégradation.

La gestion de la crise environnementale doit être modifiée afin d'inclure le suivi des produits de transformation, qui constituent une nouvelle pollution émergente aux Antilles. Ces composés, pour la plupart de structure très différente de la molécule-mère, pourraient contaminer les denrées alimentaires et, par cette voie, atteindre la population. Il faudra mener des études pour évaluer la toxicité de ces molécules, leur possible transfert environnement-alimentation, leur dégradabilité éventuelle. Il est par ailleurs possible que d'autres produits de transformation existent en plus de ceux décrits ici.

Nos découvertes sont donc à la fois une note d'espoir et une source de nouvelles interrogations pour les scientifiques, mais aussi pour la population locale. ■

BIBLIOGRAPHIE

M. L. Chevallier, O. Della-Negra et al., **Natural chlordécone degradation revealed by numerous transformation products characterized in key French West Indies environmental compartments**, *Environ. Sci. Technol.*, vol. 53(11), pp. 6133-6143, 2019.

L. Multigner et al., **Chlordécone : un perturbateur endocrinien emblématique affectant les Antilles françaises**, *Bulletin Épidémiologique Hebdomadaire*, n° 22-23, pp. 480-485, 2018.

P.-L. Saaidi et al., **Microbial degradation of a recalcitrant pesticide : Chlordécone**, *Frontiers in Microbiology*, vol. 7, article 2025, 2016.

M. Lesueur et al. (éd.), **Crisis Management of Chronic Pollution : Contaminated Soil and Human Health**, CRC Press, 2016.

L'ESSENTIEL

> L'observatoire *Chandra*, de la Nasa, vient de fêter ses vingt ans dans l'espace. Il est en orbite autour de la Terre depuis 1999.

> Ce télescope spatial a contribué à des découvertes importantes relatives aux trous noirs supermassifs, aux restes de supernovæ, etc.

> Alors qu'il entame sa troisième décennie, *Chandra* contribue encore à la science. Ses collaborations à venir avec de nouveaux autres télescopes devraient aider à mieux comprendre l'Univers.

L'AUTRICE



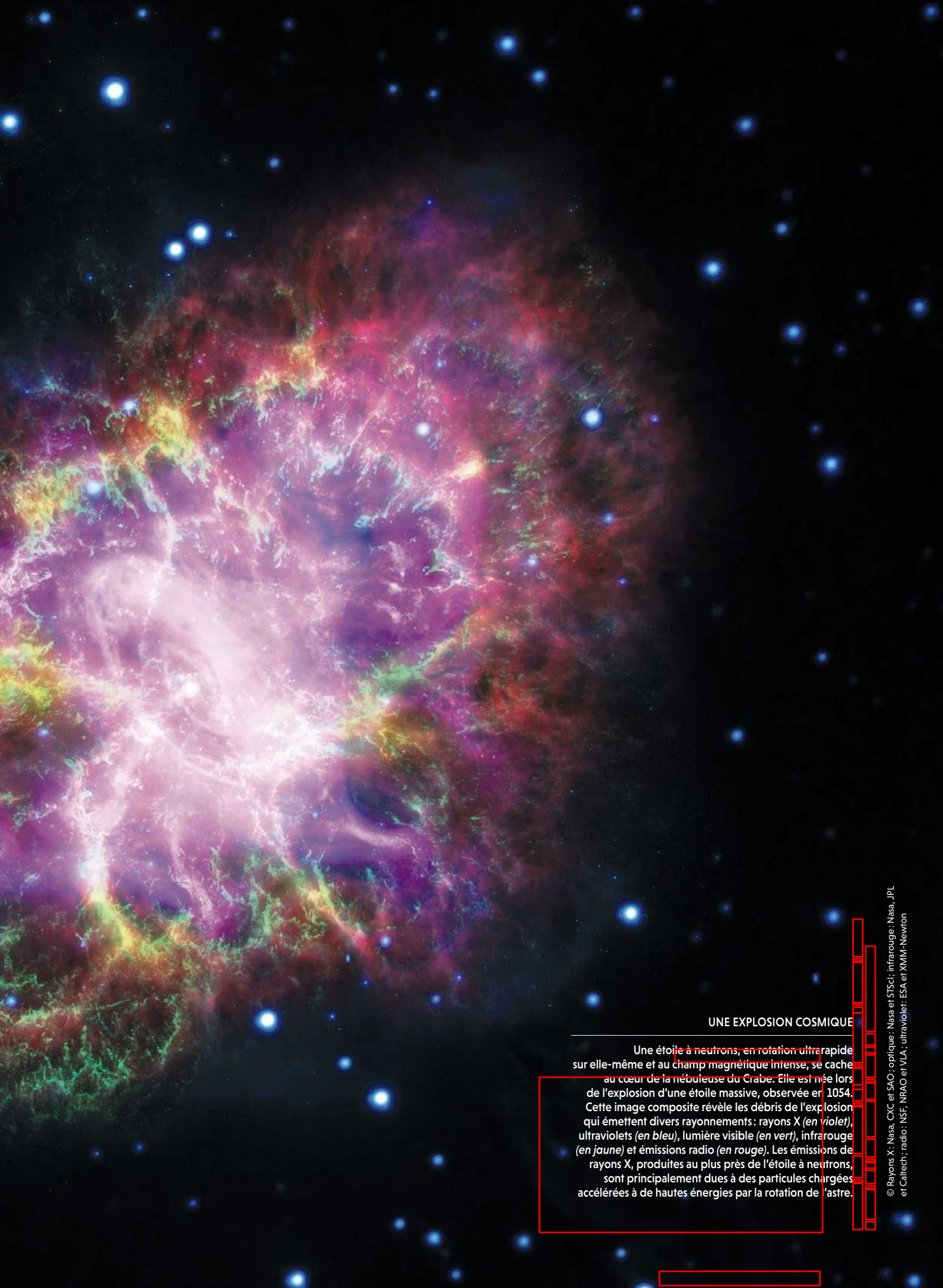
BELINDA J. WILKES
astrophysicienne à l'observatoire
d'astrophysique de l'institut Smithsonian
et directrice du centre Chandra X-Ray,
à Cambridge, aux États-Unis

L'Univers radiographié par Chandra

Cela fait deux décennies que *Chandra*, un télescope spatial sensible aux rayons X, scrute le cosmos. L'occasion de revenir, en images, sur quelques-unes de ses découvertes les plus marquantes.

Depuis son lancement en 1999, l'observatoire spatial *Chandra*, de la Nasa, a plongé son regard dans les cieux. Cet instrument est sensible aux rayons X, la fenêtre de longueurs d'onde idéale pour scruter des trous noirs gigantesques, des amas de galaxies et les restes de violentes explosions stellaires, les supernovæ. Le télescope enregistre la position, l'énergie et l'instant d'arrivée de chaque photon qui atteint son détecteur. Cette capacité, associée à un système d'imagerie d'une rare finesse, a révolutionné notre vision du monde dans la gamme des rayons X. Elle a affiné notre compréhension de quelques grandes énigmes cosmiques, comme la matière noire ou la naissance des étoiles, mais aussi de certaines caractéristiques des planètes du Système solaire.

>



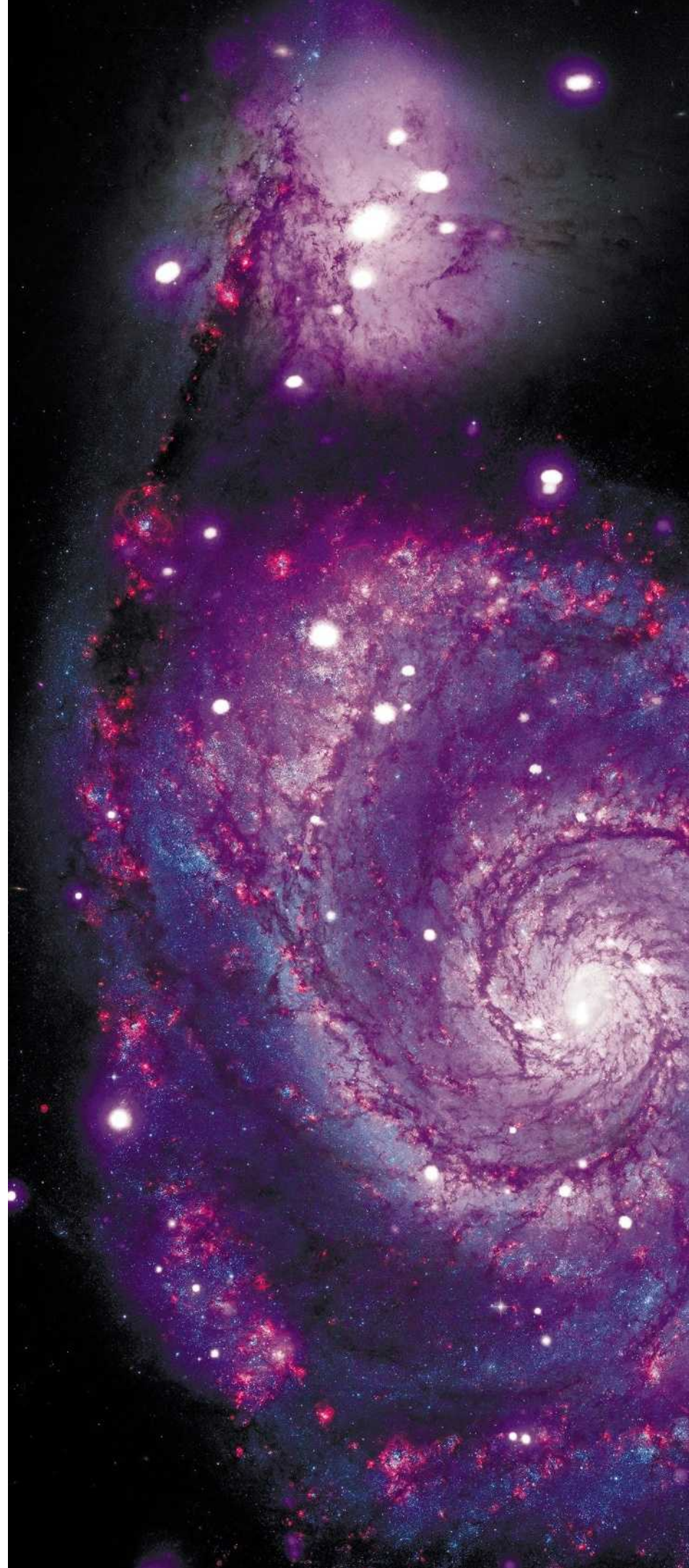
UNE EXPLOSION COSMIQUE

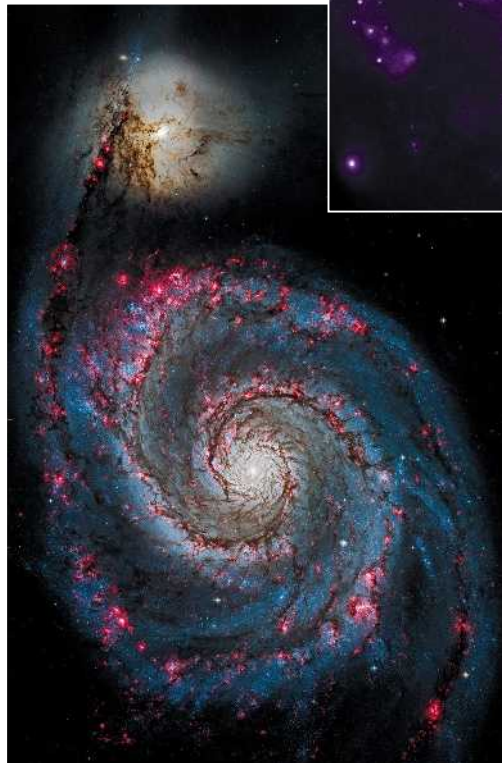
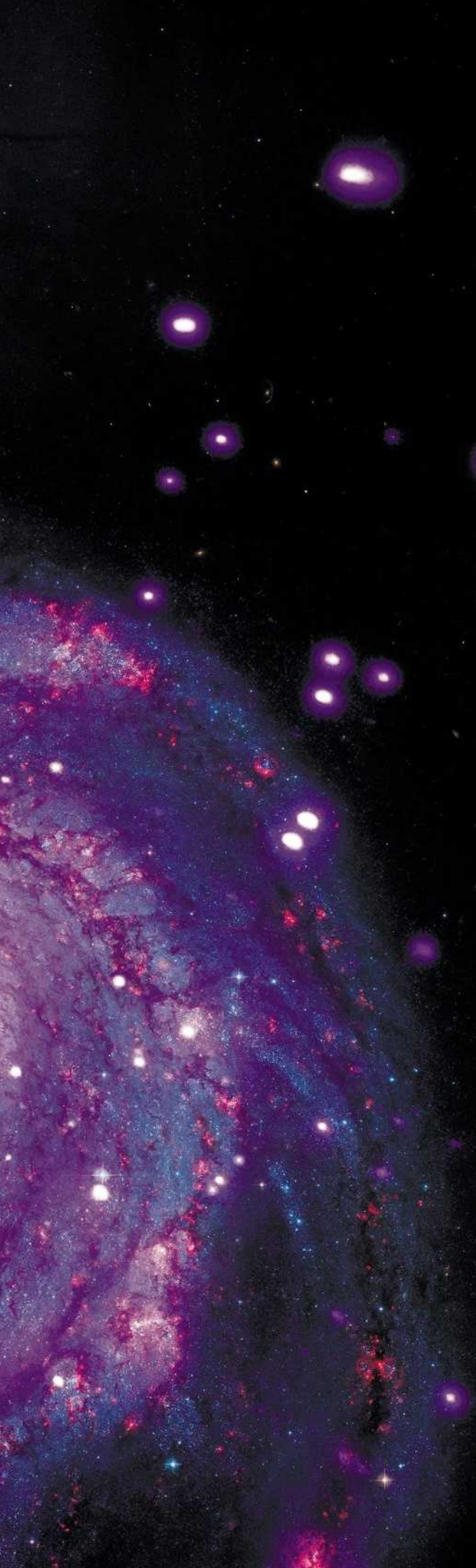
Une étoile à neutrons, en rotation ultrarapide sur elle-même et au champ magnétique intense, se cache au cœur de la nébuleuse du Crabe. Elle est née lors de l'explosion d'une étoile massive, observée en 1054. Cette image composite révèle les débris de l'explosion qui émettent divers rayonnements : rayons X (en violet), ultraviolets (en bleu), lumière visible (en vert), infrarouge (en jaune) et émissions radio (en rouge). Les émissions de rayons X, produites au plus près de l'étoile à neutrons, sont principalement dues à des particules chargées accélérées à de hautes énergies par la rotation de l'astre.

> L'observatoire *Chandra* a été d'abord conçu pour résoudre une question de l'astronomie des rayons X: quelle est l'origine du fond diffus X, ce rayonnement X qui est identique dans toutes les directions du cosmos? *Chandra* a aussi été conçu pour être un «observatoire généraliste», dont une grande partie de son temps d'observation est répartie entre des chercheurs du monde entier pour étudier des sujets très différents et sélectionnés à la suite d'un appel à projets annuel. Après vingt ans de mission, *Chandra* continue de recevoir entre 500 et 650 requêtes de temps d'observation chaque année, ce qui, au total, correspond à environ 5,5 fois le temps pouvant être attribué. Le processus de sélection est donc très sévère.

Sur le plan scientifique, *Chandra* a été très productif. L'observatoire a atteint son objectif initial en révélant que presque tout le fond diffus X provient des milliers de trous noirs supermassifs situés au centre de galaxies peuplant l'Univers. Il a aussi observé de nombreuses choses étonnantes associées à divers objets célestes: une forte émission X par des jets de matière naissant aux pôles de trous noirs supermassifs pendant que ceux-ci engloutissent du gaz et de la poussière de leur voisinage; des aurores magnifiques dans l'atmosphère de Jupiter; la lumière émise par la coalescence de deux étoiles à neutrons, un événement également observé par les détecteurs d'ondes gravitationnelles *Ligo* et *Virgo*; et des trous noirs stellaires particulièrement brillants, nommés à juste titre sources X ultralumineuses. Près de 8000 articles scientifiques s'appuient sur les observations de *Chandra* et pas moins de 4000 chercheurs à travers le monde ont utilisé ses données.

L'an dernier, l'observatoire *Chandra* a fêté son vingtième anniversaire dans l'espace, et il est toujours aussi actif. Et avec l'arrivée de nouveaux télescopes, comme le télescope *Event Horizon* ou le télescope spatial *James-Webb*, de nouvelles collaborations se profilent. Les astrophysiciens pourront combiner les données d'observatoires toujours plus performants pour défricher de nouveaux territoires et accroître notre connaissance des régions les plus chaudes et les plus extrêmes de l'Univers. ■



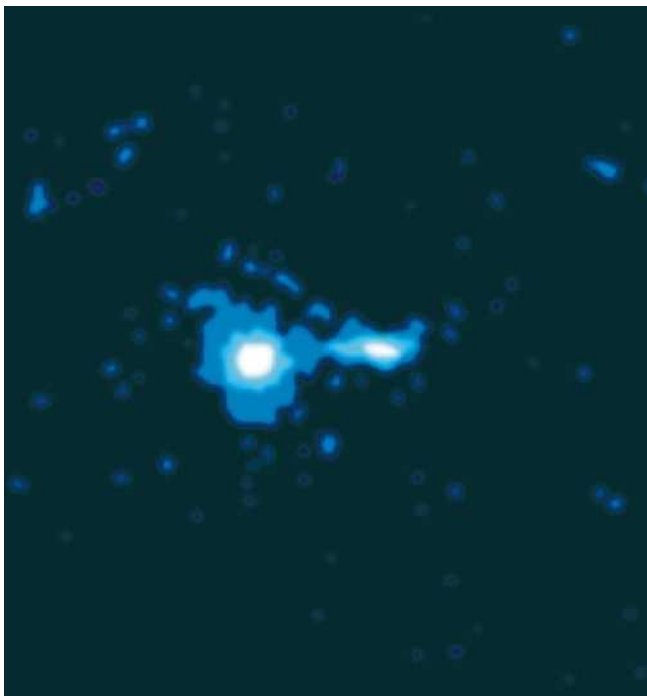


◀ ▲ UNE SPIRALE GALACTIQUE

La collision de deux galaxies, collectivement nommées M51 et surnommées la galaxie du Tourbillon, présente de magnifiques bras caractéristiques d'une galaxie spirale. Près de 400 sources de rayons X, principalement des étoiles binaires, sont visibles sur cette image. Elles sont situées à proximité des régions de formation d'étoiles. Les chercheurs pensent que les interactions des deux galaxies ont déclenché une vague de formation d'étoiles, ce qui expliquerait le nombre élevé de binaires X dans ce système. Les pulsations d'un système X impliquent que l'un des compagnons est une étoile à neutrons absorbant de grandes quantités de matière de son partenaire. Ce phénomène expliquerait la luminosité élevée de ces systèmes binaires.

L'image principale (*ci-contre*) est composée des données en rayons X de *Chandra* (*en haut*) et de la lumière visible collectée par le télescope spatial *Hubble* (*ci-dessus*). En combinant les informations de plusieurs télescopes à diverses longueurs d'onde du spectre électromagnétique, les chercheurs ont une vision plus complète des différents phénomènes observés.

© Rayons X : Nasa, CXC, université Wesleyenne et R. Kilgard et al. ; optique : Nasa et STScI



▲ UN JET PUISSANT

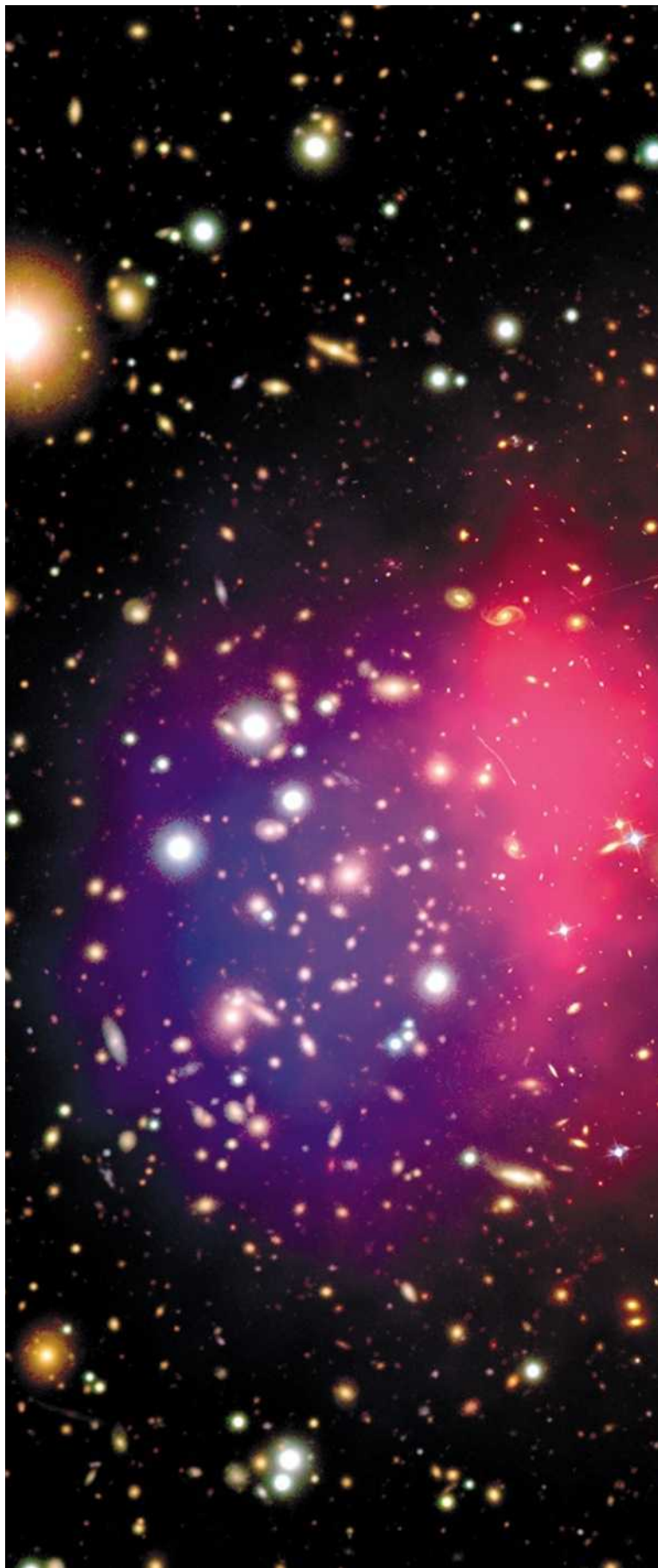
Vers le début de sa mission, *Chandra* a observé le quasar PKS 0637-752, un trou noir supermassif au cœur d'une galaxie éloignée, que j'avais étudié dix ans plus tôt en utilisant les données de l'observatoire *Einstein* de la Nasa. Le trou noir engloutit de gigantesques quantités de matière de sa galaxie hôte. Lors de sa chute, le gaz s'échauffe au point de briller plus intensément que les 100 milliards d'étoiles de la galaxie. L'excroissance lumineuse (à droite du centre) a été une surprise au point que l'équipe a soupçonné un problème dans le système optique du télescope. Mais *Chandra* avait en fait découvert les émissions X d'un jet de plasma propulsé en dehors de la matière en chute libre. Ce jet avait déjà été observé en radio, mais les astrophysiciens ne s'attendaient pas à une composante en rayons X. Grâce à cette observation, les chercheurs ont mieux compris ce qui se passe dans ces jets et en particulier comment ils prennent naissance au niveau des pôles du trou noir.

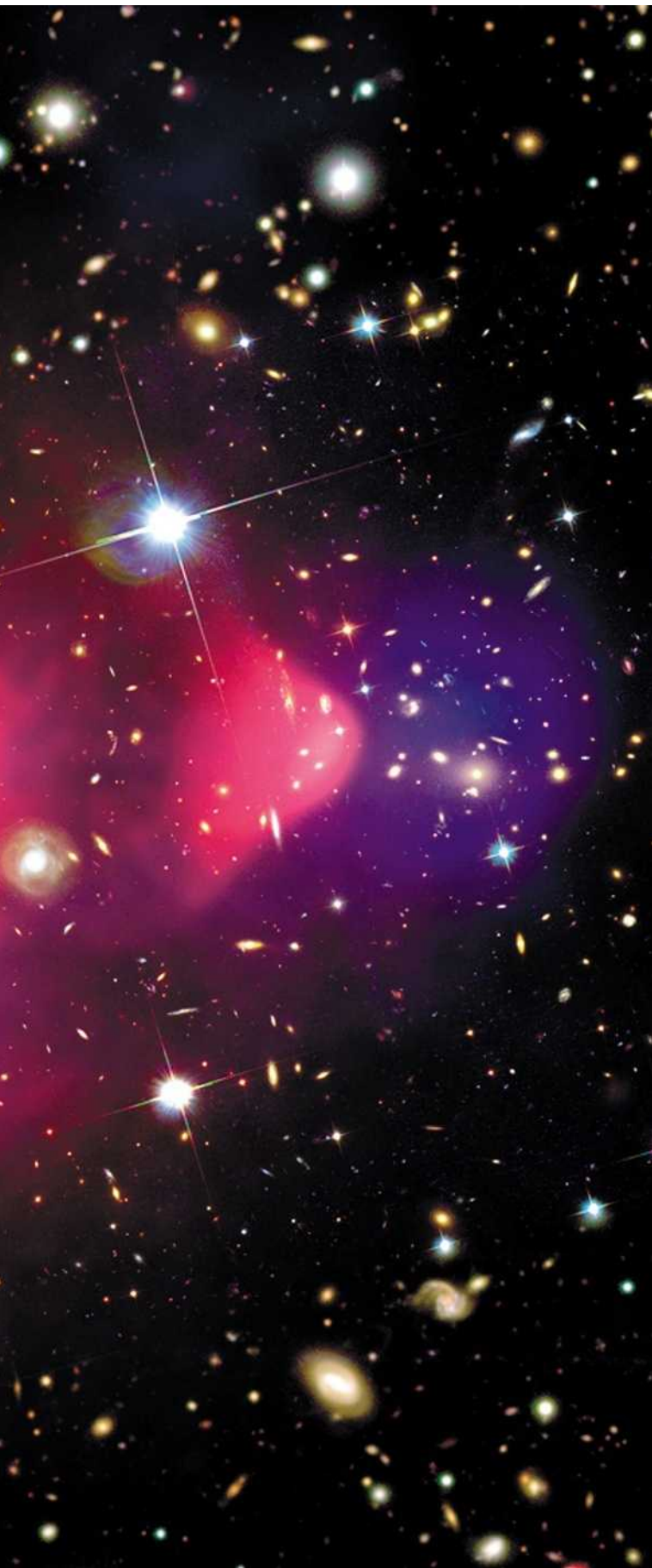
© Nasa, CXC et SAO

UNE PREUVE IRRÉFUTABLE ►

L'un des résultats les plus connus de *Chandra* est certainement l'image composite de l'amas de la Balle, le résultat de la collision de deux amas de galaxies. Cette image associe les données de *Chandra*, de *Magellan* et du télescope spatial *Hubble*. Le gaz contenu dans les amas s'est échauffé lors de la collision et émet des rayons X (en rose), il a aussi été ralenti et a pris une forme qui fait penser à un impact de balle. Les galaxies se sont croisées sans subir de collision et ont continué à la même vitesse; elles émettent en lumière visible (en blanc). Les astrophysiciens ont aussi étudié la distribution de masse du système. Ils ont utilisé le phénomène de lentille gravitationnelle, prédit par la relativité générale: en déformant l'espace-temps, la masse dévie la lumière émise par des objets en arrière-plan. En analysant les distorsions dans les images de galaxies, les chercheurs ont montré que la distribution de masse (en bleu) est incompatible avec celle du gaz. Cela s'expliquerait par la présence de matière noire. Cette dernière n'interagissant ni avec la matière ordinaire ni avec elle-même, elle a continué son mouvement sans ralentir durant la collision.

© Rayons X: Nasa, CXC, CFA et M. Markevitch et al.;
Optique: Nasa, STScI, Magellan, Université de l'Arizona
et D. Clowe et al.; carte de lentilles gravitationnelles:
Nasa, STScI, ESO WFI, Magellan, université de l'Arizona et D. Clowe et al.



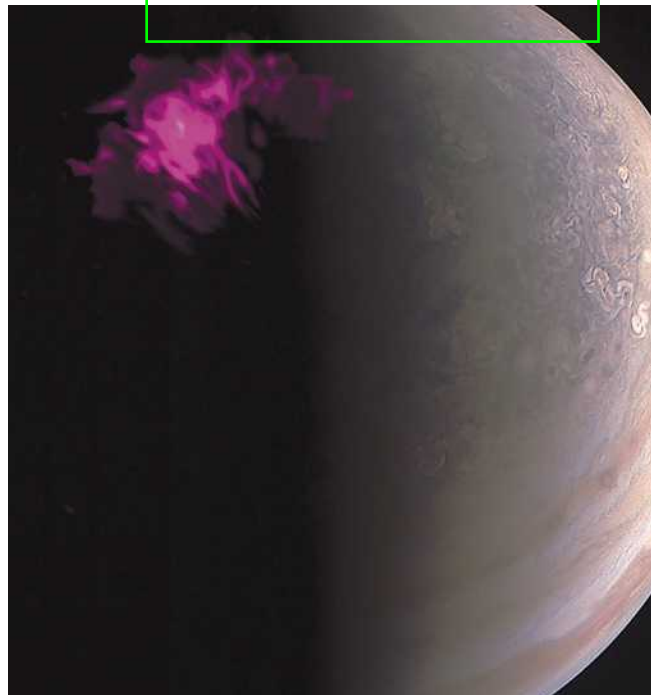


PLUS PRÈS DE CHEZ NOUS ▼

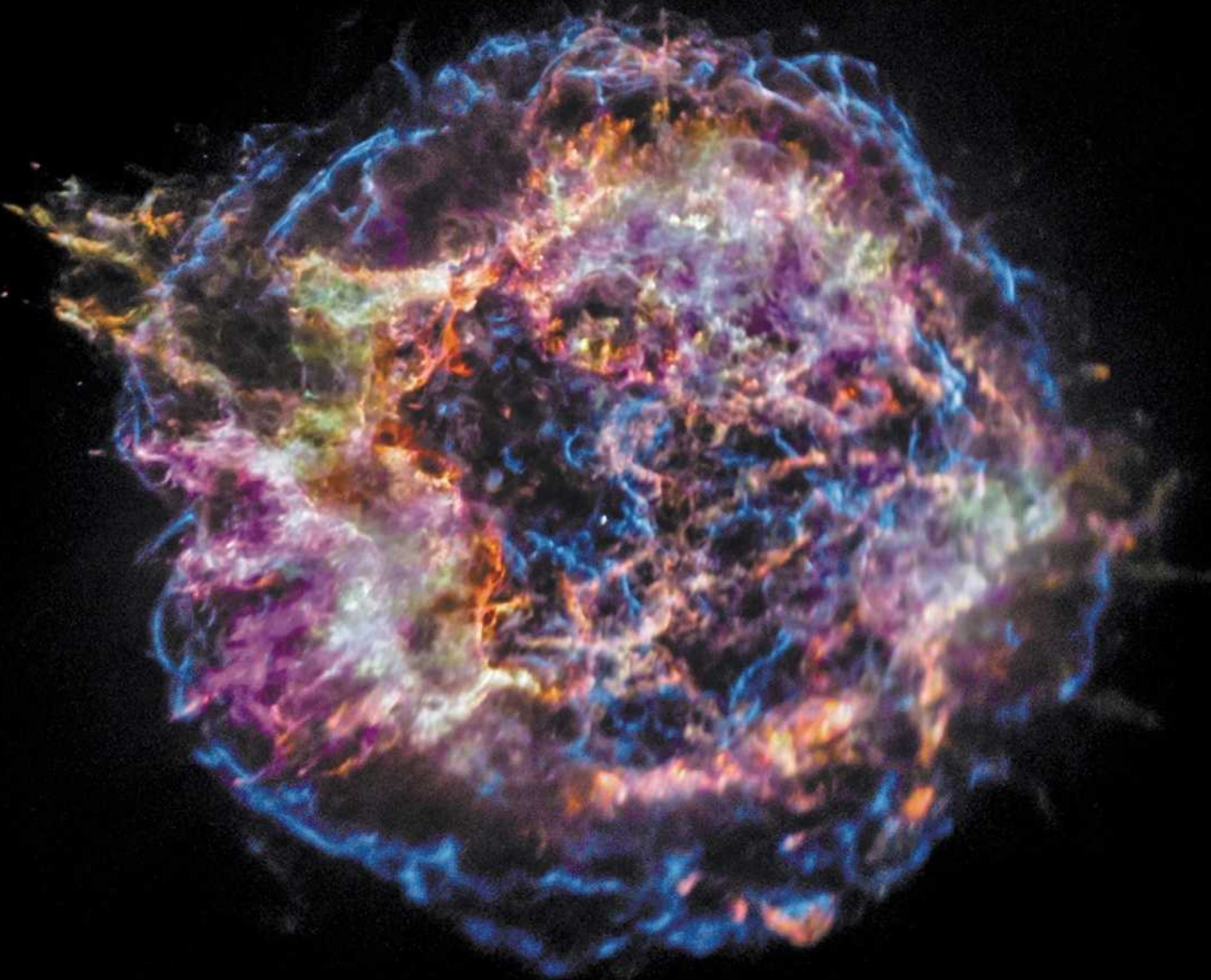
En plus de découvrir des trous noirs supermassifs et des amas de galaxies lointains, *Chandra* a fait des découvertes étonnantes dans le Système solaire.

Ces images de Jupiter montrent des émissions en rayons X d'aurores aux pôles Nord (*en haut*) et Sud (*en bas*). Ces rayons X sont probablement produits par des particules chargées canalisées par le champ magnétique de la planète. Les observations conjointes en 2019 de *Chandra* et de la sonde *Juno* de la Nasa, actuellement en orbite autour de Jupiter, devraient fournir plus de détails sur ce phénomène.

© Rayons X: Nasa, CXC, UCL, W. Dunn et al.; optique: Nasa, JPL-Caltech, SwRI, MSSS, G. Eichstädt et S. Doran (pôle Sud), Nasa, JPL-Caltech, SwRI et MSSS (pôle Nord)







PREMIÈRE IMAGE ▲

La première image officielle de *Chandra* est celle du rémanent de la fameuse supernova Cassiopée A. Cette nébuleuse de gaz et de poussière est née de l'explosion d'une étoile massive en fin de vie il y a environ 340 ans. Lors de la mort de l'étoile, son cœur s'est effondré sur lui-même en formant une étoile à neutrons, qui n'avait jusque-là jamais été détectée au sein du rémanent. La découverte de cette étoile à neutrons grâce à *Chandra* a démontré la puissance de cet observatoire capable de prendre des images à haute résolution. Cette image utilise des données que *Chandra* a enregistrées sur plusieurs années pour obtenir un grand nombre de détails de la structure du rémanent. Les chercheurs ont utilisé les mesures en énergie de l'observatoire pour identifier différents éléments chimiques formés dans l'étoile et expulsés lors de l'explosion : silicium (en rouge), soufre (en jaune), calcium (en vert) et fer (en violet). Les nuances de bleu sont associées à des émissions de particules de haute énergie accélérées par l'onde de choc de l'explosion – un autre phénomène découvert pour la première fois par *Chandra*.

© Nasa, CXO et SAO

◀ UNE POUPONNIÈRE D'ÉTOILES

Sur ce cliché, les plus de 1 400 points de lumière bleus et orange sont des étoiles qui viennent de naître au sein d'une nébuleuse riche en gaz. Si ce nuage est visible à l'œil nu au niveau de l'épée de la constellation d'Orion, il n'en est pas de même de ces étoiles. Cachés à la vue des télescopes sensibles à la lumière visible, ces nouveaux astres ne se dévoilent que par les rayons X qu'ils émettent et qui sont capables de traverser le nuage dense de gaz et de poussière. Seul un instrument comme *Chandra* permet donc de contempler et d'étudier ces étoiles jeunes. Ces dernières sont très chaudes et font preuve d'une grande activité. Elles attirent à elles, par gravitation, de grandes quantités de matière, mais leur champ magnétique intense et les vents stellaires confèrent à cette matière une dynamique complexe.

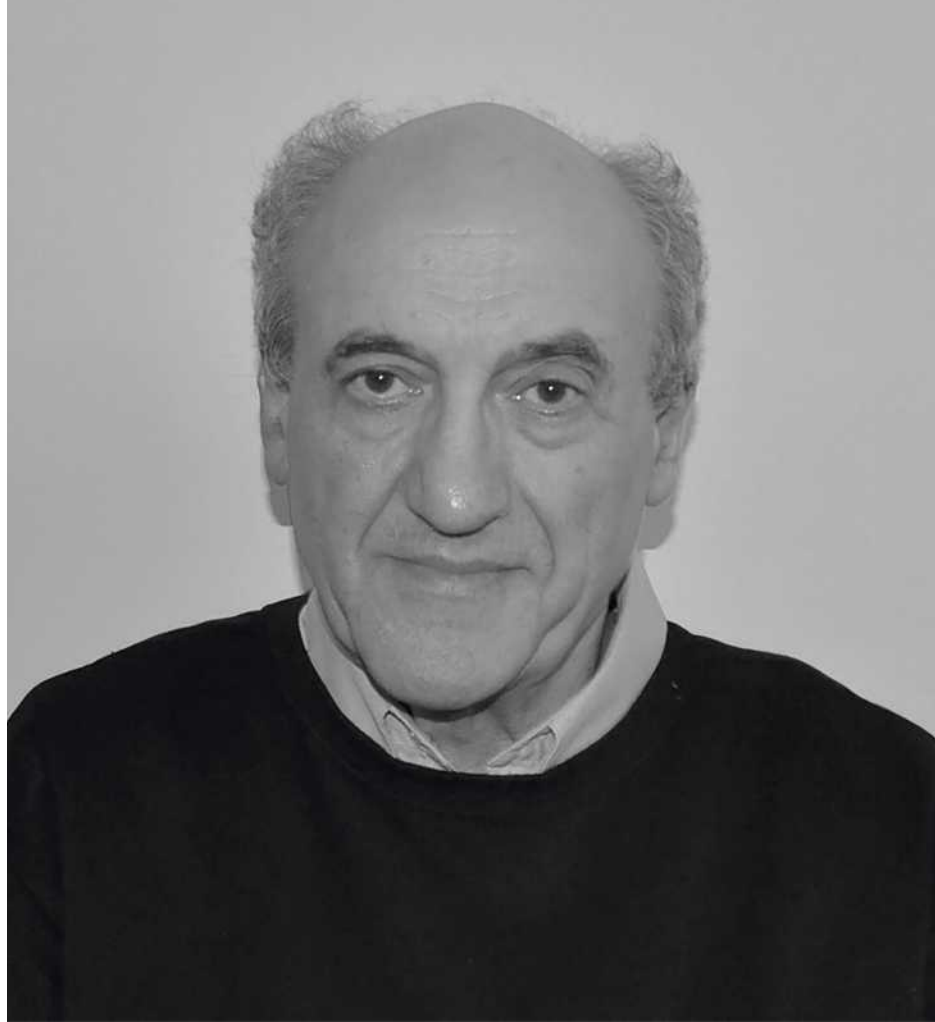
© Rayons X: Nasa, CXO, université d'État de Pennsylvanie, E. Fegelson, K. Getman et al.; visible: Nasa, ESA, STScI, M. Robberto et al.

BIBLIOGRAPHIE

A. Domínguez et al.,
Détecter la lumière de toutes les étoiles disparues,
Pour la Science, n° 459,
pp. 42-49, janvier 2016.

Centre Chandra X-Ray,
Exploring the extremes : 20 years of Chandra
<https://chandra.si.edu/20th>

JEAN-JACQUES KUPIEC est biologiste titulaire d'une habilitation à diriger des recherches et ancien membre du centre Cavaillès (École normale supérieure, Paris). Il a signé de nombreux articles de biologie, d'épistémologie et d'histoire des sciences. Auteur de plusieurs livres, il développe dans quatre d'entre eux une théorie qui accorde une place centrale au hasard en biologie.



Il faut renoncer aux lois de Mendel

Et si le vivant naissait d'un comportement aléatoire des molécules et des cellules ? Voilà une quarantaine d'années que Jean-Jacques Kupiec défend ce principe avec force arguments théoriques et expérimentaux. Les explications de ce biologiste hors norme à l'occasion de la sortie de son dernier livre, *Et si le vivant était anarchique*.

Qu'est-ce qui vous a amené à douter des principes de la génétique et de la biologie moléculaire ?

Tout a commencé à la fin des années 1970 avec des interrogations sur la différenciation cellulaire. La question est de savoir comment, au cours du développement embryonnaire, des cellules qui sont toutes issues d'un même œuf fécondé peuvent se différencier les unes des autres. Je suis arrivé à la conclusion que la meilleure façon d'expliquer ce phénomène est la survenue d'événements aléatoires à l'intérieur des cellules. Cette idée, de fil en aiguille, m'a conduit à adopter un mode de pensée probabiliste et à remettre en question le déterminisme de la génétique et de la biologie moléculaire.

Qu'entendez-vous par « déterminisme de la génétique et de la biologie moléculaire » ?

Le paradigme dominant à cette époque était celui du programme génétique. Aujourd'hui, on parle plus volontiers de réseaux de gènes, mais l'idée est la même : l'information écrite dans le génome se traduit par des événements moléculaires déterministes au niveau des protéines, puis par des interactions cellulaires guidées par des transferts de signaux. Une cellule envoie à une autre cellule un signal qui déclenche une cascade d'événements moléculaires à l'intérieur de celle-ci et aboutit à une réponse spécifique. Ce modèle est dit « instructif ». Il va de pair avec l'idée de stéréospécificité, qui stipule que les molécules sont univoques dans leurs interactions : une molécule ne peut se lier de façon spécifique qu'avec une seule molécule partenaire, ou un nombre très limité. Ce système permettrait la transmission des informations génétiques sans aléa, ce qui ne serait pas le cas si chaque protéine était capable d'interagir avec de nombreuses autres. Dès 1983, j'ai exprimé mon désaccord avec ce modèle dans un article où j'explique la différenciation cellulaire par l'expression stochastique des gènes.

Avez-vous alors orienté vos recherches dans cette optique ?

Non, parce que c'était impossible. Mes idées allaient trop radicalement à l'encontre du contexte intellectuel dominant. Mon professeur de génétique Jean Tavlitiski m'avait invité aux rencontres de Méribel, un colloque qui réunissait chaque année de nombreux laboratoires français. J'y ai fait ma première intervention sur le thème de la différenciation cellulaire stochastique et j'ai alors eu l'impression d'être regardé comme un extraterrestre tellement mes idées étaient étrangères à celles de mes collègues.

Il y avait aussi une difficulté d'ordre technique. Ceux qui ne connaissent pas mon parcours croient que je ne suis qu'un penseur, un

philosophe. En réalité, je suis d'abord un biologiste moléculaire expérimentateur. Dans les années 1980, j'ai entre autres cloné et séquencé des génomes viraux à une époque où il n'existait pas d'automates pour le faire. Néanmoins, il m'était difficile, à ce moment, d'entreprendre un programme de recherche pour tester mes idées.

Pourtant, certaines publications confortaient déjà mes hypothèses à l'époque. Par exemple, au lieu de confirmer la stéréospécificité des protéines, de plus en plus de résultats montraient qu'un même régulateur intervenait dans plusieurs lignées de différenciation cellulaire en interagissant avec divers partenaires moléculaires.

À partir de quel moment la notion de hasard dans la cellule est-elle devenue plus recevable ?

À partir des années 1990, les techniques d'analyse ont permis de regarder ce qui se passe cellule par cellule et même chromosome par chromosome. On s'est alors rendu compte que, dans une même culture cellulaire issue de rongeurs ou d'humains, il existait une grande variabilité de l'expression des gènes d'une cellule à l'autre et même entre les deux allèles d'un même gène (les deux versions du gène présentes sur une paire de chromosomes). Cette variabilité ne peut s'expliquer que par des

Il existe une grande variabilité de l'expression des gènes d'une cellule à l'autre

modèles probabilistes. C'est ainsi que la notion d'expression stochastique des gènes est devenue crédible. Je savais que ces techniques allaient permettre de vérifier certaines prédictions qu'impliquait ma théorie, mais la route a été longue et tortueuse.

À cette époque, mes idées ont également commencé à retenir l'attention. Un épisode est significatif. En 1998, j'ai reçu un message du généticien et microbiologiste américain Joshua Lederberg, qui avait reçu le prix Nobel en 1958. Il me demandait un tiré à part d'un article que je venais de publier. Au même moment, j'étais en contact avec Sergei Atamas, un chercheur >



Jean-Jacques Kupiec a récemment publié : **Et si le vivant était anarchique** (Les Liens qui Libèrent, 2019).

> de l'université médicale du Maryland qui s'intéressait comme moi aux aspects probabilistes dans le fonctionnement des cellules. Tous deux, nous avons créé un groupe de discussion sur internet sur la stochasticité en biologie, que nous avons baptisé l'Heraclitean Biology Group. Joshua Lederberg s'y est joint rapidement, ainsi que James Till, le découvreur des cellules souches, qui a reçu le prix Lasker en 2005. Chacun cooptant de nouveaux participants, notre réseau s'est agrandi. Herb Simon, Prix Nobel d'économie en 1978 et qui s'intéressait aux problèmes d'organisation, nous a également rejoints.

Avec ce groupe, marginal par sa thématique, mais prestigieux par la qualité de ses membres, les discussions ont été passionnées et passionnantes pendant environ trois ans et nous avons participé à la diffusion des idées sur le hasard en biologie. Il est difficile d'évaluer l'influence que nous avons eue, mais quelques années plus tard, en 2002, une équipe de l'université Rockefeller (où Lederberg était chercheur émérite jusqu'en 2001) autour de Michael Elowitz a publié un article important sur la notion d'expression stochastique des gènes, reposant sur des idées que nous avions

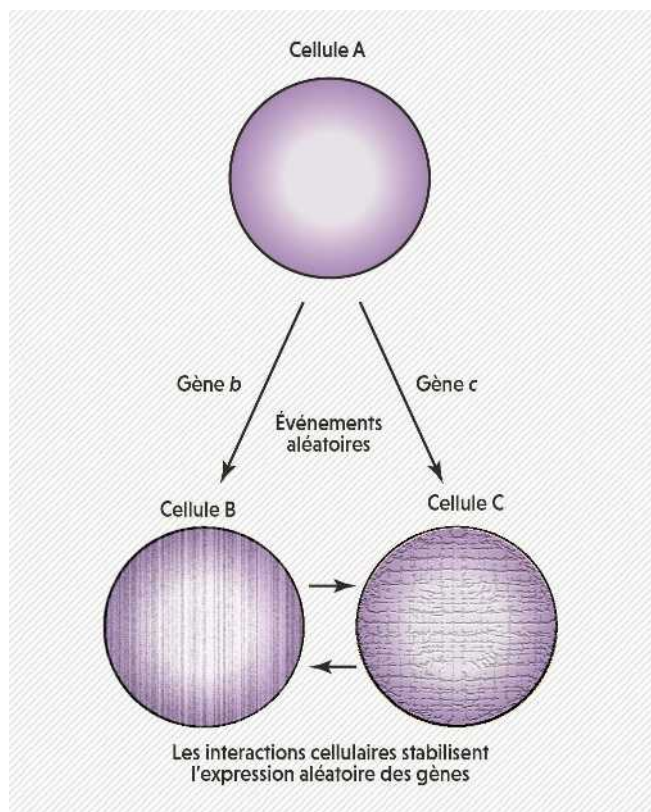
développées. Elle a montré, chez la bactérie *Escherichia coli*, que les deux allèles d'un même gène (codant une version bleue et une version jaune d'une protéine fluorescente) n'étaient pas toujours actifs de la même manière, l'un pouvant même être transcrit pendant que l'autre est réprimé.

Aujourd'hui, la notion d'expression stochastique des gènes est reconnue, mais comment est-elle interprétée ?

À partir des années 2000, cette notion a été reconnue du fait de l'accumulation des preuves expérimentales, mais la grande majorité des biologistes l'interprètent comme du bruit dans le fonctionnement des réseaux de gènes, sans remettre en cause sur le fond le déterminisme génétique et le modèle instructif. Mon interprétation va plus loin parce que je considère que la stochasticité est la propriété première des cellules. Je ne nie pas l'existence de séquences ordonnées d'expression de gènes, mais ce sont des corrélations qui sont le résultat de l'activité cellulaire et non sa cause. De plus, la notion de stéréospécificité a largement été contredite: on sait par exemple qu'au moins 10% des protéines interagissent avec plus de 100 partenaires. Cette immense complexité combinatoire implique qu'il n'existe pas de réseau moléculaire sans intervention d'une contrainte qui le stabilise. En résumé, il ne faut pas inverser la cause et l'effet: la question est de savoir comment certaines configurations d'interaction sont sélectionnées, pas d'expliquer comment les réseaux de gènes déterminent le comportement des cellules.

Alors que ces idées commençaient à s'imposer, avez-vous lancé des recherches sur ces questions ?

J'ai toujours été convaincu qu'il faut être à la fois théoricien et expérimentateur, mon objectif était donc de monter un programme de recherche sur cette thématique. Les données sur l'expression stochastique des gènes s'accumulant, la question n'était plus d'en faire la démonstration, mais d'apporter la preuve expérimentale que cette variabilité joue un rôle causal dans la différenciation cellulaire. Mon objectif était de vérifier la prédiction suivante: si l'on assimile la différenciation à un mécanisme darwinien de hasard-sélection (un mécanisme où une variabilité aléatoire produit une diversité d'individus sur lesquels une sélection naturelle s'opère), il doit exister une période transitoire au cours de laquelle la variabilité de l'expression des gènes est maximale, comme si la cellule cherchait le bon profil d'expression, puis une phase de stabilisation (ou de sélection) avec diminution de cette variabilité et différenciation cellulaire.



Dans le modèle darwinien anarchiste, l'expression des gènes est aléatoire. Une cellule A se différencie soit en cellule B, soit en cellule C, selon que le gène b ou le gène c s'est exprimé. La variabilité de l'expression des gènes produit ainsi des variations d'une cellule à l'autre, et les interactions cellulaires stabilisent certains états cellulaires par sélection naturelle.

Au moins 10% des protéines interagissent avec plus de 100 partenaires

À cette époque, Thomas Heams, aujourd'hui enseignant-chercheur à AgroParisTech, m'a demandé de diriger sa thèse. Je travaillais alors à l'Inserm à l'institut Cochin, à Paris. Nous avons commencé nos travaux avec une technique d'analyse d'expression des gènes cellule par cellule, ce qui se faisait manuellement, alors qu'aujourd'hui des robots le font automatiquement. Nous avons obtenu des résultats préliminaires, publiés en 2003. Dans le même temps, j'ai fait plusieurs demandes de financement, ce qui était indispensable pour continuer et développer cette recherche, mais elles ont toutes été retoquées.

du pic de variabilité précédant la différenciation cellulaire. Tout récemment encore, en novembre 2019, l'équipe d'Olivier Gandrillon a apporté une nouvelle preuve du rôle de la variabilité de l'expression des gènes dans la différenciation cellulaire (voir l'encadré page 61).

Au-delà de l'expérimentation, vous avez également réalisé des travaux de simulation reposant sur des automates cellulaires. Que nous apprennent ces travaux et quelle valeur accorder à leurs résultats ?

Ces travaux ont été possibles grâce à une collaboration avec un physicien de l'université Pierre-et-Marie-Curie, à Paris (aujourd'hui Sorbonne Université), Bertrand Laforge. Nous avons réalisé des simulations numériques dont l'objectif était de montrer qu'un modèle de hasard-sélection peut expliquer la formation de structures organisées et reproductibles. Nous avons créé des automates cellulaires qui se différencient de façon aléatoire, mais qui se stabilisent en fonction de l'activité de synthèse des autres automates cellulaires. Les résultats, publiés en 2005, ont montré que des structures organisées stables émergent d'un équilibre entre la variation aléatoire intrinsèque des cellules et leur stabilisation par les conditions environnementales.

Une autre observation plus inattendue a retenu notre attention : la modification de certains paramètres entraîne la formation de bourgeonnements cellulaires qui évoquent un processus de cancérisation. Cette simulation simple montre donc qu'une prolifération cellulaire incontrôlée peut être consécutive à une rupture de l'équilibre entre la variation aléatoire intrinsèque des cellules et leur stabilisation par leur environnement. Il s'agit de simulations et non de cellules réelles, mais cela donne des idées pour orienter la recherche expérimentale. Et depuis la publication de ce travail, de nombreuses données expérimentales fondées sur divers modèles de cancers suggèrent très fortement qu'il existe un lien entre les interactions cellulaires et l'expression stochastique des gènes dans les processus de cancérogenèse.

Malgré les refus que j'essayais, alors même que mes hypothèses se vérifiaient et que mes idées s'étaient répandues grâce à la publication concomitante du livre *Ni Dieu ni gène*, en 2000, je ne pouvais pas revenir en arrière et me remettre à séquencer des génomes comme si de rien n'était... C'est pourquoi, d'un commun accord avec Axel Kahn, qui dirigeait l'institut Cochin, et Christian Bréchet, alors directeur de l'Inserm, j'ai rejoint le centre Cavallès, à l'École normale supérieure, à Paris. De là, je pouvais développer les aspects épistémologiques et philosophiques de mon travail tout en continuant, si possible, des collaborations avec des équipes d'expérimentateurs.

Après votre arrivée au centre Cavallès, en 2003, comment êtes-vous parvenu à faire la démonstration expérimentale de vos prédictions ?

J'ai poursuivi ma collaboration avec les équipes qui s'intéressaient à ma théorie, en particulier celles d'Olivier Gandrillon, à l'École normale supérieure de Lyon, et d'Andrès Paldi à l'École pratique des hautes études, à Paris. Nous avons formé le groupe de recherche Stochagène qui a reçu un financement de l'Agence nationale de la recherche en 2012. Nous avons cosigné une série d'articles sur l'expression stochastique des gènes, dont l'un a fourni, en 2016, la démonstration expérimentale

Associer la cancérogenèse à un déséquilibre des interactions cellulaires rejoint l'approche évolutionniste des cancers. Quel lien faites-vous entre les mécanismes cellulaires de hasard-sélection et l'évolution darwinienne ?

Je considère que la sélection externe (darwinienne) et la sélection cellulaire sont interconnectées de façon causale. Habituellement, on sépare l'évolution des espèces (la phylogenèse) du fonctionnement des sociétés cellulaires impliqué dans le développement embryonnaire (l'ontogenèse). Avec ma théorie, les deux sont intimement liés puisque la structure tissulaire joue comme une contrainte sélective sur chaque

> cellule, mais que cette structure tissulaire est elle-même soumise à la sélection darwinienne. Les deux phénomènes ne sont donc pas indépendants, mais causalement liés.

Pour exprimer cette idée, j'ai formé le concept d'ontophylogenèse, qui entraîne un bouleversement profond dans notre façon de voir le vivant. Dans cette conception, l'entité première du vivant n'est plus l'organisme ou l'espèce, mais la lignée généalogique. L'organisme et l'espèce ne sont plus que deux entités secondaires, et l'ontogenèse et la phylogenèse, deux manières d'approcher le même phénomène: le flux continu des générations – de cellules ou d'individus.

Dans votre dernier livre, vous revisitez l'histoire de la génétique et concluez qu'il ne s'agit pas d'une théorie véritablement scientifique. Pouvez-vous nous expliquer cette interprétation très radicale ?

La génétique est fondée sur un mythe: dans les années 1860, le moine morave Gregor Mendel aurait découvert expérimentalement les lois de la génétique et les facteurs héréditaires qui seront appelés plus tard des gènes. Or, dans son texte, Mendel ne parle que de caractères, aussi bien pour les petits pois adultes que pour leurs cellules germinales. Et lorsqu'il transcrit en équation le résultat de ses hybridations, il utilise des symboles qui formalisent les caractères, pas la composition génique des gamètes.

Le gène est un concept et, comme tout concept, il peut être remis en question

Ce qu'il faut retenir, c'est que Mendel n'a pas découvert empiriquement le gène, mais que ce concept a été construit au cours des cinquante années qui ont suivi. La première définition du gène, formulée par le botaniste danois Wilhem Johannsen en 1909, était très vague, et elle l'est restée en 1933 lorsque le biologiste américain Thomas Morgan a reçu son prix Nobel pour sa découverte du rôle des chromosomes dans l'hérédité: Morgan a déclaré lors de sa conférence Nobel que cela ne faisait aucune différence qu'il s'agisse « d'une unité hypothétique ou d'une particule

matérielle ». En réalité, le gène est un concept et non une entité matérielle clairement définie, et, comme tout concept, il peut légitimement être remis en question.

De là à remettre en cause la légitimité de la génétique ?

On ne peut plus enseigner les lois dites « de Mendel », qui reposent sur la transmission des allèles dominants ou récessifs et se passent de l'environnement, tout en affirmant que l'action des gènes est modulée par des facteurs environnementaux tels que les « modifications épigénétiques ». Les lois de Mendel impliquent un déterminisme exclusif du gène et se traduisent par un programme de recherche centré sur son action. Si elles sont infirmées par l'action de facteurs épigénétiques, il faut le dire et y renoncer une fois pour toutes. D'autant que les généticiens utilisent ce double discours incompatible avec la pratique scientifique depuis les débuts de leur discipline.

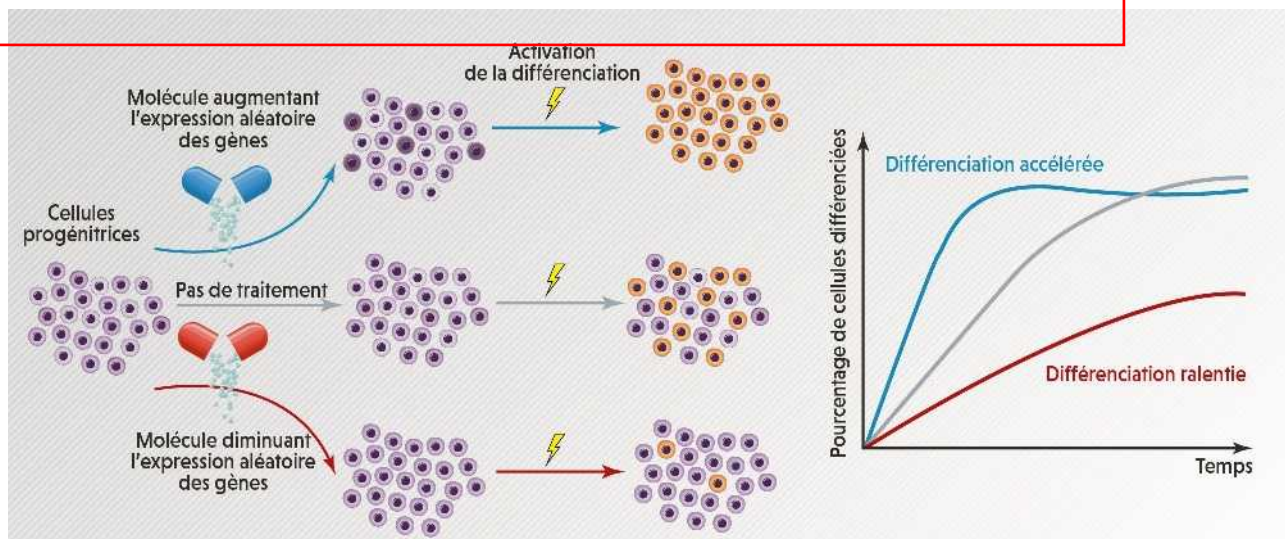
Dans mon livre, je cite notamment le zoologiste allemand Richard Woltereck, qui a proposé dès 1909 le concept de « norme de réaction », selon lequel un même génotype peut conduire à différents phénotypes en fonction de l'environnement. L'épigénétique n'est donc pas une nouveauté, elle prolonge une idée qui coexiste depuis le début du siècle précédent avec le déterminisme des lois de Mendel, alors que les deux sont incompatibles. D'ailleurs, l'épigénétique, telle qu'elle est comprise aujourd'hui, ne se substitue pas à la génétique, mais s'y ajoute en introduisant l'idée qu'il existe des niveaux d'explication complémentaires. Finalement, elle conforte donc la place centrale du gène en biologie. C'est pour cette raison que je dis que la génétique est une idéologie et non une théorie scientifique.

Vous avez publié quatre ouvrages où vous développez de nombreux arguments épistémologiques et historiques pour étayer votre théorie. Pensez-vous que cette démarche vous sert ou vous dessert ?

Chacun de ces ouvrages amène soit de nouveaux éléments, soit des éclairages et des perspectives différentes autour d'une approche darwinienne du vivant. Par exemple, dans *L'Origine des individus*, qui n'est pas un livre de vulgarisation comme l'était *Ni Dieu ni gène*, je consacre un grand chapitre à la théorie de l'autoorganisation. Cette théorie explique la complexité des êtres vivants par un cadre conceptuel holiste (où le tout est plus que la somme de ses parties, et donc où l'organisme est plus que la somme de ses composants biologiques) et des propriétés dites « émergentes », c'est-à-dire qui apparaissent lorsque l'on change d'échelle et qui ne sont pas explicables par les seules propriétés des composants du niveau inférieur.

PLUS DE HASARD, PLUS DE DIFFÉRENCIATION

Dans une population cellulaire, l'expression des gènes est variable d'une cellule à l'autre. Mais lors de la différenciation, un pic de variabilité se produit au début du processus. L'équipe d'Olivier Gandrillon, à l'École normale supérieure de Lyon, avait montré ce phénomène en 2016 en suivant la transformation en globules rouges de cellules primaires (progénitrices) de sang de poulet. Cela suggérait que la variabilité augmentait la capacité des cellules à explorer l'espace constitué de l'ensemble des combinaisons d'expression de gènes et à y trouver une combinaison plus favorable et stable que les autres, qui correspondrait à l'état différencié. Encore fallait-il le prouver. C'est ce que l'équipe vient de faire : à l'aide de substances qui augmentent ou diminuent la variabilité de l'expression des gènes dans ces mêmes cellules, Olivier Gandrillon et ses collègues ont montré qu'augmenter cette variabilité accélère la différenciation, et que la diminuer ralentit la différenciation. Un modèle mathématique du processus a fini de les convaincre que la modulation de la différenciation était bien consécutive à celle de la variabilité d'expression induite par les substances.



Mon interprétation est différente, car je pense qu'il faut utiliser les principes darwiniens de la variation aléatoire et de la sélection pour comprendre l'embryogenèse et le fonctionnement cellulaire.

Dans mon dernier livre, je vais beaucoup plus loin dans la critique de la génétique en m'appuyant sur l'histoire et l'épistémologie de cette discipline. Je ne sais pas si cela me sert ou me dessert, mais je pense que le travail de réflexion théorique et épistémologique est indispensable au progrès de la biologie. Il va de pair avec la recherche expérimentale, même si aujourd'hui la majorité des biologistes sont uniquement des expérimentateurs.

En faisant référence à une théorie anarchiste, ne craignez-vous pas d'être accusé de diffuser des théories pseudoscientifiques ?

Cette référence était déjà présente dans mon premier livre, *Ni Dieu ni gène*. Les allers-retours entre la biologie et les sciences sociales avec utilisation croisée de métaphores ont toujours existé. Au XIX^e siècle, Rudolph Virchow, l'un des fondateurs de la théorie cellulaire, parlait du « comportement social » des cellules au sein de « sociétés cellulaires » et Claude Bernard n'hésitait pas à comparer ces dernières à des systèmes économiques. Dans l'autre sens, les sociologues parlent de « corps social ». Puis

au XX^e siècle, les biologistes moléculaires ont massivement utilisé des métaphores autoritaires et hiérarchiques.

Évidemment, le mot anarchie est souvent compris de façon très négative, il est assimilé à un chaos d'où rien de positif ne peut sortir. Pris dans ce sens, je comprends que le titre de mon livre puisse choquer. Pour ma part, je me réfère à l'étymologie du terme qui vient du préfixe privatif *an*, lequel signifie « sans » en grec, et de *arké*, lequel peut être à la fois traduit par « origine », « pouvoir » et « commandement ». Or le rôle dévolu par la biologie moderne à l'information contenue dans le génome correspond bien à celui d'une *arké* : antérieure à l'être vivant, elle dirige sa genèse et son fonctionnement.

Dans la théorie que je développe, les cellules individuelles n'ont pas besoin des instructions contenues dans le génome pour changer d'état, elles le font grâce à l'expression stochastique des gènes. Mais dans le même temps, elles se trouvent dans un milieu intérieur qui résulte, pour une cellule donnée, de l'activité des autres cellules. Chacune agit donc pour elle-même, mais l'enchevêtrement des contraintes (milieux intérieurs différenciés) les relie au sein d'une société cellulaire qui oriente leurs comportements dans l'intérêt collectif. ■

Propos recueillis par Gérard Lambert

BIBLIOGRAPHIE

J.-J. Kupiec, **Et si le vivant était anarchique**, Les Liens qui Libèrent, 2019.

A. Guillemin et al., **Drugs modulating stochastic gene expression affect the erythroid differentiation process**, *Plos One*, vol. 14(11), article e0225166, 2019.

A. Richard et al., **Single-cell-based analysis highlights a surge in cell-to-cell molecular variability preceding irreversible commitment in a differentiation process**, *Plos Biology*, vol. 14, article e1002585, 2016.

J.-J. Kupiec, **A probabilistic theory for cell differentiation, embryonic mortality and DNA c-value paradox**, *Speculation in Science and Technology*, vol. 6(5), pp. 471-478, 1983.

L'ESSENTIEL

> Les tornades de feu, combinaisons de tornade et d'incendie, sont extrêmement rares mais très dangereuses.

> Leur formation nécessite à la fois un grand incendie et un mouvement de rotation atmosphérique, que le feu va concentrer sous la forme d'un tube d'air tourbillonnant vertical.

> Les chercheurs commencent à bien comprendre la physique du phénomène, mais restent incapables de prévoir son apparition.

L'AUTEUR



JASON FORTHOFFER
pompiier et ingénieur, chercheur
au laboratoire des sciences du feu
de Missoula (Montana, États-Unis),
au Service forestier des États-Unis

Comment naissent les tornades de feu

Lorsque des vents tournoyants se combinent à un incendie, ils forment une tornade de feu. Un phénomène très dangereux et imprévisible, mais dont on comprend mieux aujourd'hui la physique.

Notre avion entamait sa descente sur Medford, dans l'Oregon, quand il s'est mis à traverser une épaisse couche de fumée. Nous étions fin juillet 2018 et de grands incendies dévastaient le sud-ouest de l'Oregon et le nord de la Californie – l'incendie dit de Carr. Je venais à la rencontre d'une unité de pompiers endeuillée: «L'un de mes pompiers est mort dans une tornade qui a projeté son véhicule à des dizaines de mètres d'altitude», m'avait expliqué son chef au téléphone. Une tornade? Oui, mais une tornade de feu.

Dix ans auparavant, j'avais été le témoin pour la première fois des conséquences d'une tornade de feu. Celle-ci s'était produite au cours d'un monstrueux incendie – l'incendie des Indiens – qui avait fait rage entre le 8 juin et le 10 juillet 2008 dans la forêt domaniale de Los Padres, en Californie centrale, réduisant en

cendres 329 kilomètres carrés de la région sauvage de Ventana. Un tourbillon de vent et de feu de plus de 300 mètres de diamètre s'était formé et s'était abattu sur une équipe de pompiers. Par chance, ils se trouvaient à ce moment-là sur une autoroute à deux voies, ce qui leur avait sauvé la vie. Quelques mètres plus loin, ils auraient été tués par les débris d'arbres et de végétaux arrachés partout par la tornade.

À mon arrivée sur le site, j'avais vu d'énormes branches de chêne gisant partout, sur un sol décapé au point que plus un seul caillou n'y était visible. La scène m'avait impressionné et inquiété. Il était évident qu'une telle tornade risque d'atteindre et de blesser des pompiers même dans un abri considéré comme sûr. On n'était pas passé loin de la catastrophe...

Afin de mieux comprendre ce qu'est exactement une tornade de feu, il faut se remémorer ce qu'est un feu de forêt ordinaire. Un tel >



Au laboratoire des sciences du feu de Missoula, dans le Montana, on crée des tornades de feu miniatures en mettant en rotation l'air aspiré au-dessus d'une cuvette d'alcool en feu.

> phénomène naît de la rencontre entre une source de chaleur de température supérieure à 600 °C et une végétation inflammable. Une fois allumé, le feu prend la forme d'un front de flammes dépassant en hauteur la végétation qui se consume et poussant devant lui un mélange de gaz et d'air brûlant. Cette « vague de chaleur » de plusieurs centaines de degrés s'étend vers l'avant jusqu'à une distance qui peut excéder trois fois la hauteur des flammes. Prise dans la chaleur, la végétation subit une pyrolyse, c'est-à-dire une très rapide décomposition chimique due à l'effet thermique. Cela dégage un volume important de vapeur d'eau et de gaz inflammables, lesquels s'embrasent d'un seul coup, ce qui déplace le front vers l'avant, tandis qu'une colonne de convection plus ou moins verticale, selon le vent, surmonte l'incendie et emporte la fumée.

En fonction des écoulements d'air au voisinage de l'incendie, il peut alors se produire – et beaucoup d'entre nous l'ont déjà observé sur le terrain – que des « tourbillons de feu » se forment. Ces colonnes de feu tournantes ont la taille de l'un de ces éphémères tourbillons de poussière que nous apercevons parfois. Une tornade de feu, en revanche, combine le feu et des vents tournoyants aussi violents que ceux d'une véritable tornade. Un tel phénomène est rare au point d'en être devenu quasi mythique. Je n'en avais entendu parler qu'une seule fois, par un pompier chevronné.

En 2008, de retour à mon laboratoire de Missoula, au Montana, je m'étais lancé dans une recherche bibliographique. Plusieurs tornades de feu avaient bien été signalées dans un passé proche ou lointain, mais les informations disponibles à leur propos étaient si rares que les chercheurs ne s'accordaient même pas sur la définition du phénomène. Certains l'associaient exclusivement à la formation d'un pyrocumulonimbus (étymologiquement un « nuage de pluie cumulé dû au feu »), c'est-à-dire l'un de ces nuages d'orage se formant à partir de la vapeur d'eau que libèrent les incendies en dévorant la végétation. Pour les tenants du lien entre tornade de feu et pyrocumulonimbus, il ne peut y avoir de véritable tornade de feu qu'en relation avec un pyrocumulonimbus.

Si l'on applique cette définition, la seule tornade de feu jamais documentée est celle qui s'est formée en 2003 lors d'un grand incendie près de Canberra, en Australie, et qui a dévasté une bande longue de quelque 25 kilomètres... Cette définition semblait toutefois trop restrictive pour être utile aux pompiers. En adoptant la définition plus pragmatique de « tourbillon de feu accompagné de vents analogues à ceux d'une tornade », mon collègue Bret Butler et moi avons rassemblé toutes les informations disponibles et les avons intégrées à un manuel et des formations destinées aux pompiers.

Puis l'incendie Carr, le grand incendie évoqué au tout début de cet article, qui a ravagé pendant l'été 2018 les comtés de Shasta et de Trinity, en Californie, a produit une tornade de feu. Et c'est ainsi que je me suis retrouvé sur place afin d'enquêter sur la mort d'un pompier, tragédie que je redoutais depuis longtemps.

COMME UN CHAMP DE BATAILLE

Le site ressemblait à un champ de bataille.

Pour m'aider, j'avais recruté Josh Wurman, un météorologue célèbre aux États-Unis pour ses recherches sur les tornades et les ouragans. Comme moi, il n'avait jamais rien vu de tel. Des îlots entiers de maisons avaient été rasés. Les toitures et toutes sortes de débris jonchaient le sol. Plusieurs voitures avaient enchaîné des tonnes. Déracinés ou cassés, les arbres avaient aussi été écorcés par un vent transportant grains de sable et cailloux. Trois pylônes métalliques de 30 mètres de haut s'étaient écroulés; arraché à sa base, l'un d'eux avait été transporté sur 300 mètres...

Nous avons estimé que des vents avaient soufflé en cet endroit à 265 kilomètres par heure. Sur l'échelle de Fujita (qui classe les tornades selon la vitesse des vents sur une échelle allant de 0 à 5), cette vitesse signifie une tornade de 3, impliquant des dégâts considérables (murs et toits arrachés et emportés). En Californie, seulement deux tornades normales de cette force sont documentées... Or la tornade de l'incendie de Carr n'était pas « normale »: il s'agissait d'une tornade de feu à l'intérieur de

La tornade de feu faisait plus de 300 mètres de diamètre et s'élevait jusqu'à 4800 mètres

laquelle brûlaient des gaz dont la température a pu atteindre les 1500 °C, tandis que sa base faisait plus de 300 mètres de diamètre et que, d'après les images radar, sa hauteur a atteint 4800 mètres. Durant au moins 40 minutes, elle s'est déplacée lentement, laissant une traînée de destructions d'environ 1,5 kilomètre de long.

Afin de tirer des leçons de cet extraordinaire événement, notre équipe a interrogé les témoins et recueilli des vidéos. La tornade de feu s'est produite le soir du 26 juillet 2018, au cours d'un



TRIANGLE DE FEU

L'air se met spontanément à tourbillonner au centre d'un trio de planches en feu disposées de façon triangulaire. L'un des feux rassemble ensuite les filets d'air tournant en un tourbillon de feu. De façon similaire, les feux de forêt ou les incendies urbains peuvent engendrer des tornades de feu.

incendie de forêt couvrant des milliers d'hectares au nord-ouest de Redding. Ce feu était si étendu et si intense qu'il avait créé des pyrocumulonimbus atteignant plus de 5 kilomètres d'altitude. Vers 17h30, les flammes ont soudainement foncé vers l'est, tuant un pompier qui conduisait un bulldozer, Don Smith, ainsi qu'un habitant resté prisonnier de son domicile. Alors que l'incendie s'approchait de la périphérie de Redding, il a donné naissance à plusieurs tourbillons de feu et a projeté des brandons à plus de 1,5 kilomètre en avant à travers la rivière Sacramento. Cela a déclenché plusieurs incendies secondaires isolés à proximité de deux îlots de maisons situés au bout d'une impasse. La situation est devenue très chaotique: les pompiers tentaient d'évacuer les habitants et de sauver leurs biens, les gens couraient pour échapper au feu alors que toute retraite était coupée...

Jeremy Stoke, pompier de Redding, arriva sur les lieux vers 19h30, alors que la tornade de feu se formait au-dessus de la route menant au lotissement, piégeant habitants et pompiers. Il eut juste le temps de lancer un appel de détresse par radio avant que des vents tournants extrêmement violents ne fassent rouler son camion sur plusieurs dizaines de mètres avant de buter contre un arbre. Plusieurs heures ont passé avant qu'on ne le retrouve, mort des suites de ses blessures.

Les débris emportés par le vent ont aussi endommagé deux camions de pompier. Curieusement, alors que ces deux lourds véhicules roulaient dans la même direction à 50 mètres de distance, l'un fut abîmé surtout du côté du conducteur, et l'autre surtout du côté passager, ce qui témoigne du mouvement rotatif de l'air. Les pare-brise de trois bulldozers qui se trouvaient à proximité ont aussi volé en éclats, blessant l'un des conducteurs à l'œil; un autre s'est gravement brûlé les mains. Un policier à la retraite s'est arrêté de rouler quand il s'est rendu compte que la caisse de son pick-up brûlait; il a survécu, mais avec des brûlures des voies respiratoires. Plus tragique encore, à la périphérie de la tornade, deux enfants et leur arrière-grand-mère ont péri dans l'incendie de leur maison.

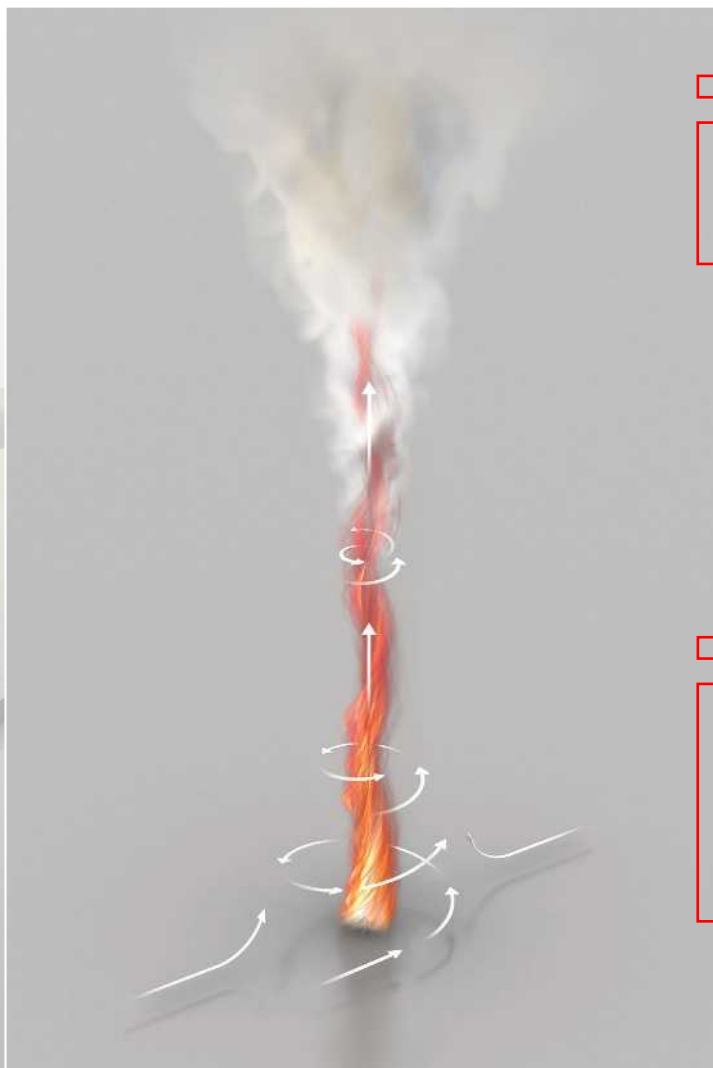
Quelles sont les causes des tornades de feu? Pouvons-nous en prédire la formation afin de pouvoir évacuer les gens à temps? Pour répondre à ces questions, une première étape consiste à rechercher des événements comparables dans le passé. En 1871, une ville du Wisconsin fut dévastée par un phénomène qui, à en juger par la quantité massive d'objets déplacés, dont une maison, était sans doute une tornade de feu. En 1964, l'incendie du Polo, en Californie, a fait quatre blessés et détruit deux maisons, une grange, trois voitures et un verger d'avocats.

TORNADES DE FEU DE FORÊT

Les tornades de feu sont des colonnes de feu et de fumée tournant à des vitesses comparables à celles des vents des tornades habituelles. Elles sont rares, mais extrêmement destructrices. Remarquablement durables, elles peuvent se détacher de l'incendie principal et surprendre des groupes entiers de pompiers. Elles aspirent en hauteur des brandons et les recrachent au loin, ce qui déclenche des incendies secondaires. Même si les chercheurs comprennent de mieux en mieux la physique des tornades de feu, la prévision de ces phénomènes reste un défi.

LA TORNADE DE FEU DE L'INCENDIE DE CARR

Le 26 juillet 2018, un grand incendie de forêt au nord-ouest de Redding, en Californie, a engendré une grosse tornade de feu qui a tué quatre personnes et en a blessé plusieurs autres. La formation d'un tel phénomène suppose non seulement un puissant incendie, mais aussi un mécanisme de mise en rotation de l'air. Dans le cas de l'incendie de Carr, ce mécanisme fut probablement le fait que le vent froid provenant du Pacifique dévalait les montagnes situées à l'ouest de Redding au pied desquelles faisait rage un grand incendie. En plongeant dans la masse d'air chaud remplissant le fond de la vallée de Sacramento, le vent froid y a créé de multiples tourbillons, emportant des gaz hautement inflammables produits par l'incendie. Ces gaz se sont enflammés et les tourbillons de flammes ainsi formés se sont rassemblés, aboutissant à un gigantesque tourbillon de feu aspirant tout à sa base sur son passage : une énorme tornade de feu.

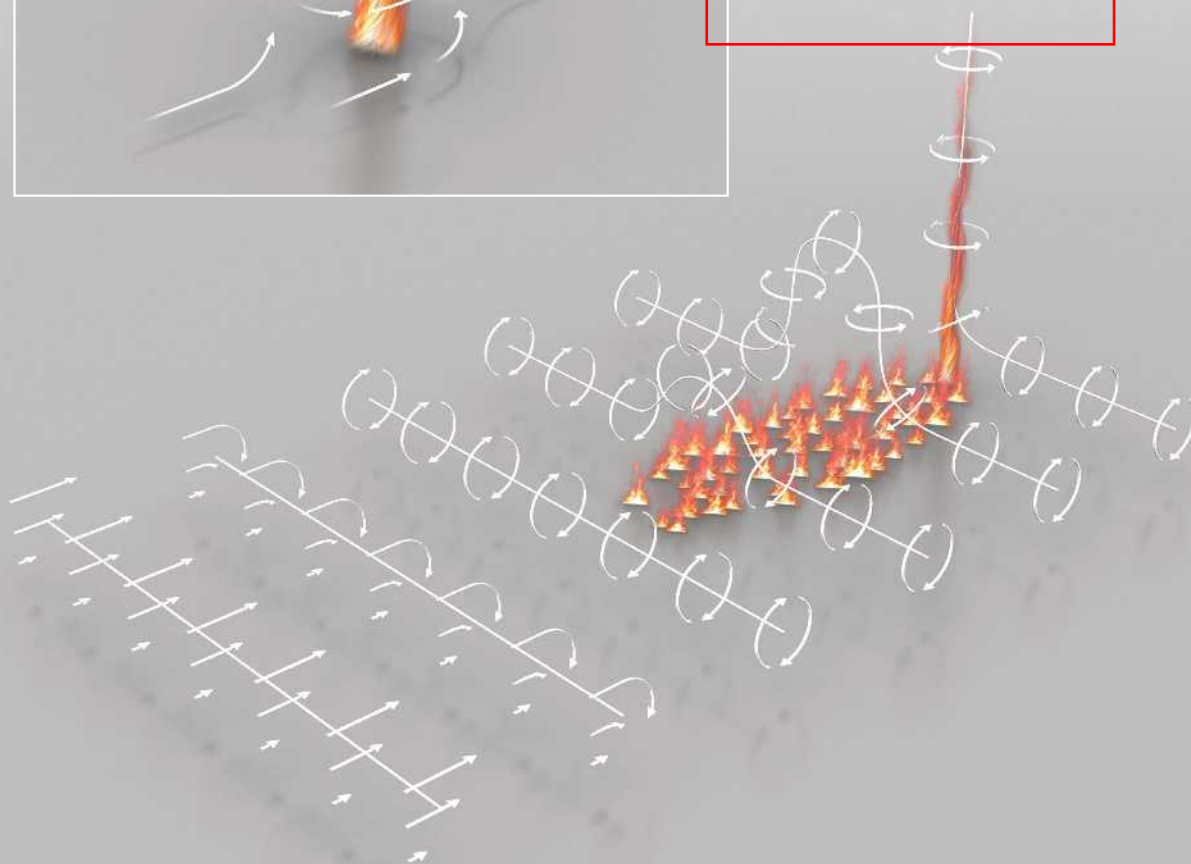


TOURBILLONS DE FEU DE LABORATOIRE

De petits tourbillons de feu créés en laboratoire ont aidé à comprendre la physique des tornades de feu. On constate que ce type de feu tournant consomme son combustible trois fois plus vite que les feux normaux, et conserve son énergie avec une grande efficacité, ce qui lui permet de durer.

MISE EN ROTATION

Plusieurs mécanismes peuvent mettre l'air en rotation et former un tourbillon, à commencer par le vent rasant le sol. Les tourbillons horizontaux nés du frottement entre ce vent et le sol s'élèvent et se redressent en raison de l'air chaud ascendant produit par l'incendie. La combustion des gaz inflammables contenus dans le panache de feu chauffe son contenu et accélère son ascension en étirant le tourbillon et en accélérant sa rotation.



> L'une des plus horribles tornades de feu s'est produite lors des bombardements de Hambourg, entre le 25 juillet et le 3 août 1943, pendant lesquels ont péri plus de 40000 habitants: selon le géographe Charles Ebert, ce *feuersturm*, c'est-à-dire cette «tempête de feu», mesurait plus de 3 kilomètres de large et 4,5 kilomètres de haut.

L'horreur du *feuersturm* de Hambourg de 1943 le dispute à celle de la tornade du grand incendie de Tokyo de 1923. Un tremblement de terre majeur avait déclenché le feu. Puis une grande tornade de feu s'était formée et avait tué en 15 minutes 38000 personnes.

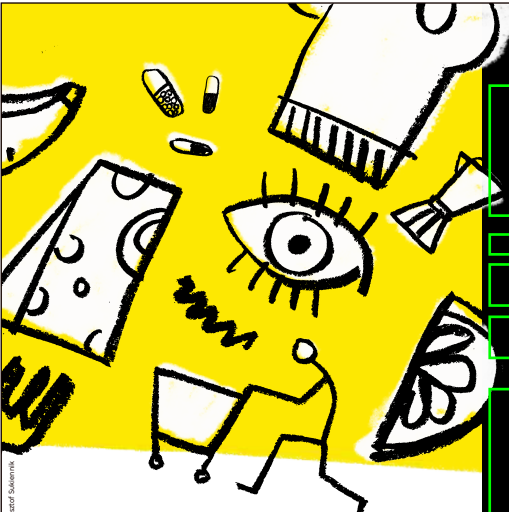
DES TOURBILLONS DE FEU CRÉÉS EN LABORATOIRE

Pendant plus d'un demi-siècle, on a expliqué cet événement en supposant qu'une tornade normale s'était formée exactement là où un grand incendie faisait rage. Mais dans les années 1980 et 1990, Seiji Soma et Kozo Saito, de l'université du Kentucky, lurent les récits historiques de l'événement afin de construire une maquette du lieu et d'imiter les vents ayant soufflé ce jour-là par des courants d'air appropriés. Ils reproduisirent ainsi à petite échelle le grand incendie de Tokyo, et mirent en évidence que cet incendie avait lui-même engendré sa tornade de feu.

Cette recherche s'appuyait sur les expériences novatrices réalisées deux décennies plus tôt par George Byram et Robert Martin, à la station de recherche du Sud du Service forestier des États-Unis. Ces deux chercheurs avaient réussi à créer de petits tourbillons de feu dans leur installation de Macon, en Géorgie.

Leur dispositif? Un petit bassin circulaire contenant de l'alcool en train de brûler et entouré de parois cylindriques percées de fentes verticales. Celles-ci forçaient l'air venant alimenter le feu à entrer en rotation. Le tourbillon ainsi formé consommait tout le carburant jusqu'à trois fois plus vite qu'en l'absence de rotation. La présence d'un vent tournant augmente le taux de combustion en amenant les flammes à lécher la surface de l'alcool, ce qui le réchauffe puis enflamme les vapeurs émises. Des recherches ultérieures ont montré que, dans de tels feux, l'énergie dégagée par unité de temps était jusqu'à sept fois plus importante que dans les feux ordinaires.

Quelque chose de semblable se produit dans les tourbillons de feu des incendies de forêt et dans les tornades de feu. Porté à haute température, un morceau de bois produit des centaines de gaz inflammables différents, dont la combustion produit des flammes. Les forts vents horizontaux et tournants de la tornade



À L'AUDITORIUM DE LA GRANDE GALERIE DE L'ÉVOLUTION

Jardin des Plantes
36 rue Geoffroy St Hilaire - Paris 5^e

Entrée libre et gratuite dans la limite des places disponibles

Détails sur jardindesplantesdeparis.fr

POUR LA SCIENCE

Samedi 7 mars - 15h DES GRAINES POUR L'ÉTERNITÉ !

Deux documentaires de création étonnants, poétiques et politiques, consacrés à une banque de graines unique au monde, située dans l'archipel du Svalbard, en Norvège.

NOÉ Réal : Pauline Julier (Suisse - 2010 - 22 min.)

WILD RELATIVES Réal : Jumana Mena (Liban / Norvège / Syrie - 2017 - 65 min. - VOSTF)

Projection suivie d'une présentation d'Éléonore Samira Mobaied, chercheuse au Muséum national d'Histoire naturelle (Département « Homme & Environnement »).

Lundi 9 mars - 19h LES AVENIRS DE L'ALIMENTATION

Venez découvrir le monde de 2040 créé par les CFistes : écouter leurs récits, échanger... Le comité de science-fiction est un atelier créatif qui réunit étudiants, chercheurs et artistes, soutenu par l'Institut de transition environnementale Sorbonne Université, le Muséum, en partenariat avec Sciences-Po Paris.

Lundi 23 mars - 19h LES GOÛTS ET LES COULEURS DU MONDE

Une histoire naturelle des tannins, de l'écologie à la santé
Ed. Actes Sud, 352 p. 24€. Illustrations d'Arnaud Rafaelian.
Une exploration sensorielle et naturaliste d'une famille de molécules ignorées, les tannins, omniprésents dans notre quotidien.

Présentation de l'ouvrage par l'auteur, Marc-André Selosse, biologiste, spécialisé en mycologie, Muséum national d'Histoire naturelle.

Vente-dédicace de l'ouvrage sur place de 18h15 à 18h45

AUTOUR DE L'EXPOSITION JE MANGE DONC JE SUIS DU MUSÉE DE L'HOMME



de feu rabattent les flammes vers la végétation, ce qui renforce sa combustion.

En 1967, Howard Emmons et Shuh-Jing Ying, de l'université Harvard, ont entouré un feu de laboratoire stationnaire d'un grillage cylindrique que l'on pouvait faire tourner à différentes vitesses, ce qui imprimait une rotation à

à l'accélération de la rotation d'une patineuse qui rapproche les bras de son corps.

Un tourbillon de feu qui arrive sur une zone en feu tend à s'étirer jusqu'à une hauteur considérable et à tourner très vite; lorsqu'il parvient au-dessus d'une zone déjà brûlée, il s'élargit et ralentit en prenant l'aspect d'un cylindre diffus de fumée. Les mêmes comportements valent pour les tornades de feu. Parfois, la masse en rotation est si large et tourne si lentement que les pompiers ne s'aperçoivent pas qu'il s'agit d'un tourbillon. Quant aux déplacements d'un tourbillon de feu, ils dépendent d'une part des vents ambiants et d'autre part des détails du relief, mais il reste à comprendre de quelle façon précisément.

Howard Emmons et Shuh-Jing Ying avaient aussi montré que les tourbillons de feu conservent avec une remarquable efficacité leur énergie cinétique de rotation, ce qui les rend malheureusement assez persistants. La tornade de feu de l'incendie des Indiens, par exemple, a duré environ une heure. À mesure que la rotation dans une tornade de feu s'accroît, deux forces radiales opposées s'intensifient: d'une part la force centrifuge, qui tire chaque parcelle d'air vers l'extérieur, d'autre part celle due à la basse pression régnant au centre du tourbillon, qui l'aspire au contraire vers l'intérieur. L'équilibre entre ces deux forces limite le mouvement radial de l'air et donc la perte d'énergie cinétique par le tourbillon. Les feux ne présentant pas de rotation échangent, eux, à peu près dix fois plus d'énergie avec l'atmosphère environnante.

Ce mécanisme contribue aussi à rendre les tourbillons de feu plus minces et plus hauts que les feux non tournoyants. La stabilisation, par les forces radiales, des parois tournantes du tube de feu implique que, sauf à la base, pratiquement aucun air n'est aspiré à l'intérieur. Peu d'oxygène est donc disponible pour la combustion. Une partie des gaz combustibles doit donc remonter haut à l'intérieur du tube avant qu'il y en ait assez pour brûler.

Tout aussi dangereux est le fait que l'ascension rapide de gaz chauds et peu denses crée une très basse pression à la base du tourbillon. Le frottement de l'air contre le sol ralentit la rotation, ce qui réduit la force centrifuge poussant l'air vers l'extérieur. Comme l'aspiration vers l'intérieur du tube engendrée par la pression reste la même, de l'air rasant le sol s'engouffre dans la tornade de feu. L'effet produit est le même que celui qu'aurait un aspirateur géant, avalant goulument de l'air et des débris enflammés à sa base, les tirant vers le haut à des vitesses extrêmes avant de les éjecter de façon imprévisible depuis des hauteurs considérables, ce qui déclenche des incendies secondaires à distance.

Les tourbillons de feu conservent assez bien leur énergie de rotation, d'où leur persistance

L'air entrant dans les flammes. Les chercheurs ont mesuré la vitesse du vent et la distribution de la température du tourbillon de feu ainsi créé. Ils ont ainsi mis en évidence que le feu ne suffit pas en lui-même à engendrer un tourbillon de flammes: il faut un mécanisme qui mette l'air en rotation et un autre qui amplifie celle-ci.

Une tornade de feu a essentiellement la même aérodynamique. De nombreux tourbillons se forment naturellement dans l'atmosphère. Ils sont engendrés par les vents tournant autour des montagnes ou longeant le sol, voire par des différences de pression au sein de l'atmosphère. Le feu, lui, joue deux rôles: il concentre la rotation et la fait monter (les gaz chauds s'élevant vite), ce qui aboutit à un étroit tube d'air et de flammes tournant autour d'un axe plus ou moins vertical.

Dans les premiers instants d'une tornade de feu, l'air chaud surmontant le feu aspire vers le haut l'air venu le remplacer à la base. Ce faisant, il rassemble des tourbillons atmosphériques préexistants. Certains de ces tourbillons sont initialement horizontaux, mais l'aspiration vers le haut tend à les redresser vers la verticale. Ensuite, l'air ascendant s'échauffe à mesure que brûlent les gaz qu'il contient.

La pression exercée par l'air entourant le tourbillon force aussi l'air chaud et léger de l'intérieur du tube de feu à s'élever; le tourbillon ou la tornade de feu s'étire ainsi le long de son axe et son diamètre diminue. Comme le moment cinétique (la quantité de mouvement de rotation) de la masse tournante est une quantité conservée, l'éirement de cette dernière a pour conséquence de faire tourner plus vite le contenu du tourbillon, effet comparable



> Malgré toutes nos nouvelles connaissances sur la physique des tornades de feu, nous ne savons toujours pas prédire où et quand l'une d'elles se produira. Au moins une chose est sûre : l'ingrédient essentiel à leur formation est l'existence d'une source de rotation importante.

À cet égard, des études de cas nous ont montré que l'un des endroits les plus propices à la formation de tornades de feu se trouve du côté sous le vent d'une montagne. En contournant la montagne, le flux d'air crée des mouvements tourbillonnants en arrière du mont, comme dans l'écoulement d'une rivière immédiatement en aval d'un rocher. Si à ces tourbillons s'ajoute un incendie, ce dernier pourra rassembler tous ces mouvements rotatifs et les transformer en une tornade de feu.

DIVERSES CONDITIONS D'APPARITION

Toutefois, la pratique nous a appris que des tourbillons de feu peuvent aussi apparaître sur un terrain plat et en l'absence de vent. Ainsi, un grand tourbillon de feu apparut au Kansas à probablement été formé par la collision d'un front froid avec l'air ambiant chaud au-dessus d'un champ en feu. Et en 2007, Rui Zhou et Zi-Niu Wu, de l'université Tsinghua, à Pékin, ont montré que certaines configurations où plusieurs feux sont présents peuvent déclencher des courants d'air au sol et finir par leur imprimer une rotation. Or ces configurations peuvent apparaître spontanément à la faveur des sautes de feu, c'est-à-dire des incendies secondaires allumés par les brandons que beaucoup d'incendies projettent.

En novembre 2008, l'incendie de Corona Yorba Linda, en Californie, a créé un grand tourbillon de feu, une tornade de feu peut-être, qui a menacé les habitations.

BIBLIOGRAPHIE

N. P. Lareau et al., **The Carr Fire vortex : A case of pyrotornadogenesis ?**, *Geophysical Research Letters*, vol. 45(23), pp. 13, 107-113 et 115, 2018.

J. M. Forthofer et S. L. Goodrick, **Vortices and wildland fire**, dans P. A. Werth et al. (dir.), *Synthesis of Knowledge of Extreme Fire Behavior*, vol. 1 for Fire Managers, US Forest service Pacific Northwest research station, novembre 2011.

P.-Y. Colin et al., **La simulation des sautes de feu**, *Pour la Science*, n° 322, pp. 30-37, août 2004.

R. N. Meroney, **Fire whirls, fire tornadoes and firestorms : Physical and numerical modeling**, dans G. Manfreda et D. Contini (éd.), *Proceedings of PHYSMOD 2003*, Firenze University Press, 2003.

Après toutes ces considérations, sommes-nous en mesure de préciser l'origine de la rotation d'air qui a causé la terrible tornade de feu de l'incendie de Carr ? Étant donné les nombreux tourbillons de feu qui ont précédé le phénomène, d'importants mouvements de rotation étaient sans doute présents dans le secteur. J'ai demandé à Natalie Wagenbrener, une collègue de notre laboratoire de Missoula, d'effectuer des simulations numériques de la météo de cette journée-là.

Son travail a montré que l'air frais et dense de l'océan Pacifique était poussé vers l'est et au-dessus du sommet d'une chaîne de montagnes situées à l'ouest de Redding. Cet air frais était beaucoup plus lourd que l'air chaud de la vallée de Sacramento, puisque l'aéroport de Redding a enregistré ce jour-là une température maximale de 45 °C ! Par gravité, l'air froid marin s'est donc écoulé le long des flancs des montagnes vers le fond de la vallée. Cependant, curieusement, à l'endroit où la tornade de feu s'était formée, ces forts vents de surface semblaient avoir disparu.

Comment était-ce possible ? J'ai fini par comprendre que l'on avait affaire à l'équivalent atmosphérique du ressaut hydraulique subi par l'eau se déversant dans le lac en aval d'un barrage. On observe alors que la surface du plan d'eau calme est rehaussée (c'est le ressaut) par la formation et le maintien d'une vague déferlante stationnaire, qui marque la limite entre les écoulements. Or cette vague s'accompagne d'intenses mouvements tourbillonnaires. De façon analogue, l'air froid et dense qui descendait à vive allure le flanc de la montagne a pénétré dans le bassin d'air chaud et calme de la vallée de Sacramento, engendrant un ressaut probablement responsable des puissants mouvements de rotation à l'origine de la tornade de feu de l'incendie de Carr (voir l'encadré pages 66 et 67).

Par ailleurs, Neil Lareau, de l'université du Nevada, et ses collègues ont proposé en 2018 que les pyrocumulonimbus de plus de 10 kilomètres d'altitude qui surmontaient l'incendie de Carr pendant que la tornade de feu s'est formée ont contribué aussi à étirer le tourbillon jusqu'à une grande altitude, tout en l'amincissant et en l'accéléralant.

Si les incendies de forêt continuent à s'intensifier, il se pourrait que nous soyons confrontés plus souvent à des tornades de feu. Les leçons tirées d'un examen attentif du phénomène pourraient nous aider à prévenir d'autres tragédies dues à ces phénomènes. Espérons que de nouvelles recherches, combinées aux progrès de la prévision météorologique et de la puissance de calcul, nous permettront bientôt de préciser les conditions favorables à la formation d'une tornade de feu et d'alerter à temps les populations concernées. ■

OFFRE D'ABONNEMENT

1 AN

ABONNEZ-VOUS À
POUR LA

SCIENCE

3 FORMULES
AU CHOIXFORMULE
PAPIERFORMULE
PAPIER
+ HORS-SÉRIEFORMULE
INTÉGRALE

Le magazine papier 12 numéros par an

Le magazine en version numérique 12 numéros par an

Le hors-série papier 4 numéros par an

Le hors-série en version numérique 4 numéros par an

Accès à pouirlascience.fr

actus, dossiers, archives depuis 1996

VOTRE TARIF D'ABONNEMENT

59€

Au lieu de 82,80€

79€

Au lieu de 114,40€

99€

Au lieu de 174,40€

29 %
de réduction *31 %
de réduction *43 %
de réduction *

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

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

PAG20STD

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

2 / J'indique mes coordonnées

☐ M. ☐ Mme

Nom: Prénom:

Adresse:

Code postal: Ville:

Téléphone:

Email: (indispensable pour la formule intégrale)

.....@.....

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

3 / Je choisis mon mode de règlement

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science☐ Carte bancaire

N° Clé (Les 3 chiffres au dos de votre CB)

Date d'expiration Clé (Les 3 chiffres au dos de votre CB)

Signature obligatoire:

1 / Je choisis ma formule (merci de cocher)

☐ FORMULE
PAPIER

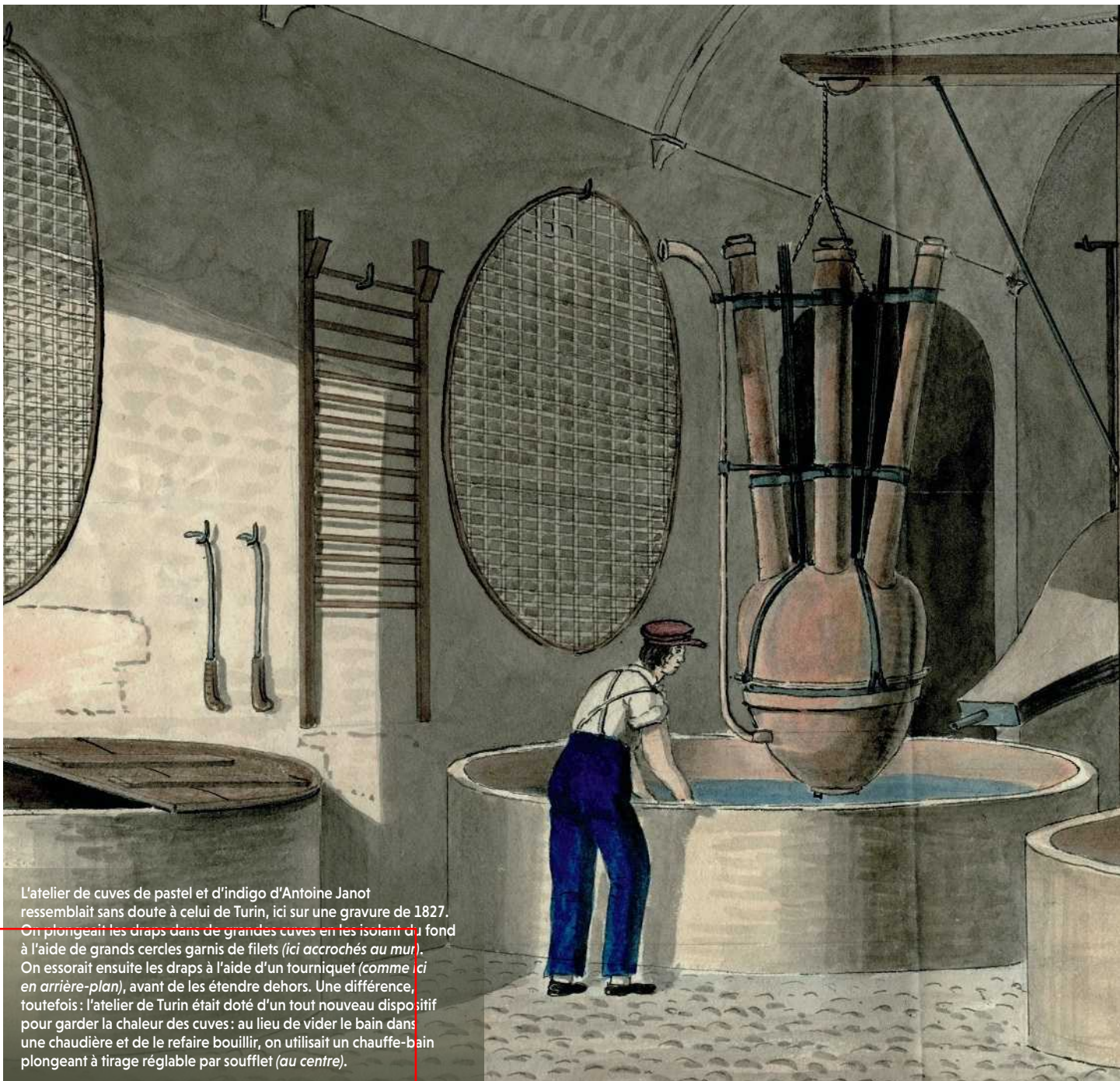
• 12 n° du magazine papier

59€
Au lieu de 82,80€☐ FORMULE PAPIER
+ HORS-SÉRIE• 12 n° du magazine papier
• 4 Hors-série papier79€
Au lieu de 114,40€☐ FORMULE
INTÉGRALE• 12 n° du magazine
(papier et numérique)
• 4 Hors-série
(papier et numérique)
• Accès illimité aux contenus en ligne99€
Au lieu de 174,40€

* Réduction par rapport au prix de vente en kiosque et l'accès aux archives numériques. Durée d'abonnement: 1 an. Délai de livraison: dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/03/2021 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site <https://boutique.pouirlascience.fr>. Photos non contractuelles.

Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société Pour la Science. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. Pour la Science ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à Pour la Science. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante: <https://rebrand.ly/charte-donnees-pls>. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit «RGPD») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pouirlascience.fr.

Créer des couleurs des Lumières



L'atelier de cuves de pastel et d'indigo d'Antoine Janot ressemblait sans doute à celui de Turin, ici sur une gravure de 1827. On plongeait les draps dans de grandes cuves en les isolant du fond à l'aide de grands cercles garnis de filets (ici accrochés au mur). On essorait ensuite les draps à l'aide d'un tourniquet (comme ici en arrière-plan), avant de les étendre dehors. Une différence, toutefois : l'atelier de Turin était doté d'un tout nouveau dispositif pour garder la chaleur des cuves : au lieu de vider le bain dans une chaudière et de le refaire bouillir, on utilisait un chauffe-bain plongeant à tirage réglable par soufflet (au centre).

au siècle

L'ESSENTIEL

> Au XVIII^e siècle, la concurrence était grande entre les producteurs européens de draperie pour conquérir les marchés orientaux.

> Aussi, le mémoire qu'Antoine Janot, teinturier du Languedoc, rédigea en 1744, rassemblant ses recettes de dizaines de couleurs avec échantillons, aurait dû faire sensation si

son auteur n'avait été fiché comme un « aventurier sujet à caution ».

> Aujourd'hui, un collectif international de teinturiers à la recherche de sources durables de colorants reproduit ces recettes et les adapte avec les plantes tinctoriales des différentes régions du monde.

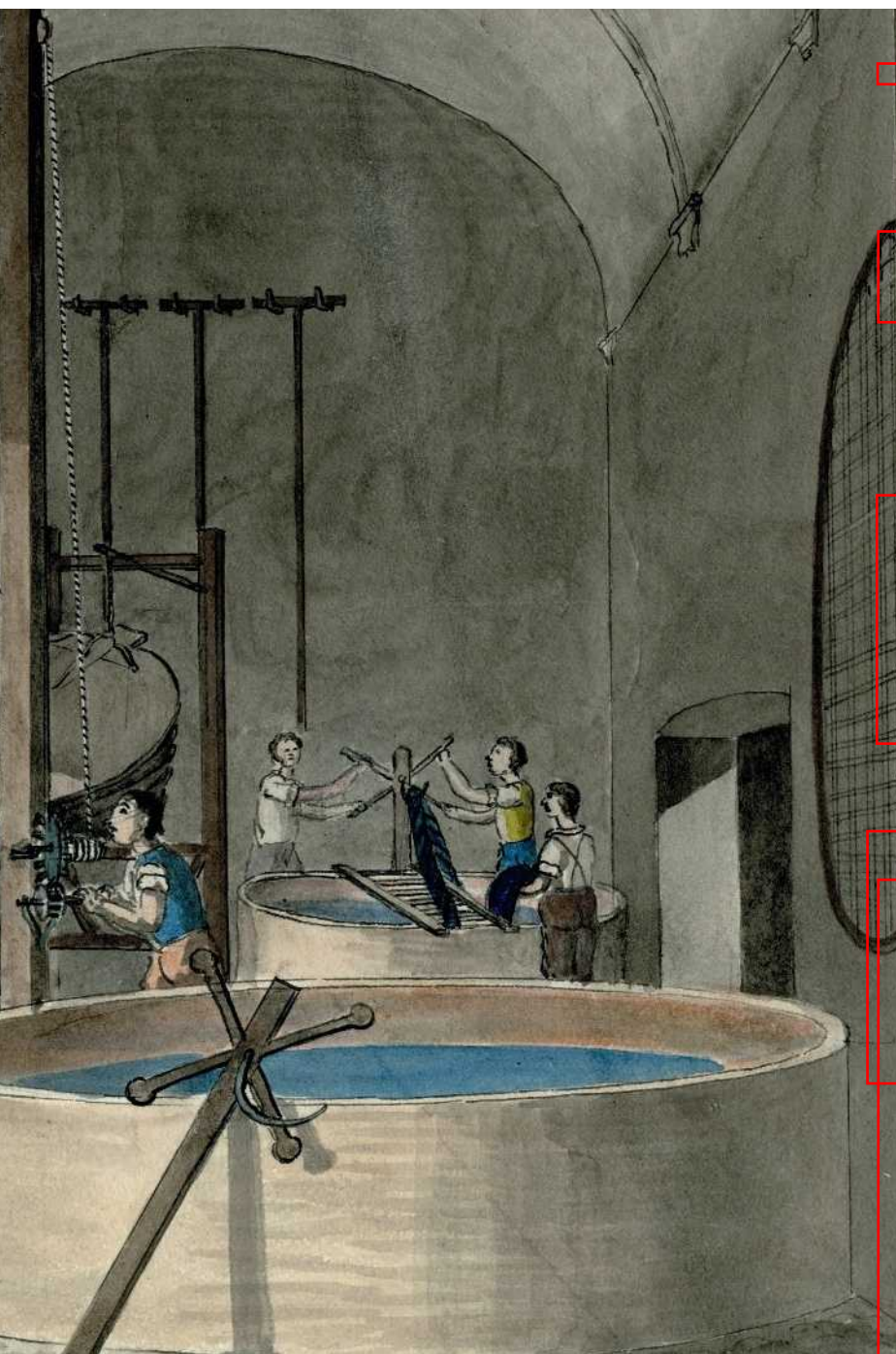
L'AUTRICE



DOMINIQUE CARDON
directrice de recherche émérite du CNRS
au centre Histoire et archéologie des mondes
chrétiens et musulmans médiévaux, à Lyon

En 1744, Antoine Janot, audacieux teinturier du Languedoc, composa le tout premier recueil de recettes pour teindre des draps de laine et doté d'échantillons. Tombé dans l'oubli, ce mémoire est enfin publié et inspire les teinturiers d'aujourd'hui.

Combien d'entre nous, visitant un monument historique ou un musée, prêtent-ils attention au fait que les couleurs de tous les costumes, rideaux, tapisseries, tapis que nous y admirons sont forcément – s'ils datent de plus d'un siècle et demi – des teintures naturelles, extraites de plantes ou de certains insectes? Et les teintures d'aujourd'hui? Qui d'entre nous, immergé dans la foule bariolée du métro, arpentant les trottoirs bondés d'un centre-ville, songe à s'interroger sur les couleurs de tous ces vêtements en mouvement? Comment sont-elles fabriquées, avec quel impact sur l'environnement? Quels produits de dégradation forment tous ces colorants, désormais fabriqués à partir de ressources fossiles, quand ces montagnes de textiles en fin de vie sont enfouies dans des décharges ou incinérées? >



> Trouver des sources durables de colorants, parvenir à les fixer sur les textiles qui égaient et rendent confortable notre quotidien: la teinture est une des activités les plus anciennes de l'humanité. Mais c'est aussi, dans nos sociétés industrialisées, l'une des plus polluantes. D'où le regain actuel d'intérêt pour les potentialités des colorants élaborés par la nature.

Leur souhaitable utilisation à plus grande échelle dans le design et la production textiles suppose d'abord un inventaire et une sélection des ressources, ainsi que l'étude et l'optimisation des procédés de production, de préparation et d'application. Pour une telle recherche, point n'est besoin de partir de zéro: les teinturiers de l'ère des teintures naturelles nous ont laissé une série d'écrits où sont consignées leurs recettes pour obtenir une large gamme de couleurs en grand teint, c'est-à-dire qui résistent au lavage et à la lumière.

Plusieurs teinturiers languedociens du siècle des Lumières ont même voulu compléter leur œuvre de transmission de savoir en apportant des exemples matériels des résultats des procédés décrits, sous la forme de centaines d'échantillons de tissu teints. Ceux-ci constituent aujourd'hui des références précieuses, car leurs mesures et leurs analyses colorimétriques, exprimées dans le système CIE L*a*b* de la Commission internationale de l'éclairage (voir l'encadré page ci-contre), largement utilisé internationalement, offrent désormais une caractérisation objective et précise de tous les noms des couleurs d'autrefois dont les recettes sont décrites dans les manuscrits. Il devient alors possible de vérifier l'exactitude des essais de reproduction de ces couleurs et de s'en inspirer pour concevoir les couleurs de demain. Il était donc grand temps de publier et d'exploiter ces documents.

UN MÉMOIRE CONTRE LES ABUS DE POUVOIR

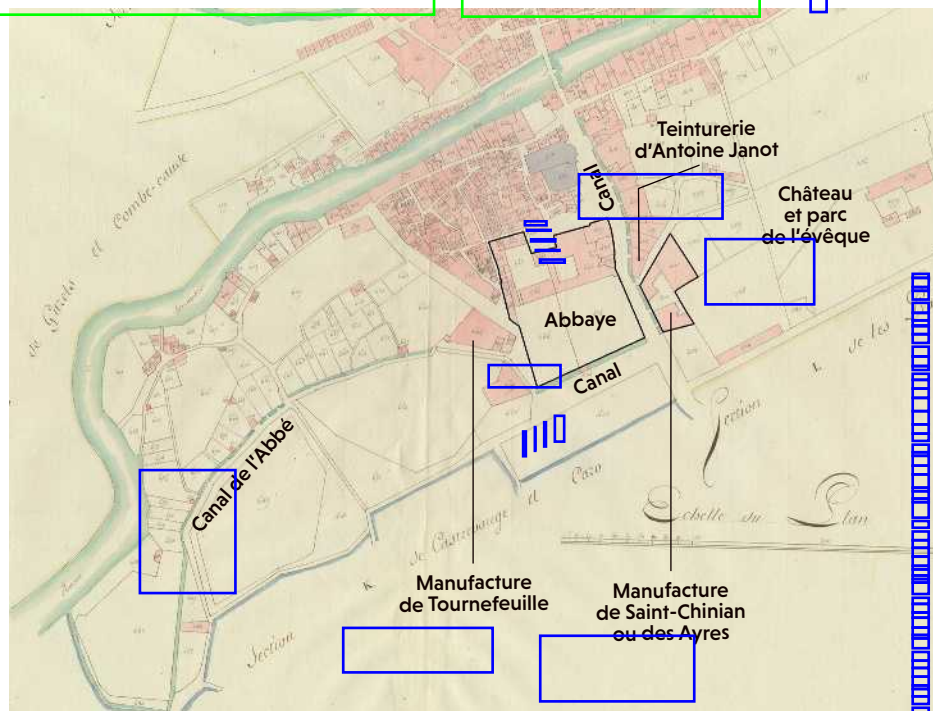
Une première publication en français en 2013, puis en anglais en 2016, d'un de ces manuscrits à échantillons de tissu teints a déjà mis à disposition les recettes correspondant à 167 échantillons de drap de laine teints en différentes nuances. Ces échantillons représentent la production de la teinturerie de la Manufacture royale de Bize en Minervois, au nord de Narbonne, aux environs de 1763 quand Paul Gout, son directeur, a mis à profit le ralentissement des affaires causé par la guerre de Sept Ans pour rédiger quatre *Mémoires de teinture*, dont deux sont illustrés d'échantillons du fin drap de laine appelé «londrin second», best-seller des exportations vers les échelles du Levant – ces ports de la Méditerranée orientale ouverts au commerce entre l'Europe occidentale et l'Empire ottoman.

Janot avait conçu son *Mémoire* comme arme contre les abus d'un inspecteur

Un second manuscrit vient d'être publié: plus ancien d'une vingtaine d'années, il donne les recettes pour 65 couleurs, dont 59 illustrées d'échantillons de londrin second. Signé Antoine Janot, il est daté du 31 mai 1744 à Saint-Chinian, ville drapière à quelques kilomètres au nord de Bize. C'est ce *Mémoire sur les opérations de la teinture du grand et bon teint des couleurs qui se consomment en Levant avec la quantité et qualité des drogues qui les composent* qui a inspiré à Paul Gout la rédaction de ses *Mémoires de teinture*.

Gout a bien connu Antoine Janot: la manufacture royale de Saint-Chinian où il a commencé sa carrière en 1747 jouxte, en effet, la teinturerie de Janot, le long du canal qui approvisionnait en eau les deux établissements. L'entreprise de Janot assurait alors la mise en couleurs de tous les draps fabriqués

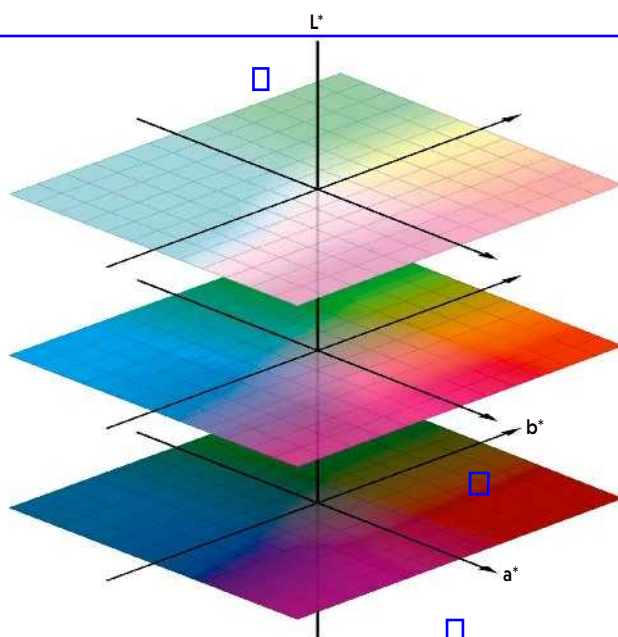
Au XVIII^e siècle, Saint-Chinian était l'un des principaux centres languedociens de production de fins draps de laine. Outre deux manufactures royales, la ville comptait plusieurs drapiers fabricants. Y installer une teinturerie était donc un choix judicieux. Celle d'Antoine Janot était idéalement située, près d'une manufacture et du canal, et avec à l'arrière des prés où les draps étaient mis à sécher.



LE SYSTÈME COLORIMÉTRIQUE CIE L*a*b*

Proposé en 1976 par la Commission internationale de l'éclairage (CIE), l'espace chromatique CIE L*a*b* est le système de caractérisation des couleurs le plus couramment utilisé internationalement pour les couleurs de surface, en particulier pour les textiles. Toute couleur y est définie par trois paramètres, représentés sous la forme de trois coordonnées dans le schéma ci-dessous : la luminance, L*, sur l'axe des gris (du noir, correspondant à L* = 0, au blanc, correspondant à L* = 100) ; l'écart de couleur a* par rapport à un gris de même luminance sur un axe allant du vert (valeurs négatives de a*) au rouge (valeurs positives de a*) ; l'écart de couleur b* par rapport à un gris de même luminance sur un axe allant du bleu (valeurs négatives de b*) au jaune (valeurs positives de b*).

On exprime aussi parfois les couleurs dans le système CIE L*C*h°, où C* est la chromaticité, qui décrit l'intensité de couleur à partir de l'axe des gris (C* = 0 correspond à une saturation nulle, et C* = 100 à une saturation maximale) et h° l'angle de teinte, qui décrit la teinte de façon circulaire (0° = rouge magenta ; 90° = jaune ; 180° = vert ; 270° = bleu ; 359° = presque rouge magenta). Pour mesurer la différence entre un échantillon de couleur de référence et un autre échantillon, la CIE recommande l'utilisation d'une variante du système CIE L*a*b*, la formule CIE ΔE 2000, la mieux adaptée aux applications textiles. Dans ce système, les différences de couleur égales ou inférieures à 1 ne sont pas perceptibles par l'œil humain « normal ». Les différences inférieures à 2 sont considérées comme acceptables dans la plupart des branches industrielles concernées par la reproductibilité des couleurs.



dans la ville, à l'exception de ceux des deux manufactures royales, qui avaient chacune leur propre teinturerie. Leur voisinage offrait jour après jour, de multiples occasions de comparaisons et de discussions entre le maître-teinturier reconnu et le jeune entrepreneur, lorsque leurs longues pièces de draps étaient rincées côte à côte dans la rivière, puis tendues en rames dans les prés à l'arrière des deux ensembles de bâtiments.

Quand Gout arriva à Saint-Chinian, Janot était déjà devenu une célébrité locale, à la réputation ambivalente d'« aventurier sujet à caution, aussi inquiet, aussi haut et aussi dangereux

qu'il est bon teinturier », selon le portrait au vitriol qu'avait brossé de lui l'évêque du lieu, Paul-Alexandre de Guénet, dans une lettre à l'intendant du roi en Languedoc du 4 juin 1744. Cela parce que, conscient de la valeur de son savoir, Janot avait eu l'audace de concevoir son *Mémoire* comme arme de contre-attaque face aux abus de pouvoir d'un inspecteur des manufactures nouvellement nommé pour le département de Saint-Chinian, Bize et Saint-Pons. Son manuscrit sitôt rédigé, Janot l'avait envoyé directement à l'intendant, représentant du roi en Languedoc, pour s'en attirer l'intérêt et la protection et, par son intermédiaire, celle du contrôleur général, principal ministre du roi.

Pari réussi : le *Mémoire* est – on va le voir – un document d'un intérêt exceptionnel. Antoine Janot l'avait rapidement fait suivre d'une dénonciation argumentée des intimidations et harcèlements auxquels se livrait l'inspecteur pour contraindre les drapiers fabricants de la ville à faire teindre leurs draps, à l'encontre des règlements, dans les teintureries des deux manufactures royales où il avait des liens familiaux et des intérêts financiers. Situation typique de ce que l'on nomme aujourd'hui « conflit d'intérêts ». L'affaire avait fait grand bruit jusqu'à Versailles, justement à cause du réseau d'influence de l'inspecteur. Mais une enquête administrative avait été ouverte et l'inspecteur, finalement destitué, était mort peu après.

SOIXANTE-CINQ RECETTES, CINQUANTE-NEUF ÉCHANTILLONS

Cette histoire est révélatrice de l'importance stratégique de la qualité et de la beauté des teintures dans la guerre commerciale acharnée que se livraient, depuis le xvii^e siècle, les producteurs européens de draperie pour la conquête des immenses marchés de l'Empire ottoman. Ce dernier, en effet, ne produisait pas ces tissus de laine aux apprêts raffinés. Si, à cette époque, les pays orientaux étaient déjà experts dans les tissus de soie, les tapis et beaucoup d'autres types de textiles, aucun pays d'Orient n'avait encore jamais maîtrisé la longue et complexe filière technique aboutissant à un drap de laine – une technologie héritée des Grecs et des Romains. Aussi, dès le Moyen Âge, les draps de laine étaient-ils la plus importante marchandise d'échange contre les importations de produits précieux d'Orient.

Pour comprendre l'attention qu'a immédiatement suscitée jusqu'en haut lieu le *Mémoire* de Janot, il faut se rappeler qu'il est antérieur de plusieurs années au premier traité publié sur ce domaine technique : l'*Art de la teinture des laines et des étoffes de laine en grand et petit teint* de Jean Hellot, édité en 1750, sans échantillons de teinture. Ce qu'a produit Antoine Janot, >

À LA RECHERCHE DES BLEUS D'ANTOINE JANOT

Les premières couleurs présentées dans le *Mémoire* d'Antoine Janot sont les huit degrés de son échelle des bleus. Il les obtenait d'une cuve de pastel agranat – un colorant concentré obtenu à partir de coques de pastel broyées et doublement fermentées – renforcée en ajoutant du pigment d'indigo importé des Antilles. Pour réduire le pigment ainsi obtenu sous sa forme *leuco*, soluble et donc utilisable pour teindre les tissus, il entretenait dans la cuve une fermentation bactérienne à l'aide de son de blé, tout en maintenant le caractère alcalin requis par des ajouts de chaux fraîchement éteinte. Le *Mémoire* décrit un procédé à grande échelle, la cuve contenant plusieurs milliers de litres d'eau très chaude à laquelle étaient ajoutées des centaines de kilos de pastel agranat et, un peu après, plusieurs kilos d'indigo naturel. Sachant qu'aujourd'hui on ne produit presque plus de pastel agranat, suffirait-il d'utiliser les proportions de Janot à plus petite échelle pour reconstituer son procédé à l'identique et retrouver son

nuancier de bleus ? Ou, sinon, pourrait-on proposer des procédés alternatifs ? Pour répondre à ces questions, un groupe international d'experts en teintures naturelles a lancé des expériences de teinture en bleus avec toutes les sources et formes d'indigo disponibles, par différents procédés de cuve biologiques, traditionnels ou non, à différentes échelles. Tous les essais ont été réalisés sur la même qualité de fin drap de laine, fabriqué actuellement en Languedoc. Il présente les mêmes caractéristiques colorimétriques qu'un échantillon de londrin second (le drap que teignait Janot), conservé aux mêmes archives que le *Mémoire*.

Au Japon, l'artiste et teinturière Hisako Sumi a fidèlement reproduit le procédé de Janot mais à échelle réduite, dans une cuve de 20 litres. Elle a aussi expérimenté le même procédé de cuve (associant le son de blé comme agent réducteur et la chaux comme alcalinisant) avec deux sources d'indigo traditionnelles au Japon – le *sukumo*, du compost de feuilles de renouée des teinturiers (*Persicaria tinctoria*), et le pigment d'indigo extrait du *Ryu Kyu Ai* de l'archipel d'Okinawa (*Strobilanthes cusia*) – dans des cuves de 200 et 100 litres respectivement ; et enfin, avec de l'indigo d'*Indigofera tinctoria* importé d'Inde, dans une cuve de 50 litres.

En France, l'artisan teinturier David Santandreu a expérimenté deux procédés biologiques différents : l'un,

Au Mali, l'artiste textile Aboubakar Fofana reproduit les bleus d'Antoine Janot en utilisant des cuves traditionnelles de 350 litres, remplies d'un bain produit à partir des feuilles pilées puis séchées de la liane-indigo.



> c'est, tout simplement, le plus ancien ensemble connu au monde de recettes de teinture des draps de laine illustrées d'échantillons. Ces recettes étaient par ailleurs organisées systématiquement, dans l'ordre des opérations techniques permettant d'obtenir toutes les gammes de coloris concernées par les Règlements royaux sur le grand teint.

Le mémoire de Janot était, de surcroît, le premier manuel d'application pratique de ces règlements, édictés à partir de 1667 pour répondre à la volonté de Colbert de rehausser la qualité des productions textiles françaises. En effet, bien qu'élaborés en concertation avec les meilleurs teinturiers du royaume, ces règlements se contentaient d'imposer l'usage de

certaines ingrédients et d'en interdire d'autres en fonction des solidités à la lumière et au lavage des différents colorants, sans fournir d'indications techniques.

Antoine Janot était à la manœuvre des cuves et des chaudrons depuis son plus jeune âge, à l'école de son père, maître-teinturier à Carcassonne puis à la manufacture royale de Bize : il était convaincu de la pertinence de ces règlements, à la fois par sa longue expérience et par son impressionnante compréhension empirique de la chimie tinctoriale. Son *Mémoire* représente ainsi l'âge classique de la teinture et un niveau d'excellence technique qui, en une vingtaine d'années, a assuré le triomphe des draps du Languedoc au Levant :



En France (à droite, David Santandreu sortant des pièces de tissu d'une cuve de pastel et d'indigo par fermentation biologique) et ailleurs, comme au Mali ou au Japon, des teinturiers multiplient les expériences pour reproduire les bleus d'Antoine Janot par différents procédés (à gauche, la gamme des bleus du plasticien franco-malien Aboubakar Fofana). Certains partent de plants de pastel (au centre en haut), d'autres de pigment d'indigo extrait de diverses plantes, comme le *Strobilanthes* (ci-contre, une pâte pigmentaire d'indigo de *Strobilanthes* de la Japonaise Hisako Sumi).

en cuve de 30 litres, conforme au procédé de Janot (son de blé et chaux) mais combinant deux sources de bleu, la renouée des teinturiers et de l'indigo d'Inde ; le second, dans une cuve de 230 litres, avec comme sources d'indigo des pigments de pastel et de renouée des teinturiers de sa production, comme agents réducteurs du sirop de dattes et une décoction de henné, et de la chaux pour réguler l'alcalinité de la cuve.

Au Canada, Charlotte Kwon et Tim McLaughlin ont travaillé uniquement avec de l'indigo d'Inde, dans deux cuves de 15 litres, l'une à la banane et l'autre au henné (comme agents réducteurs), alcalinisées à la chaux. Leur

idée est de proposer de nouveaux ingrédients faciles à obtenir, comme des bananes trop mûres mises au rebut dans la filière alimentaire ou du henné, produit en abondance et disponible partout. Enfin, au Mali, l'artiste textile Aboubakar Fofana a travaillé avec une cuve traditionnelle, de 350 litres, où l'indigo est apporté par de petites coques de feuilles de la liane-indigo (*Phileoptera cyanescens*) – *gala yiri* en bamana kan –, qui servent également d'agent de fermentation, l'alcalinité du bain étant maintenue à l'aide de lessive de cendres ou de chaux.

Tous les échantillons de bleus obtenus ont alors fait

l'objet de mesures colorimétriques, avec le même spectrophotomètre, dans les mêmes conditions, puis Iris Brémaud, au Laboratoire de mécanique et génie civil (CNRS-université de Montpellier), a calculé leurs différences de couleurs par rapport aux échantillons des bleus de Janot dans le système CIE ΔE 2000. Après quelques échanges sur les résultats et ajustements des procédés, toutes les cuves ont permis de produire des bleus qui, dans ce système, différaient de ceux de Janot d'une valeur comprise entre 1 (seuil de détection par l'œil humain) et 2 (valeur de tolérance courante dans l'industrie).

La recherche continue, mais ces expériences montrent déjà que des teintures bleues ayant les mêmes caractéristiques colorimétriques que les bleus d'un teinturier languedocien du XVIII^e siècle peuvent être obtenues aujourd'hui, de cuves d'indigo biologique de différents volumes, montées avec de l'indigo extrait de toutes les plantes à indigo qui ont traditionnellement été utilisées à grande échelle par les teinturiers en indigo, dans toutes les régions du monde.

D. C.

Cette exigence de qualité devait combler l'appétit des clientèles orientales pour de nouvelles couleurs

bel exemple de cette « économie de la qualité » théorisée par le sociologue Lucien Karpik à la fin des années 1980, dans laquelle l'ajustement entre l'offre et la demande ne passe pas tant par le prix que par le jugement sur la qualité du produit. « La vivacité de la couleur des draps en cause le débit », écrivait déjà l'économiste français Jacques Savary en 1679 dans *Le Parfait Négociant*.

En même temps, cette exigence de qualité devait aussi combler l'appétit des clientèles orientales pour de nouvelles couleurs, toujours plus éclatantes ou subtiles et raffinées. L'écarlate devait devenir une « écarlate de feu », les verts clairs plus pâles, gris bleutés à l'instar des céladons importés d'Extrême-Orient. Les

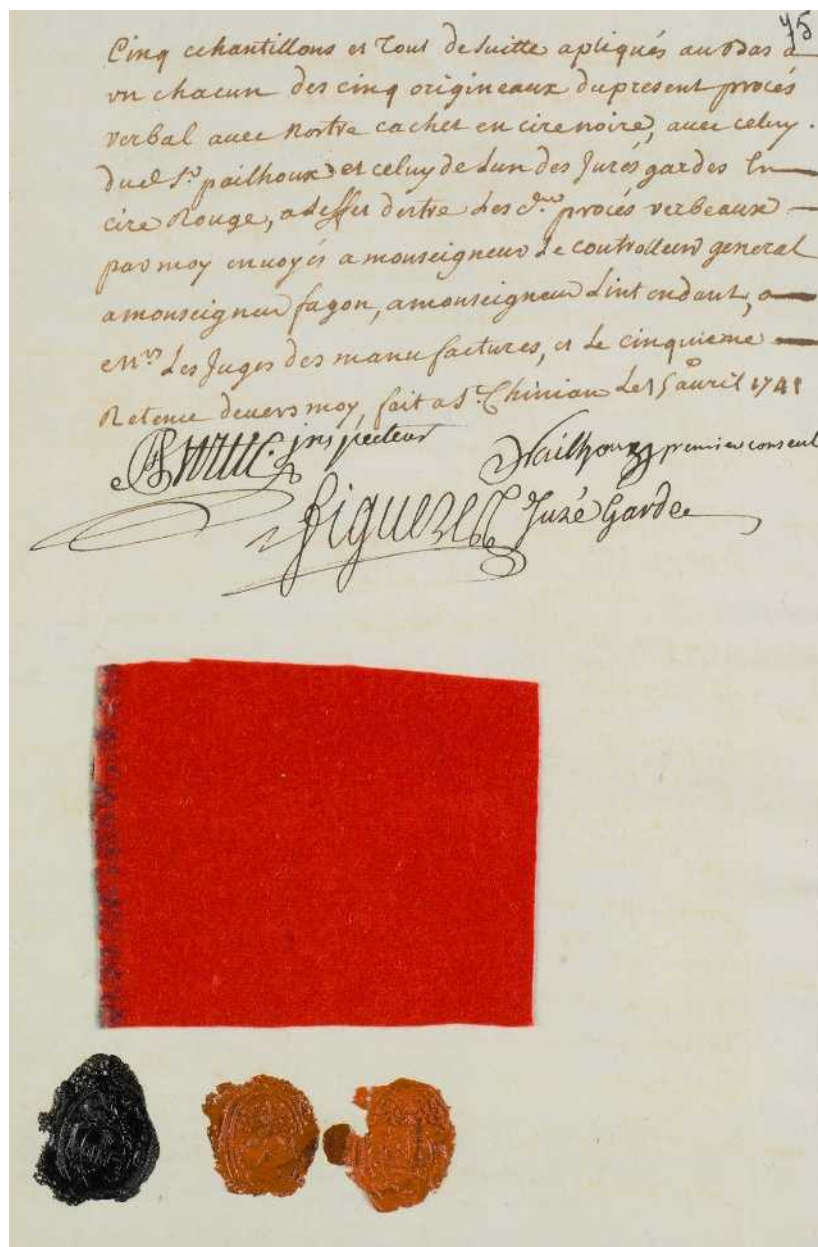
> teinturiers anglais, non assujettis au harnais de la réglementation, recouraient largement, pour ces nouveaux coloris, aux bois tinctoriaux importés des Amériques, dont les belles couleurs se sont malheureusement révélées fugaces, ou au bricolage chimique de l'alcalinité des bains de teinture, ou encore à des procédés nouvellement inventés: mordantage pour fixer et aviver les rouges de cochenille, à l'étain dissous dans l'acide nitrique, ou encore bleu de Saxe, qui n'est autre qu'une dissolution d'indigo dans l'acide sulfurique. Antoine Janot, lui, s'était efforcé d'obtenir ces nouvelles gammes de couleurs par le perfectionnement des procédés de grand teint, ouvrant ainsi la voie à toutes sortes de recherches dont Paul Gout, une génération plus tard, offrirait une remarquable synthèse.

DIX DRAPS TEINTS PAR JOUR

Une abondante documentation consacrée à la draperie et à la teinturerie est conservée dans les archives de l'ancienne province de Languedoc. Les recherches sur la vie et la carrière d'Antoine Janot ne révèlent pas seulement une personnalité hors du commun, avec un parcours de vie aux péripéties dignes d'un roman de Diderot. Elles mettent en lumière le niveau impressionnant de l'activité drapière de la jurande de Saint-Chinian, qui regroupait tous les clients drapiers fabricants de Janot. En 1730, ils étaient onze.

À eux tous, ils faisaient battre dans la ville et ses environs 140 grands métiers à drap à deux tisserands et produisaient 3 592 pièces de londrins seconds. En comparaison, l'une des deux manufactures royales, celle des Ayres, que dirigerait plus tard Paul Gout, en produisait 952, ainsi que 41 pièces de londrins premiers – encore plus fins que les londrins seconds – et l'autre manufacture royale, dite de Tournefeuille, fabriquait 660 pièces de londrins seconds. Ces pièces prêtes à être expédiées vers le Levant devaient mesurer entre 17,82 et 20,19 mètres de longueur pour 1,39 mètre de largeur; elles pesaient environ 10 kilos et demi – à sec. En fait, il faut les imaginer à la teinture, mouillées et donc au moins trois fois plus lourdes, fumantes et bouillantes, pour comprendre la pénibilité du métier.

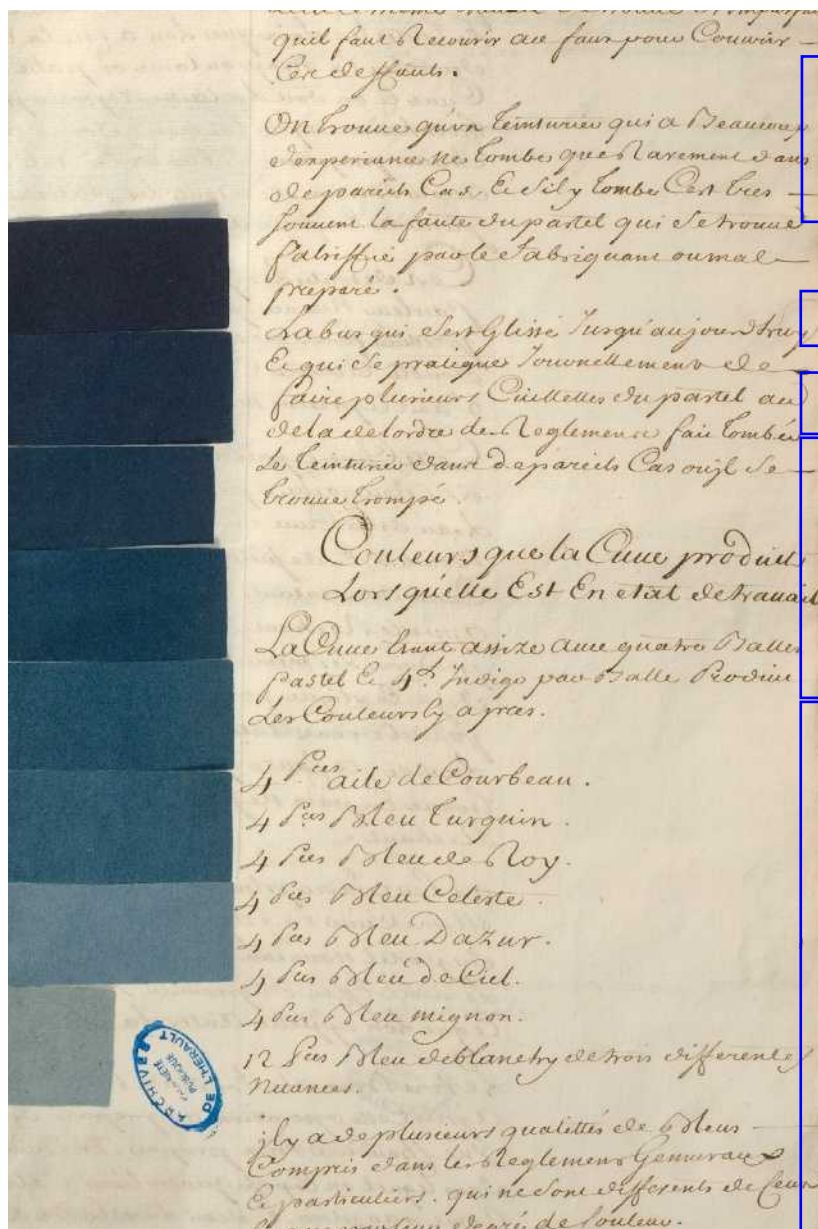
En effet, les draps étaient teints non pas avant tissage, mais en pièce, après foulage, grattage et tondage du tissu, et ce pour plusieurs raisons. D'une part, on économisait ainsi de grandes quantités de produits de teinture coûteux: on ne teignait en fait que les deux faces du tissu, pas le cœur. D'autre part, la laine une fois filée était enduite de colle (pour consolider le «fil de chaîne», qui soutenait la trame du tissage) en plus de la graisse qu'elle avait reçue pour faciliter le filage. Aussi, tisser en non-teint était-il beaucoup plus rapide et



facile, les fils cassant moins souvent. De plus, les manipulations qui suivaient le tissage (dégraissage, foulage, etc.) auraient pu endommager les couleurs. Enfin, teindre en pièce sur le tissu dégraissé assurait une belle vivacité, une intensité et une uniformité des couleurs.

Si, comme il semble, Janot était alors le seul maître-teinturier en activité à Saint-Chinian – cela a probablement été le cas durant la majeure partie de sa carrière –, cela signifie qu'en 1730, sa teinturerie a vu passer 3 592 pièces de drap, soit presque 10 à teindre par jour en ne décomptant aucun jour de repos. Travail titanesque! Mais aussi des données importantes dans la perspective actuelle d'un retour des teintures naturelles sur la scène économique. Une teinturerie comme celle de Janot

Le 15 avril 1741, l'inspecteur Pierre Astruc confisqua cet échantillon d'écarlate de feu d'Antoine Janot comme «terne et affamée» et l'ajouta sous scellé à la copie du procès-verbal envoyé à l'intendant du Languedoc Jean Le Nain. Les tests de «débouillis» qui s'ensuivirent révélèrent pourtant que le tissu était parfaitement teint. Néanmoins, le stratagème d'Astruc priva le drapier commanditaire de Janot d'une vente substantielle.



La gamme de bleus d'Antoine Janot comportait huit teintes, chacune accompagnée d'un échantillon de drap. Elles portent les noms suivants, du plus foncé au plus clair : aile de courbeau, bleu turquin, bleu de roy, bleu céleste, bleu d'azur, bleu de ciel, bleu mignon et bleu deblanchy.

utilisés par les inspecteurs de la draperie pour révéler les teintures de faux teint.

DANS LES PAS DES TEINTURIERS D'AUTREFOIS

La beauté de ces échantillons de teinture inspire depuis quelque temps un milieu de passionnés de couleurs, designers et teinturiers, et fournit des thèmes de travaux aux étudiants de plusieurs formations universitaires et professionnelles. Pour faciliter ces recherches, il est nécessaire d'extraire l'essentiel des données techniques qu'ont partagées les teinturiers auteurs de ces couleurs.

C'est dans ce but qu'a été entreprise une série de publications bilingues – car la tendance est mondiale – de « Cahiers » (Workbooks), qui se veulent des outils pratiques, permettant de suivre les évolutions dans la création des couleurs issues des colorants naturels, durant les deux derniers siècles de leurs applications industrielles massives. Le prototype, consacré aux couleurs d'Antoine Janot, illustre le nom de chaque coloris par une photo de l'échantillon teint correspondant et résume sous forme de tableau la description du procédé donnée dans le document source. Les données quantitatives y sont converties en proportions calculées par rapport au poids de tissu sec à teindre. Le tableau donne en plus les caractéristiques colorimétriques de chaque échantillon, dans les deux systèmes complémentaires CIE L*a*b* et CIE L*C*h°.

La publication de ces cahiers va suivre l'ordre chronologique des sources qui seront exploitées. Ces documents constitueront ainsi autant de jalons de l'évolution des gammes de couleurs offertes par les teinturiers. Ce faisant, ils révéleront les apparitions ou disparitions de certains noms de nuances ou de couleurs, la stabilité ou les glissements des espaces colorimétriques délimités par les noms des couleurs. Ils permettront aussi d'explorer les liens entre ces phénomènes et l'évolution, d'une part, des approvisionnements en sources colorantes et, d'autre part, des techniques de teinture.

Les documents extraordinaires que nous ont légués les teinturiers du passé pourraient ainsi retrouver bientôt leur fonction et leur pouvoir initiaux. Leur fonction, en tant que sources de données techniques introuvables ailleurs et de guides pratiques. Leur pouvoir, comme sources d'inspiration et de création pour notre temps. ■

BIBLIOGRAPHIE

D. Cardon et I. Brémaud, **Le Cahier de couleurs d'Antoine Janot / Workbook, Antoine Janot's Colours**, CNRS Éditions, 2020.

D. Cardon, **Des couleurs pour les Lumières – Antoine Janot, teinturier occitan (1700-1778)**, CNRS Éditions, 2019.

D. Cardon, **Mémoires de teinture – Voyage dans le temps chez un maître des couleurs**, CNRS Éditions, 2013.

était un établissement d'importance comparable aux teintureries industrielles à façon qui se sont maintenues, certaines jusqu'à présent, en Languedoc. Y travaillaient avec Janot plusieurs ouvriers, compagnons et apprentis teinturiers.

La qualité de leurs couleurs était largement appréciée. À plusieurs reprises, des échantillons de drap appartenant à des clients réguliers de Janot ont été inclus dans des rapports adressés à l'Intendant du Languedoc comme exemples d'excellence pour telle ou telle couleur : écarlate de feu, jujube, céladon, rouge de garance. Les bleus foncés sortis des cuves de pastel et indigo de Janot lui permettaient de faire des noirs qui se distinguaient parmi les plus solides de la province, capables de résister aux bains concentrés en produits agressifs des « débouillis », les tests

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

DES BALISES QUI ÉMETTENT DU BON HASARD

Des sources publiques de nombres aléatoires, infalsifiables et contrôlables *a posteriori*, sécuriseraient de nombreux protocoles, comme les tests de médicaments, les tirages au sort du loto ou le choix des jurés d'assises.

L'AUTEUR



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



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

Produire un hasard parfait avec une absolue certitude est difficile; au sens mathématique, c'est même impossible (voir l'encadré 1 page ci-contre). Cependant, on admet que les méthodes à base de mécanique quantique créent un hasard probablement correct, et même que certaines méthodes purement algorithmiques donnent des séquences aléatoires si proches du hasard parfait qu'on peut les utiliser en toute tranquillité.

Nous examinerons ici la création sécurisée d'aléas publics et la mise à disposition d'un hasard infalsifiable, utile dans de nombreuses situations. Cette création de hasard sera le fait de balises aléatoires (en anglais: *random beacons*), des phares numériques émettant des nombres (binaires ou autres) aléatoires que tout le monde peut voir et que nul ne peut fausser et anticiper. On utilise parfois le terme «source publique d'aléas», mais nous préférons le terme de balise aléatoire.

PILE OU FACE PAR TÉLÉPHONE...

Le jeu de pile ou face par téléphone pose ce problème du partage d'une source de hasard. Vous voulez jouer mais vous n'avez pas confiance en la personne au bout du fil, ni elle en vous. Il est donc impossible que l'un de vous lance la pièce et indique le résultat à l'autre. Il faudrait utiliser un fournisseur extérieur en qui vous auriez confiance tous les deux et qui ne pourrait être influencé ou acheté par aucun des joueurs. Ce fournisseur indépendant pourrait être une balise aléatoire. Pour satisfaire vos attentes, elle doit posséder certaines propriétés.

(a) Elle doit émettre périodiquement, à intervalle de temps fixé, des nombres aléatoires que des entités éloignées peuvent observer (par Internet) simultanément en ayant la certitude d'observer la même chose.

(b) La source doit être impossible à prédire et à truquer; autrement dit, il faut qu'interviennent dans le résultat des éléments que personne (ni l'émetteur ni les joueurs) ne puisse anticiper ou manipuler.

(c) Il faut que chacun puisse vérifier après une émission quels nombres ont été émis, pour chaque date d'émission et cela avec la certitude que rien n'a été modifié après l'émission, ni par la balise elle-même ni bien sûr par un acteur étranger à la balise. C'est la vérifiabilité *a posteriori*.

Avec une telle balise aléatoire, jouer à pile ou face par téléphone est facile. Les joueurs décident que le bit produit à un instant donné, convenu entre eux, fixera le résultat du tirage: par exemple 0 pour *pile*, 1 pour *face*; et attendent l'émission de ce bit par la balise, qui désignera le gagnant sans tricherie possible.

Si un site de jeux sur internet prétend tirer seul au hasard les gagnants d'une loterie ou distribuer des cartes à partir d'un jeu bien mélangé, il n'est pas raisonnable de lui faire confiance, car il peut faire gagner qui il veut et manipuler les distributions de cartes... et cela s'est déjà produit. En revanche, s'il indique précisément comment, à partir d'une balise aléatoire sûre et indépendante, il déduit les gagnants ou obtient le mélange du jeu de cartes, et que chacun peut vérifier qu'il respecte le protocole fixé, il ne pourra pas tricher.

IMPOSSIBLE HASARD PARFAIT

Les méthodes algorithmiques de production de suites aléatoires ne donnent pas des suites aléatoires au sens fort défini par Per Martin-Löf en 1965. En effet, « être produit par un algorithme » entraîne que celui qui détient l'algorithme peut anticiper ce qui sera produit. De plus, ce qui est produit par un algorithme peut être compressé en un fichier de taille au plus égale à la taille du programme de l'algorithme ; or ce qui est authentiquement aléatoire est incompressible. Les décimales de π , en particulier, sont produites par des algorithmes tirés de séries numériques classiques et ne constituent donc pas une suite aléatoire au sens fort.

Les méthodes physiques (loterie, bruit thermique, mécanique quantique, etc.) ne produisent des suites aléatoires au sens fort que (1) sous



l'hypothèse que les théories associées (par exemple la mécanique quantique) sont les bonnes théories qui régissent la physique du mécanisme producteur, ce qui est impossible à prouver, et (2) si le dispositif physique producteur a été correctement monté et ne subit aucune manipulation, et en particulier n'est victime d'aucune porte dérobée. Il se

peut donc que les méthodes quantiques produisent de véritables suites aléatoires, mais l'affirmer est impossible car cela reviendrait à affirmer que la mécanique quantique est une théorie qui ne sera jamais remise en cause, et que l'on a bien modélisé le dispositif physique utilisé, deux affirmations risquées, comme le montre l'histoire de la physique.

Il en va de même plus généralement pour tous les sites internet qui proposent des jeux où le hasard intervient, et cela concerne aussi les loteries nationales, lotos et autres jeux d'argent organisés à grande échelle. Tous devraient proposer des procédures de tirage non plus fondées sur des dispositifs physiques locaux que certains ont su manipuler, mais sur des balises aléatoires sécurisées dont l'utilisation serait rendue parfaitement contrôlable *a posteriori* grâce aux données enregistrées.

L'utilisation de balises aléatoires concerne d'autres domaines et devrait y être obligatoire. Si une entreprise qui produit des médicaments assure qu'elle teste au hasard les lots mis en circulation, il est souhaitable que le système de tirage au sort qu'elle utilise pour ces contrôles soit fondé sur un tirage aléatoire extérieur, car c'est la seule façon d'être certain que l'entreprise ne choisisse pas les cobayes à sa convenance.

Lorsqu'un tribunal désigne au hasard des jurés ou qu'une procédure politique choisit aléatoirement des représentants, il serait souhaitable, pour garantir l'absence de biais et de manipulations, que la procédure elle aussi se fonde sur une balise aléatoire indépendante publique et autorisant des contrôles *a posteriori*.

D'autres exemples concernent les applications décentralisées, par exemple liées aux blockchains et aux monnaies cryptographiques. Ils confirment l'importance de bonnes balises

aléatoires et, depuis quelques années, le sujet préoccupe les informaticiens et les cryptologues qui ont, nous le verrons, élaboré des idées subtiles afin que personne ne triche.

Explorons pas à pas le problème de la création de balises aléatoires sûres.

LA MÉTÉO, UNE BALISE ALÉATOIRE ?

Notre premier exemple de balise élémentaire donnant un aléa public pour le pile ou face par téléphone s'appuie sur la météo. La balise serait déduite des publications sur internet de Météo-France. Elle produirait un bit par jour en se fondant sur la température à midi relevée par Météo-France à la station météorologique de Paris-Montsouris. Cette température serait arrondie au dixième de degré inférieur et un 0 (correspondant à *pile*) serait produit si le premier chiffre après la virgule de la température est pair et un 1 (correspondant à *face*) serait produit si le premier chiffre est impair.

Un site internet donne cette température « officielle » et peut donc, sans intermédiaire, servir de balise aléatoire : www.infoclimat.fr/observations-meteo/temps-reel/paris-montsouris/07156.html. La température à midi y est chaque jour définitivement inscrite sur le site et reste ensuite accessible. On trouve par exemple les données suivantes : 11,8 °C pour le 28 novembre 2019 à midi, qui donnerait un 0, donc *pile*; 9,5 °C pour le 29 novembre 2019 à midi, qui donnerait un 1, donc *face*; 7,8 °C pour >

> le 30 novembre 2019 à midi, qui donnerait un 0, donc *pile*; 3,5 °C pour le 1^{er} décembre 2019 à midi, qui donnerait un 1, donc *face*; 5,2 °C pour le 2 décembre 2019 à midi, qui donnerait un 0, donc *pile*. La suite des tirages est donc, à partir du 28 novembre: *pile-face-pile-face-pile*. On peut opérer un tirage à pile ou face par téléphone tous les jours à midi.

Cette balise est très probablement aléatoire: il n'y a aucune raison de penser que les nombres pairs (ou impairs) soient favorisés, ni qu'aucune séquence particulière de *pile* ou *face* soit plus fréquente qu'une autre de même longueur. Elle est bien imprévisible, car les prévisions météorologiques pour Paris ne sont pas assez précises pour qu'on puisse savoir à l'avance ce qui va venir comme premier chiffre après la virgule de la température à midi. La balise est vérifiable *a posteriori*: tout le monde peut aller consulter le site mentionné pour voir ce qui y est indiqué. On peut raisonnablement faire confiance au sérieux des opérateurs du site pour qu'ils ne changent pas les données inscrites et qu'ils les maintiennent accessibles assez longtemps.

Trois problèmes persistent cependant avec cet aléa public.

(1) Prévoir le résultat du tirage devient possible quand on s'approche de midi, car la température varie continûment. Il faudrait donc convenir au moins quelques heures avant midi que l'on va jouer à pile ou face et attendre midi pour que s'effectue le tirage.

(2) Le procédé n'est pas rapide. En considérant d'autres lieux de relevé, d'autres heures,

d'autres données (pression, hygrométrie, etc.) on pourrait faire mieux, mais on resterait limité à quelques bits par minute au plus.

(3) Peut-on faire totalement confiance à ce qui est publié par le site de Météo-France? Est-ce qu'il ne se pourrait pas qu'un employé, par négligence, erreur de manipulation ou soudoyé par l'un des joueurs, modifie le relevé publié pour produire des températures autres que celles vraiment relevées? L'un des joueurs ne pourrait-il pas s'introduire sur le site et en modifier les chiffres publiés? Nous verrons par la suite que nous pouvons pallier cette incertitude sur la stabilité et la sécurité de ce qui est inscrit.

Les cours de bourses, les taux de change, les résultats sportifs, le contenu de ce qui est publié par les médias (journaux, radio, télévisions, pages web), sont d'autres sources publiques d'aléas et vérifiables *a posteriori*. Certaines sont assez rapides, mais aucune ne donne une assurance de stabilité supérieure aux données publiées par Météo-France. Avec elles, on aura donc en définitive un aléa public ayant les mêmes imperfections qu'avec Météo-France.

AUTRES SOURCES

PARTAGEABLES D'ALÉAS

Conscients de l'intérêt de disposer de meilleures sources publiques d'aléas, certains sites internet en proposent. Ainsi, le site random.org rend disponible des nombres aléatoires de toutes sortes depuis 1998.

Ce site, conçu et réalisé par Mads Haahr, du Trinity College, à Dublin, propose des nombres aléatoires qu'il qualifie de «véritables», car

2

LES FONCTIONS DE HACHAGE

Une fonction de hachage est une fonction qui, à un x donné (une suite de caractères ou un nombre) de longueur quelconque, associe une valeur $f(x)$ de taille fixe, l'« empreinte de x ». Le passage de x à $f(x)$ se fait par une série d'opérations qui commencent en découpant x en morceaux (d'où le nom de hachage). Ces morceaux sont rassemblés et emmêlés de façon à obtenir un brouillage aussi parfait que possible de l'information présente dans x . Pour la fonction classique de hachage SHA-256, la longueur de $f(x)$ est de 256 bits.

Les fonctions de hachage à usage cryptographique, comme SHA-256, ont les propriétés suivantes.

- (a) Elles sont « à sens unique » : le passage de x à $f(x)$ est un calcul rapide, mais pour un y donné, trouver x tel que $y = f(x)$ est impossible en pratique.
- (b) Il est impossible en pratique de trouver x et x' différents avec $f(x) = f(x')$.
- (c) Elles produisent des valeurs assimilables à des valeurs aléatoires uniformes et, en particulier, même si x et x' sont deux suites de caractères n'ayant qu'un seul caractère différent, les valeurs $f(x)$ et $f(x')$ sont sans aucun lien apparent.

Exemple simple. On transforme la donnée x en une suite de 0 et de 1 que l'on découpe en morceaux de longueur 8. Les morceaux sont ensuite additionnés comme des nombres en base 2. On ne garde du résultat que les quatre chiffres centraux :
 $x = 000100101001010100100101$
 $\rightarrow 00010010 + 10010101 + 00100101 = 11001100$
 $\rightarrow f(x) = 0011$.
 Cet exemple est bien sûr trop simple pour avoir les propriétés (a), (b) et (c).

Exemples d'utilisation.

- Authentifier un utilisateur sans garder son mot de passe (voir l'illustration ci-contre).
- Assurer l'intégrité d'un fichier x . Si l'on dépose un gros fichier sur un serveur, on lui associera son empreinte $f(x)$, beaucoup plus courte. Celui qui téléchargera x s'assurera que x lui parvient sans erreur et en totalité en calculant l'empreinte du fichier qu'il aura reçu, laquelle doit être la même que celle publiée sur le site.
- Engagement d'une donnée sans la révéler. Vous choisissez un nombre que vous ne devez plus changer car, par exemple, vous allez participer à une enchère simultanée; vous calculez son empreinte et la communiquez à l'organisateur. Le site

d'enchère recueille les empreintes des autres participants. Les empreintes sont toutes rendues publiques et ceux qui les ont proposées ne peuvent donc plus rien changer. À cet instant, personne ne connaît les enchères proposées (car f est impossible à inverser), et donc, même si les soumissions ne sont pas simultanées, ceux qui participent ignorent les propositions des autres. La phase d'enchère terminée, chacun révèle son nombre. Le calcul des empreintes des nombres révélés permet de vérifier qu'il n'y a pas eu de changements. Tout s'est donc déroulé comme si chacun avait écrit sa proposition sur un papier et avait placé celui-ci dans une enveloppe cachetée qui n'a été ouverte qu'au dernier moment.

En cryptographie, les fonctions de hachage sont conçues avec soin et soumises à des tests variés. Des compétitions pour concevoir les nouvelles générations de fonctions de hachage sont organisées. Ainsi est née la fonction SHA-3, disponible depuis 2015 (voir <https://en.wikipedia.org/wiki/SHA-3>).

tirés du bruit atmosphérique capté par radio. On peut par exemple obtenir, à la demande, le résultat d'un lancer de deux dés, ou le mélange d'un paquet de 52 cartes, ou même une image aléatoire faite de pixels noirs et blancs.

Random.org affirme extraire 12 000 bits par seconde du bruit atmosphérique, et c'est à partir d'eux que les autres services sont fournis. Si on le souhaite, les nombres que le site communique sont mémorisés, mais ce n'est pas très facile car le site n'est pas conçu pour jouer le rôle de balise aléatoire sécurisée émettant périodiquement. Par ailleurs, on ne sait pas vraiment comment le bruit atmosphérique est capté et transformé en données aléatoires. Utiliser random.org pour les applications n'exigeant pas une certitude d'honnêteté et de sécurité totale sera une assez bonne solution, mais, tel qu'il est conçu, ce site internet n'est pas en mesure de fournir assez de garanties pour des applications où par exemple des sommes importantes d'argent seraient en jeu.

LA BALISE DU NIST: UNE LISTE DE 512 BITS CHAQUE MINUTE

C'est sans doute pourquoi l'institut américain des normes et de la technologie, le NIST (National Institute of Standards and Technology), travaille sur ce problème depuis 2011 et propose une balise aléatoire, conçue cette fois comme un émetteur public et périodique d'aléas dont les données produites sont protégées et restent consultables sans limitation de temps. La balise du NIST publie chaque minute une liste de 512 bits

aléatoires (voir <https://beacon.nist.gov/home>). Et le NIST encourage la création d'autres balises indépendantes.

Le NIST utilise les bits émis par un dispositif quantique. Il fournit un moyen de vérifier que les bits publiés ne sont pas modifiés une fois publiés et affirme que son site est protégé contre toute intervention extérieure, ce qui assure que personne ne manipule le mécanisme de production ou de publication.

Si l'on considère que le NIST est un tiers de confiance parfait, on peut utiliser ce qu'il émet sa balise. Par exemple, si des sites de jeux qui utilisent des nombres aléatoires vont les y rechercher en indiquant comment, on pourra avoir confiance en eux et vérifier qu'il n'y a pas tricherie, car il est improbable que le NIST se laisse corrompre par eux. Malgré tout, comme le notent de nombreux spécialistes, le NIST ne donne aucun moyen pour contrôler que les bits qu'il publie sont produits par des phénomènes quantiques et qu'aucune manipulation n'est opérée par l'institut sur ce qu'il émet. Le NIST ayant déjà été soupçonné de tentatives de tramage liées à des outils de génération d'aléas (voir https://en.wikipedia.org/wiki/Dual_EC_DRBG), il est impossible de recommander d'utiliser sa balise pour les applications exigeant une sécurité absolue.

Remarquons que, sur sa page, le NIST indique en rouge qu'il ne faut pas utiliser sa balise pour choisir des mots de passe. La recommandation est tout à fait justifiée et s'applique à tous les générateurs publics d'aléas. En effet, les données publiées restent accessibles (c'est nécessaire pour mener des contrôles *a posteriori*), ce qui signifie que si votre mot de passe a été engendré par une balise publique, quelqu'un cherchant à le deviner a accès aux mêmes nombres aléatoires, ce qui facilite son travail. Pour vos mots de passe, utilisez des générateurs privés et si possible indépendants de votre machine!

D'autres sites se présentent comme des balises aléatoires sécurisées et réussissent à faire mieux que la balise du NIST.

Le Laboratoire de sécurité computationnelle et de cryptographie appliquée de l'université du Chili (<https://random.uchile.cl/en/>) propose une balise dont les bits dépendent à la fois d'une source quantique locale et de données extérieures (données sismiques, radio de l'université du Chili, blockchain Ethereum, Twitter). Ce site est l'une des meilleures balises actuelles: il utilise le principe décrit plus loin et dans l'encadré 3.

Le site brésilien d'Inmetro, l'Institut national de la métrologie et de la qualité (www.inmetro.gov.br/) et le projet collaboratif *League of entropy* (www.cloudflare.com/leagueofentropy/) offrent divers outils de génération de hasard privé et public. Là encore, ils s'appuient

AUTHENTIFICATION SANS CONSERVATION DES MOTS DE PASSE

Première connexion : enregistrement de l'identifiant de l'utilisateur et de l'empreinte du mot de passe



Jean-Paul choisit le mot de passe JP1234 et le communique au serveur



Le serveur calcule l'empreinte du mot de passe reçu, trouve X2e9qq92 et mémorise le couple Jean-Paul/X2e9qq92.

Connexion ultérieure : vérification par le serveur que celui qui se connecte est la bonne personne



Jean-Paul se connecte au serveur et indique son identifiant ainsi que son mot de passe



Le serveur calcule l'empreinte du mot de passe reçu et vérifie qu'elle est bien la même que celle du couple qu'il a enregistré Jean-Paul/X2e9qq92

3

LES FONCTIONS
VÉRIFIABLES À DÉLAI

Savoir qu'un calcul ne peut pas être fait rapidement est parfois utile. Les fonctions vérifiables à délai, ou VDF (pour *verifiable delay function*), ont été introduites en cryptographie il y a trois ans par Dan Boneh, Joseph Bonneau, Benedikt Bünz et Ben Fisch, des universités Stanford et de New York. Il est probable que ce nouveau concept cryptographique jouera un rôle important dans l'avenir.

Une VDF, comme une fonction de hachage, prend une donnée quelconque et la transforme en une donnée aléatoire, mais pour cela elle opère un calcul complexe impossible à mener rapidement et qui, en particulier, ne se parallélise pas. Il faut par exemple 30 secondes à la VDF pour faire le calcul, même en utilisant les plus puissants outils disponibles. De plus, connaissant le résultat d'un calcul fait par la VDF, il est facile de vérifier qu'il est correct.

Bien utilisées, ces VDF rendent impossible pour un site émetteur d'une balise aléatoire de tricher. L'idée est que le site qui produit ses propres données et les mélange à des données extérieures pourrait tricher s'il savait quelles données émettre pour que, combinées avec celles reçues, il produise un résultat biaisé. Or si le site émetteur apprend trop tardivement ce qui résulte des données qu'il mélange avec d'autres, il lui sera impossible de choisir ce qu'il propose dans le mélange pour fausser le résultat. Détaillons le protocole.

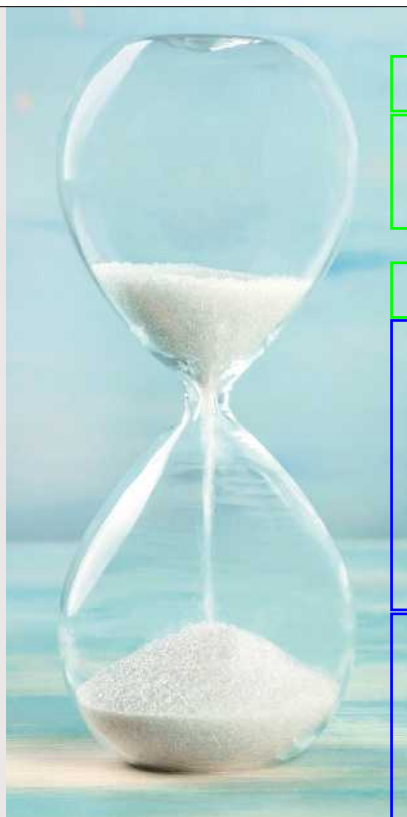
Imaginons une balise qui émet des séquences de bits aléatoires toutes les 60 secondes en mélangeant celles qu'elle propose (et qu'elle peut truquer) à d'autres reçues périodiquement de l'extérieur (impossibles à truquer, car publiques). Voici le détail du protocole entre l'instant t et l'instant $t + 60$ secondes que va appliquer la balise aléatoire, procédure vérifiable *a posteriori* par tous.

De l'instant t à l'instant $t + 30$

La balise reçoit des données $d_1, d_2, d_3, \dots, d_n$ qu'elle va chercher sur d'autres balises ou qu'on lui envoie. Ces données sont rendues publiques.

À l'instant $t + 30$

La balise fixe sa propre donnée Q (tirée par exemple d'un dispositif quantique) et en publie



l'empreinte $f(Q)$ (où f est une fonction de hachage).

La balise regroupe les données reçues et la sienne en une donnée D .

De l'instant $t + 30$ à l'instant $t + 60$
La balise calcule le résultat de la VDF appliquée à D .

La VDF ne peut pas faire le calcul plus rapidement qu'en 30 secondes. Personne d'autre, durant ces 30 secondes, ne peut le faire, car Q est resté secret.

À l'instant $t + 60$

La balise publie le résultat R du calcul et la donnée Q restée jusque-là cachée.

Avec une telle procédure, chacun peut vérifier instantanément que :

- s'il avait envoyé une donnée, elle a été prise en compte dans D .
- la balise n'a pas changé sa donnée Q entre l'instant $t + 30$ et l'instant $t + 60$.
- le calcul de R a été fait comme il fallait.

Celui qui propose une donnée ne peut pas biaiser le résultat, car quand il propose sa donnée, il ne dispose pas de Q qui y sera mélangée. La balise elle-même ne peut pas biaiser le résultat ; en effet, quand elle commence le calcul avec D , elle ne peut plus changer sa donnée Q (qui est dans D) car elle en a publié l'empreinte, et elle ne sait pas avant l'instant $t + 60$ l'effet que sa donnée Q produit sur le résultat aléatoire final.

Aujourd'hui, de nombreux travaux sont menés pour trouver des VDF les plus simples possible et les plus sûrs. (voir <https://vdfresearch.org/>).

> sur des méthodes cryptographiques avancées pour sécuriser les émissions.

Les balises évoquées sécurisent et améliorent la vérifiabilité *a posteriori* de leurs émissions. Quelles sont les méthodes mises en œuvre ?

GARANTIR L'IMPOSSIBILITÉ
DE MODIFICATION

La première idée est la signature. Les données aléatoires produites peuvent être signées par un procédé cryptographique qui assure que ce qu'on lit sur le site internet n'a pas été écrit ou réécrit par un autre acteur que le site producteur. Les signatures numériques sont vérifiables par tous, mais seul l'organisme producteur (qui indique sa clé publique permettant le contrôle) peut (grâce à sa clé privée) produire les signatures.

Pour garantir que les nombres publiés ne soient pas modifiés après coup, on peut utiliser une fonction de hachage (voir l'encadré 2). En même temps que la balise aléatoire publie le k -ième nombre aléatoire N_k , elle publie un autre nombre E_k qui est l'« empreinte », par une fonction de hachage cryptographique, de $E_{k-1}N_k$ (la concaténation de E_{k-1} et de N_k). Cette publication lie toutes les publications antérieures, car la publication à l'étape k dépend de celle à l'étape $k-1$, qui elle-même dépend de la publication à l'étape $k-2$, etc. Le procédé rend visible toute modification qui serait apportée aux N_k après leur publication.

NOUVEAUX PERFECTIONNEMENTS

Une méthode pour assurer que les bits utilisés ne soient pas soumis à des manipulations est l'utilisation combinée de plusieurs balises aléatoires indépendantes. Comment le faire et qu'est-ce que cela donne comme garantie ?

- Considérons par exemple quatre balises produisant chacune 512 bits toutes les minutes; notons-les A, B, C et D;

- Pour connaître le résultat combiné des quatre balises, vous opérez une addition modulo 2 des bits des quatre séries: pour chaque k , vous regardez si le nombre de 1 produits en position k par les balises A, B, C et D est pair; si c'est le cas, le bit en position k de la combinaison est 0; sinon, c'est 1.

La séquence de 512 bits obtenue est un mélange très intéressant. En effet, d'une part, la qualité du hasard produit sera bonne si l'un au moins des sites produit un hasard convenable. D'autre part, pour truquer cette combinaison des quatre balises, il faudrait que l'attaquant truque les quatre sites émetteurs à la fois, ou en truque un en ayant connaissance de ce que les autres publient à l'instant du truchage.

Les blockchains, dont celles des monnaies cryptographiques bitcoin ou ether, ont été proposées comme sources d'aléas publics

BIBLIOGRAPHIE

K. Pietrzak, **Simple verifiable delay functions**, dans *IACR Cryptology ePrint Archive*, n° 627, 2018.

D. Boneh et al., **Verifiable delay functions**, dans H. Shacham et A. Boldyreva (éd.), *Advances in Cryptology – CRYPTO 2018*, Springer, 2018.

C. Pierrot et B. Wesolowski, **Malteability of the blockchain's entropy**, *Cryptography and Communications*, vol. 10(1), pp. 211-233, 2018.

A. Lenstra et B. Wesolowski, **Trustworthy public randomness with stoth, unicorn, and trx**, *Int. J. of Appl. Crypt.*, vol. 3(4), pp. 330-343, 2017.

J. Bonneau et al., **On Bitcoin as a public randomness source**, *IACR Cryptology ePrint Archive*, n° 1015, 2015.

La balise aléatoire de Mads Haahr : www.random.org

La balise aléatoire du NIST : <https://beacon.nist.gov>

La balise aléatoire de l'université du Chili : <https://random.uchile.cl/en/>

Un site collectant les derniers travaux sur les VDF : <https://vdfresearch.org/>

infalsifiables et vérifiables *a posteriori*. L'utilisation de fonctions de hachage au sein

des pages ajoutées périodiquement aux fichiers blockchains semble introduire un hasard dans ces blockchains qui par ailleurs sont publiques et infalsifiables car conservées en de multiples exemplaires lisibles par tous. Cependant, une étude publiée en 2018 par Cécile Pierrot, de Sorbonne Université, à Paris, et Benjamin Wesolowski, de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), a montré qu'en réalité de telles sources pourraient être manipulées par des acteurs assez puissants. Même si cela peut avoir un certain intérêt d'utiliser l'aléa des blockchains en le mêlant à d'autres sources, une balise aléatoire ne doit pas se fonder sur cette méthode seule.

Plus intéressant, le cryptologue Arjen Lenstra, de l'EPFL, et Benjamin Wesolowski, ont récemment introduit deux idées nouvelles susceptibles de renforcer la confiance envers les balises aléatoires modernes.

La première idée est de permettre aux acteurs qui le souhaitent de participer à ce qui est produit. Entre deux émissions successives, on permettrait à quiconque le souhaite d'envoyer des nombres à la balise. Tous ces nombres seraient regroupés en un seul dont on calculerait l'empreinte, et l'on mêlerait celle-ci aux résultats du mécanisme local (quantique ou autre) de la balise, par exemple par le biais d'une somme modulo 2 comme quand on mélange plusieurs balises. De plus, le site de la balise autoriserait la vérification que les nombres envoyés sont bien pris en compte.

Le fait de pouvoir envoyer ses propres données assurerait que, même si tous les autres intervenants et la balise forment une association dont le but est de vous tromper, elle ne réussira pas. Le fait que vous interveniez ne vous donne heureusement pas le pouvoir de manipuler la balise et cela même en vous coordonnant avec tous les intervenants extérieurs, car la composante locale (avec une somme modulo 2) rend vaine toute tentative de biais.

DES FONCTIONS DONT LE CALCUL NÉCESSITE UN DÉLAI

La seconde idée est plus subtile, mais la plus importante peut-être pour assurer qu'aucune manipulation n'est possible, même par la balise. Elle utilise le concept de *fonction vérifiable à délai* ou VDF (le sigle anglais), objet d'intenses recherches depuis trois ans.

Une VDF est une fonction qui, lorsqu'on lui confie un fichier quelconque, le transforme en une séquence de chiffres aléatoires, comme le fait une fonction de hachage (voir l'encadré 3). Mais en plus, elle le fait de telle façon que le calcul ne peut pas être mené en moins d'une certaine durée (par exemple 30 secondes), et que la vérification de son

résultat final est quasi instantanée: calculer est long, vérifier est rapide.

Même si une balise aléatoire combine des sources extérieures, selon la première idée, un problème persiste qu'une VDF va résoudre. Le problème est qu'au moment où la balise mélange les données extérieures (qu'elle ne contrôle pas) et une donnée locale, par exemple présentée comme quantique, elle pourrait s'arranger, connaissant les données extérieures, pour que la combinaison avec ce qu'elle introduit (prétendument tiré d'un mécanisme quantique), conduise à un résultat final biaisé comme elle le souhaite. En clair, à cause de la donnée locale qu'elle introduit, la balise garde une possibilité de tricherie. Comment rendre impossible cette manipulation?

Voici la solution d'Arjen Lenstra et Benjamin Wesolowski. La balise exige que les données externes qu'elle prendra en compte lui soient parvenues durant les 30 premières secondes de l'intervalle de temps de 60 secondes entre deux émissions (en t , et en $t+60$). Elle-même, à l'instant $t+30$, engage sa donnée (par exemple quantique) en publiant son empreinte. La balise combine les données extérieures et la sienne et, à partir du résultat, effectue le calcul de la VDF qui exige 30 secondes. Le résultat de ce calcul est connu et publié par la balise à l'instant $t+60$ (il ne peut pas l'être avant) avec la donnée dont la balise n'avait communiqué que l'empreinte à l'instant $t+30$. Tout le monde peut vérifier instantanément que le calcul fait par la balise est correct (c'est la propriété de vérifiabilité instantanée) et qu'elle n'a pas changé sa donnée (puisque'elle en avait publié l'empreinte).

Les acteurs extérieurs n'ont pas pu agir sur le résultat, car ils ne connaissaient pas la donnée de la balise, restée secrète jusqu'à $t+60$, et que le résultat en dépend.

Plus important, la balise n'a pas pu proposer une donnée conduisant à un résultat qui l'arrange. En effet, dès l'instant $t+30$, elle a figé la donnée qu'elle proposait (en publiant l'empreinte) et il lui a fallu 30 secondes pour savoir comment cette donnée combinée aux autres données venant de l'extérieur (qu'elle ne connaissait pas entièrement avant $t+30$) produisait le résultat. Dans le protocole, ni un fournisseur de données externes ni la balise elle-même ne peuvent tricher. Le résultat dépend de toutes les données et il est donc vraiment aléatoire, si un seul des fournisseurs de données (local ou externe) en livre qui soient aléatoires.

On dispose ainsi de méthodes cryptographiques pour concevoir et réaliser des balises aléatoires fiables et sécurisées. Rien ne semble interdire ou limiter les applications exigeant des balises parfaitement sécurisées. On peut désormais exiger des sites internet de jeux, des loteries et lotos divers qu'ils se fonderont de manière transparente sur de telles balises. ■

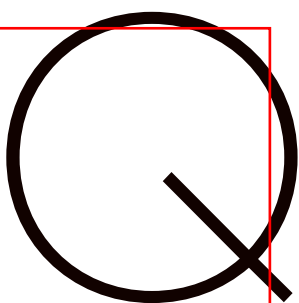
L'AUTEUR



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

OÙ SE CACHE LE TRIFLUOROMÉTHYLE ?

Un artiste-plasticien rend hommage à un nouveau type de réaction chimique, respectueux de l'environnement, qui aidera à préparer des composés inédits comportant un groupe trifluorométhyle, souvent intéressant en pharmacologie.



u'ont en commun l'antidépresseur Prozac, l'antipaludéen Iariam, l'anti-VIH Sustiva... ? Outre leur effet dirigé contre quelque chose, leurs principes actifs (respectivement fluoxétine, méfloquine, éfavirenz et fipronil) sont tous dotés d'un groupe chimique trifluorométhyle (CF_3). À la liste précédente, on aurait pu ajouter un autre « produit » qui partage cette particularité : une œuvre récente (voir page ci-contre) de Patrick Barrès, enseignant-chercheur au Laboratoire de recherche en audiovisuel – savoirs, praxis et poétiques en art, à l'université de Toulouse ! Où est le trifluorométhyle ?

Tout commence dans les laboratoires de Géraldine Masson, de l'Institut de chimie des substances naturelles, à l'université Paris-Saclay, et celui d'Emmanuel Magnier, de l'Institut Lavoisier, à l'université de Versailles-Saint-Quentin. Avec leurs collègues, ils ont récemment mis au point une méthode de synthèse de composés trifluorométhylés, à l'aide de réactions plus respectueuses de l'environnement.

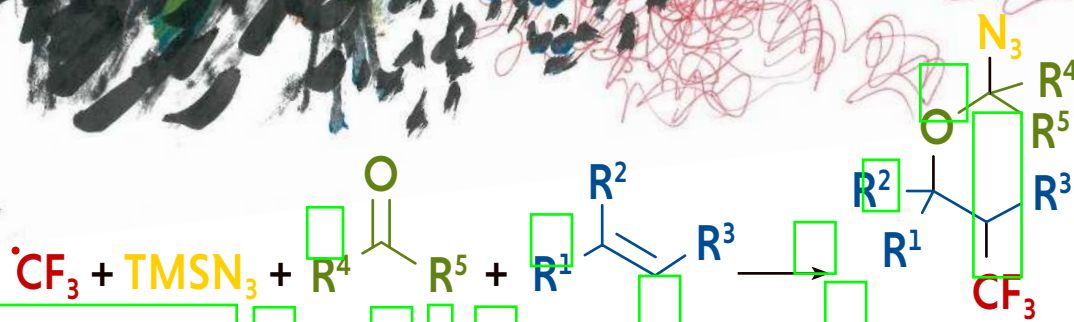
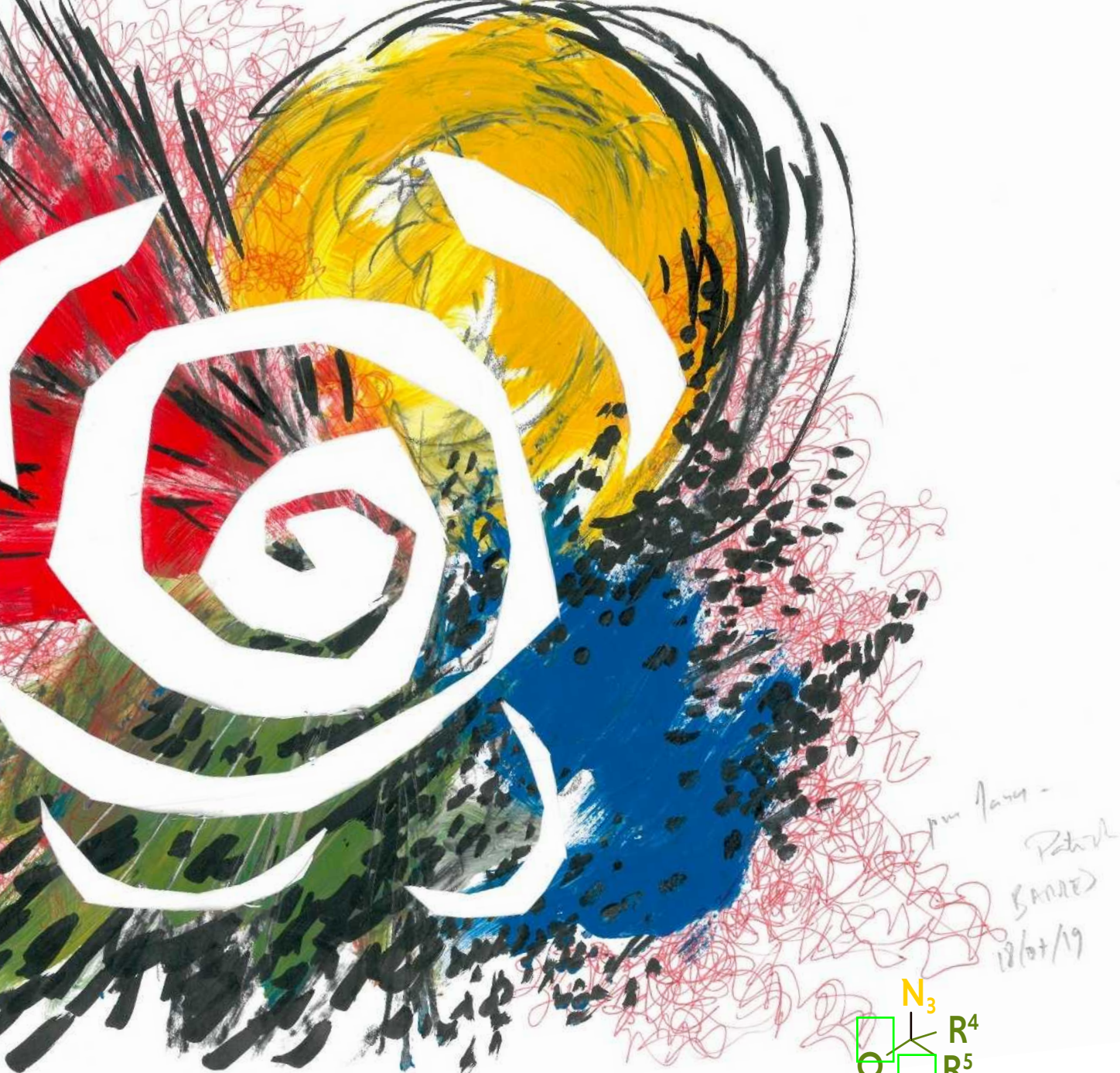
La piste suivie est celle de la photocatalyse d'oxydo-réduction dont l'un des pionniers fût, au début des années 1980, par Alain Deronzier, de l'université de Grenoble. L'idée est d'utiliser un photocatalyseur qui, éclairé, passe dans un état excité et peut alors donner ou recevoir un électron et ainsi démarrer une réaction, voire plusieurs, et dans le cas qui nous intéresse un processus dit « radicalaire » (un seul électron est engagé).

Patrick Barrès s'est emparé du résultat des chimistes et a souhaité le représenter symboliquement. De fait, les quatre zones colorées correspondent à autant de

réactifs mis en jeu : des alkènes, c'est-à-dire des molécules carbonées à double liaison (*en bleu*) ; un composé carbonylé, comportant une double liaison entre un atome de carbone et un d'oxygène (*en vert*) ; le triméthylsilyl azide ($(\text{CH}_3)_3\text{SiN}_3$, noté TMSN_3 (*en jaune*) ; enfin, le réactif d'Umemoto qui apporte le groupe trifluorométhyle (*en rouge*). La spirale découpée brouille les cartes et, en apportant une dynamique à l'œuvre, renvoie à la réaction elle-même. Quelle est-elle ?

Grâce au photocatalyseur, ici le $[\text{Ru}(\text{bpy})_3](\text{PF}_6)_2$, le rouge et le bleu s'associent, le jaune et le vert font de même, et





les deux paires interagissent enfin pour former le composé recherché (voir la formule ci-dessus). Tous les réactifs sont réunis en une seule fois, la réaction étant dépendante d'une part de la quantité de chacun et, d'autre part, de leur réactivité.

Pour optimiser le résultat, on utilise une lumière adaptée au photocatalyseur, en l'occurrence du bleu pour le ruthénium (Ru). Les conditions requises sont plutôt douces, sans chauffage, et les produits utilisés sont peu toxiques (on utilisait auparavant des réactifs à base d'antimoine, beaucoup plus nocif). Au final, la production de déchets est limitée

au maximum et le coût énergétique notablement réduit.

Revenons à l'œuvre. L'artiste précise: «L'ensemble s'articule autour d'un nœud, défini comme le sujet de la peinture et comme une métaphore de la fusion des éléments sous l'effet de la réaction photocatalysée.» Divers systèmes graphiques, comme les hachures, les taches éparpillées, l'enchevêtrement de lignes fines... ajoutent un effet vibratoire empêchant l'œil d'accommoder et que d'aucuns, chimistes en premier lieu, pourraient rapprocher des vibrations qui agitent toute molécule, notamment lors d'une réaction.

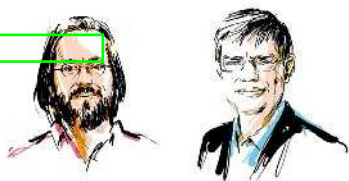
Mais on ne doit pas y voir, Patrick Barrès insiste, une représentation figurative de ce qui se passe dans les récipients des chimistes. Tout n'est qu'évocation, suggestion... une vraie (al)chimie douce qui n'a rien contre quoi que ce soit. ■

G. Levitre et al., *Org. Lett.*, vol. 21(15), pp. 6005-6010, 2019.



L'auteur a publié:
**Pollock, Turner, Van Gogh,
Vermeer et la science...**
(Belin, 2018)

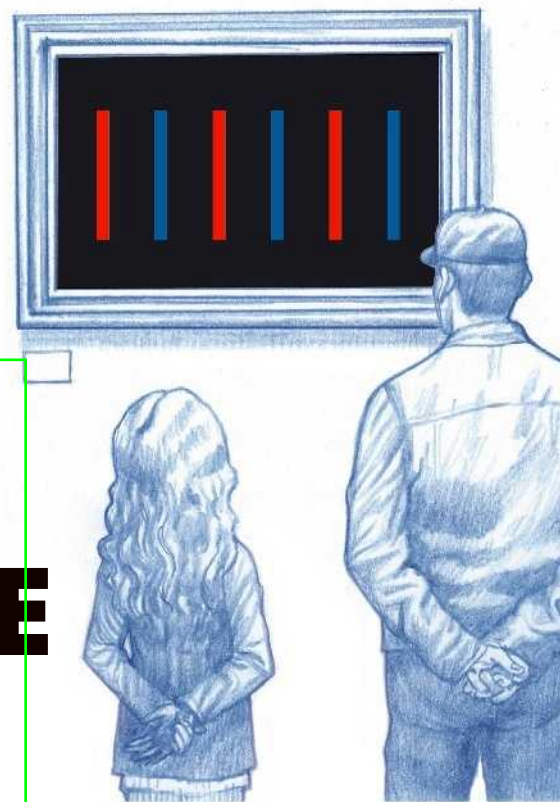
LES AUTEURS



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

DE LA PROFONDEUR AVEC DU ROUGE ET DU BLEU

Certaines images colorées, bien que planes, sont perçues comme ayant du relief. L'effet trouve son explication dans les aberrations chromatiques et la physiologie de l'œil humain.



Goethe l'a mentionné dans son *Traité des couleurs* de 1810: quand nous regardons certaines images composées de rouge et de bleu, les parties rouges semblent saillantes par rapport au plan de l'image, tandis que les parties bleues paraissent en creux (voir l'illustration ci-dessus). Cet effet a été utilisé comme procédé pour donner en peinture une impression de profondeur.

L'origine de l'effet est en grande partie physique et tient aux aberrations chromatiques de l'œil, semblables à celles des objectifs photographiques de mauvaise qualité: selon leur couleur, ou plus exactement leur longueur d'onde, les rayons

lumineux ne sont pas déviés de la même façon lorsqu'ils passent de l'air à l'intérieur de l'œil ou de l'objectif.

QUAND LA LUMIÈRE SE DISPERSE

Les aberrations chromatiques résultent de la dispersion de la lumière, observée par exemple lorsqu'un prisme de verre décompose un pinceau de lumière blanche. À chacune des interfaces air-verre, la composante bleue de la lumière est davantage déviée que sa composante rouge. Plus généralement, la lumière émerge du prisme en étant dispersée selon les couleurs de l'arc-en-ciel.

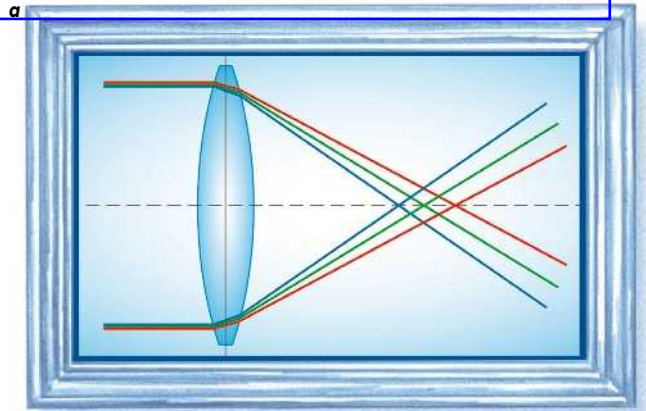
Pour comprendre ce phénomène et être quantitatif, nous avons besoin de

l'indice de réfraction de chaque milieu traversé, rapport entre la vitesse de la lumière dans le vide et la vitesse de la lumière dans le milieu. Ce nombre caractérise l'intensité de l'interaction de la lumière avec le milieu et dépend de la longueur d'onde lumineuse, et c'est de lui dont dépend directement l'angle de déviation des rayons.

L'air, peu dense, a un indice moyen de 1,0003, proche de 1, et son caractère dispersif est en conséquence faible. Ce n'est pas le cas du verre, comme l'illustre l'expérience avec le prisme, ou, pour notre sujet, de la cornée: l'indice moyen de celle-ci est 1,37, très proche de celui de l'eau (1,33), mais il varie de 0,012 entre la lumière rouge (0,65 micromètre

ABERRATIONS CHROMATIQUES

L'indice de réfraction optique, dont dépend l'angle de déviation des rayons lumineux lorsqu'ils traversent l'interface de deux milieux, varie selon la longueur d'onde. Ainsi, lorsqu'un faisceau de lumière composite traverse une lentille convergente, les rayons se focalisent en des points plus ou moins distants selon leur longueur d'onde, donc selon leur couleur : la partie rouge de la lumière se focalise le plus loin, la partie bleue se focalise le plus près (a). Cette « aberration chromatique » de base a pour conséquence d'autres aberrations de même nature, par exemple du bleu qui, dans une image, bave sur le bord gauche d'un objet et du rouge qui bave sur son bord droit (b).



Les parties rouges des images paraissent saillantes par rapport aux parties bleues. Cet effet est dû aux aberrations chromatiques affectant les rayons lumineux quand ils entrent dans les yeux.

de longueur d'onde) et la lumière bleue (0,45 micromètre de longueur d'onde), aux deux bouts du spectre visible. Selon les lois de Descartes, avec un rayon incident à 45 degrés, on obtient un écart de 0,3 degré entre les rayons réfractés rouge et bleu.

Cet écart est du même ordre de grandeur que la dispersion dans les verres communs. Il paraît faible, mais a pourtant des conséquences pour les systèmes optiques fondés sur la réfraction. Par exemple, une lentille éclairée par un faisceau parallèle de lumière rouge et bleue focalisera la composante bleue en un point plus proche d'elle que la composante rouge (voir l'encadré ci-dessus). Cela signifie que les conditions pour former

l'image nette d'un objet bleu diffèrent de celles requises pour un objet rouge situé à la même distance.

On s'en aperçoit sur certaines photographies réalisées avec des objectifs de piètre qualité. Par exemple, si l'on a réglé l'objectif pour que la composante bleue d'un objet soit nette, alors la composante rouge sera floue et bavera sur le fond. Cet effet est bien visible lorsque la photographie présente des séparations franches entre un objet très clair et un fond sombre, ou inversement : le bord n'est pas net, mais paraît légèrement irisé.

Si l'on s'écarte du centre de l'image, ce qui correspond à des rayons lumineux d'angles d'incidence plus élevés, à l'effet de flou s'ajoute un décalage entre la partie

bleue et la partie rouge de l'image. L'irisation des bords des objets clairs s'accroît donc et on distingue un bord bleu d'un côté et rouge de l'autre !

Les aberrations chromatiques constituent un défaut que l'on peut corriger par des moyens optiques ou numériques, mais les céphalopodes (poules, calmars, etc.) l'ont peut-être tourné en avantage. Ces animaux n'ont qu'un seul type de cellules rétiniennes et ne voient donc qu'en

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



> « noir et blanc ». Leur comportement montre pourtant qu'ils distinguent les couleurs. D'après une étude publiée en 2016 par les Américains Christopher et Alexander Stubbs, la forme très particulière de la pupille de ces mollusques aurait pour effet d'amplifier les aberrations chromatiques dans leur œil. Cela permettrait aux céphalopodes, à partir des différences de netteté des images formées sur leur rétine, de discriminer les couleurs.

LA VISION BINOCULAIRE DONNE DU RELIEF AUX COULEURS

Pour en revenir à l'œil humain, comment les aberrations chromatiques conduisent-elles à une illusion de relief? On remarque aisément que cet effet disparaît lorsqu'on ferme un œil. Il s'agit donc d'une conséquence de la vision binoculaire. Quand nous regardons un objet, nous orientons les yeux pour que son image se forme sur la fovéa, la région de la rétine où la concentration de cellules photoréceptrices est la plus élevée, c'est-à-dire où la résolution est la meilleure. Or la fovéa n'est pas située sur l'axe optique du système composé de notre cornée et notre cristallin: la direction de visée optique et l'axe optique sont décalés de 5 degrés.

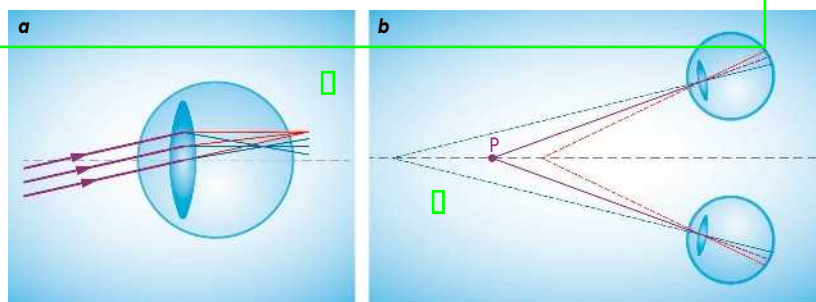
À cause de ce décalage angulaire, les rayons issus du point visé arrivent obliques par rapport à l'axe optique et on a donc les deux effets mentionnés plus haut: la distance de focalisation et la position latérale de la composante bleue des rayons diffèrent de celles de la composante rouge. Les yeux étant symétriques par rapport au milieu du visage, les décalages latéraux entre bleu et rouge sont inversés d'un œil à l'autre, et notre cerveau interprète cela comme une différence de distance (voir l'encadré ci-dessus).

Un calcul simplifié, en considérant un modèle rudimentaire d'œil avec la cornée comme surface réfractrice, confirme l'ordre de grandeur: la différence de profondeur apparente entre un objet bleu et un objet rouge situés à 80 centimètres des yeux est d'environ 16 millimètres, ce qui correspond bien à l'effet de profondeur perçue.

Reste que certaines personnes ne voient pas l'effet ou le voient inversé. Pourquoi? On s'est aperçu que la sensibilité des cellules rétinienne dépend de l'angle d'arrivée des rayons lumineux sur ces dernières: elle est cinq fois plus élevée pour les rayons qui passent par le centre de la pupille par rapport à ceux qui

DU RELIEF AVEC PAS MAL DE REGARD OBLIQUE...

Quand les rayons lumineux traversent l'œil de façon oblique, le point de focalisation de la composante rouge est non seulement un peu plus distant que celui de la composante bleue, mais les deux points sont aussi décalés latéralement (a). Quand on regarde un point P à une distance donnée (b), les yeux sont en fait dirigés vers un point plus distant afin que l'image de P se forme sur la fovéa, qui est décalée de 5 degrés par rapport à l'axe de l'œil. Les rayons issus de P arrivent alors de façon légèrement oblique par rapport à l'axe de l'œil. Si P est rouge, son image sur la rétine est décalée vers l'extérieur des deux yeux, tandis que si P est bleu, son image est décalée vers l'intérieur des deux yeux. En raison de cette différence angulaire, le cerveau interprète alors le point P rouge comme plus proche que le point P bleu.



passent par sa périphérie. C'est l'effet Stiles-Crawford.

Or à cause du décalage de la fovéa par rapport à l'axe optique, cet effet n'est pas symétrique. Autrement dit, la sensibilité pour les rayons passant par la gauche de la pupille diffère de celle pour les rayons passant par la partie droite. En fin de compte, tout se passe comme si la pupille effective, du point de vue optique, était décalée. Or un décalage de pupille affecte de façon différente les diverses couleurs, car cela revient à changer les angles d'incidence des rayons qui la traversent.

En mesurant cette variation de sensibilité chez diverses personnes, les chercheurs ont trouvé que l'effet Stiles-Crawford agit dans le sens contraire de l'aberration chromatique, jusqu'à éventuellement le compenser voire le surpasser – ce qui explique que, chez certains individus, l'effet de profondeur soit absent ou inverse.

L'explication est confirmée par le fait que lorsque l'image est très lumineuse, cette inversion du relief perçu disparaît. En effet, comme la pupille se contracte en réaction à la forte luminosité, les rayons arrivant sur la rétine ont tous des angles d'incidence à peu près égaux et sont alors tous perçus avec la même sensibilité par les cellules rétinienne. L'effet des aberrations chromatiques, avec le rouge qui jaillit de l'image et son bleu qui s'enfonce, reste alors entier. ■

BIBLIOGRAPHIE

M. Ozolinsh et K. Muizniece, **Color difference threshold of chromostereopsis induced by flat display emission**, *Frontiers in Psychology*, vol. 6, 337, 2015.

J. J. Vos, **Depth in colour, a history of a chapter in physiology optique amusante**, *Clinical and Experimental Optometry*, vol. 91(2), pp. 139-147, 2008.

J. Thompson et al., **Chromostereopsis : A multicomponent depth effect ?**, *Displays*, vol. 14(4), pp. 227-234, 1993.

J. J. Vos, **Some new aspects of color stereoscopy**, *Journal of the Optical Society of America*, vol. 50(8), pp. 785-790, 1960.

ABONNEZ-VOUS À
POUR LA

SCIENCE

OFFRE D'ABONNEMENT

DURÉE
LIBRE

3 FORMULES
AU CHOIX

FORMULE
PAPIER

FORMULE
PAPIER
+
HORS-SÉRIE

FORMULE
INTÉGRALE

Le magazine papier 12 numéros par an

Le magazine en version numérique 12 numéros par an

Le hors-série papier 4 numéros par an

Le hors-série en version numérique 4 numéros par an

Accès à pouirlascience.fr

actus, dossiers, archives depuis 1996

VOTRE TARIF D'ABONNEMENT

4,90€
PAR MOIS

6,50€
PAR MOIS

8,20€
PAR MOIS

29 %
de réduction *

31 %
de réduction *

43 %
de réduction *

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

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

☒ **OUI, je m'abonne à Pour la Science en prélèvement automatique**

PAG20STD

1 / Je choisis ma formule (merci de cocher) et je complète l'autorisation de prélèvement ci-dessous.

☐ FORMULE
PAPIER

• 12 n° du magazine papier

4,90€
PAR MOIS
-29 %

DPV4E90

☐ FORMULE
PAPIER +
HORS SÉRIE

• 12 n° du magazine papier
• 4 Hors-série papier

6,50€
PAR MOIS
-31 %

PPV6E50

☐ FORMULE
INTÉGRALE

• 12 n° du magazine (papier et numérique)
• 4 Hors-série (papier et numérique)
• Accès illimité aux contenus en ligne

8,20€
PAR MOIS
-43 %

IPV8E20

2 / Mes coordonnées

Nom:

Prénom:

Adresse:

Code postal: Ville:

Tél.:

E-mail:@.....

(indispensable pour la formule intégrale)

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

3 / Mandat de prélèvement SEPA

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

TYPE DE PAIEMENT : PAIEMENT RÉCURRENT

Titulaire du compte

Nom: Prénom:

Adresse:

Code postal: Ville:

Désignation du compte à débiter

BIC (Identification internationale de la banque)

IBAN:

(Numéro d'identification international du compte bancaire)

Établissement teneur du compte

Nom:

Adresse:

Code postal: Ville:

Date et signature

Organisme Créancier: Pour la Science
170 bis, bd. du Montparnasse - 75014 Paris
N° ICS FR92ZZZ426900
N° de référence unique de mandat (RUM)

* Réduction par rapport au prix de vente en kiosque et l'accès aux archives numériques. Durée d'abonnement: 1 an. Délai de livraison: dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/03/2021 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site <https://boutique.pouirlascience.fr>. Photos non contractuelles.

Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société Pour la Science. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. Pour la Science ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à Pour la Science. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante: <https://rebrand.ly/charte-donnees-pls>. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit «RGPD») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pouirlascience.fr.

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

4 / **MERCI DE JOINDRE IMPÉRATIVEMENT UN RIB**

Partie réservée au service abonnement. Ne rien inscrire

L'AUTEUR



HERVÉ LE GUYADER
professeur émérite de biologie
évolutive à Sorbonne Université,
à Paris

LA MOUCHE DE L'AUBÉPINE S'EST POMMÉE

Comment une mouche habituée à parasiter une aubépine a-t-elle si facilement changé d'hôte lorsque le pommier domestique a été introduit dans la région où elle prospérait ? La réponse à cette vieille énigme se trouve sur ses antennes...

La mouche de la pomme (*Rhagoletis pomonella*) devrait en réalité s'appeler la mouche de l'aubépine. C'est en effet sur une espèce courante d'aubépine américaine, *Crataegus mollis*, que cet insecte vivait avant l'arrivée, il y a quatre siècles, du pommier européen (*Malus domestica*) en Amérique du Nord-Est. Ce pommier a pour ancêtre un pommier sauvage (*Malus sieversii*) endémique des montagnes de l'Asie centrale. Il était donc inconnu en Amérique du Nord avant son introduction par les colons. Sur le continent américain, il a d'abord fleuri et fructifié sans parasites, fournissant pendant longtemps de magnifiques récoltes. Puis *Rhagoletis pomonella* l'a infecté. Comment un tel changement d'hôte s'est-il produit ? Ce type d'événement est somme toute banal, mais celui-ci a longtemps intrigué les biologistes de l'évolution, tant le cycle de vie de l'insecte est inféodé à celui de la plante qu'il

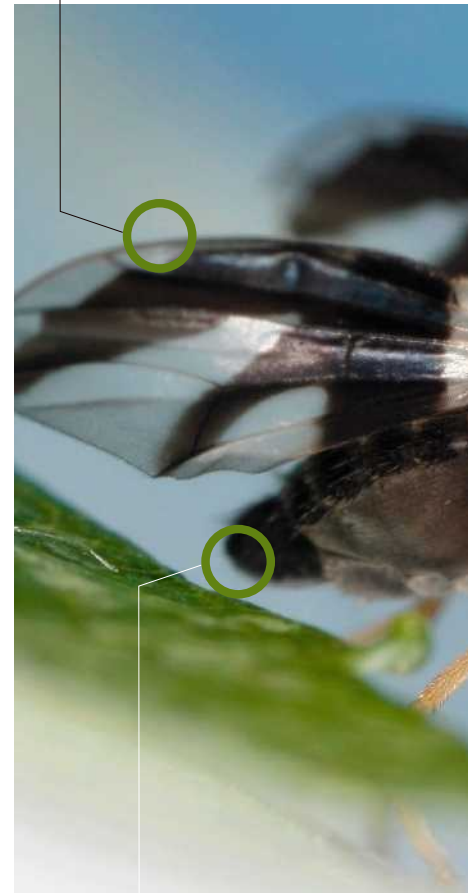
parasite. Récemment, cependant, des études de physiologie comparée ont levé le voile sur les mécanismes à l'œuvre.

UNE FENÊTRE DE QUATRE SEMAINES

Sur l'aubépine, la mouche femelle pond ses œufs sous la peau des fruits, les « cenelles », à raison d'un œuf par baie. Après éclosion, l'asticot s'enfonce dans la pulpe, s'en nourrit et y reste jusqu'à ce que, en automne, le fruit tombe à terre. La larve quitte alors cet abri pour s'enfoncer de quelques centimètres dans le sol, où elle se transforme en une pupa qui reste dormante pendant plusieurs mois. L'adulte (ou imago) éclot vers la mi-septembre et la maturité sexuelle survient une semaine plus tard. Attirés par les cenelles mûres, les insectes y réalisent leurs accouplements. La femelle pond ses œufs et le cycle recommence.

Les cycles de l'hôte et de son parasite doivent coïncider temporellement, car la

Quand elle est menacée, la mouche étend ses ailes et effectue des mouvements qui imitent ceux d'une araignée sauteuse, les rayures de ses ailes apparaissant alors comme des pattes d'araignée.



La femelle dépose les œufs un par un sous la peau du fruit à l'aide de son organe de ponte (ovipositeur). Une femelle pond 300 à 400 œufs durant sa vie.



Hervé Le Guyader a récemment publié :
L'Aventure de la biodiversité,
(Belin, 2018).

EN CHIFFRES

1 522

Les colons espagnols ont introduit le pommier domestique au Mexique en 1522. Cent ans plus tard, on le cultivait jusqu'en Nouvelle-Angleterre. Les premières infestations des pommiers d'Amérique du Nord par la mouche *Rhagoletis pomonella* remontent à 1864.

23 JUIN

C'est la date moyenne d'émergence des imagos de *Rhagoletis pomonella* parasitant les pommiers domestiques, alors que celles de l'aubépine émergent en moyenne plutôt vers la mi-septembre. Les œufs éclosent entre 3 et 7 jours après la ponte.

28

La mouche *Rhagoletis pomonella* compte 28 classes de neurones de l'olfaction, situés dans les sensilles de leurs antennes.



La mouche se nourrit à la surface des fruits. Grâce à sa trompe rétractable, elle libère de la salive sur le fruit, laquelle sert de solvant qui lui permet d'absorber les molécules présentes.

La mouche perçoit les odeurs grâce à de minuscules sensilles recouvrant ses antennes.



Mouche de la pomme (*Rhagoletis pomonella*)
Taille : environ 5 mm

durée de vie des femelles n'est que de quatre semaines environ et leur fécondation doit survenir au moment où les œufes sont à maturité, vers la mi-octobre. Par conséquent, les mouches n'ont pu parasiter le pommier européen qu'en surmontant deux problèmes majeurs, l'un relevant de l'espace, l'autre du temps : il fallait que les insectes puissent trouver des pommes et que celles-ci soient mûres au moment de l'éclosion des imagos. Or le pommier fleurit environ quatre semaines avant l'aubépine : les pommes sont loin d'être mûres lors de l'émergence des insectes... Pourtant, actuellement, les imagos des mouches parasitant le pommier émergent vers la fin juillet, c'est-à-dire bien

avant celles vivant sur l'aubépine. Il y a donc eu un changement important dans la temporalité du cycle de vie de l'animal. Comment l'expliquer ?

Il faut compter avec la variabilité du monde vivant. Si la majorité des mouches de l'aubépine éclosent vers la mi-septembre, les émergences s'étalent en fait du début août jusqu'à la mi-octobre. Ainsi, les imagos les plus précoces sont actives lors de la fructification des pommiers. Le scénario devient alors simple à concevoir : ces mouches donnent une descendance également précoce, et la coïncidence avec la fructification des pommiers joue comme une sélection. Ces quelques mouches qui avaient du mal à survivre sur l'aubépine, car émergeant trop tôt, ont ainsi trouvé sur leur nouvel hôte des fruits mûrs où se multiplier. On assiste donc à une sélection qui partage la population ancestrale en deux sous-populations distinctes inféodées à deux hôtes différents.

VERS UNE NOUVELLE ESPÈCE ?

Après la Seconde Guerre mondiale, l'affaire *Rhagoletis* a défrayé pendant un temps la communauté des évolutionnistes. En effet, les imagos copulent sur ou près des fruits sur lesquels les femelles vont pondre. Par conséquent, une barrière de reproduction s'établit entre les deux populations, celle qui fréquente l'aubépine et celle qui fréquente le pommier. Isolées l'une de l'autre d'un point de vue génétique, ces deux populations entament donc un processus de spéciation. À l'époque, >

> cependant, le dogme voulait que la spéciation ne se produise qu'après l'isolement spatial de deux populations, spéciation dite «allopatrique». Or les deux populations vivent au même endroit, dans un processus de spéciation dit «sympatrique», ce que l'école de l'évolutionniste Ernst Mayr refusait. C'était presque de l'idéologie...

Aujourd'hui, il ne fait plus aucun doute qu'il s'agit d'un processus de spéciation sympatrique. Déjà, au cours des années 1960, Guy Bush, à l'université d'État du Michigan, aux États-Unis, avait montré, par des études morphologiques (en particulier sur la longueur de l'ovipositeur des femelles – leur organe de ponte), que les deux populations sont bel et bien différenciées. Puis récemment, en 2018, Jeffrey Feder, de l'université de Notre-Dame, dans l'Indiana, et son équipe ont prouvé, cette fois par des études génomiques sophistiquées, que les deux populations sont séparées génétiquement. Plus précisément, l'étude porte d'une part sur des populations de mouches distantes géographiquement les unes des autres et, d'autre part, sur les populations vivant en sympatrie sur des hôtes différents. La divergence est plus grande entre ces populations sympatriques qu'entre des populations allopatriques inféodées au même hôte. Or on sait, par des études en laboratoire, que les mouches parasitant l'aubépine et le pommier sont interfertiles. Ainsi, bien que l'échange génétique ne soit pas totalement interrompu, la sélection est suffisamment forte pour faire diverger les populations sympatriques.

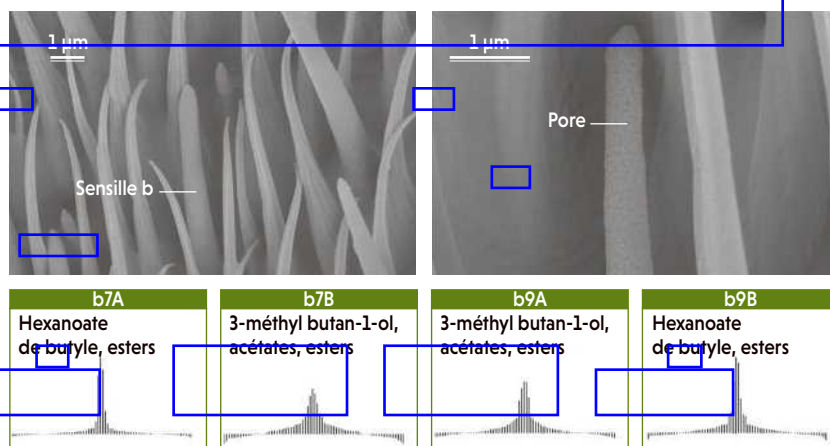
UN CHOIX À L'ODEUR

En fait, la divergence des populations repose sur un phénomène clé : dans leur très grande majorité, les descendants viennent copuler (et pondre) sur les fruits qui ont nourri leurs parents. Cette constance permet à la sélection d'agir pleinement. Très vite, les biologistes ont compris que les mouches étaient attirées par l'odeur du fruit, et à un moindre degré par leur aspect. L'équipe de Jeffrey Feder s'est focalisée sur la question de l'odeur dès 2016, avec un remarquable succès.

En affinant le travail de ses prédécesseurs, l'équipe a listé les molécules volatiles émises par les fruits et reconnues par les mouches. Sur 76 molécules testées, les deux les plus importantes dans la reconnaissance des fruits sont l'hexanoate de butyle pour la pomme et le 3-méthylbutan-1-ol pour la cenelle. Elle a ensuite repéré par électrophysiologie les

L'OLFACTION CHEZ LES INSECTES

Les insectes perçoivent les odeurs principalement par leurs antennes. Ces dernières portent des sensilles en forme de soies (en haut) dont la cuticule est percée de nombreux pores qui laissent pénétrer les molécules odorantes. Des neurones parcourent ces sensilles. Leurs prolongements nerveux (dendrites) portent, près de ces pores, des récepteurs protéiques qui, en reconnaissant les molécules odorantes, déclenchent des stimuli, lesquels sont conduits jusqu'au cerveau où l'information est traitée. Dans le cas présent, deux sensilles (b7 et b9) répondent à l'hexanoate de butyle et au 3-méthyl butan-1-ol (en bas). Le neurone A de la sensille b7 (neurone b7A) et le neurone B de la sensille b9 (neurone b9B) répondent à la première molécule, tandis que les neurones b7B et b9A (suivant la même terminologie) répondent à la deuxième molécule. Enfin, le traitement de l'information est tel que les mouches inféodées à un fruit (pomme ou cenelle) sont attirées par la molécule concernée et repoussées par l'autre.



différents neurones de l'olfaction des antennes qui réagissaient à ces molécules et a analysé leur fonctionnement.

Le système, extrêmement simple, ne met en jeu que quatre neurones. Deux reconnaissent l'hexanoate de butyle, deux le 3-méthylbutan-1-ol (voir l'encadré ci-contre). Toutes les mouches *R. pomonella* ont ces quatre neurones, mais, selon leur hôte, elles sont attirées par une odeur et repoussées par l'autre. Le changement de reconnaissance de ces molécules (un processus évolutif connu par ailleurs) constituerait la base biologique de l'inféodation au végétal hôte.

Mais il y a plus : l'équipe de Jeffrey Feder a aussi testé d'autres aubépines, en particulier celles que l'on trouve dans le sud des États-Unis. Ce n'était pas innocent : on sait que *R. pomonella* a tout d'abord vécu dans cette région avant de coloniser le nord du continent. Or les fruits de ces aubépines ont pour molécules attractives à la fois le 3-méthylbutan-1-ol et l'hexanoate de butyle ! Ainsi, de manière ancestrale, la mouche reconnaissait ces deux molécules : l'odeur du pommier n'était donc pas inconnue ! Sans doute là réside le secret de la mouche : son système olfactif est passé à une seule reconnaissance attractive. ■

BIBLIOGRAPHIE

M. M. Doeltman et al., **Genomic differentiation during speciation-with-gene-flow : comparing geographic and host-related variation in divergent life history adaptation in *Rhagoletis pomonella***, *Genes*, vol. 9(5), article 262, 2018.

C. Tait et al., **Sensory specificity and speciation : a potential neuronal pathway for host fruit odour discrimination in *Rhagoletis pomonella***, *Proc. R. Soc. B*, vol. 283, article 20162101, 2016.

G. L. Bush, **Sympatric host race formation and speciation in frugivorous flies of the genus *Rhagoletis* (Diptera, Tephritidae)**, *Evolution*, vol. 23(2), pp. 237-251, 1969.

POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

**COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION
DÈS MAINTENANT !**



N° 508 (fév. 20)
réf. PL508



N° 507 (jan 20)
réf. PL507



N° 506 (déc. 19)
réf. PL506



N° 505 (nov. 19)
réf. PL505



N° 504 (oct. 19)
réf. PL504



N° 503 (sept. 19)
réf. PL503



N° 502 (août 19)
réf. PL502



N° 501 (juillet 19)
réf. PL501



N° 500 (juin 19)
réf. PL500



N° 499 (mai. 19)
réf. PL499



N° 498 (avr. 19)
réf. PL498



N° 497 (mar. 19)
réf. PL497

À retourner accompagné de votre règlement à :

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



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

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

1 ^{re} réf.	01	x 9,90 € =	9,90	€
2 ^e réf.		x 9,90 € =		€
3 ^e réf.		x 9,90 € =		€
4 ^e réf.		x 9,90 € =		€
5 ^e réf.		x 9,90 € =		€
6 ^e réf.		x 9,90 € =		€
TOTAL À RÉGLER				€

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme

Nom :

Prénom :

Adresse :

Code postal :

Ville :

Téléphone :

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science

☐ 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 :

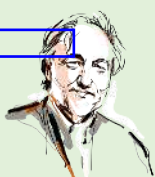
Groupe Pour la Science – Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris Cedex 14 – Sarl au capital de 32000 € – RCS Paris B 311 797 393 – Siret : 311 797 393 000 23 – APE 5814 Z

Offre valable jusqu'au 31/12/2020 en France Métropolitaine uniquement. Pour l'export, rendez-vous sur notre site internet boutique.pourlascience.fr. Les prix affichés incluent les frais de port et les frais logistiques.

Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société Pour la Science. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. Pour la Science ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à Pour la Science. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante : <https://rebrand.ly/charte-donnees-pls>. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit « RGPD ») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.

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

L'AUTEUR



HERVÉ THIS
physicochimiste,
directeur du Centre
international de gastronomie
moléculaire AgroParisTech-
Inra, à Paris

ASTRINGENCE CONTRE AMERTUME

Du vin tannique pour réduire l'amertume de certains légumes? C'est la leçon qu'apporte une étude récente réalisée par des chercheurs londoniens.

Analysons nos sensations pour améliorer nos menus... en connaissance de cause. Dans une première phase, pour goûter les produits, nous nous pincerons le nez, puis nous libérerons les narines après quelques instants de mastication. Avec une pincée de sucre, nous ressentons une saveur sucrée et, si nous libérons les narines, il n'y a pas de sensation supplémentaire: le sucre ne libère pas de composés odorants, qui monteraient vers le nez par les fosses rétronasales. Inversement, avec des herbes de Provence sèches, nous ne ressentirons en bouche qu'une consistance un peu dure et sèche tant que le nez sera pincé, mais un «goût» aromatique apparaîtra quand nous libérerons les narines. Ce goût est donc réductible à l'odeur rétronasale. Je vous invite à faire de même avec du vinaigre, du vin, du café, du thé, du bouillon, etc.

Bien sûr, le goût ne se limite pas à ces deux sensations de saveur et d'odeur: il y a aussi le rafraîchissant du menthol, les divers piquants (du poivre, du raifort, etc.) et bien d'autres modalités sensorielles. Reste que nous sommes démunis pour mettre des mots sur nos sensations et que nous manquons de données scientifiques pour les interpréter, d'autant qu'elles interagissent.

Par exemple, l'astringence modifie la perception de la saveur, comme l'indique une étude récente de Guy Carpenter et ses collègues (*Journal of Texture Studies*, vol. 50, pp. 71-74, 2019). Ces chercheurs londoniens ont étudié l'amertume perçue des choux de Bruxelles. L'amertume, qui expliquerait pourquoi les enfants et certains adultes renâclent à manger des légumes, correspond à une saveur, mais on la confond parfois avec

L'astringence d'un vin tannique réduit l'amertume perçue quand on mange des choux de Bruxelles.

l'astringence qui, elle, correspond à une sensation d'assèchement de la bouche.

On a longtemps cru que l'astringence était due à la complexation des protéines salivaires par des polyphénols de la classe des tanins (si l'on «mâche» une bouchée de vin rouge tannique avant de la recracher, on voit des dépôts dus à ces complexations). Toutefois, au cours des dernières années, on a identifié d'autres composés que les polyphénols (notamment des aluns) qui modifient la lubrification de la bouche, en même temps que l'on détectait de nombreuses interférences avec les acides, l'éthanol, les sucres...

Pour apporter de l'amertume, les biologistes anglais ont utilisé des choux de Bruxelles: ces derniers contiennent des glucosinolates, composés qui se lient aux récepteurs de l'un des 27 types de récepteurs de l'amertume dans les papilles. Et pour observer l'effet de l'astringence, les biologistes ont comparé les effets respectifs d'une sauce au jus de viande, de l'eau et d'un vin tannique (provenant de la Rioja).

En pratique, les choux de Bruxelles avaient été cuits au four à microondes, coupés en quatre, et chaque quart était soumis à un dégustateur soit seul, soit en compagnie d'un des trois liquides. Les 28 dégustateurs notaient le degré d'amertume sur une échelle de 0 à 10. L'analyse

a montré que le vin réduisait considérablement l'amertume perçue, alors que ni l'eau ni la sauce n'avaient d'effet.

Le mécanisme à l'œuvre reste inconnu, mais il implique sans doute la salive. Les composés sapides s'y dissolvent, avant de se lier aux récepteurs correspondants de la langue, tandis qu'elle contient ions, protéines, et de nombreux autres composés formés par le métabolisme humain ou des bactéries de la bouche. Les sauces changent la composition du liquide dans la bouche et modifient aussi la façon dont les composés des parties solides des aliments agissent sur les récepteurs du goût. Des compositions chimiques et des interactions dont une cuisine plus affinée aurait raison de tenir compte! ■



LA RECETTE

❶ Blanchir des choux de Bruxelles pendant quelques minutes à l'eau bouillante, afin de lessiver le plus de composés amers possible (goûter l'eau pour se faire une idée).

❷ Dans une casserole, cuire de petits lardons à sec, puis ajouter de la crème, du vin tannique et les choux blanchis, afin de réunir dans une même assiette les tissus végétaux un peu amers et les composés phénoliques qui viendront pallier leur amertume.



U N



N E M E U R T

J A M A I S .

EN TRIANT VOS JOURNAUX,
MAGAZINES, CARNETS, ENVELOPPES,
PROSPECTUS ET TOUS VOS AUTRES
PAPIERS, VOUS AGISSEZ POUR UN MONDE PLUS
DURABLE. PLUS D'INFORMATIONS SUR
LE RECYCLAGE SUR
TRIERCESTDONNER.FR

CITEO

Donnons ensemble une nouvelle vie à nos produits

A

PICORER



Retrouvez tous
nos articles sur
www.pourlascience.fr

P.62

265 KM/H

C'est la vitesse maximale des vents au sein de la tornade de feu apparue durant l'incendie Carr, en Californie, à l'été 2018.

P.20

« En informatique, l'éthique, qui nous apparaissait naguère comme une entrave à l'innovation, devrait, au contraire, devenir un avantage compétitif pour les entreprises qui en maîtriseront les enjeux »

GILLES DOWEK
chercheur à l'Inria

P.40

90%

C'est la part des Antillais qui présentent dans leur sang des quantités détectables de chlordécone, une substance très toxique utilisée dans l'agriculture jusqu'en 1993.

P.12

RAYURES DE TIGRE

Ces quatre stries rectilignes, parallèles et régulièrement espacées, longues d'une centaine de kilomètres, griffent le pôle sud d'Encelade, une lune glacée de Saturne. Elles portent les noms de quatre villes des Mille et une nuits : Bagdad, Le Caire, Damas et Alexandrie.

P.92

SYMPATRIQUE

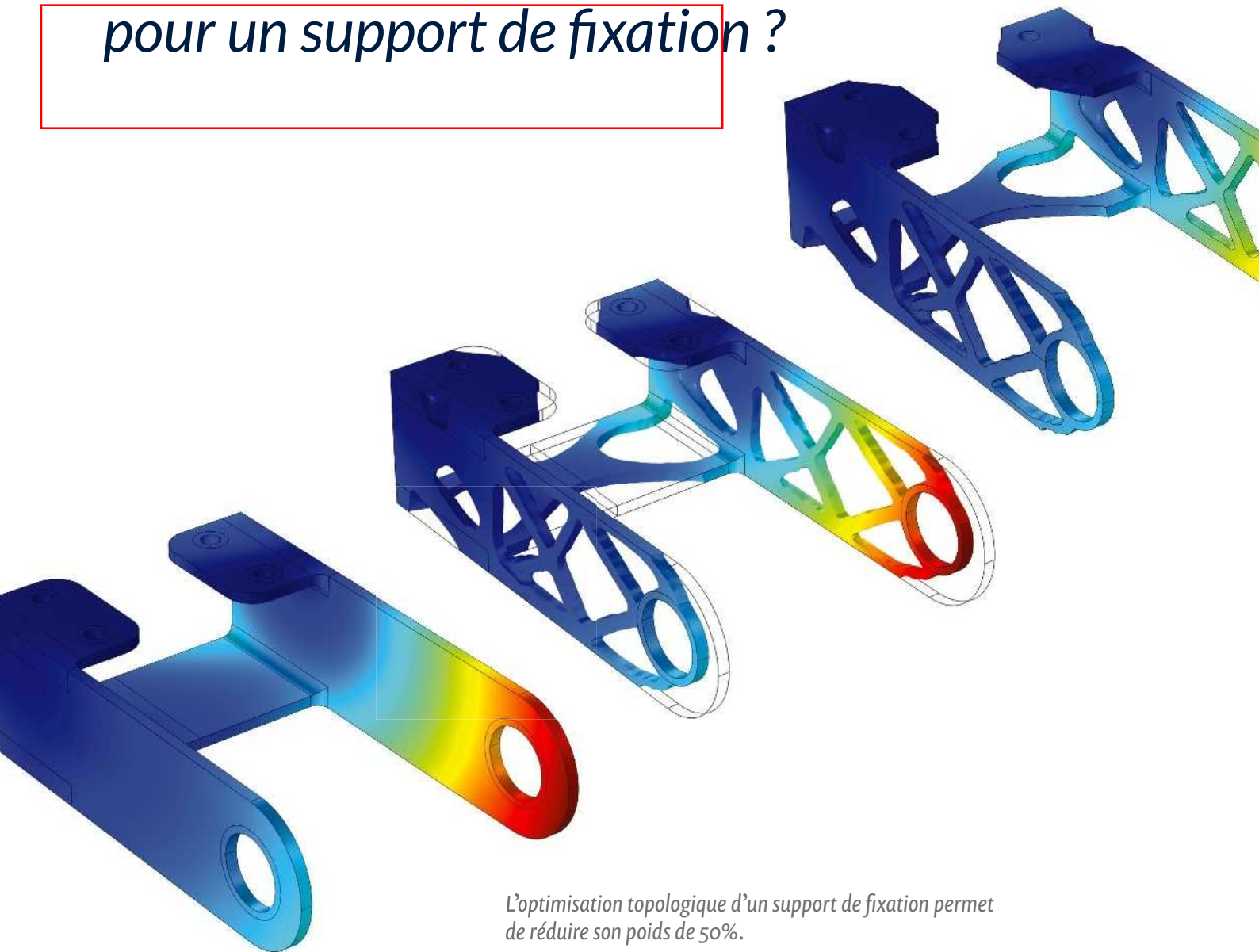
Sans lien avec le 17 mars, se dit d'une spéciation – séparation d'une population en deux espèces distinctes – qui se produit à partir d'une population située en un seul endroit. Par opposition, on nomme « allopatrique » une spéciation qui se produit entre deux populations séparées géographiquement.

P.7

12 000

C'est le nombre de satellites que comptera, au milieu de la décennie, la mégakonstellation Starlink lancée par l'entreprise américaine SpaceX. À comparer avec les 5 000 satellites, en fonctionnement ou hors d'usage, qui peuplent actuellement le ciel.

Quel est le meilleur design pour un support de fixation ?



L'optimisation topologique d'un support de fixation permet de réduire son poids de 50%.

Cela dépend des objectifs de conception. Les méthodes d'optimisation topologique permettent de trouver la meilleure version possible d'une structure pour un usage spécifique. Un support peut être optimisé pour un seul type de chargement, tandis qu'un autre est optimisé pour huit. La fonctionnalité Density Model simplifie le processus d'optimisation topologique pour les ingénieurs en calcul de structure.

Le logiciel COMSOL Multiphysics® est utilisé pour la conception et la simulation des composants et des procédés dans tous les domaines de l'ingénierie, de la fabrication et de la recherche. Découvrez comment vous pouvez l'appliquer pour l'optimisation topologique.

comsol.blog/density-topology

FAIRE UNE THÈSE POUR PRÉPARER L'AVENIR.



AU SEIN D'UN PARTENARIAT AVEC L'ÉTUDIANT, SON LABORATOIRE D'ACCUEIL
ET UN COFINANCEUR PUBLIC OU PRIVÉ,
L'ADEME FINANCE VOTRE THÈSE PENDANT 3 ANS POUR INVENTER LE MONDE DE DEMAIN.

www.ademe.fr/theses