



NOYAU ATOMIQUE
ON SAIT ENFIN
À QUOI IL RESSEMBLE

TERRE
ELLE SE DÉCHIRE
SOUS NOS YEUX

CERVEAU ARTIFICIEL

SA FABRICATION A COMMENCÉ!

NUCLÉAIRE
EDF FACE AU DÉFI DU
DÉMANTÈLEMENT



CANNABIS
DES ADOS
MARQUÉS À VIE

France métro: 4,20 € - DOM surf: 4,80 € - DOM avion: 6,90 € - BEL: 4,70 € - CH: 8,50 FS - CAN: 6,50 \$ CAN - D: 6,90 € - A: 5,30 € - ESP: 5,50 € - FIN: 6,20 € - GR: 4,90 € - ITA: 4,90 € - LUX: 4,70 € - MAR: 45 DH - MAY: 6,40 € - TOM: 5/750 A/1400 CFP - PORTCONT: 4,90 € - TUN: 6,5 DTU

M 02578 - 1145 - F: 4,20 €





Nouvel **OPEL MOKKA**

SORTEZ DU LOT.

Pourquoi passer inaperçu ?



Difficile de passer inaperçu au volant du nouvel Opel Mokka. Avec ses lignes racées, son caractère affirmé et sa finition allemande, ce SUV compact ne laissera personne indifférent. Disponible en deux ou quatre roues motrices, le nouvel Opel Mokka peut recevoir toutes les dernières technologies Opel : Phares Bi-xénon directionnels AFL+, système FlexFix porte-vélo intégré, sièges cuir ergonomiques certifiés AGR* ou encore volant chauffant. Venez vite le découvrir chez votre distributeur Opel, à partir de **18 990 €⁽¹⁾**.

Wir leben Autos : Nous vivons l'Automobile.

(1) Prix catalogue de l'Opel Mokka 1.6 115 ch Édition. Tarif au 01/09/12. **Conso mixte (l/100km) : 4.5/6.5. CO₂ (g/km) : 120/153.** Modèle présenté : Opel Mokka Cosmo 1.4T 4x4 avec options, au prix conseillé de 23 190 €. *AGR (Aktion Gesunder Rücken) est une association médicale allemande à l'origine des exigences orthopédiques pour sièges de voiture.

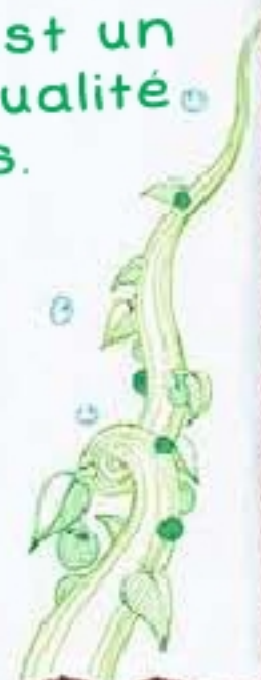


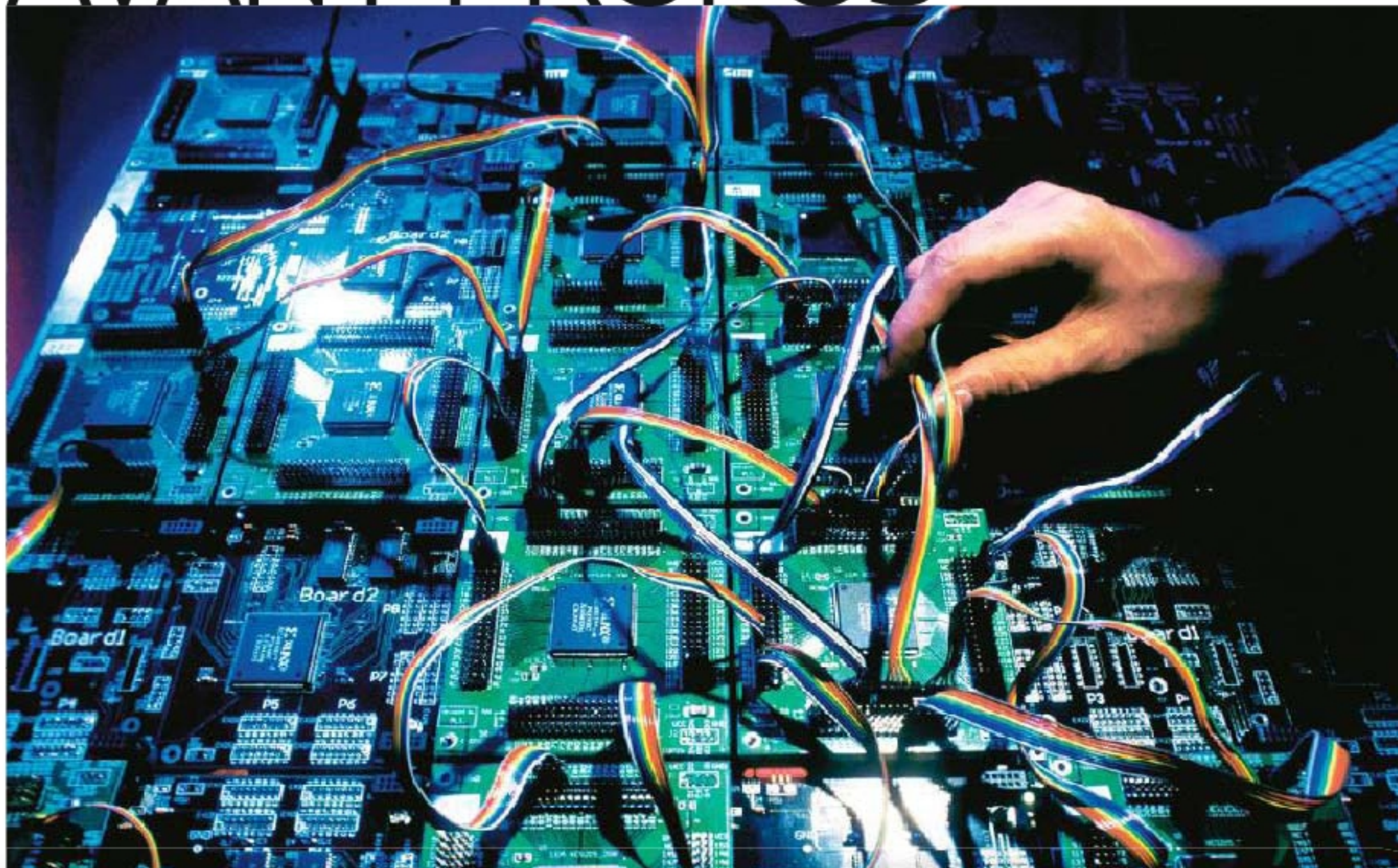
Wir leben Autos.



DU Big. CHEZ Mc Do™

C'est naturel de faire plaisir à vos enfants !
Depuis avril 2010, le menu enfant propose deux produits issus de l'agriculture biologique, un jus de fruit 100% pur jus et un yaourt à boire aux fruits. Le Happy Meal™ c'est un choix de produits de qualité et toujours plus variés.





UNE MÉGA-VIE DE **GIGA-PENSÉES ?**

Rien ne sert de le cacher, on a un peu de mal à y croire. Alors autant l'avouer aussi : lorsque certains de nos journalistes ont proposé que nous traitions de la possibilité effective de fabriquer un cerveau artificiel, l'accueil qui leur a été réservé ne fut pas immédiatement à la hauteur de leur excitation. On peut le comprendre.

Certes, il n'a échappé à personne que les ordinateurs sont toujours plus puissants et rapides, toujours plus nombreux et utiles aussi. Mais on convient également qu'ils demeurent toujours aussi stupides. L'ordinateur Deep Blue a beau avoir tenu le champion Gary Kasparov en échec en 1997, cela ne change rien à l'affaire. Que son successeur Watson soit venu à bout des meilleurs participants au jeu de questions télévisé Jeopardy en 2011, non plus. Le cerveau est tout autre chose qu'un ordinateur. Pour concevoir un ordinateur qui puisse ne serait-ce qu'approcher ce qu'est un cerveau, il faudrait *primo* savoir fabriquer des neurones artificiels, *secundo* être en mesure de les connecter selon une cartographie

très précisément connue, *tertio* de pouvoir charger le tout d'une masse de données et d'informations comparable à celle que tout un chacun traite quotidiennement, le plus généralement à son insu. Et encore. Le charme aurait-il alors une chance d'opérer ? Emergerait-il de ce fatras électronique une sorte de pensée ? De conscience ? De sens commun ? Mystère et spéculations...

Alors ? Après enquête, voici où nous en sommes.

Des équipes travaillent effectivement très sérieusement à la mise au point de chacune des trois étapes mentionnées ci-dessus. Nous avons été impressionnés par leur maîtrise du sujet et par leurs premiers résultats. Intégrés, leurs travaux pourraient effectivement conduire à la fabrication d'une sorte de cerveau. Ce projet existe et pourrait prendre une très grande ampleur très prochainement. Il est assurément l'un des plus excitant et ambitieux de ce début de siècle. Il soulève effectivement quantité de questions vertigineuses que nous nous garderons bien de trancher.

S&V

CERVEAU ARTIFICIEL

SA FABRICATION A COMMENCÉ !

Vertigineux ! Le projet de réaliser, à partir de silicium et de puces électroniques, un cerveau capable de mimer le nôtre est en train de devenir une réalité. Structure, neurone, connexions... De par le monde, des dizaines de labs relèvent le défi d'une complexité hors-norme – et obtiennent déjà des résultats. A la dé ? Un fantastique outil de science, une aubaine médicale et... plein de questions !

PAR PIERRE-YVES BOCQUET, STÉPHANE BARGE, JÉRÔME CRENÈCHE, ROMAN IKONICOFF, FRANÇOIS LASSAGNE ET L'ENSEMBLE DE LA RÉDACTION

10 FÉVRIER 2013

44

LE CERVEAU ARTIFICIEL : UN PROJET DE GIGANTES

Le projet de réaliser un cerveau artificiel est en train de devenir une réalité. Structure, neurone, connexions... De par le monde, des dizaines de labs relèvent le défi d'une complexité hors-norme – et obtiennent déjà des résultats. A la dé ? Un fantastique outil de science, une aubaine médicale et... plein de questions !



LE TEMPS S'ÉCOULE AUSSI POUR L'ATOME

Plus le temps passe, plus les atomes se déplacent. C'est la loi de la physique. Mais les scientifiques ont réussi à ralentir le temps d'un atome à un point tel qu'il semble presque immobile. Cette expérience a été réalisée par une équipe de chercheurs du MIT. Ils ont utilisé un laser pour ralentir le mouvement d'un atome de strontium. Le résultat est impressionnant : l'atome se déplace à une vitesse si faible qu'il semble presque immobile. Cette expérience a des implications importantes pour la physique fondamentale et pour les technologies de précision.

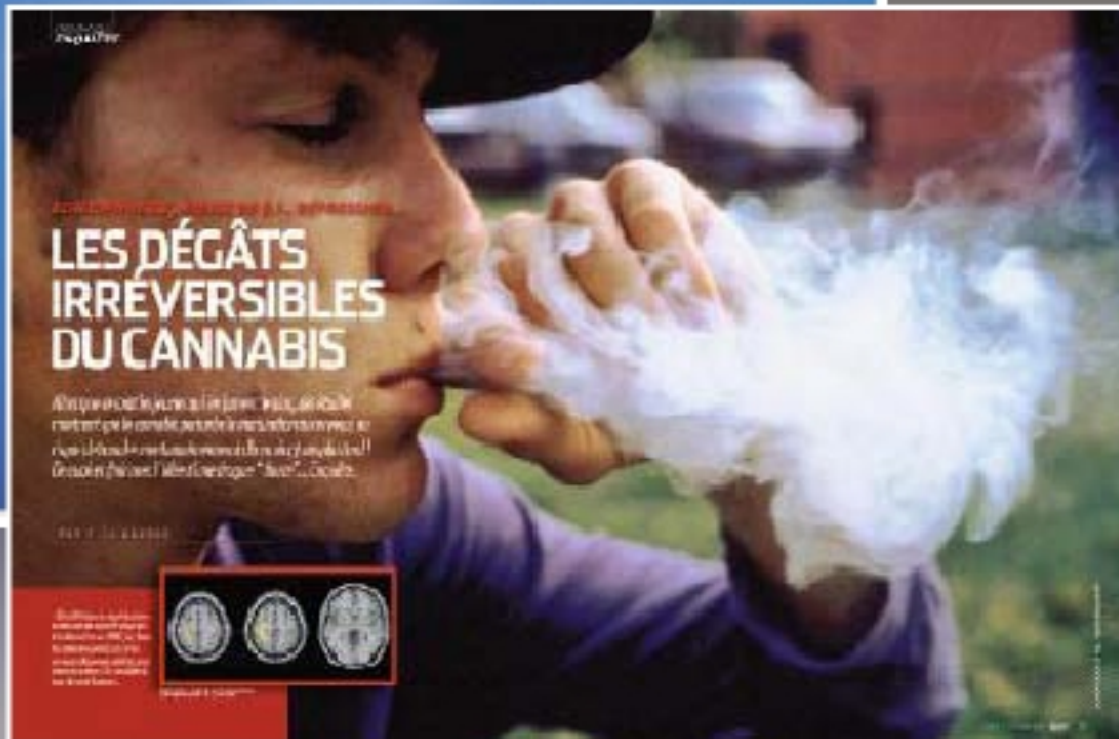
ACTUS

- 10 LABOS**
Les primates dépriment aussi à la quarantaine; le Soleil vit sous l'emprise... des planètes!, etc.
- 14 ON EN REPARLE**
Autres Terre: même autour des étoiles naines !
- 20 ON TENAIT À VOUS DIRE**
Stop au mythe du cerveau d'Einstein
- 22 TERRE**
A haute altitude, le dioxyde de carbone refroidit l'atmosphère; l'acidité des eaux ronge déjà les ptéropodes, etc.
- 28 LES CLÉS POUR COMPRENDRE**
Pourquoi craint-on une nouvelle crise alimentaire

- 30 MÉDECINE**
Un remède veut protéger les poumons de la grippe; la piqûre de cette méduse ne sera plus mortelle; dans le coma, le cerveau se réorganise; un diurétique serait efficace pour atténuer les troubles de... l'autisme, etc.
- 36 IDÉE NEUVE**
"Je veux colmater les hémorragies avec une bombe de mousse anticrevaison"
- 38 TECHNOS**
Cette fusée décolle et atterrit comme un avion; ils ont réussi à transformer de l'air en pétrole, etc.
- 42 FOCUS**
graphène: enfin prêt pour l'électronique

FONDAMENTAL

- À LA UNE**
- 44 CERVEAU ARTIFICIEL**
SA FABRICATION A COMMENCÉ !
- 64 ÉVÉNEMENT**
SUMATRA: UNE PLAQUE TECTONIQUE EST EN TRAIN DE NAÎTRE
- 70 ENQUÊTE**
SCHIZOPHRÉNIE, DÉPRESSION... LES DÉGÂTS IRRÉVERSIBLES DU CANNABIS



70



EN PRATIQUE

- 78 EXPLOIT**
LE NOYAU DE L'ATOME N'EST PLUS CE QU'IL ÉTAIT
- 84 TENDANCE**
VÉNUS, SATURNE, MARS... LEUR CLIMAT NOUS INTÉRESSE
- 92 ANALYSE**
DÉMANTÈLEMENT NUCLEAIRE
MAIS COMMENT EDF VA S'Y PRENDRE ?

- 104 LE POINT SUR...**
60 ans après sa découverte
LES NOUVEAUX MYSTÈRES DE L'ADN
Lorsqu'en 1953, Crick et Watson élucident la structure de l'ADN, c'est une nouvelle compréhension du vivant qui émerge. Soixante ans plus tard, on sait que les gènes n'expliquent pas tout. Et que l'ADN pose bien d'autres défis...



- 116 BON À SAVOIR**
- 118 ZOOM DU MOIS**
Erreurs de jugement, perceptions erronées... Apprenez à reconnaître vos "biais cognitifs"
- 124 QUESTIONS / RÉPONSES**
- 130 TECHNOFOLIES**
Les lunettes anti-décalage horaire ; elle aspire sans effort les cheveux sur la moquette ; le reflex le plus compact du marché ; une lige high-tech profilée pour les fous de la vitesse, etc
- 136 LE CIEL DU MOIS**

- 138 Contre-Sommaire**

Trois encarts, "Société française des monnaies", "Boutique S&V, big bang des soldes" et "S&V Montre" sont jetés sur les exemplaires de toute la diffusion abonnés France métropolitaine. Un encart "carte 100 ans" est jeté sur la diffusion abonnés étrangers.

R. HARTWICK - DR



IMAGINÉE POUR VOUS ÉVADER.

Avec une consommation raisonnée de 3,8 L/100 km, des rejets de CO₂ limités de 99 g/km, sa garde au sol surélevée et ses équipements de série comme l'airbag piéton en première mondiale et son système anti-collision City Safety, la Volvo V40 Cross Country va vous donner envie d'ailleurs.

À partir de 299 €/mois⁽¹⁾ Entretien, Garantie et Assistance inclus pendant 4 ans⁽²⁾
(LLD 48 mois valable du 02/01/2013 au 31/03/2013)

NOUVELLE VOLVO V40 CROSS COUNTRY.



f REJOIGNEZ
VOLVO AUTOMOBILES FRANCE
SUR FACEBOOK

VOLVOCARS.COM/FR

(1) Exemple de **Location Longue Durée sur 48 mois et 60 000 km** pour une **Volvo V40 Cross Country D2 Kinetic avec peinture métallisée. Un premier loyer de 5 400 €** suivi de 47 loyers mensuels de 299 € TTC (hors assurances facultatives et prestations). Offre réservée aux particuliers, valable du **02/01/2013 au 31/03/2013** sous réserve d'acceptation du dossier par Volvo Automobiles Finance, département de CGL, Compagnie Générale de Location d'Équipements, SA au capital de 58 606 156 € - 69, avenue de Flandre 59708 Marcq-en-Baroeul Cedex - SIREN 303 236 186 - RCS Roubaix-Tourcoing. (2) Tous véhicules sauf Taxis et VSL. La garantie constructeur est complétée par une extension de garantie dont la couverture est moins étendue que celle de la garantie initiale (exclusion notamment de la carrosserie). Demander le détail des conditions de la garantie constructeur, de l'extension de garantie, de l'entretien et de l'assistance à votre conseiller service. Volvo Automobiles France, RCS Nanterre n° 479 807 141, Immeuble Nielle, 131-151 rue du 1^{er} mai - 92737 Nanterre Cedex. Modèle présenté : Volvo V40 Cross Country D3 Kinetic avec options protections de bas de caisse latéraux, feux de jour à LED et jantes alliage Mefitis 18" à partir de **340 €/mois** dont **un premier loyer de 6 000 €**.

Consommation Euromix de la Volvo V40 Cross Country D2 Kinetic : 3,8 l/100 km, CO₂ rejeté : 99 g/km.

ADN : êtes-vous sûrs de vos chiffres ?

Dans votre numéro de décembre 2012, vous indiquez dans une actualité (p. 22) que la demi-vie de l'ADN a été établie à 521 ans. Or, dans un autre article (p. 92), il est écrit que certains scientifiques veulent utiliser l'ADN comme forme de stockage de l'information, estimant qu'un échantillon d'ADN dans le désert pourrait être retrouvé 400 000 ans plus tard !

Sylvain Grancher, Internet

SV En effet, une demi-vie de 521 ans "seulement" et une conservation sur plusieurs centaines de milliers d'années peuvent sembler contradictoires... Ces

deux chiffres sont pourtant justes et compatibles ! Car plus qu'une date absolue de demi-vie, c'est un modèle de la dégradation de l'ADN au fil du temps et selon l'environnement qu'a proposé le chercheur Morten Allentoft. Les 521 ans ont été obtenus à une température de 25 °C. Or, la conservation de l'ADN fluctue énormément selon les conditions de stockage : température, type d'environnement (acide...), humidité, etc. A -5 °C, le chercheur note ainsi que la demi-vie peut monter jusqu'à 158 000 ans pour de petits fragments. Le généticien George Church, s'il



pousse l'image en parlant de 400 000 ans pour un échantillon d'ADN abandonné dans le désert, connaît parfaitement les conditions à prévoir pour obtenir une conservation optimale – et les a bien entendu privilégiées dans son laboratoire. Mais surtout, vu qu'il synthétise artificiellement le texte d'ADN qu'il veut stocker, il se débarrasse

de facto du premier responsable de la destruction de l'ADN : la cellule elle-même ! Laquelle, à sa mort, libère enzymes et agents chimiques qui s'attaquent à la longue molécule... A l'abri de tout ce qui peut l'attaquer dans un environnement naturel, la très stable molécule d'ADN peut donc tenir des centaines de milliers d'années.



Des galets de Mars aux rochers d'Atacama...

Peut-on envisager que les galets retrouvés sur Mars par le rover *Curiosity* ne reflètent pas la présence passée d'eau sur cette planète comme vous l'écrivez (n° 1143, p. 14)... Mais imaginer que ces galets soient plutôt le

résultat de frottements induits par une multitude de séismes martiens, comme cela a été proposé pour expliquer l'aspect poli de rochers dans le désert d'Atacama au Chili (n° 1143, p. 36) ?

Raphael Toriel, Seynod (74)

SV Votre mise en parallèle de ces deux actualités est intéressante. Pour les galets trouvés sur Mars, la présence d'eau dans le passé est cependant l'hypothèse la plus simple. Mais surtout la plus étayée ! "Nous avons de nombreux autres indices permettant de dire que de l'eau a coulé sur

Mars, rappelle Stéphane Le Mouellic, de l'université de Nantes. D'ordre morphologique, comme l'observation d'anciennes vallées fluviales et de deltas ; ou minéralogique, comme la détection, depuis l'orbite de Mars, d'argiles à sa surface." La Nasa a justement choisi de poser *Curiosity* à proximité d'un delta, et à quelques kilomètres du lieu où des argiles ont été détectées. Par ailleurs, bien que son activité sismique n'ait jamais encore été mesurée, les spécialistes ne pensent pas que Mars connaisse une tectonique des plaques analogue à celle qui engendre sur Terre, et au Chili en particulier, des tremblements de terre.

La boutique SCIENCE & VIE

NOUVEAU !

WWW
laboutiquescienceetvie.com

Livres

Idées cadeaux

Objets scientifiques ou insolites

Veuillez adresser votre courrier à : sev.lecteurs@mondadori.fr

actus labos

> Grâce au détecteur de particules de la collaboration BaBar, à Stanford, les chercheurs ont démontré que la flèche du temps joue aussi à l'échelle microscopique.

P. GINTER/CORBIS



PHYSIQUE

LE TEMPS S'ÉCOULE AUSSI POUR L'ATOME

Pour la première fois, des physiciens sont parvenus à mettre en évidence à l'échelle microscopique un processus qui ne soit pas réversible dans le temps. "A notre échelle, l'irréversibilité des phénomènes physiques est une chose banale. De fait, personne n'a jamais vu les morceaux d'un verre brisé se réassembler, explique Guy Wormser, du Laboratoire de l'accélérateur linéaire (université Paris-Sud), et membre de la collaboration BaBar. A l'inverse, les équations de

la microphysique sont parfaitement réversibles dans le temps. Si bien que si un phénomène impliquant des particules élémentaires est possible, on s'attend a priori à ce que le phénomène inverse le soit aussi, et ce avec la même probabilité." Sauf qu'a posteriori, les expérimentateurs sont donc formels: la probabilité de transformation des mésons B, des particules élémentaires, d'un état quantique à un autre n'est pas la même selon que cette transformation s'effec-

tue dans un sens ou dans l'autre. Le phénomène est bien asymétrique par rapport au temps. Jusqu'ici, seul le monde macroscopique était concerné par une telle irréversibilité: le fameux deuxième principe de la thermodynamique, qui décrit les échanges thermiques entre systèmes, stipule que le désordre ne peut que croître au fil du temps. Preuve est faite aujourd'hui que la flèche du temps prend également sa source au cœur de l'infiniment petit. **M.G.**

GÉNÉTIQUE

UN PRÉDÉCESSEUR DE L'ADN AURAIT ÉTÉ RETROUVÉ

Et si l'on venait de trouver la trace de la première molécule génétique? Si l'ADN reste la forme reine de stockage de l'information dans le vivant, certaines théories font de l'ARN, son cousin, un prédécesseur. Entre les deux acides nucléiques, peu de différences: le squelette est le même, alternant sucre et phosphate, et s'y accrochent quatre "bases" quasiment identiques. Des chercheurs américains et suédois sont peut-être remontés au-delà, en étudiant des cyanobactéries venant de toute la planète. En effet, si ces micro-organismes apparus il y a 3,5 milliards d'années possèdent bien de l'ADN, les chimistes ont découvert qu'ils produisaient également du N-(2-aminoethyl) glycine: la molécule de

base du squelette d'un autre type d'acide nucléique, les acides nucléiques peptidiques (ANP). *"Avec ce squelette très simple et très stable, on peut penser que cette molécule porteuse de l'information génétique ait pu apparaître avant l'ARN et l'ADN"*, indique Marie-Christine Maurel, du Laboratoire acides nucléiques et biophysique à l'université Paris-VI. Déjà créés en laboratoire, ces ANP n'avaient jamais été observés à l'état naturel. Patrick Forterre, de l'Institut Pasteur, met toutefois en garde: *"Vu les conditions extrêmes sur la Terre il y a 3 milliards d'années, la synthèse d'ANP n'était certainement pas plus facile que la synthèse d'ARN!"* Le débat n'est donc toujours pas tranché. **O.D.**



PHYSIOLOGIE VÉGÉTALE

Cette algue est cannibale

C'est ce que vient de découvrir la chercheuse Olga Blifernez-Klassen, de l'université allemande de Bielefeld, en Westphalie du Nord. Elle a observé que placée dans un environnement pauvre en dioxyde de carbone, élément nécessaire au processus de photosynthèse, la microalgue verte *Chlamydomonas reinhardtii* sécrète une enzyme qui lui permet de digérer la cellulose des autres végétaux. C'est la première fois qu'on observe chez un organisme chlorophyllien la capacité de produire de la matière organique autrement que par photosynthèse. **E.L.-T.**





▲ C'est dans des sources chaudes, notamment celles du parc de Yellowstone, que vivent les bactéries produisant la molécule qui aurait pu précéder l'ADN.

PALÉONTOLOGIE

DÉJÀ AU NÉOLITHIQUE, ON MANGEAIT DU FROMAGE

Il y a 7000 ans, les fermiers du Néolithique savaient déjà fabriquer du fromage. L'analyse par Mélanie Salque (université de Bristol, Royaume-Uni) de fragments de poteries percées découverts en Pologne est en effet formelle : les traces d'acides gras caractéristiques du lait retrouvées sur ces poteries attestent de leur utilisation dans la fabrication de fromage. A l'image des faisselles modernes, les multiples trous de 2 à 3 mm de diamètre qui caractérisent ces poteries devaient permettre la séparation du caillé – le lait coagulé – d'avec le petit-lait, riche en lactose. *“La production de fromage a été une étape importante de développement, note Mélanie Salque. Non seulement elle a permis la conservation du lait sous une forme non périssable et transportable, mais elle a aussi fait du lait une denrée plus digeste pour les fermiers préhistoriques”.* Ces populations étaient en effet intolérantes au lactose. **E.H.**

323 années-lumière

C'est la distance qui nous séparerait en fait de l'étoile Polaire. Soit 111 années-lumière de moins que la précédente estimation réalisée dans les années 1990 à l'aide du satellite *Hipparcos*. Située à l'extrémité de la queue de la Petite Ourse, Polaris indique toujours le nord : c'est dans cette direction que David Turner, de l'université d'Halifax, a pointé le télescope russe BTA-6, et a pu déduire plus précisément son éloignement par rapport à la Terre. **B.R.**



▲ Cette poterie du Néolithique a toutes les caractéristiques d'une faisselle.





SCIENCE & VIE

N° 1139

AOÛT 2012

AUTRES TERRE

MÊME AUTOUR DES ÉTOILES NAINES !

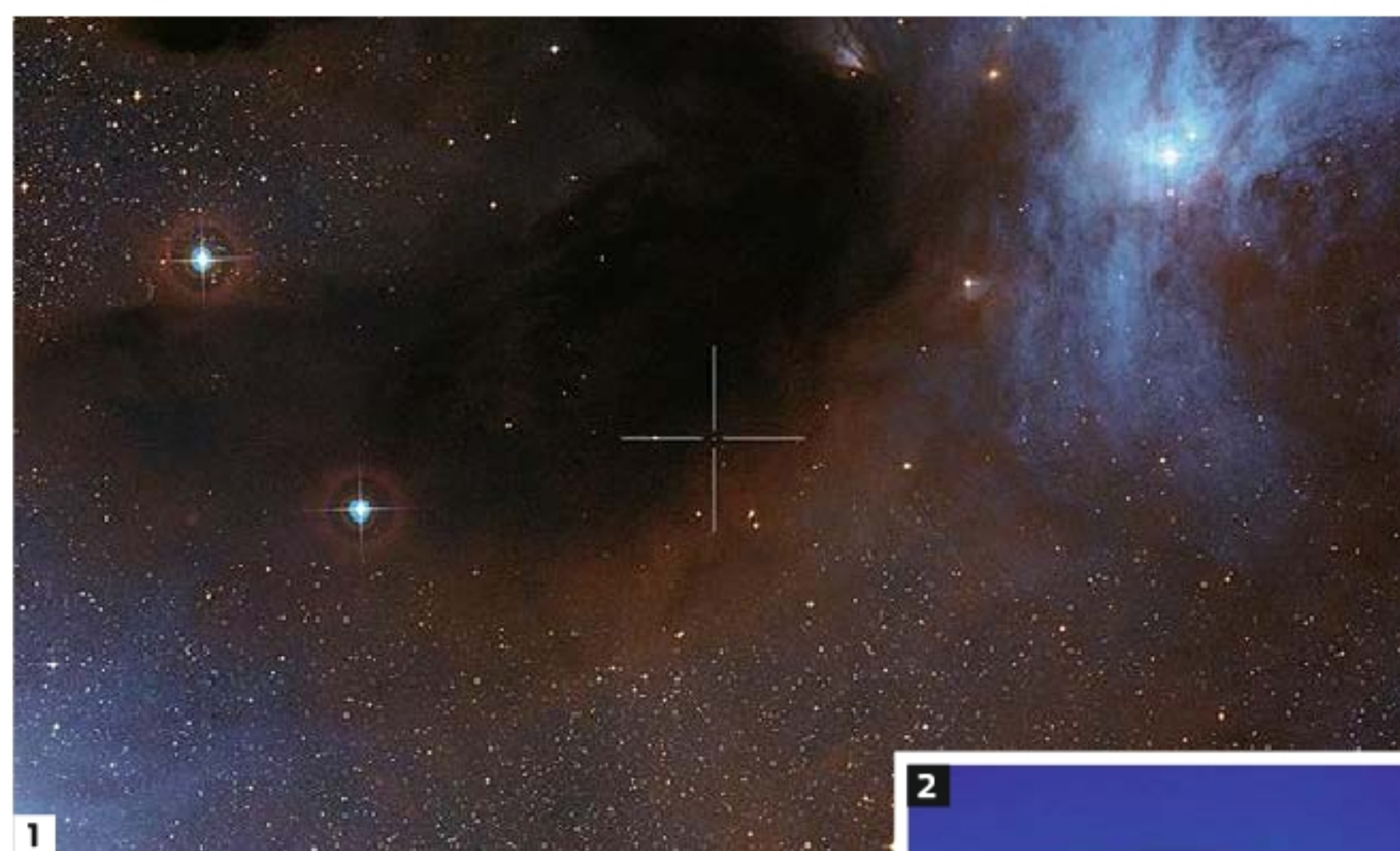
Décidément, la Terre est loin d'être unique ! Alors qu'il existe une infinité de planètes habitables dans l'Univers, voici que même des étoiles avortées comme les naines brunes rendraient possible la formation de planètes rocheuses.

Il y a 10000 milliards de milliards de planètes habitables dans l'Univers, annonçait-on à la une en août dernier. Ce chiffre pourrait encore grimper, car les étoiles solaires n'auraient pas l'exclusivité de la fabrication de planètes. L'équipe de Luca Ricci, du California Institute of Technology, a montré que les naines brunes, ces étoiles ratées à la lumière ténue, incapables de brûler de l'hydrogène, seraient elles aussi capables de façonner des rocheuses, comme la Terre. Braquant le télescope Alma sur la naine brune Rho-Oph 102, les astrophysiciens ont détaillé son disque de gaz et de poussières, et découvert que sa composition et sa structure étaient similaires à celles du disque du Soleil.

PLUS FACILES À OBSERVER

"On craignait que les disques autour des naines brunes soient composés de corpuscules trop petits et pas assez nombreux pour s'agglomérer et former des planètes", explique Luca Ricci. Or, le disque de Rho-Oph 102 est constitué de grains du millimètre au centimètre qui s'étendent sur 40 unités astronomiques, représentant jusqu'à 1 % de la masse de l'étoile... exactement comme ceux des étoiles solaires!

Une bonne nouvelle pour les astronomes qui traquent la vie extraterrestre, car les naines

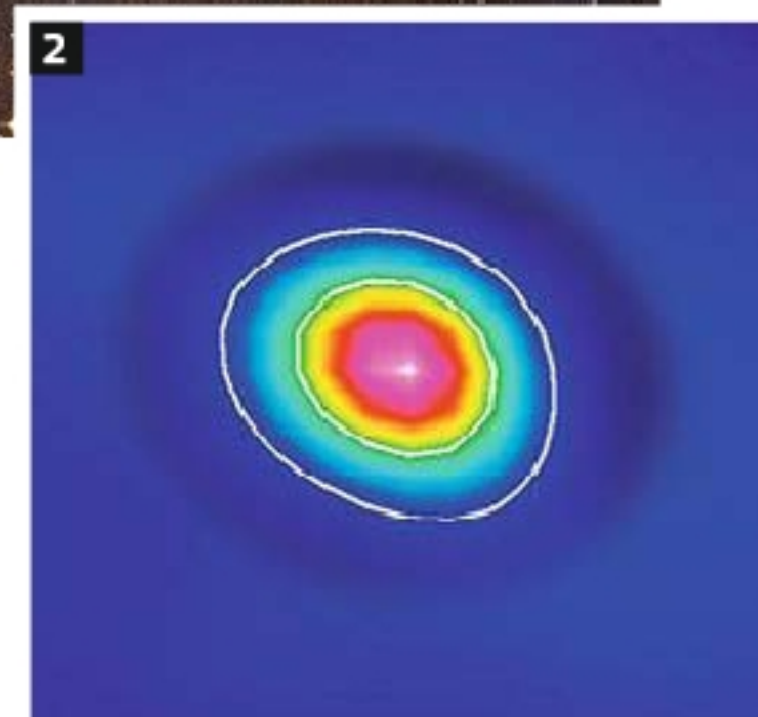


brunes seraient aussi nombreuses que les soleils dans la Voie lactée; et surtout, leur faible rayon permettrait de détecter plus facilement des planètes autour d'elles. *"La seule méthode d'analyse de l'atmosphère des exoplanètes consiste à capter la variation de la lumière de l'étoile lorsque la planète passe devant elle, explique Emeline Bolmont, spécialiste des naines brunes à l'Observatoire de Bordeaux. Une Terre passant devant une étoile aussi petite qu'une naine brune sera forcément très visible."*

Les astronomes prévoient déjà d'exploiter la puissance du télescope JWST, qui devrait être en orbite en 2018. En attendant, ils évaluent la possibilité qu'une

1 Le télescope Alma a ciblé la naine brune Rho-Oph 102, petite étoile à la lumière ténue...

2 ... et découvert que son disque de gaz et de poussières était similaire à celui d'une étoile solaire.



planète habitable existe autour de ces étoiles atypiques. Les premiers modèles viennent de livrer leurs résultats: malgré leur faible luminosité, les naines brunes pourraient chauffer assez pour qu'une planète abrite de l'eau liquide. Un argument de poids pour se convaincre encore un peu plus que nous ne sommes pas seuls dans l'Univers... **M.F.**

CERTAINS HOMMES
ONT DU MAL À EXPRIMER
LEURS SENTIMENTS.
PAS NOS DESIGNERS.



www.renault.fr



ON SE SOUVIENT TOUJOURS DE LA PREMIÈRE FOIS OÙ L'ON A VU LA

NOUVELLE RENAULT CLIO

- Nouveau moteur diesel Energy dCi 90 ch 3,2l/100km et 83g CO₂/km⁽¹⁾
- 5 étoiles Euro NCAP⁽²⁾
- Écran tactile multimédia avec navigation⁽³⁾

CHANGEONS DE VIE
CHANGEONS L'AUTOMOBILE



(1) Version optimisée. Consommation (en cycle mixte) et émissions homologuées. Véhicule présenté avec options. (2) 5 étoiles Euro NCAP obtenues en 2012 sur Renault Clio Energy TCe 90 ch Expression. (3) De série dès le niveau de finition Expression.
RENAULT QUALITY MADE : la qualité par Renault.

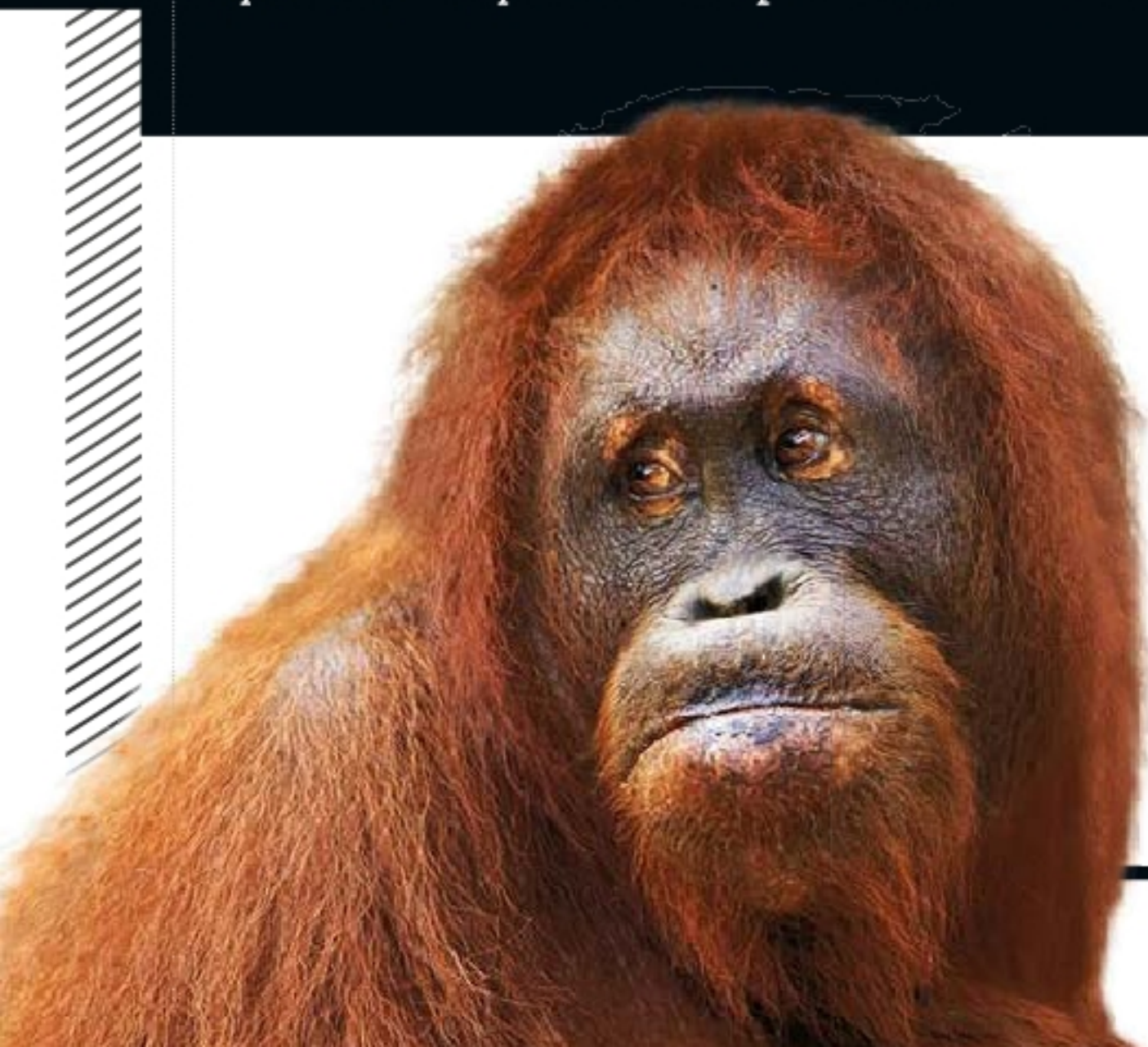
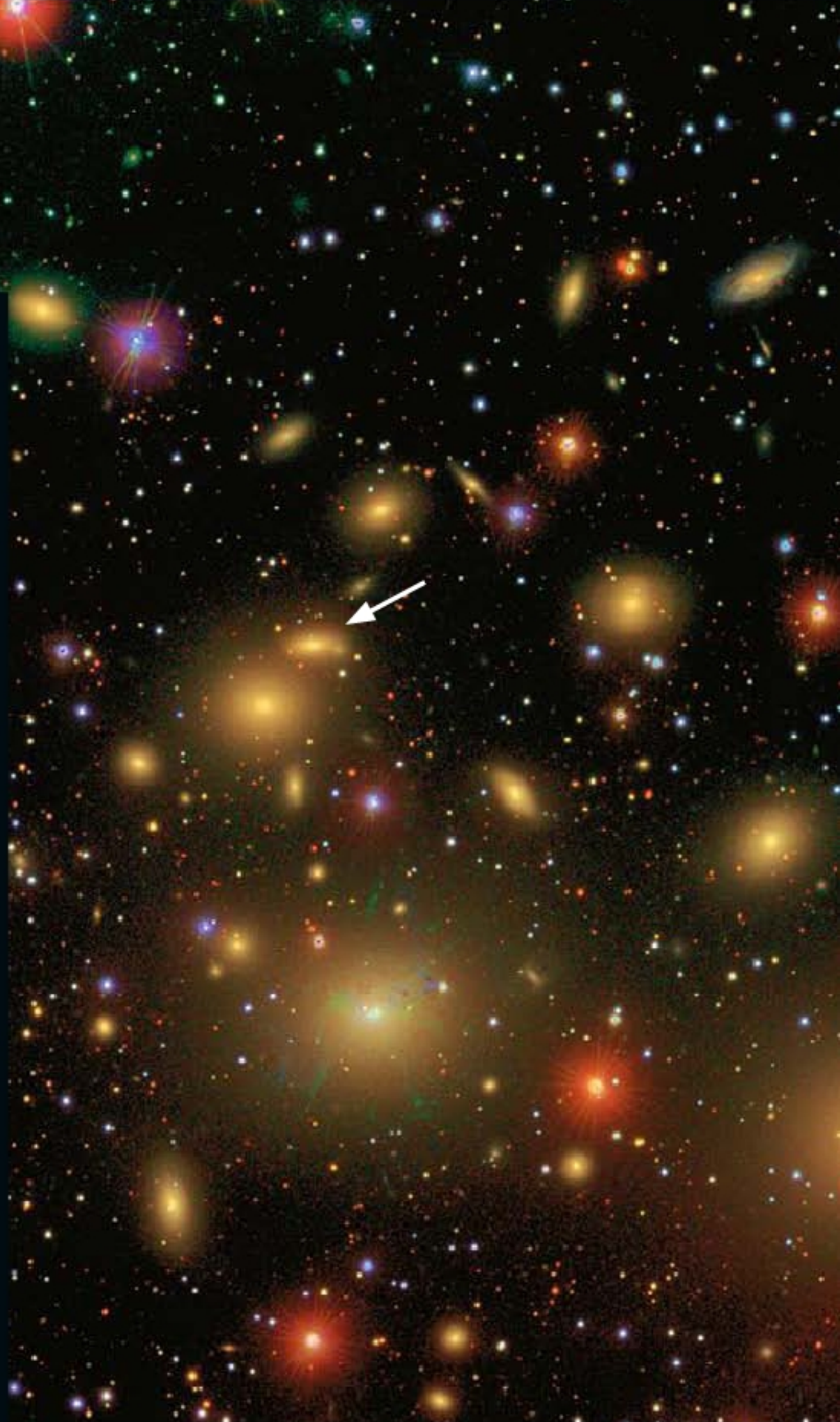
Renault présente **elf**

ASTROPHYSIQUE

UN TROU NOIR, GALACTIQUE SÈME LA CONFUSION

Karl Gebhardt n'en est pas encore revenu. Avec ses collègues de l'université du Texas, il vient de découvrir le plus gigantesque trou noir galactique jamais observé. Un monstre de 17 milliards de masses solaires, au cœur de NGC 1277, située à 220 années-lumière. Alors que la plupart des trous noirs galactiques affichent une masse équivalente à 0,1 % de celle de leur galaxie hôte, celui-ci représente 14 % de la masse de NGC 1277! *"C'est vraiment une galaxie excentrique, explique Karl Gebhardt. Presque entièrement constituée d'un trou noir, elle pourrait être le premier*

représentant d'une nouvelle classe d'objets." Au point de remettre en question les scénarios de formation et d'évolution des galaxies et de leur trou noir, qui sont loin d'être gravés dans le marbre. Car les astrophysiciens s'accordaient au moins sur un point: il doit y avoir une corrélation forte entre la masse d'un trou noir et celle de son hôte. Ce que les observations semblaient jusqu'alors confirmer dans un rapport de 1 pour 1 000. NGC 1277 est-elle l'exception qui confirme la règle? Ou bien l'arbre qui cache la forêt? C'est, pour l'instant, la stupeur qui domine chez les spécialistes. **M.G.**



ÉTHOLOGIE

LES PRIMATES DÉPRIMENT AUSSI À

Humeur morose, fatigue, stress... les grands singes connaissent eux aussi la crise de la quarantaine. C'est ce que révèle Alexander Weiss, psychologue de l'université d'Edimbourg, qui a examiné le bien-être de 508 chimpanzés et orangs-outans vivant dans des parcs animaliers. L'ana-

lyse des questionnaires remplis par les soigneurs chargés de ces primates montre qu'ils présenteraient un certain mal-être au milieu de leur vie, entre 28 et 35 ans, selon une courbe en U caractéristique. Bons vivants durant leurs jeunes années et pendant l'âge mûr, ils connaissent "un passage à

UNE "ODEUR BLANCHE"

Après le blanc, synthèse visuelle des couleurs mélangées, le bruit blanc (superposition de sons), des chercheurs ont démontré l'existence d'une "odeur blanche". Ainsi, des mélanges composés de plus de trente molécules olfactives différentes auront tous la même odeur, même s'ils n'ont aucun composé en commun. **E.R.**

MOUSTIQUES ET BROUILLARD

Le moustique supporte les gouttes de pluie, pesant 50 fois son poids, mais pas les gouttelettes de brouillard, vingt millions de fois plus légères que lui ! Leur impact continu sur ses "haltères", organes qui renseignent sur l'équilibre et l'orientation, lui fait en effet perdre le contrôle de son vol. **E.L.-T.**

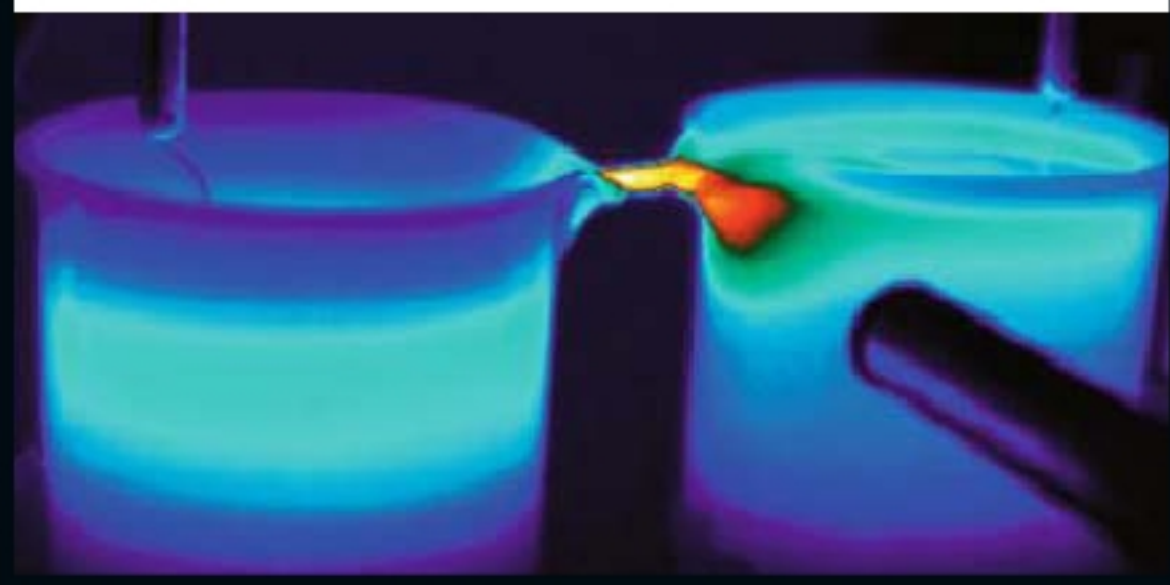
L'ISOLEMENT MODIFIE LES NEURONES

Des souris séparées de leurs congénères pendant huit semaines ont vu s'amincir la gaine qui protège leurs neurones et favorise la transmission des signaux nerveux. De retour parmi leurs semblables, les rongeurs restent à l'écart. Mais cet état est toutefois réversible. **L.C.**

PHYSIQUE

L'ÉNIGME DES PONTS D'EAU N'EN EST PLUS UNE

Les molécules d'eau ne s'alignent pas sur les champs électriques. Depuis que des physiciens avaient découvert que, sous l'action d'un fort champ électrique, l'eau pouvait former un pont de plusieurs dizaines de millimètres entre deux récipients, ils pensaient que sa structure pouvait être modifiée. "Certaines expériences avaient semblé montrer que les molécules d'eau se liaient les unes aux autres dans la direction du champ électrique, précise Lawrie Skinner, du laboratoire national d'Argonne (Etats-Unis). Mais nous venons de prouver que ce n'est pas le cas." Scrutant le phénomène à l'aide d'un diffractomètre à rayon X, le physicien vient en effet de s'apercevoir que les molécules d'eau demeurent indépendantes et leurs mouvements aléatoires... comme dans n'importe quel verre d'eau. C'est simplement en renforçant la cohésion entre les molécules d'eau à la surface du liquide que l'électricité lui offre le pouvoir de défier la gravité et donne naissance à ces étranges sculptures liquides. **M.F.**



NEUROSCIENCES

ON SAIT D'OÙ VIENT LA "PETITE VOIX" QUAND ON LIT EN SILENCE

La "petite voix intérieure" qui se manifeste quand on lit en silence a été localisée. Grâce à des électrodes implantées chez des patients épileptiques, Jean-Philippe Lachaux (Centre de recherche en neurosciences de Lyon) a observé l'activation de neurones du cortex auditif spécialisés dans le traitement de la voix. Et ce, une fraction de seconde après l'activation des aires visuelles par la lecture. Le couplage de ces deux aires cérébrales trouverait son origine dans l'apprentissage de la lecture à voix haute. Autre enseignement : les neurones auditifs sont plus actifs lorsqu'on est attentif à ce qu'on lit. "Cela laisse envisager la possibilité d'apprendre à contrôler ce mécanisme dans d'autres circonstances que la lecture silencieuse, par exemple pour les patients schizophrènes dont la petite voix se fait trop présente", explique le chercheur. **C.H.**

F. ROGERS/CORBIS - D.W. HOOG/M. BLANTON/DSS COLLABORATION - © PNAS

▲ Le trou noir au cœur de la galaxie NGC 1277 a une masse hors-norme : il pourrait remettre en question la formation des trous noirs.

LA QUARANTAINE

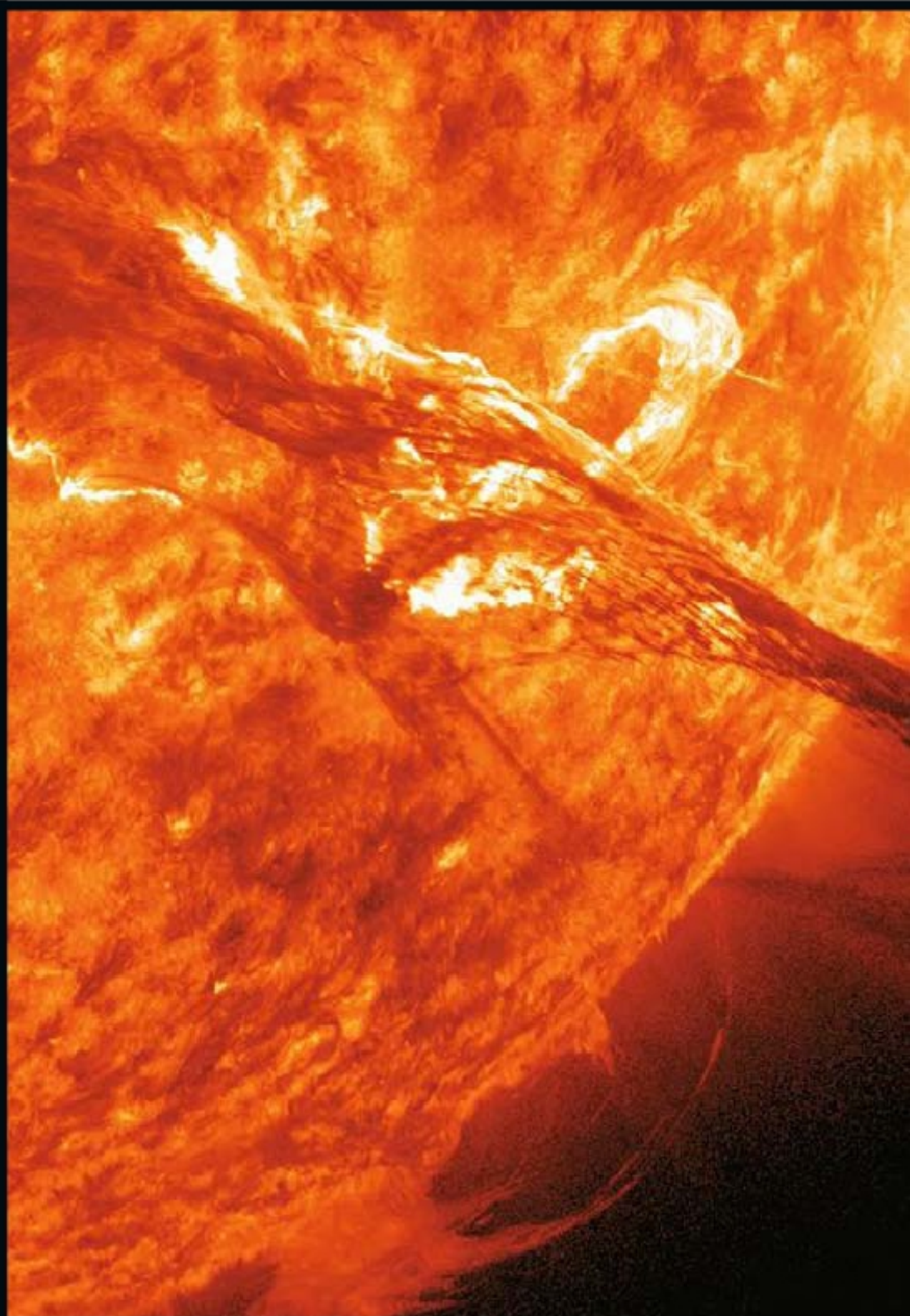
vide" à l'âge adulte. Moins investis socialement, ils font aussi moins d'efforts pour trouver de la nourriture. Sur la base de ces observations, les chercheurs estiment que la crise de la quarantaine chez les humains serait elle aussi liée à des facteurs biologiques et non pas seulement culturels. **J.G.**

ASTROPHYSIQUE

LE SOLEIL VIT SOUS L'EMPRISE DES... PLANETES

Elles représentent moins de 1 % de la masse du système solaire et pourtant, elles pèsent dans la balance: les planètes pourraient influencer ce mastodonte qu'est le Soleil! Comparant les variations d'activité solaire au cours des 10 000 dernières années avec celles du pouvoir d'attraction des planètes en fonction de leur configuration, José Abreu et son équipe de l'université de Zurich ont noté une parfaite correspondance. *"Cela a été une grande surprise de trouver cette corrélation entre les variations à grande échelle du cycle solaire et le moment cinétique des planètes, raconte José Abreu. Nous osions à peine imaginer qu'elle pouvait traduire*

un lien de cause à effet." Les chercheurs ont tout de même modélisé l'impact de la gravitation des planètes sur la zone qui, au cœur du soleil, est responsable de la formation de son champ magnétique et ils ont eu la confirmation de leur intuition: si ténues soient-elles, les forces de gravité planétaires peuvent modifier la circulation des plasmas jusqu'à faire varier le champ magnétique global de l'étoile et modifier son activité et par là, l'intensité de ses éruptions. De la même manière que la Lune provoque les marées terrestres, Mars, Vénus, Jupiter et les autres pourraient commander aux humeurs du Soleil. **M.F.**



1,40 m

C'est la distance à laquelle est capable de sauter le grillon pygmée. Soit l'équivalent de 250 fois la longueur du corps de l'insecte, qui mesure seulement 5 millimètres. D'après les calculs de Malcom Burrows (université de Cambridge), le criquet est soumis à une accélération de 306 g lors de ses bonds. En comparaison, un astronaute subit une accélération de 3 g au décollage. **B.B.**

ÉTHOLOGIE

Les oiseaux apprennent à chanter dans l'œuf

Un mot de passe vocal. Voici ce que le mérion superbe, un passereau d'Australie, apprend de sa mère alors qu'il n'est qu'un embryon. Diane Colombelli-Négrel (université de Flinders, Adelaïde) a observé que la mère émet une mélodie spécifique pendant la couvée, et que plus le chant de l'oisillon y ressemble, mieux elle s'occupe de lui. Et moins la reproduction est juste, plus elle tend à abandonner le nid. C'est le cas lorsque des œufs de coucous, dont la durée d'incubation est plus courte, sont placés dans le nid. **E.A.**



▲ Les forces de gravité des planètes impactent le champ magnétique solaire au point de modifier l'activité de l'astre.



PALÉONTOLOGIE

UNE THÉORIE RÉINTERPRÈTE L'ORIGINE DES PREMIERS ORGANISMES COMPLEXES

Et si les premiers fossiles d'organismes complexes, traditionnellement considérés d'origine marine, étaient en réalité les vestiges d'organismes vivant sur la terre ferme ? C'est la thèse étonnante soutenue par Gregory Retallack, de l'université de l'Oregon, aux Etats-Unis. Ce spécialiste des sols anciens a étudié des échantillons prélevés en Australie et datant de l'Ediacarien (de -635 à -542 millions d'années). Et selon lui, plusieurs caractéristiques amènent à les considérer comme des sols fossilisés, plutôt que comme des fonds marins fossilisés : la texture de leur surface, évoquant celle du désert ou de la toundra, la structure de leurs sédiments, ou leur composition isotopique. Les fossiles retrouvés dans ces roches ne seraient donc pas ceux d'organismes marins, mais plutôt ceux de lichens, de champignons ou de colonies microbiennes établis sur les continents. A contre-courant des théories prévalant actuellement, cette réinterprétation dépeint une transition de la vie marine vers les continents bien plus précoce qu'envisagée, voire, une influence de la vie à terre sur le développement de la vie marine. Mais cette réécriture de l'histoire laisse sceptiques nombre de spécialistes qui estiment que les indices mis en avant sont ambigus et pourraient aussi s'expliquer dans un environnement océanique. Affaire à suivre... **L.C.**



▲ Selon cette théorie, ces organismes complexes vivaient sur les continents et non en milieu marin.

STOP AU MYTHE DU CERVEAU D'EINSTEIN

Par Hervé Poirier

Le secret du génie d'Albert Einstein se lirait-il dans les nouvelles photographies de son cortex cérébral qui viennent d'être publiées dans la revue *Brain*? Assez macabres, ces quatorze clichés sont les dernières pièces d'une saga qui a commencé le 18 avril 1955, à la mort de celui qui reste la plus grande star scientifique de tous les temps : lors de son autopsie, son cerveau fut prélevé (sans autorisation), photographié, découpé, puis caché pendant plus de vingt ans avant de faire l'objet d'analyses plus ou moins partielles et convaincantes (voir *Science & Vie* n° 1080, p. 106). Or, après avoir analysé les quatorze clichés inédits, Dean Falk, du département d'anthropologie de l'université d'Etat de Floride, vient d'annoncer que "*le cerveau d'Einstein a un cortex préfrontal extraordinaire*", que les cortex moteur et somatosensoriel primaire sont "*grandement étendus*" et que les lobes pariétaux sont "*inhabituels et pourraient avoir fourni les soubassements neurologiques à son talent mathématique et visiospatial*".

Il faut bien reconnaître que ce petit tas de chair est une icône de la science : c'est là qu'ont été forgées les clés de compréhension du monde moderne. C'est dans ces sillons, cinquante ans avant leur plongée dans le formol, que furent coup sur coup pensés l'expérience décisive démontrant l'existence des atomes, l'argument clé pour l'avènement de la mécanique quantique, ainsi que le raisonnement révolutionnaire sur l'espace et le temps menant à la théorie de la relativité restreinte. Et c'est toujours de là, dix ans plus tard, que jaillirent les lois cosmiques de la relativité générale. Malgré tout, il est très difficile de croire que des photographies de ce fascinant cortex puissent permettre de comprendre quoi que ce soit du génie particulier d'Einstein.

Et pas seulement parce que ces études neuro-anatomiques résonnent comme une improbable résurgence de la

phrénologie, qui tenta au XIX^e siècle de relier forme du crâne et intelligence. Le problème, surtout, est que cette approche part d'un grand malentendu sur le talent d'Einstein. Non, le physicien n'était pas doué d'aptitudes mathématiques exceptionnelles ou d'une capacité d'abstraction hors norme. Non, ce n'est pas en jonglant avec des concepts ultrasophistiqués que son cerveau a révolutionné la physique. Au contraire !

Sa méthode a toujours été de se poser les questions les plus simples, à l'aune de quelques principes de base, posés comme incontournables. L'expérience qui révèle l'existence des atomes ? Il l'a imaginée en appliquant à des corps en suspension dans un liquide le "principe de Boltzmann" sur le désordre d'un système thermodynamique. L'argument clé pour l'avènement de la mécanique quantique ? Il est issu de sa volonté de tirer toutes les conséquences du "principe de Planck" sur la quantification du rayonnement lumineux. Sa découverte de la relativité restreinte ? Conséquence de la mise en conformité des lois de l'électromagnétisme avec le "principe de Galilée" sur les mouvements relatifs. La relativité générale ? Née du mariage de la relativité restreinte et du "principe de Newton" sur l'équivalence entre masses graves et inertielles.

Bref, Einstein n'était pas un homme de calculs ou de visions, mais un homme de principes, animé par un esprit lucide, tenace et pratique. Or, il est difficile d'imaginer qu'une telle attitude puisse se lire dans les replis de son cerveau. Pour comprendre d'où vient le génie d'Einstein, il vaut donc mieux tout simplement lire ses écrits.

EN RÉALITÉ, LE GÉNIE DU GRAND PHYSICIEN SE CACHE LÀ OÙ ON NE L'ATTEND PAS



SEE

LE CINEMA GAZINE

LE NOUVEAU MENSUEL DU CINÉMA

**DANS
CHAQUE
NUMÉRO**

- ★ HUMOUR ET CULTURE
- ★ DES ACTUS DE STARS
- ★ UN GRAND DOSSIER
- ★ DES CRITIQUES DE FILMS
- ★ DES INTERVIEWS
- ★ DU LIFESTYLE
- ★ DES SÉRIES T.V.
- ★ UNE SÉLECTION
DVDs, LIVRES,
MUSIQUE,
JEUX VIDÉO...



LE CINÉMA COMME VOUS NE L'AVEZ JAMAIS LU !

En Kiosque chaque mois
au prix de 4,90 €



ÉNERGIE

VERS UN BOOM DES CENTRALES AU CHARBON

Le charbon a encore de beaux jours devant lui ! Près de 1 200 nouvelles centrales au charbon pourraient ainsi voir le jour dans le monde (sans compter les chantiers en cours), d'après le World Resources Institute, un *think tank* américain qui a recensé tous les projets de construction. La majorité d'entre eux concernent l'Asie : l'Inde, avec 455 nouvelles centrales envisagées, et la Chine (363) concentrant 68 % des projets. Suivent la Turquie, la Russie et le Vietnam. L'Europe n'est pas en reste avec des projets en Ukraine (14 centrales), en Pologne (13) et en Allemagne (10). Si le charbon a toujours la cote sur le Vieux Continent, c'est parce qu'il est économiquement plus intéressant que le gaz, dont le cours reste élevé, quand celui du produit final, l'électricité, est à la baisse. En France, la consommation de charbon pour produire de l'électricité s'est ainsi envolée de 79 % entre septembre 2011 et 2012. Mais tous les projets ne verront sans doute pas le jour. Les grands groupes énergétiques chinois et indiens pourraient en effet en abandonner un grand nombre, confrontés à une hausse des prix du charbon et une opposition croissante des citoyens. Ces centrales constituent aujourd'hui la principale source d'émissions de gaz à effet de serre.

G.S.



ZONES AFRIQUE
ET EUROPE

Près de 1200 nouveaux projets de centrales au charbon ont été recensés

Nombre de centrales au charbon à venir (hors chantiers en cours) par pays.

SOURCE: WORLD RESOURCES INSTITUTE, 2012



PLUS DE 50



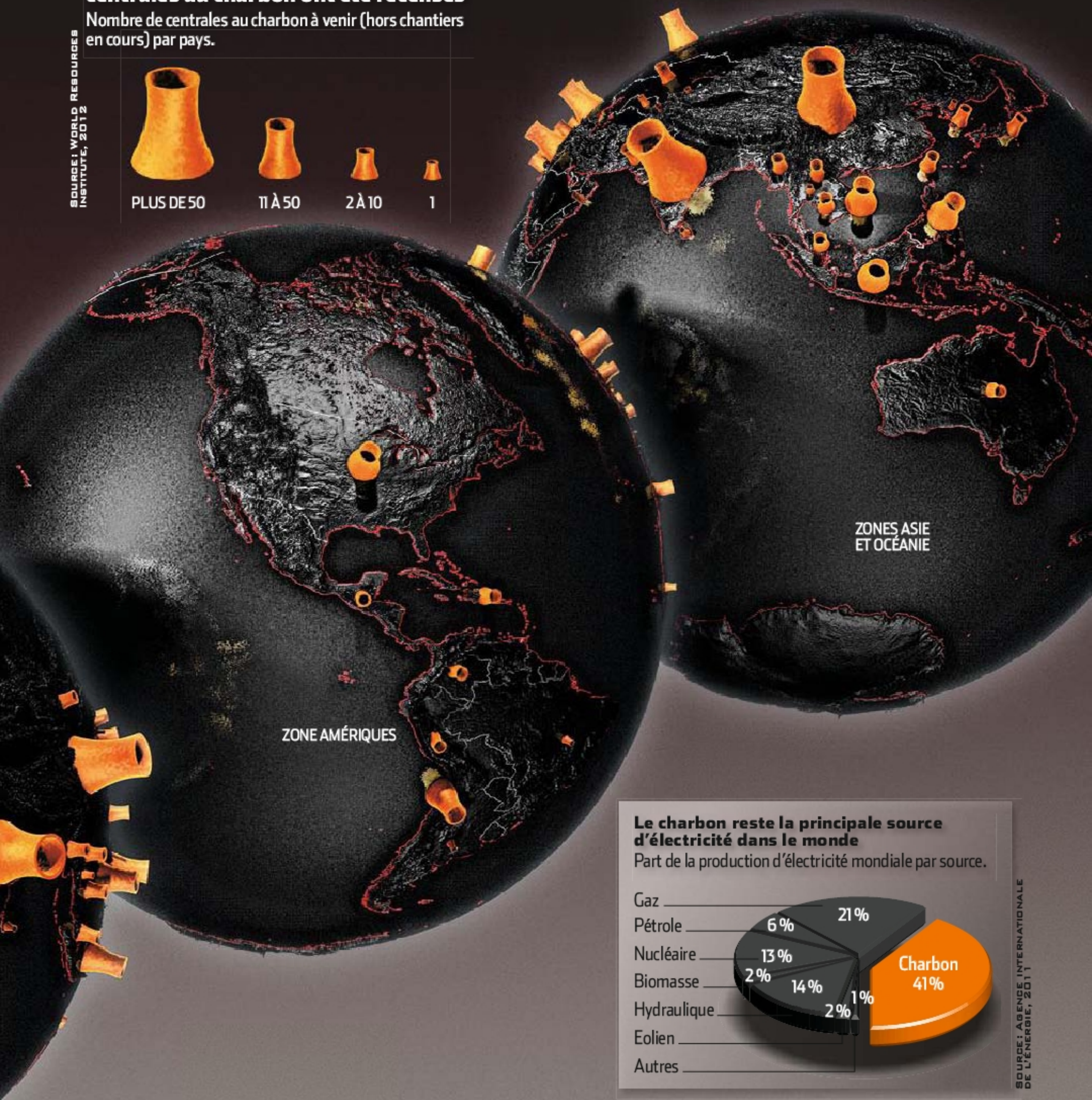
11 À 50



2 À 10

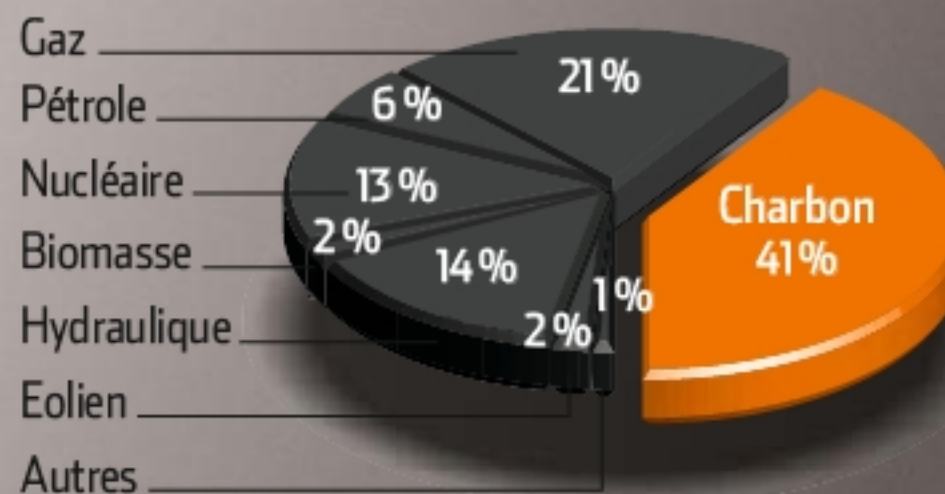


1



Le charbon reste la principale source d'électricité dans le monde

Part de la production d'électricité mondiale par source.



SOURCE: AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE, 2011

7,2 milliards de tonnes de charbon ont été brûlées dans le monde en 2010.

46 % du charbon ont été consommés par la Chine, suivie des États-Unis (13 %) et de l'Inde (9 %).

1,4 million de mégawatts supplémentaires pourraient être disponibles grâce à ces centrales, soit le double de la capacité actuelle.

GÉOCHIMIE

À HAUTE ALTITUDE, LE DIOXYDE DE CARBONE REFROIDIT L'ATMOSPHÈRE

En altitude, le réchauffement climatique refroidit. Epluchant les mesures du satellite canadien SCISAT-1 collectées entre 2004 et 2011, John Emmert et son équipe du Naval Research Laboratory de Washington ont découvert que la quantité de dioxyde de carbone (CO_2) dans la thermosphère, au-delà de 90 km d'alti-

tude, avait augmenté deux fois plus vite que ne le prévoyaient les modèles. "Nous sommes sûrs que cette hausse n'est pas due aux variations de l'activité solaire, précise le chercheur. Il s'agit bien de l'effet, 100 km plus haut, de l'augmentation des émissions de CO_2 au niveau du sol. Et cela a une conséquence : nous avons sous-

estimé le refroidissement de la thermosphère." Car si à basse altitude, le CO_2 est tellement concentré qu'il renvoie vers la terre les rayons du soleil, réchauffant l'air via le fameux effet de serre, sa concentration dans la thermosphère est trop faible pour avoir cet impact : "L'effet dominant du CO_2 à haute altitude est

la collision avec des molécules d'oxygène : elles s'excitent, émettent un rayonnement vers l'espace et donc, refroidissent localement", précise John Emmert. Plus froide, la thermosphère serait ainsi plus compacte... et pourrait se tenir à distance des satellites et prolonger leur vie en orbite autour de la Terre. **M.F.**



✓ Observé sur des papillons de mer de l'océan Austral, le phénomène n'était pas attendu avant 2050...

OCÉANOGRAPHIE

L'ACIDITÉ DES EAUX RONGE DÉJÀ

Dans l'océan Austral, la coquille de certains mollusques présente des signes de corrosion liée à l'acidité des eaux. C'est ce que révèlent les observations au microscope électronique réalisées par Nina Bednaršek (université de Nova Gorica, en Slovénie) sur des papillons de mer, un ptéropode dont

sont friands les harengs et les baleines. Jusqu'à présent, les modèles prédisaient que les eaux de surface de l'océan Austral commenceraient à devenir corrosives à partir des années 2050, sous l'effet de l'augmentation de la teneur en CO_2 atmosphérique. La dissolution mesurée dès à présent sur ces

▼ Au-delà de 90 km d'altitude, le CO₂ a un effet inverse : il refroidit localement l'air.

VIEUX MÉGOTS ET NIDS D'OISEAUX

Passereaux et moineaux utilisent nos vieux mégots pour faire leur nid. Et pas uniquement pour leur moelleux : la nicotine est un excellent répulsif pour les insectes parasites ! De fait, plus un nid contient d'acétate de cellulose, composant des filtres de cigarettes, moins il recèle de parasites. **E.H.**

LA TOILE D'ARAIGNÉE ET LES CULTURES

La simple vue de fils d'araignée sur une feuille de haricots suffit à refréner l'appétit des herbivores les plus voraces, selon les expériences menées en laboratoire et en plein champ par Ann Rypstra (université de Miami). Et ce, même en l'absence d'araignées ! **E.H.**

LE GRAND CANYON PREND UN COUP DE VIEUX

Le fleuve Colorado aurait creusé le plateau du même nom il y a 70 millions d'années, estime Rebecca Flowers (université du Colorado) sur la base d'une nouvelle technique de datation. Une chronologie qui fait débat : on pensait que le Grand Canyon s'était formé il y a seulement 6 millions d'années. **E.H.**

LES PTÉROPODES

mollusques s'explique par la conjonction, locale, entre l'acidification des eaux via l'atmosphère, et des remontées d'eaux profondes contenant elles aussi du CO₂. Reste à déterminer si les papillons de mer parviendront à construire leur coquille plus rapidement que celle-ci n'est corrodée. **L.C.**

BIODIVERSITÉ

DEPUIS 3 000 ANS, CES BACTÉRIES VIVENT SOUS 20 MÈTRES DE GLACE

Une communauté de bactéries très diversifiée, évoluant dans l'un des endroits les plus hostiles de la planète. Voilà ce qu'Alison Murray (Desert Research Institute, Chicago) et ses collègues ont eu la surprise de découvrir dans les eaux du lac Vida, en Antarctique. Particularité : ce lac est recouvert en permanence d'une couche de glace de 20 m d'épaisseur. Un couvercle hermétique qui a isolé ses eaux du monde extérieur depuis au moins 2 800 ans. Les bactéries y survivent en l'absence totale de lumière, d'oxygène, dans une eau six fois plus salée que l'eau de mer, et dont la température descend à -13 °C. D'après l'analyse de segments d'ARN, les micro-organismes retrouvés appartiennent à huit grandes familles de bactéries (spirochètes, protéobactéries...). Bien que cela ne soit pas encore clairement établi, elles pourraient tirer leur source d'énergie de l'hydrogène présent en forte concentration dans le lac. Cette découverte alimente également les conjectures sur les vies extraterrestres, comme l'indique Christopher Mc Kay, spécialiste d'exobiologie à la Nasa : "L'écosystème du lac est probablement un bon analogue des écosystèmes qui pourraient exister sous la glace des lunes Encelade de Saturne, et Europa de Jupiter." **P.L.**



▲ C'est dans le lac Vida, en Antarctique, que vivent des familles de bactéries par -13 °C.

A. SEMENON, WHITE SEA BIOLOGICAL STATION - DR - PNAS

DÉPOLLUTION

DISPERSER LE PÉTROLE LE REND PLUS TOXIQUE

Dans la lutte contre la marée noire provoquée par l'explosion de la plate-forme Deepwater Horizon, l'usage de produits chimiques pour désagréger les nappes d'hydrocarbures aurait rendu le pétrole... 52 fois plus toxique! C'est le résultat des travaux menés après la catastrophe qui a touché le golfe du Mexique en 2010. Lors de tests de toxicité effectués sur des rotifères, des organismes planctoniques à la base de la chaîne alimentaire, les chercheurs mexicains et américains ont en effet observé que l'association du pétrole et de produits dispersants augmentait la mortalité des organismes adultes et empêchait l'éclosion de

plus de la moitié des œufs, menaçant l'écosystème marin. *"Reste à déterminer si les bénéfices de cette dispersion l'ont emporté sur l'augmentation de la toxicité. Peut-être aurait-on dû laisser la nappe se disperser naturellement"*, estime Roberto Rico-Martinez, auteur de l'article. C'est aussi ce que suggère Claire Paris, de l'université de Miami. Selon ses calculs, l'injection sous-marine de dispersant au niveau de la fuite n'a pas réduit la quantité de pétrole à la surface. Pour faire face aux 780 millions de litres déversés en mer, 4 millions de litres de dispersants ont été ainsi épanchés et 3 autres millions injectés en profondeur. E.L.-T.



0,59 mm/an

C'est la contribution de la fonte des calottes polaires dans l'élévation du niveau des mers, qui s'élève à 3 mm/an. Depuis 1992, le Groenland a ainsi perdu 152 milliards de tonnes de glace par an. La situation est plus contrastée en Antarctique : l'Ouest et la péninsule se sont allégés de 65 et 20 milliards de tonnes par an, mais l'Est en a gagné 14 milliards. E.L.

CLIMATOLOGIE

Ce ravageur du pin fait grimper la température au Canada

Les attaques du dendroctone du pin auraient fait monter les températures estivales de 1 °C dans l'ouest du Canada, selon Holly Maness (université de Toronto). Cet insecte xylophage infecte en effet 170 000 km² de forêts, et la mortalité des arbres a eu pour effet de réduire de 19 % le processus d'évapotranspiration. Avec pour conséquence d'élever localement la température. Une perturbation qui pourrait également altérer les précipitations sur la région. Pa.G.





▲ Les dispersants utilisés contre la marée noire engendrée par Deepwater Horizon ont renforcé la mortalité des écosystèmes.



GÉOPHYSIQUE

C'EST GRÂCE À SES MURMURES QU'ON A PU CARTOGRAPHIER LES PROFONDEURS DE LA TERRE

Tout comme ses colères, le bruit de fond sismique de la Terre en dévoile désormais les entrailles. "Actuellement, les modèles permettant d'expliquer l'intérieur de notre planète s'appuient sur des données sismiques récoltées lors de tremblements de terre", explique Michel Campillo, de l'Institut des sciences de la Terre de Grenoble. Jusqu'ici, il fallait attendre la survenue de séismes pour étudier la façon dont les ondes émises se propagent à l'intérieur de notre planète, et en tirer des informations sur sa structure profonde. Or, même quand elle ne tremble pas, la terre est parcourue par une sorte de bruit de fond engendré en surface par la houle océanique et les perturbations atmosphériques. On sait déjà utiliser ce bruit pour prédire les éruptions volcaniques (voir *Science & Vie* n° 1122) et pour caractériser la première centaine de kilomètres sous nos pieds. Mais les travaux de Michel Campillo et de son équipe vont plus loin. En utilisant un an de données issues d'un réseau de 42 stations sismiques installées en Finlande, les géophysiciens sont parvenus à cartographier la zone de transition séparant le manteau inférieur et le manteau supérieur, qui s'étend entre 410 et 660 km de profondeur. A termes, il pourrait même être possible d'obtenir des informations sur la limite entre le manteau et le noyau de la Terre.

C.L.

✓ Via un réseau de stations sismiques installé en Finlande, on a pu affiner nos connaissances de la zone située entre les manteaux supérieur et inférieur.



EPA/MAXPPP - S.VALLEY, OREGON DEPT. OF AGRICULTURE, BUGWOOD ORG

POURQUOI CRAINT-ON UNE NOUVELLE CRISE ALIMENTAIRE

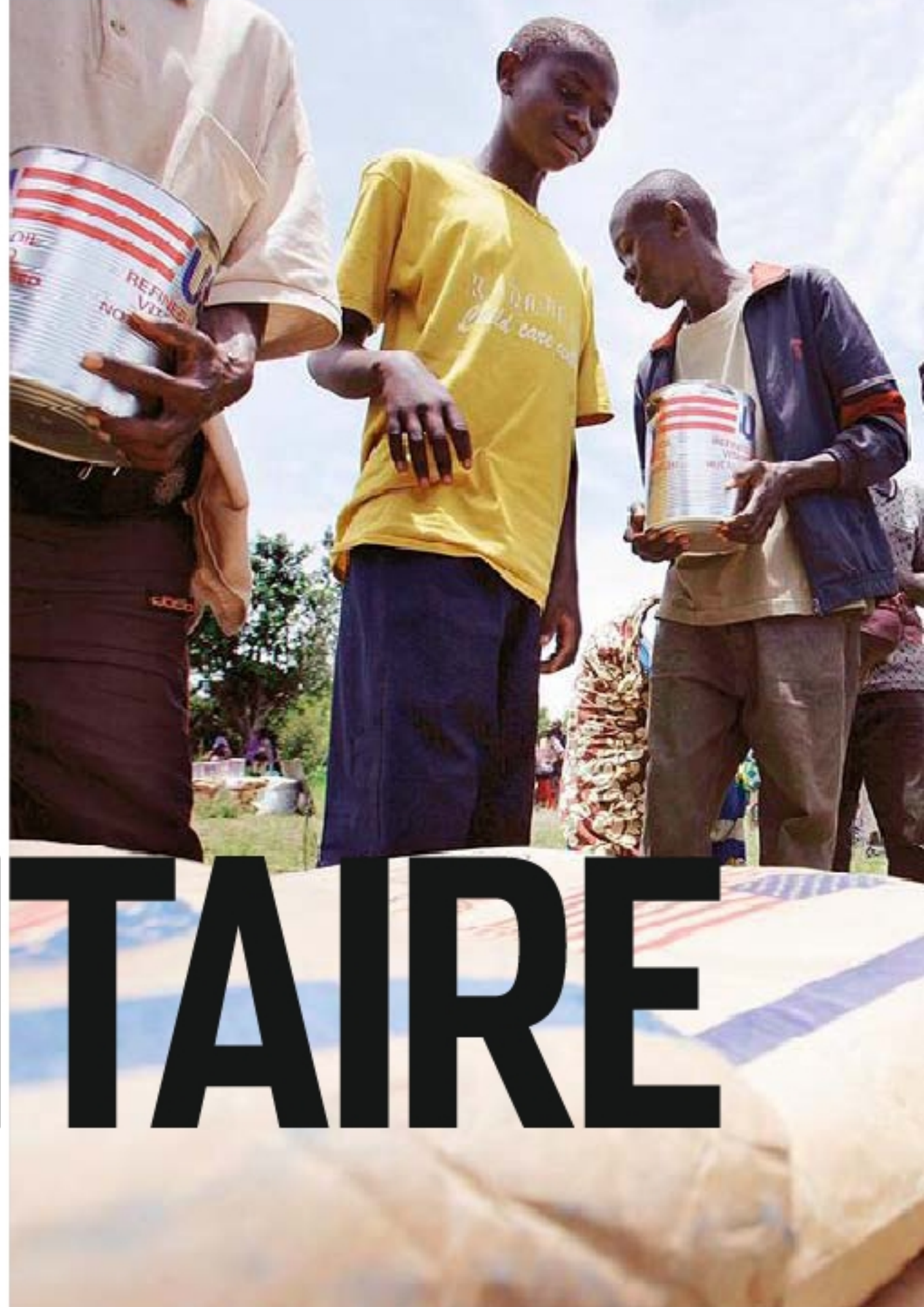
Production céréalière en recul, flambée des prix, diminution des stocks, développement des biocarburants: tous les éléments d'une crise majeure semblent en place... Explications.

Les émeutes de la faim sont-elles appelées à devenir récurrentes? En 2008, la flambée des prix des denrées alimentaires avait provoqué des troubles graves en Afrique (Sénégal, Côte d'Ivoire, Cameroun...), en Haïti, en Indonésie et aux Philippines. Or, selon l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), une nouvelle crise grave pourrait avoir lieu en 2013, lorsque les produits des campagnes agricoles mondiales 2012-2013 arriveront dans l'assiette des consommateurs. En repli, la production céréalière a en effet pâti l'été dernier d'une sécheresse catastrophique aux Etats-Unis, mais aussi d'un déficit hydrique en Europe de l'Est et en Asie centrale. Dès juillet, les prix du maïs et du blé ont atteint des niveaux record sur le marché mondial (+ 25 % par rapport au mois de juin), l'ensemble des prix ali-

mentaires enregistrant globalement une forte progression.

Cet affolement du cours des denrées est intervenu dans un contexte de forte tension sur les marchés, due à des facteurs structurels. Avec la croissance démographique et la transition vers une alimentation plus riche en protéines animales des pays en voie de développement, la consommation augmente plus vite que la production. L'accaparement des terres pour développer les biocarburants concourt aussi à la contraction des stocks mondiaux. Sur des marchés fragilisés par la crise, l'état des récoltes et le niveau des stocks se répercutent vite sur les prix...

Même si la faiblesse des récoltes européennes ou américaines a été en partie compensée par des récoltes records de blé en Chine et en Inde, ainsi que par une production de riz mondiale en hausse pour la



troisième année consécutive, les cours des denrées restaient à l'automne 2012 élevés et fluctuants. D'où l'inquiétude de la FAO, qui recense 35 pays incapables de faire face à leurs besoins alimentaires, principalement en Afrique.

Dans ce contexte, les filets de sécurité mis en place depuis 2008 pour amortir les effets des hausses de prix – amélioration de la coordination entre Etats, augmentation des aides d'urgence de la Banque mondiale, transparence accrue des marchés alimentaires... – risquent de s'avérer insuffisants. Et les perspectives à plus long terme ne sont guère plus brillantes, d'autant que le risque d'événements météorologiques extrêmes grandit et que la crise financière compromet la solidarité. Pour les experts, c'est, fondamentalement, un changement de modèle agricole qui s'impose. **M.M.**

REPÈRES

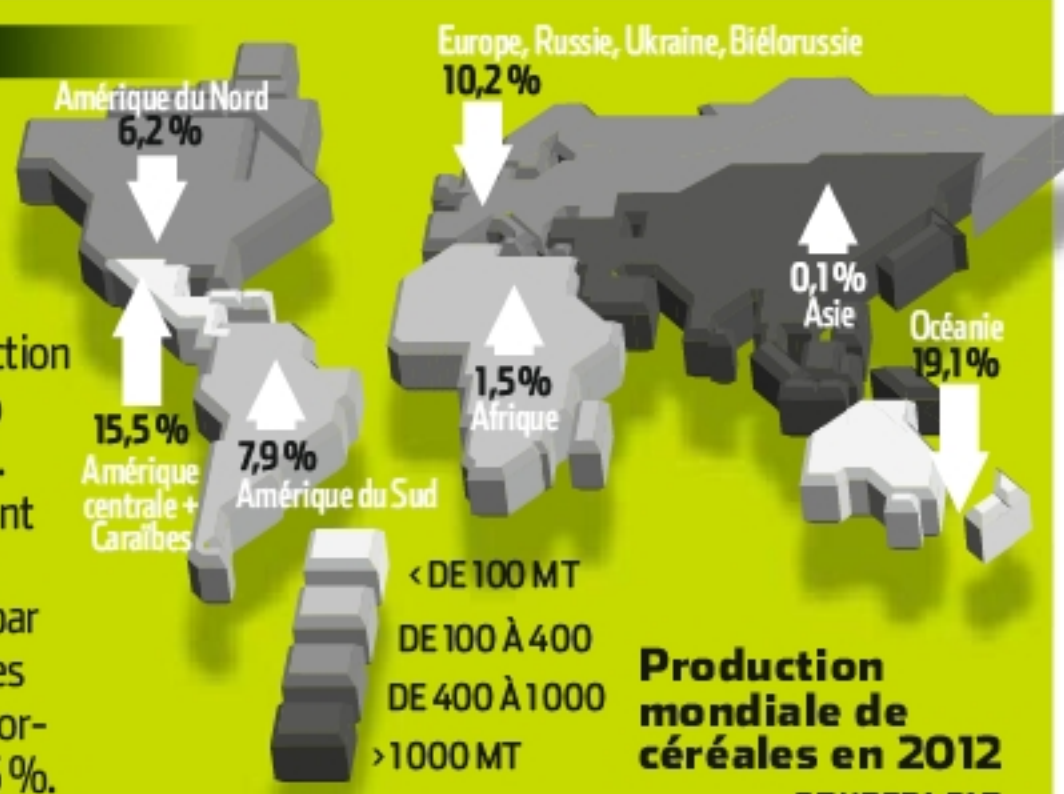
La surface cultivée globale dans le monde est passée de **0,45 ha** par personne dans les années 1960 à **0,22 ha** en 2008. Les céréales représentent **50%** de la consommation calorique humaine. La sous-alimentation chronique touche **14,9%** de la population, contre **23,2%** en 1990. Cependant, les progrès ont été considérablement ralentis depuis 2007.



CLÉ N° 1

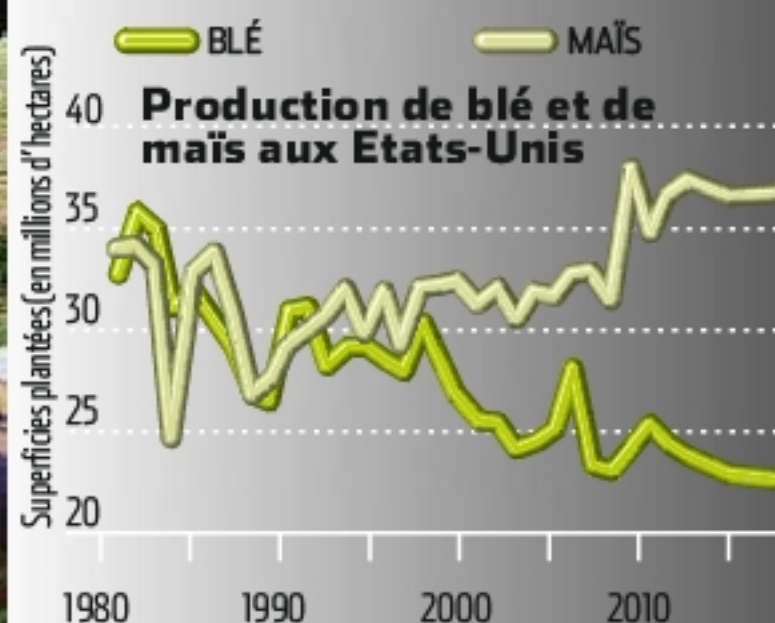
La production de céréales est en recul...

Le recul global de la production est estimé à 2,6 % (9,4 % dans les pays développés). Les récoltes de blé devraient s'établir à 663 millions de tonnes, en repli de 5,2 % par rapport à 2011. Les céréales secondaires (maïs, orge, sorgho, mil...) reculent de 2,3 %.



CLÉ N° 2

... et le blé pâtit des biocarburants



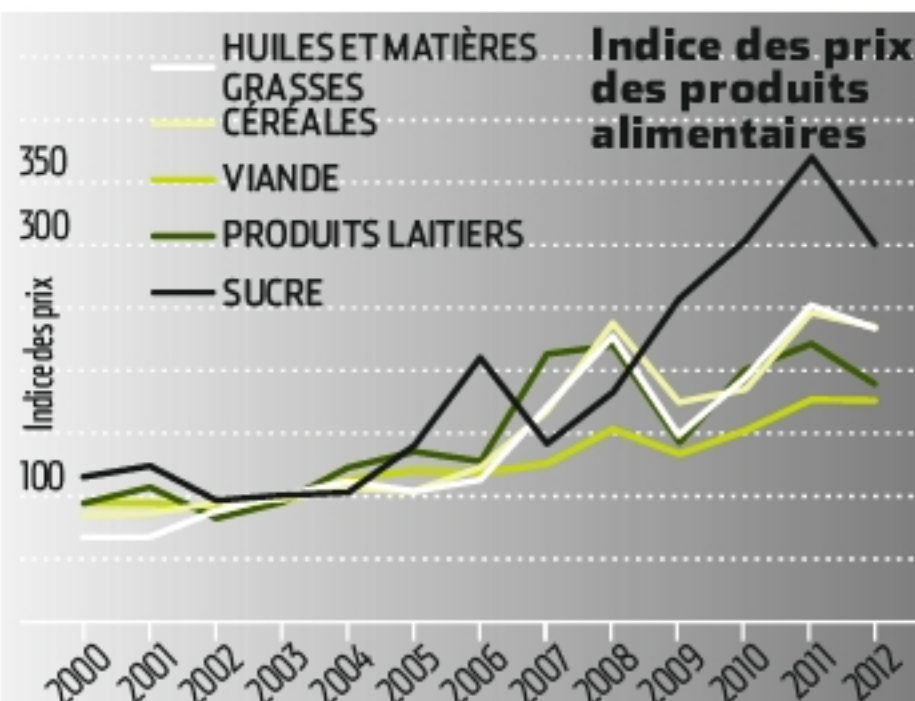
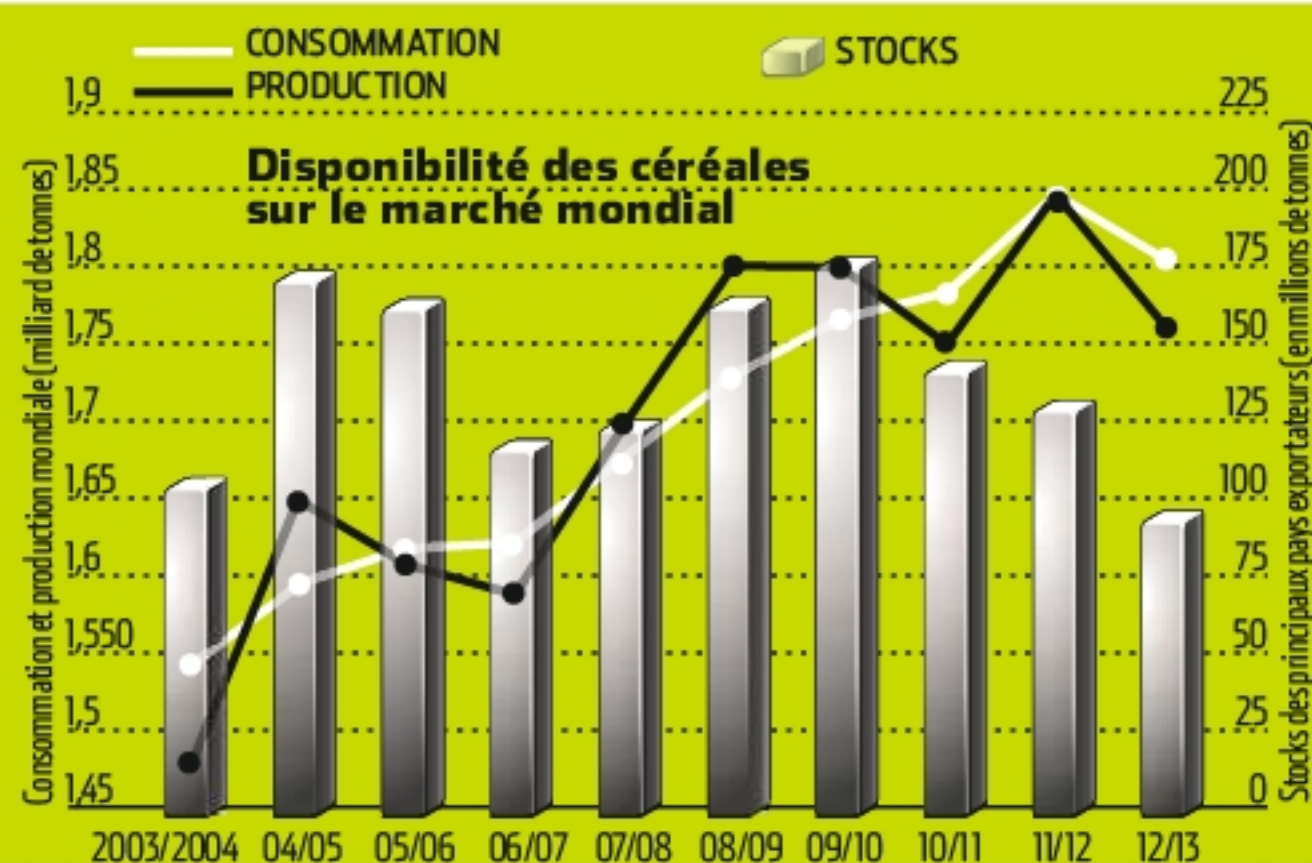
Les Etats-Unis, premier exportateur de maïs au monde, utilisent désormais près de 40 % de leur production pour en faire du biocarburant. Cette politique pousse les agriculteurs à privilégier la culture du maïs au détriment du blé, et contribue à la baisse des stocks de céréales alimentaires et à la hausse des prix.

▲ La FAO a recensé 35 pays, principalement en Afrique, qui ne pourront pas assumer leurs besoins alimentaires cette année.

CLÉ N° 3

Les stocks se réduisent depuis 2009...

Les stocks de céréales disponibles (sauf riz) dans les principaux pays exportateurs reculent à 96 millions de tonnes. Ce recul continu depuis 2009-2010 accroît le risque de crise alimentaire. Les stocks mondiaux de céréales s'établiraient, selon la FAO, à 497 millions de tonnes à la fin des campagnes agricoles 2012/2013, soit un recul de 25 millions de tonnes par rapport à l'année précédente.



CLÉ N° 4

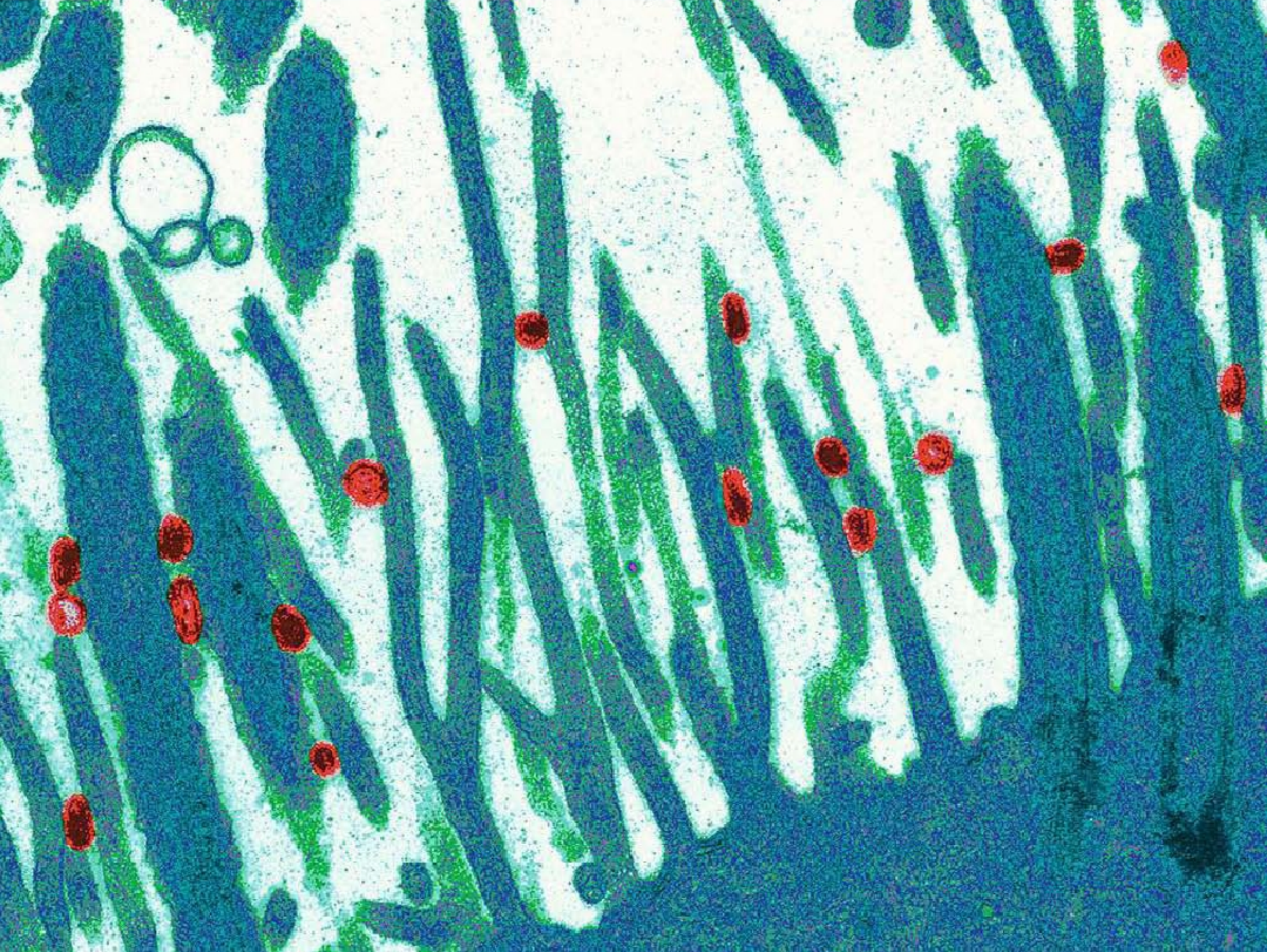
... tandis que les prix des produits alimentaires de base s'envolent

L'indice du prix des céréales calculé par la FAO (pondéré en fonction des échanges internationaux) augmente de 12 % sur un an, en raison surtout d'une hausse de 16 % des prix du blé et des céréales secondaires, mais reste en dessous du pic atteint en 2008. La tendance à la hausse concerne aussi les autres produits de base (viande, produits laitiers, huiles et matières grasses, sucre).



actus médecine

> Le traitement mis au point pourrait empêcher la destruction des cellules respiratoires (ici, celles de la trachée, infectées par un virus de la grippe, en rouge) et réduire les symptômes.



PNEUMOLOGIE

UN REMÈDE VEUT PROTÉGER LES POUMONS DE LA GRIPPE

Mettre au point un médicament enfin efficace pour les patients les plus sévèrement touchés par la grippe : c'est l'objectif des chercheurs de l'Institut national de la recherche agronomique et de l'université Claude-Bernard à Lyon. Leur stratégie ? Ne pas combattre frontalement les virus, mais empêcher la destruction des cellules respiratoires infectées. Car c'est l'inflammation massive des

poumons qui fait succomber les patients les plus gravement atteints. L'équipe s'est donc intéressée à une protéine, appelée PAR-1, impliquée dans l'inflammation des muqueuses. Chez la souris, ils sont parvenus à bloquer son activité... réduisant ainsi fortement les symptômes respiratoires. Et cela, même en cas d'infection par des souches virales très différentes, comme le

H5N1 (virus de la grippe aviaire), le H1N1 pandémique ou des virus H3N2 plus classiques. *"Notre molécule cible une protéine de l'organisme infecté, et non une protéine de virus"*, souligne Béatrice Riteau, co-auteur des travaux. C'est ce qui a permis aux souris de se défendre efficacement et même d'éviter l'apparition de résistances chez les différents virus. Prometteur,

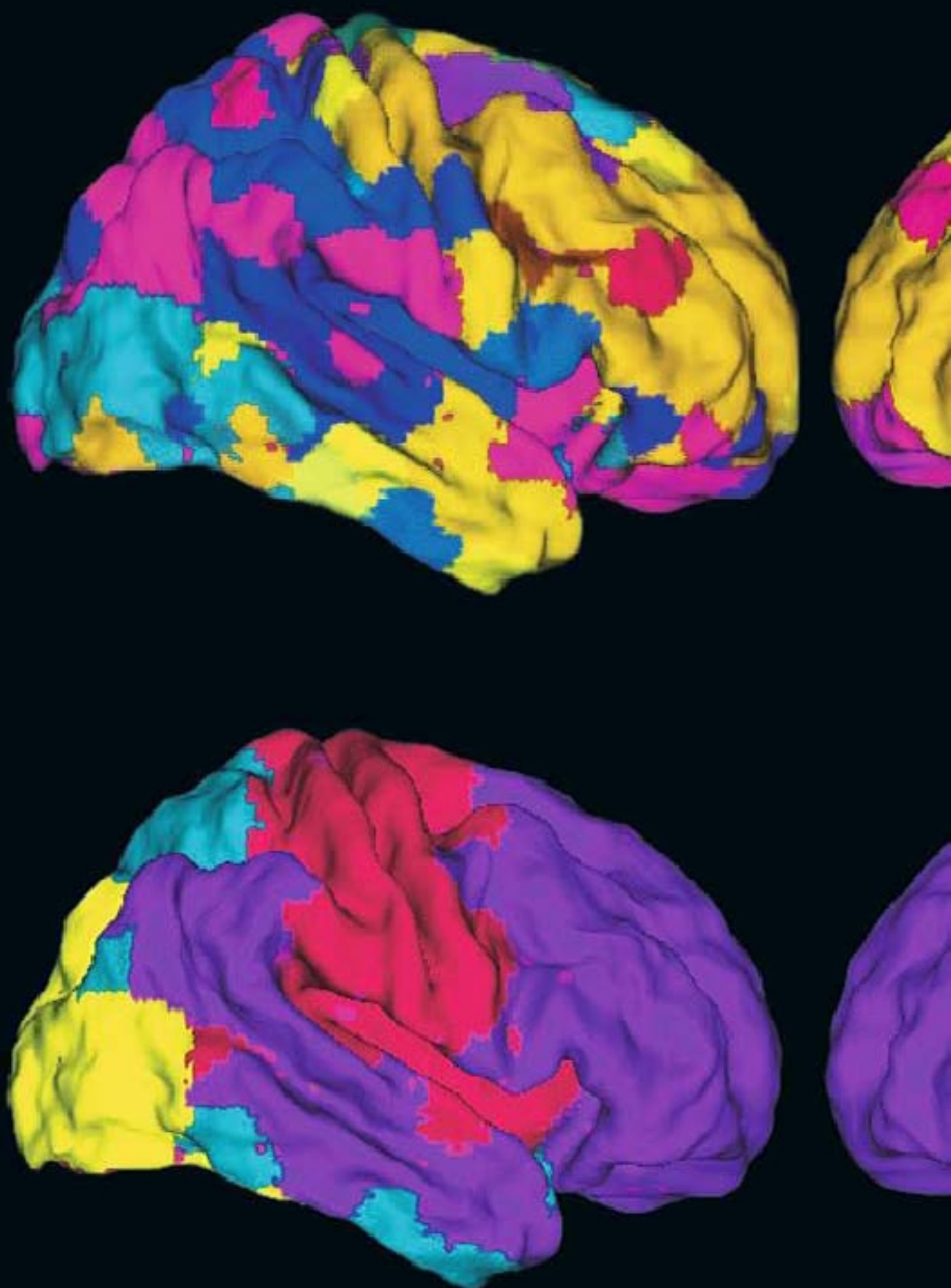
alors que les seuls traitements disponibles jusqu'à présent contre la grippe, des antiviraux censés s'attaquer aux protéines qui enveloppent le virus, font preuve d'une efficacité au mieux limitée, au pire nulle. *"A terme, si ces résultats se confirment chez l'homme, nous disposerons d'un médicament probablement administré par voie nasale"*, avance la chercheuse. **A.R.**

NEUROPHYSIOLOGIE

DANS LE COMA, LE CERVEAU SE RÉORGANISE

Lorsqu'un patient est plongé dans le coma, son cerveau n'en devient pas pour autant inactif. Grâce à des images obtenues par IRM fonctionnelle, une équipe de chercheurs franco-britannique vient de montrer que, comparées à celles d'un patient conscient, les connexions neuronales du cerveau d'une personne dans le coma ne diminuent pas. Autrement dit, il s'y échange toujours autant de données. En revanche, la cartographie des flux d'informations est largement modifiée. *"Dans le cerveau, il existe ce que l'on appelle des 'hubs', des zones où la connectivité est plus importante,* explique Sophie Achard, l'une des chercheuses du CNRS de

Grenoble ayant participé à ces travaux. *Si l'on comparait le cerveau à un réseau de transports en commun, ces hubs seraient les stations où se croisent le plus de lignes. Or, chez les patients dans le coma, ils sont déplacés : ils ne se trouvent pas au même endroit que dans le cerveau des personnes conscientes. Il y a une vraie réorganisation du trafic."* Les scientifiques ne savent pas encore expliquer les raisons de cette réorganisation, ni dire si elle est la cause ou la conséquence du coma. Mais ils travaillent d'ores et déjà à déterminer si la manière dont s'est réorganisé le cerveau influence la façon dont le patient récupère. C.H.



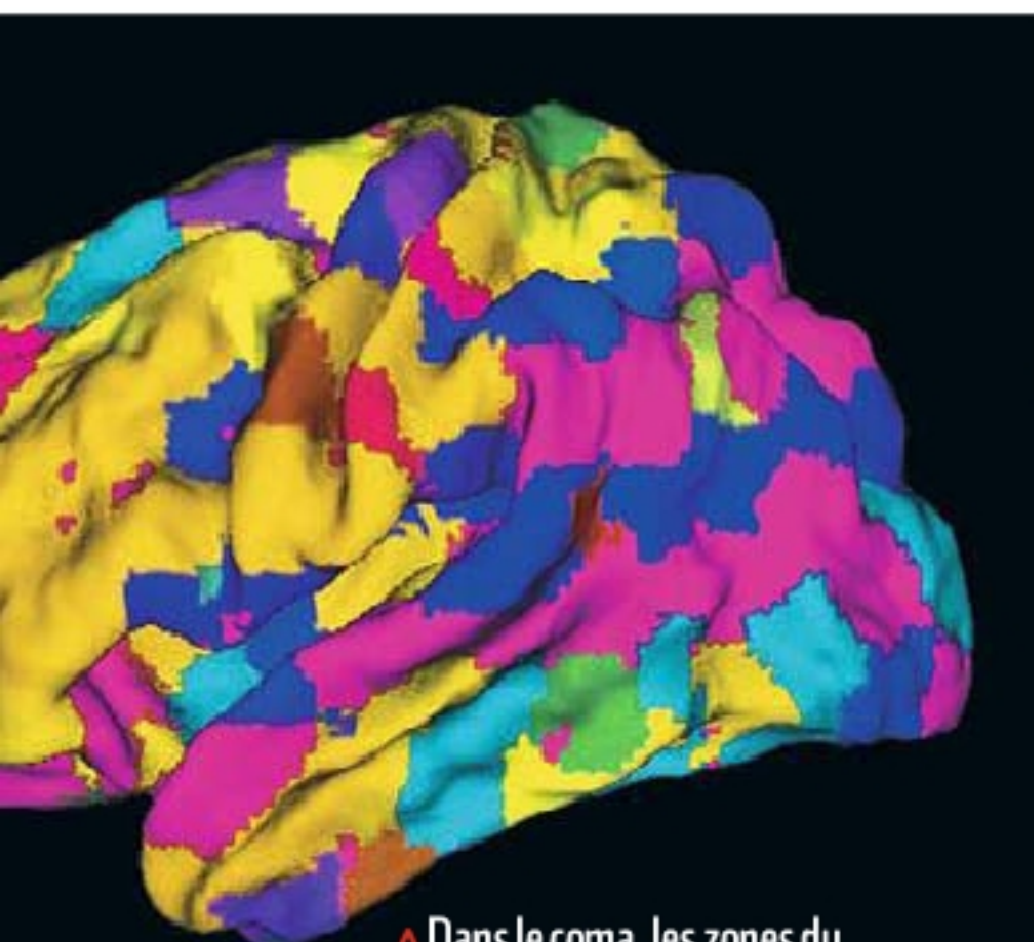
32,2 %

C'est la proportion de spermatozoïdes perdus sur une période de dix-sept ans, soit une diminution de près de 2 % chaque année. A 35 ans, un Français est en moyenne passé de 73,6 millions de spermatozoïdes par millilitre en 1989 à 49,9 millions en 2005. Si la limite d'infertilité (15 millions) n'est pas atteinte, les spermatozoïdes sont en outre moins bien formés. E.D.

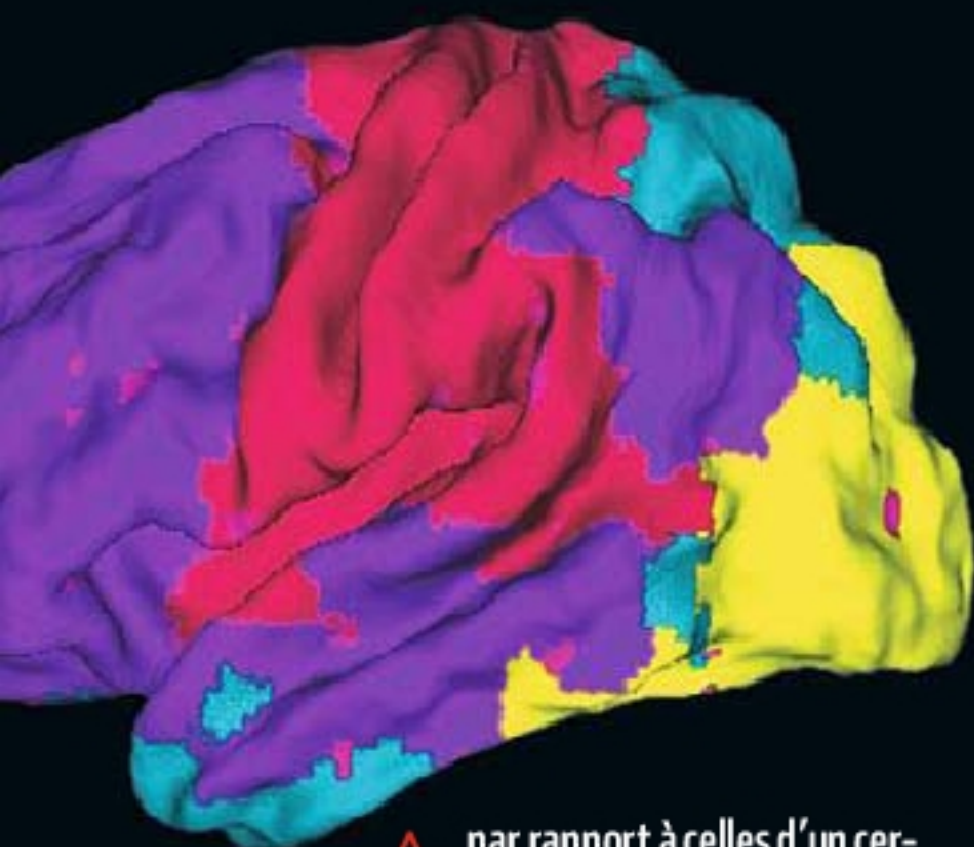
GYNÉCOLOGIE-OBSTÉTRIQUE

Les ovules matures ont trouvé leur pilule de jeunesse

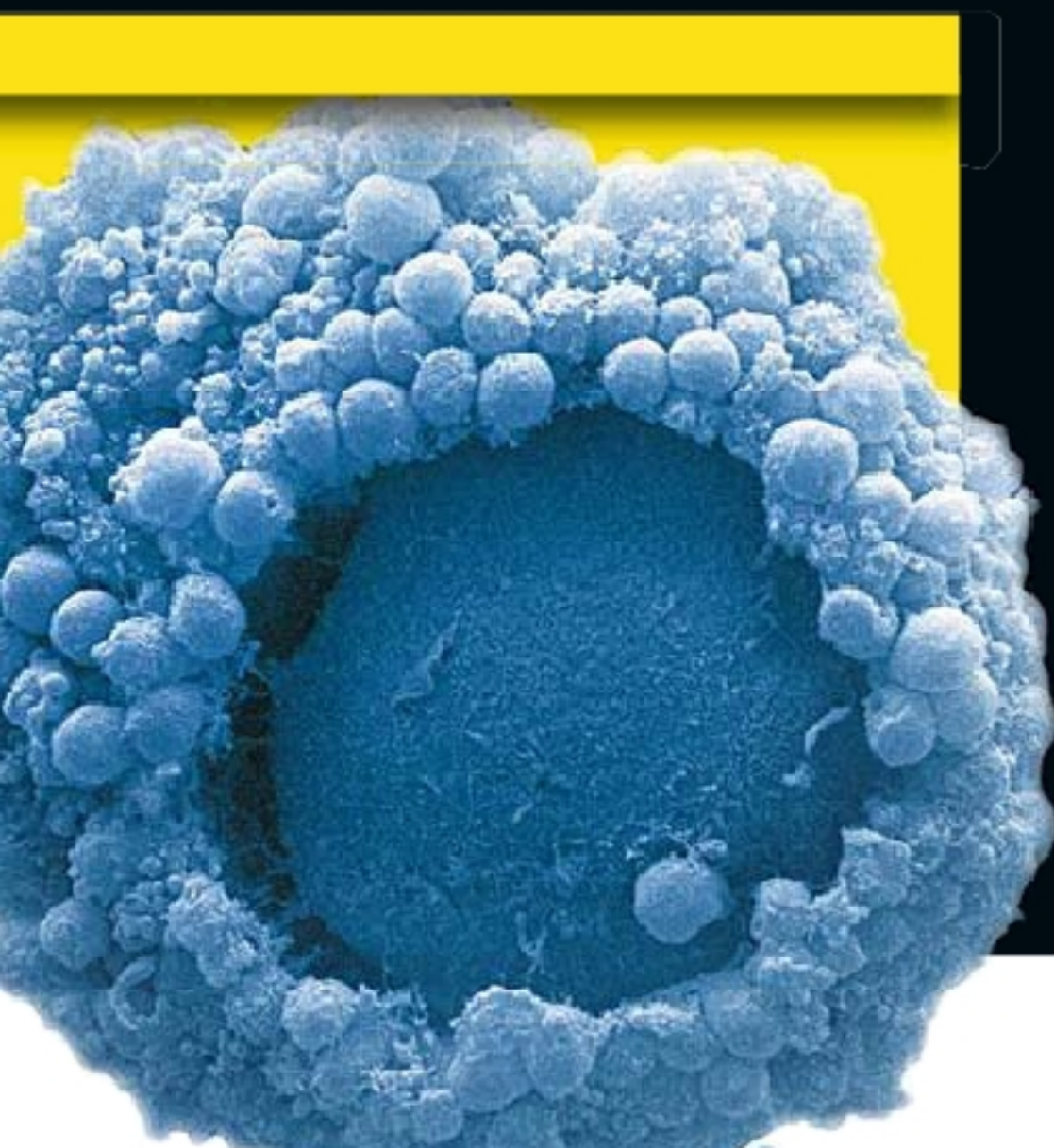
Après 40 ans, la fertilité des femmes diminue, de plus en plus d'ovules présentant un nombre anormal de chromosomes. Une équipe d'Ottawa (Canada) a démontré le rôle clé de la putrescine. Cette molécule, produite au cours du cycle ovarien, aide à la maturation des futurs ovules. Or, sa synthèse diminue avec l'âge. D'où l'idée de la rajouter dans l'eau de boisson, la semaine précédant l'ovulation. Chez la souris, la méthode a permis de réduire de moitié les ovules anormaux. Une piste prometteuse, dont la toxicité reste à évaluer. O.C.



^ Dans le coma, les zones du cerveau connectées entre elles (même couleur) sont déplacées...



^ ... par rapport à celles d'un cerveau en état de veille : la carte des flux d'informations est modifiée.



NEUROPSYCHIATRIE

UN DIURÉTIQUE SERAIT EFFICACE POUR ATTÉNUER LES TROUBLES DE... L'AUTISME

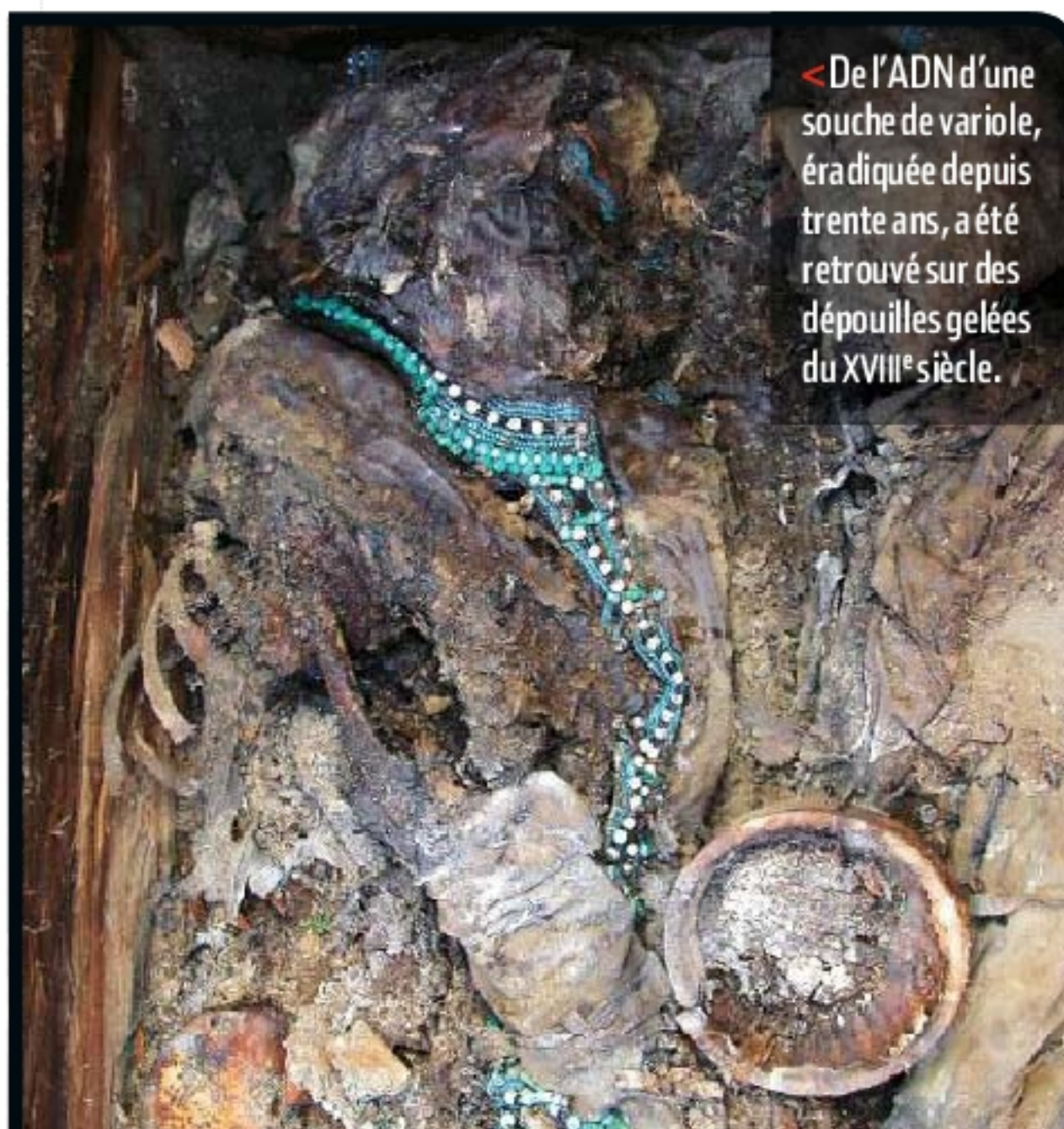
Réduire les troubles autistiques grâce à un médicament couramment utilisé dans le traitement de l'hypertension ? Pour l'instant, seule une soixantaine d'enfants, âgés de 3 à 11 ans, en ont bénéficié. La prudence reste donc de mise. Pourtant, il semble bien qu'un diurétique, utilisé normalement pour augmenter la sécrétion urinaire, provoque également une diminution du taux de chlore dans le cerveau de ces enfants. *"Nous savions déjà que les neurones immatures ou ceux de patients épileptiques contiennent une grande quantité de chlore, ce qui a pour effet de rendre les neurones fonctionnant à l'aide du neurotransmetteur GABA excitateurs au lieu d'inhibiteurs",* explique Yehezkel Ben-Ari, de l'Institut de neurobiologie de la Méditerranée, à Marseille. Avec le psychiatre Eric Lemonnier, du CHU de Brest, il a alors émis l'hypothèse qu'un taux élevé de chlore dans les neurones pouvait aussi être à l'origine des modifications de l'inhibition cérébrale chez les patients autistes. Or, pour diminuer le taux de chlore, rien de mieux qu'un diurétique ! *"Même si ces résultats nécessitent d'être confirmés par une étude induisant un plus grand nombre de patients, la majorité des enfants autistes ont vu leurs symptômes s'améliorer. Ils sont plus présents et plus aptes aux échanges sociaux",* précise Eric Lemonnier.

C.H.



^ Grâce à ce médicament, des enfants autistes se sont montrés plus aptes aux échanges.

SACHARD-PETRA VERTES - D.PHILLIPS/BSIP - À L'ÉCOLE ABA DE LA FONDATION AUTISME, S.BRANDS/TRÖMPICURE TANK



< De l'ADN d'une souche de variole, éradiquée depuis trente ans, a été retrouvé sur des dépouilles gelées du XVIII^e siècle.

VIROLOGIE

LA VARIOLE SURGIT DU PASSÉ

Si la variole est éradiquée depuis 1980, son virus n'a pas totalement disparu de la surface de la Terre. En dehors des échantillons conservés par les armées russe et américaine, des fragments de son ADN viennent en effet d'être retrouvés sur cinq corps enterrés au début du XVIII^e siècle dans les sols gelés de la Yakoutie (Russie). Les dépouilles ont été exhumées par l'équipe d'Eric Crubézy, du CNRS. Etonnés d'en trouver autant dans une même sépulture, les spécialistes soupçonnent une origine infectieuse. Le coupable, le virus de la variole, a laissé sa trace sous forme de trois fragments d'ADN. C'est la première fois qu'une souche antérieure à la seconde moitié du XX^e siècle est repérée. Le décryptage génétique per-

met d'en apprendre plus sur le comportement épidémique de cette maladie, qui reste une arme bioterroriste potentielle. La souche pourrait être l'ancêtre direct des deux lignées éradiquées en 1979, ou un membre d'une lignée éteinte avant le XX^e siècle. *"Lorsque les Russes, qui subissaient des épidémies de variole, sont venus en Sibérie, ils ont pu transmettre la maladie à ces populations non protégées",* explique Catherine Thèves, coauteur de l'étude. Une réapparition de la maladie via le dégel de virus congelés dans le sol sibérien est-elle à craindre? Philippe Biagini, qui a participé aux analyses virologiques, est catégorique: *"Malgré le froid, la dégradation du génome et des constituants du virus est inexorable."* **E.D.**

LE CANCER COLORECTAL DÉPISTÉ DANS L'HALEINE

Le cancer colorectal pourrait bientôt être détectable grâce à une simple expiration. Une équipe italienne a identifié 15 composés organiques produits par les cellules tumorales dans l'air expiré des patients. Ce qui leur a permis de dépister ce cancer dans 76 % des cas. **A.R.**

ON A TROUVÉ LA CAUSE DE L'HYPERSOMNIE

Une molécule de la somnolence a été identifiée dans le cerveau de patients atteints d'hypersomnie, incapables de rester éveillés, même sous amphétamines. Cette molécule stimulerait fortement le neurotransmetteur GABA, chargé de réduire l'excitation du cerveau, selon une étude américaine. **C.T.**

DES GREFFES DE GRAS POUR LIMITER LE DIABÈTE ?

Testées chez la souris, des injections abdominales de graisse brune, connue pour consommer de l'énergie en générant de la chaleur, ont permis de diminuer la résistance à l'insuline de leur organisme, selon des travaux menés au centre Joslin de Boston (Etats-Unis). **C.T.**

TOXICOLOGIE

LA PIQÛRE DE CETTE MEDUSE NE SERA PLUS MORTELLE

Les victimes d'une des méduses les plus mortelles au monde, *Chironex* (photo), pourraient bénéficier d'un traitement inédit: le composé gluconate de zinc. Testé sur des souris par une équipe hawaïenne, il agit plus rapidement que le sérum antivenimeux actuel. En effet, ce sérum, bien qu'efficace, met environ quinze minutes à agir... alors que le venin de *Chironex* peut tuer un homme en cinq minutes par arrêt cardiaque. Or, le gluconate de zinc agit justement en limitant l'excès de potassium dans le plasma sanguin, à l'origine de l'arrêt cardiaque. Reste maintenant à le tester sur l'homme. **K.B.**

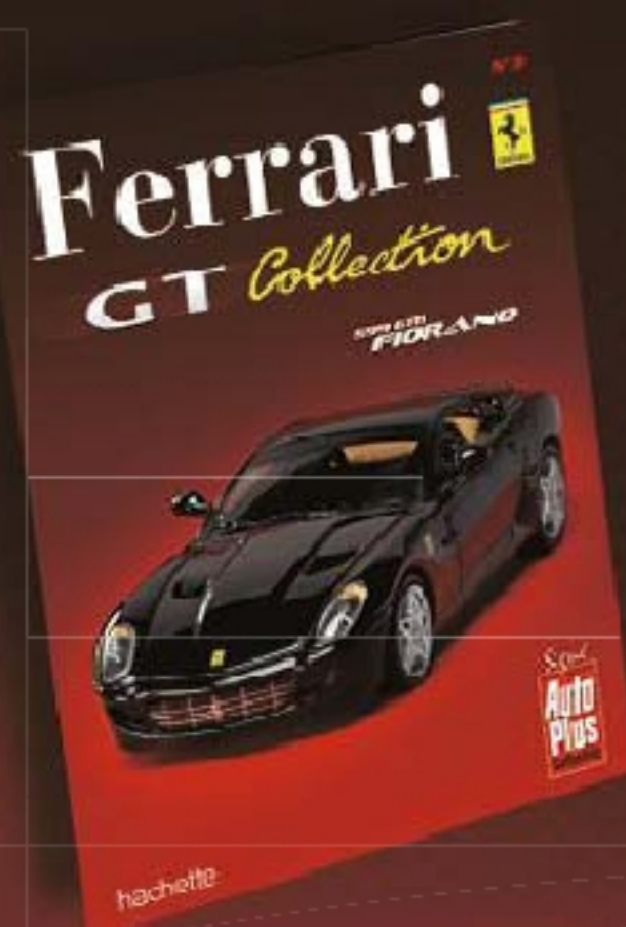


Ferrari



GT Collection

TOUTES LES GT QUI ONT MARQUÉ L'HISTOIRE DE FERRARI



VOTRE MAGAZINE
AUTO PLUS

+
LE N°3

LE DOSSIER TECHNIQUE
ET LE POSTER EXCLUSIF

+
VOTRE MODÈLE DE COLLECTION
LA FERRARI
599 GTB FIORANO



ÉCHELLE
1/43^e

OBJETS DE COLLECTION

Ne convient pas aux enfants de moins de 14 ans.

hachette Hachette Collections SNC, 43 Quai de Grenelle 75905 Paris Cedex 15 - 395 291 644 RCS PARIS.

LE 4 FÉVRIER CHEZ VOTRE MARCHAND DE JOURNAUX AVEC

**Auto
Plus**



RETROUVEZ VOTRE N°2,
ACTUELLEMENT AVEC AUTO PLUS

LE DOSSIER TECHNIQUE
ET LE POSTER EXCLUSIF

+ VOTRE MODÈLE
DE COLLECTION
LA FERRARI
250 GTO

COLLECTION
OFFICIELLE



Ferrari

OFFICIAL LICENSED PRODUCT

Produit fabriqué sous licence accordée par la société FERRARI Spa. La dénomination FERRARI, l'emblème du CHEVAL CABRÉ, ainsi que l'ensemble des logos et signes distinctifs associés constituent la propriété de la société FERRARI Spa. Le dessin de la carrosserie des voitures FERRARI est protégé en tant que propriété de la société FERRARI en vertu de réglementations applicables aux dessins, modèles, marques commerciales et configurations visuelles (trade dress).

Les modèles présentés
sont vendus sur leur socle. Longueur des modèles
réduits présentés comprise entre 8 et 12 cm. Matière : métal injecté.

<http://gtcollection.autoplus.fr>

JE VEUX COLMATER LES HÉMORRAGIES AVEC UNE BOMBE DE MOUSSE ANTICREVAISON

SON IDÉE

DAVID KING, directeur de recherche à l'école de médecine de Harvard et directeur du service de traumatologie et de chirurgie d'urgence à l'hôpital du Massachusetts à Boston (Etats-Unis)

Science & Vie : Comment vous est venue l'idée de tester une mousse expansive injectable ?

David King : C'est une idée directement inspirée des bombes anticrevaison utilisées pour les pneus des voitures ! En 2008, j'ai commencé une collaboration avec la Darpa, une agence de la Défense américaine qui finance le développement de nouvelles technologies pour l'armée. Il s'agissait de mettre au point une technique adaptée au champ de bataille. Les hémorragies internes au niveau de l'abdomen y sont particulièrement redoutées, car rien ne peut les arrêter. Seule une intervention chirurgicale en urgence peut sauver la personne... mais rejoindre un hôpital prend souvent deux à trois heures. Trop long. Il fallait donc développer un dispositif à la fois facile d'usage, portatif et qui se conserve dans des conditions variables de température et d'humidité. Tout comme la mousse anticrevaison toujours disponible dans le coffre !

S & V : Pourquoi était-elle si difficile à mettre au point ?

D.K. : Il faut des composants bien tolérés par l'organisme, facilement injectables et capables de générer une mousse dense et compacte. Cela nous a demandé quatre ans de travail. Les autres travaux avaient abouti à une mousse anticoagulante mais peu visqueuse, qui ne comprimait pas suffisamment les organes et ne stoppait donc pas le saignement. Notre mousse a une texture tout à fait différente. Elle est très ferme et très dense, ce qui résout le problème.

S & V : Comment est-ce que cela fonctionne en pratique ?

D.K. : Nous utilisons deux composés chimiques de polyol et d'isocyanate préparés séparément, contenus dans une seringue à double réserve. Au moment d'injecter le produit dans l'abdomen, les deux liquides se mélangent au niveau de l'aiguille et s'associent dans l'abdomen. Cette réaction

En cas d'hémorragie interne, pas d'autre solution que d'opérer la personne au plus vite... avant qu'elle ne se vide de son sang. Mais, sur un champ de bataille ou lors d'un accident grave, il est le plus souvent impossible de pratiquer une telle opération. Injectée dans l'abdomen, la mousse expansive formerait une coque autour des organes et colmaterait les fuites. Le dispositif doit être petit et pratique, pour être utilisé dans toutes les situations.

provoque la formation d'une gangue en polyuréthane-urée étonnamment dense et compacte. Nous savions que ces composés étaient bien tolérés, car ils sont déjà utilisés dans d'autres dispositifs médicaux, comme les stents en cardiologie. Une fois à l'hôpital, l'enveloppe de mousse se retire d'un bloc, en trente secondes à peine, à l'aide d'une incision. En général, très peu de fragments se détachent.

S & V : Avez-vous déjà obtenu de premiers résultats ?

D.K. : Le produit devrait bientôt être testé chez l'homme car les résultats sont très bons chez le porc, le modèle animal qui sert de référence en chirurgie. La mousse se forme en une minute environ et colmate les saignements durant plusieurs heures. Lors des premiers essais, le taux de survie des animaux trois heures après le début de l'hémorragie est passé de 8 % à 72 % grâce à la mousse.

Propos recueillis par A.R.

Venise

et ses îles enchantées

449€ SEULEMENT

PAR PERSONNE
5 jours / 4 nuits
en pension complète

TARIF
EXCLUSIF
négocié
pour vous



Le tarif préférentiel de Science & Vie Voyages comprend :

La croisière de 5 jours/4 nuits en cabine double climatisée sur le pont principal • la pension complète • les boissons (eau, vins) incluses lors des repas à bord • l'animation à bord • le cocktail de bienvenue • la soirée de gala • l'assurance assistance/rapatriement • les taxes portuaires.

Pour compléter votre croisière

- Nous vous proposons un forfait excursions au tarif négocié de 91€ par personne (recommandé par Science & Vie).
- Des vols low cost et réguliers au départ de votre région, à partir de 61€ hors taxes d'aéroport par personne selon disponibilité.

Réservation : 01 44 32 06 61

(Prix d'un appel local).

VOTRE BATEAU, AU COEUR DE VENISE !

Un navire à taille humaine à deux pas de la place St Marc.



Les escales de votre croisière

1er jour : Embarquement à VENISE

Embarquement à bord du Michelangelo à 18 h et soirée de bienvenue, cocktail et présentation de l'équipage.

2ème jour : VENISE - BURANO - MURANO - VENISE

Croisière sur la lagune et déjeuner à bord. Départ pour l'excursion (facultative) à Burano, réputée pour ses dentelles et Murano, mondialement connue pour sa méthode ancestrale de soufflage de verre ou temps libre à Venise. Dîner et soirée dansante à bord.

3ème jour : Visite de VENISE

Départ pour la visite guidée (facultative) du Palais des Doges et de la célèbre Place San Marco. Retour à bord pour le déjeuner. Après-midi libre à quai à Venise et dîner à bord.

4ème jour : VENISE - CHIOGGIA - VENISE

Navigation dans la magnifique baie vénitienne. Escale libre à Chioggia. Déjeuner à bord. L'après-midi, excursion (facultative) à Padoue, ville d'art et de pèlerinage. Visite de sa basilique dédiée à Saint Antoine, du centre historique et du célèbre «Café Pedrocchi» cher aux habitants de Padoue. Dîner et soirée de gala.

5ème jour : VENISE

Petit déjeuner à bord et débarquement.



Burano et ses façades multicolores.

Des dates de départ toute l'année

2013	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Septembre	Octobre
Dates des croisières	1 - 5 - 13 17 - 21 - 25	1 - 5 - 9 - 13 17 - 21 - 25 - 29	2 - 6 - 12 16 - 22	2 - 12 - 28	7 - 27	5 - 9 - 15 21 - 27	1 - 5 - 9

Places limitées

Nos conseillers vous informent du lundi au vendredi de 9h à 12h30 et de 13h30 à 18h et le samedi de 9h à 12h.

CODE : SV

Informations - réservation : 01 44 32 06 61

(Prix d'un appel local).

Si vous souhaitez recevoir une documentation comprenant les informations détaillées de votre croisière retournez ce bulletin à : **Science & Vie Voyages TSA 10005 - 8, rue François Ory - 92543 MONTRouGE Cedex.**

Nom _____ Prénom _____

Adresse _____

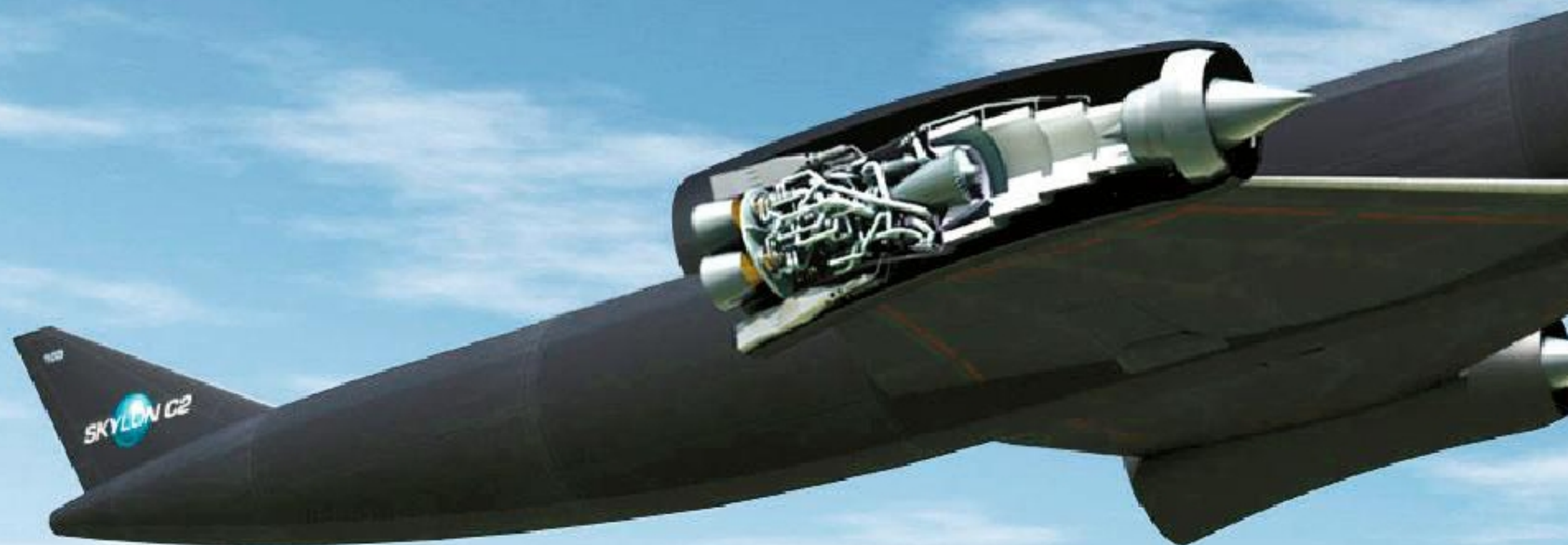
Code postal [] [] [] [] Ville _____

Téléphone : [] [] [] [] [] [] [] [] E-mail : _____

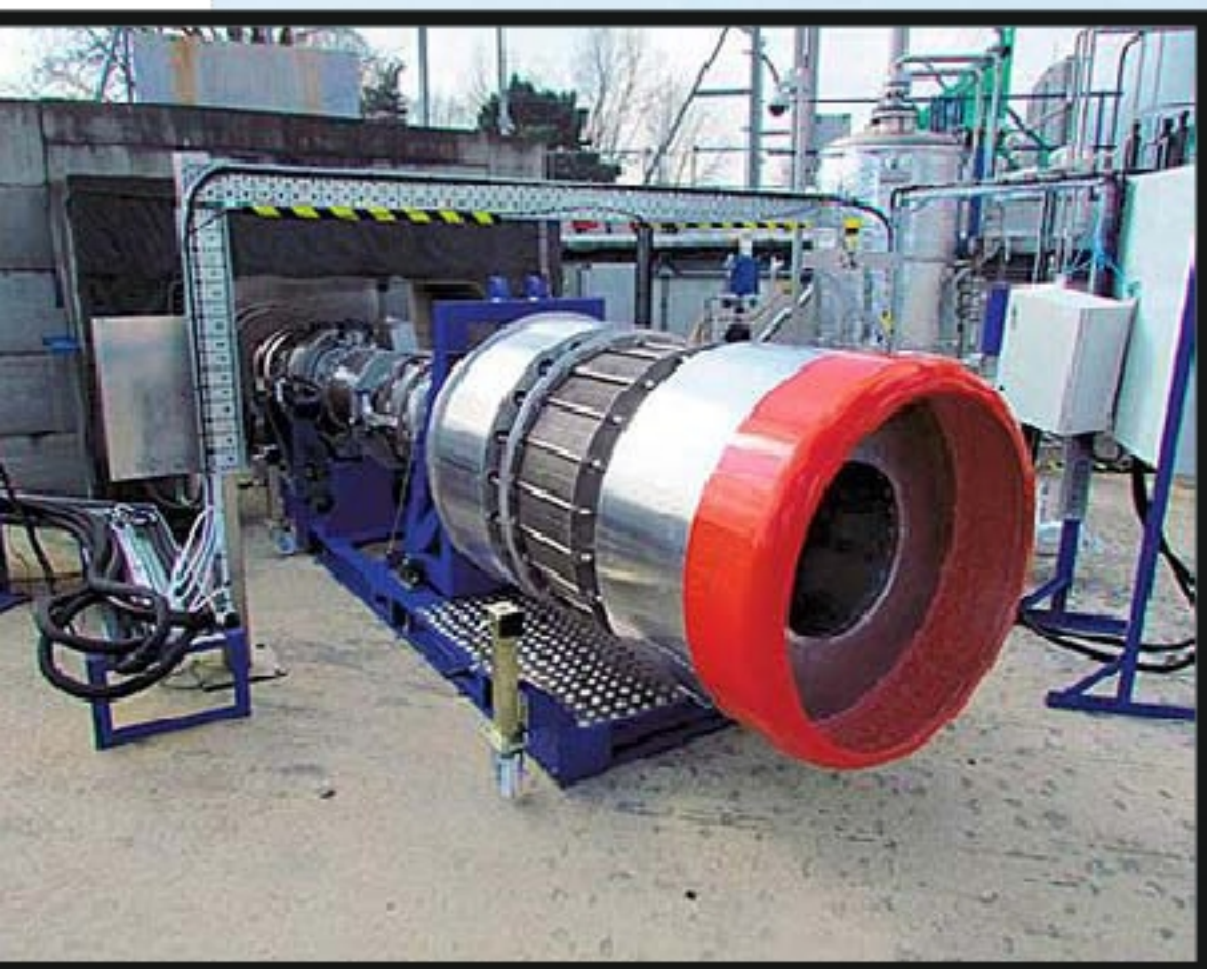
☐ J'accepte d'être informé(e) des offres commerciales du groupe Mondadori France et de celles de ses partenaires.

Conformément à la loi "Informatique et Liberté" du 6 janvier 1978, nous vous informons que les renseignements ci-dessus sont indispensables au traitement de votre commande et que vous disposez d'un droit d'accès, de modification, de rectification et de suppression de ces données par simple courrier. Sauf refus de votre part, ces informations peuvent être utilisées par des partenaires.

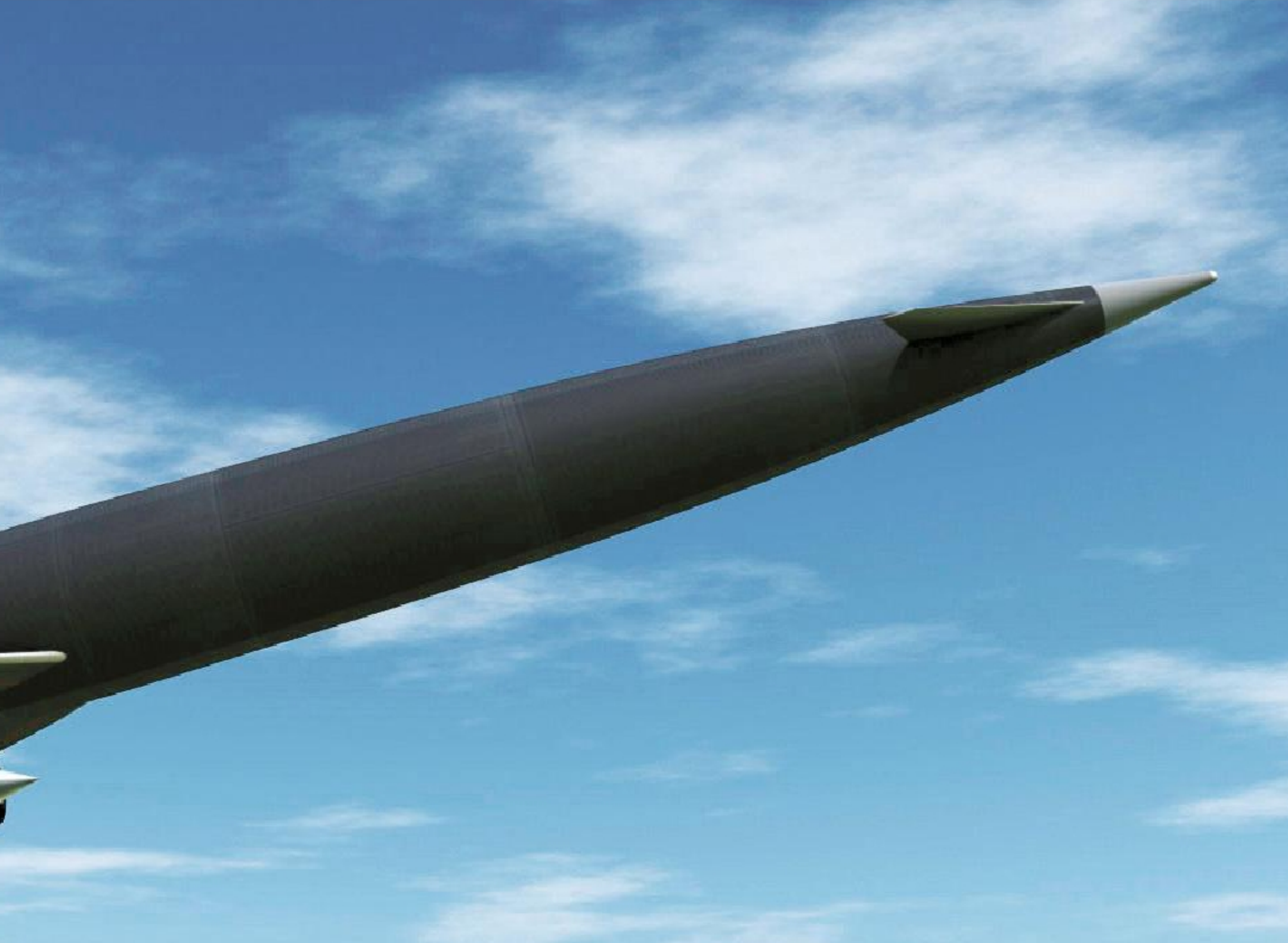
actus technos



REACTION ENGINES LIMITED



➤ Equipé d'un moteur hybride capable de fonctionner dans l'atmosphère et dans l'espace (à g.), le Skylon (ci-dessus, vue d'artiste) pourra servir de lanceur spatial réutilisable ou d'avion hypersonique.



AÉROSPATIAL

CETTE FUSÉE DÉCOLLE ET ATTERRIT COMME UN AVION

C'est fait! Après vingt ans de travaux, le concept de fusée spatiale Skylon de la société anglaise Reaction Engines Ltd (REL) a réussi ses premiers tests critiques, validant sa viabilité technique. Sa particularité? Elle tient dans son moteur inédit, baptisé Sabre (Synergic Air Breathing Engine), conçu pour fonctionner selon deux modes: dans l'air, en aspirant l'oxygène

de l'atmosphère, puis dans l'espace, en prélevant de l'oxygène liquide dans un réservoir. Grâce à cette propulsion hybride, cette future fusée pourra décoller et atterrir comme un avion. Elle atteindra aussi, sans lanceur, l'espace à moindre coût. Pour réussir cette prouesse, REL a mis au point un refroidisseur à hélium, chargé de refroidir l'air, échauffé par les frottements et aspiré

par le moteur à Mach 5: de 1 000 °C à -150 °C en un centième de seconde, sans création de givre. Une étape cruciale pour que l'oxygène puisse réagir efficacement avec l'hydrogène, qui lui sert de carburant, dans la turbine du moteur. Les premiers tests ont permis de vérifier l'efficacité de cette pièce maîtresse. "La difficulté était de fabriquer des échangeurs thermiques à

partir de tubes de moins de 30 micromètres d'épaisseur présentant près de 6 000 m² de surface, supportant une pression de 2 000 bars et quelque 1 000 °C, détaille Alan Bond, l'ingénieur fondateur de REL. Skylon emmènera ainsi 15 tonnes en orbite pour seulement 4 % du coût d'une mission actuelle." Il devrait prendre son envol en 2019 et entrer en service en 2022. **P.-Y.B.**

CHIMIE

ILS ONT RÉUSSI À TRANSFORMER DE L'AIR EN PÉTROLE

Produire du carburant à partir de... l'air ambiant, c'est le défi qui vient d'être relevé par l'entreprise britannique Air Fuel Synthesis. Pour y parvenir, les chercheurs sont partis du dioxyde de carbone et de l'hydrogène présents dans l'air. Ces deux éléments ont été extraits par diverses manipulations chimiques en laboratoire, puis recombinaison en méthanol, lequel a été transformé en essence, diesel ou kérosène. L'avantage de ce carburant synthétique, c'est qu'il permet de valoriser le dioxyde de carbone, qui est un gaz à effet de serre. En trois mois, la société a ainsi fabriqué 5 litres de

carburant *via* son unité de démonstration. D'ici à 2015, elle projette de construire une usine alimentée par une énergie renouvelable (hydroélectrique ou éolienne) qui en produira 1 tonne par jour, soit 7,6 barils. C'est très peu, comparé aux 80 millions de barils extraits chaque jour dans le monde. Mais, selon Air Fuel Synthesis, ce nouveau carburant pourrait faire rouler "dans un futur proche" des voitures de course et des avions, les principaux marchés visés, sans qu'il soit besoin de modifier leurs moteurs. L'expérience s'est déjà révélée concluante avec un petit scooter. **L.B.**



> Quand ils sont traversés par un courant électrique, les nanotubes de carbone de cette tresse se dilatent et s'étirent, comme des fibres musculaires.



MATÉRIAU

CES NANOTUBES RÉAGISSENT COMME UN VRAI MUSCLE

Cette tresse peut soulever 100 000 fois son poids ! Elle se contracte et se relâche instantanément "sans être plongée dans un liquide conducteur pour fonctionner", précise Ray Baughman, qui a dirigé sa conception à l'université de Dallas (Etats-Unis). Son secret : elle est truffée de milliers de nanotubes de carbone rangés parallèlement, qui se dilatent quand ils sont traversés par un courant électrique, étirant avec eux leur enveloppe de paraffine. Il suffit donc de relier ses extrémités à une alimentation pour l'animer. Un futur muscle artificiel très performant pour des micromachines ou des prothèses de la main. **M.F.**



▲ Des chercheurs britanniques ont fabriqué un carburant synthétique à partir de dioxyde de carbone.

TRANSISTORS : ILS S'EMPILENT EN 4D

Des chercheurs de l'université de Purdue (Etats-Unis) ont conçu des transistors qui s'assemblent verticalement et en parallèle. D'où leur nom : transistors 4D. Au lieu du silicium, leurs nanofil sont en arséniure de gallium et d'indium, ce qui permet de créer des composants de seulement 20 nanomètres de largeur, facilement empilables. J.J.

ON VA BOOSTER LE DÉBIT DES RÉSEAUX WI-FI

Pour désengorger un réseau wi-fi encombré et le booster jusqu'à 700%, l'université de Caroline du Nord (Etats-Unis) a créé un programme qui repère les appareils très sollicités pour leur accorder un accès prioritaire, au lieu de traiter les demandes dans l'ordre d'envoi. G.S.

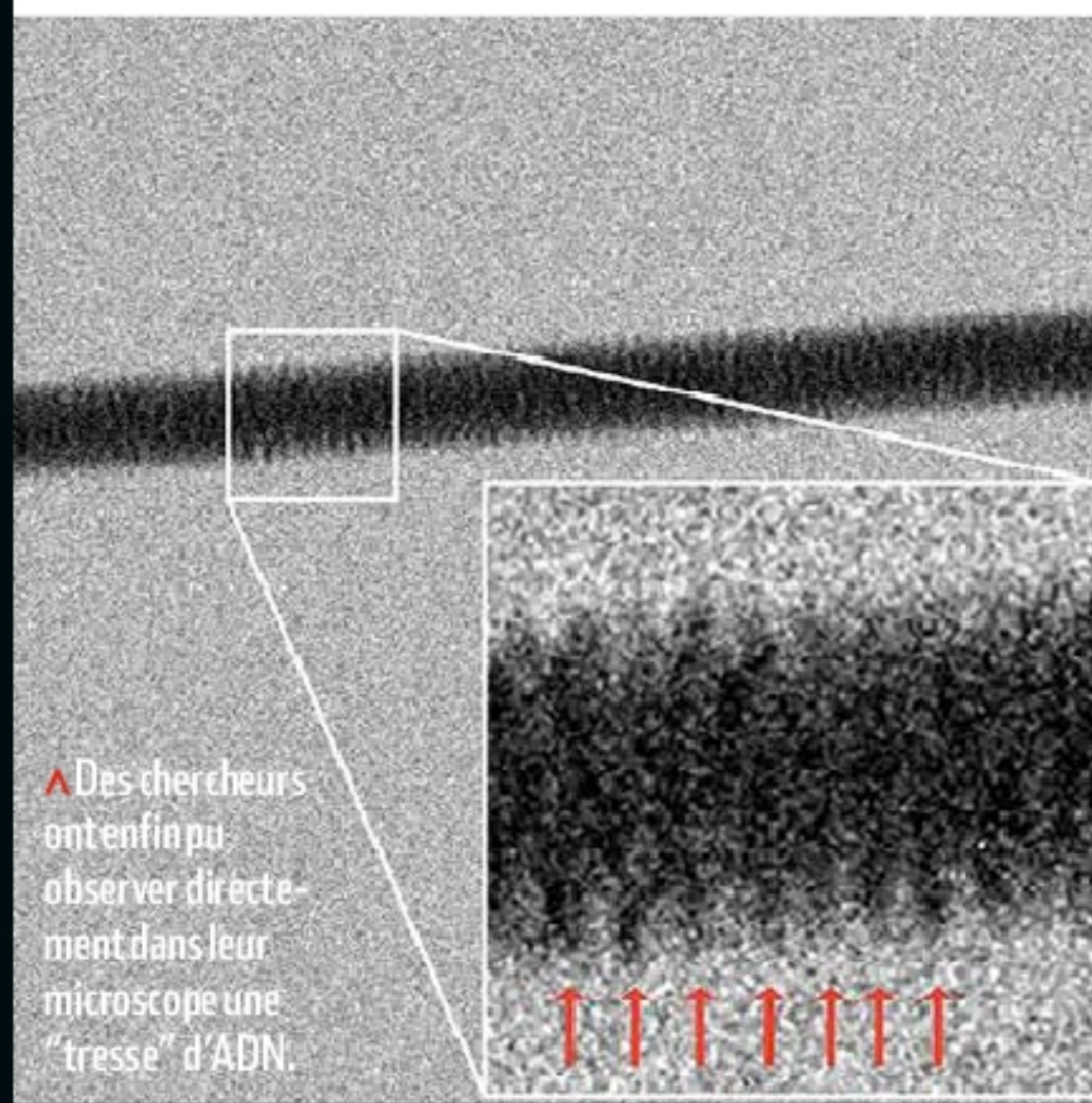
UN MATÉRIAU QUI PRÉVIENT DE SES DÉFAUTS

Pour limiter les risques liés à la dégradation d'un matériau composite, des chercheurs de l'université de Munich (Allemagne) lui ont intégré des cristaux d'oxyde de zinc qui brillent sous les UV en fonction des contraintes qu'il subit... Laisant voir ses éventuelles microfissures. S.F.

IMAGERIE

LA DOUBLE HÉLICE DE L'ADN A ÉTÉ PHOTOGRAPHIÉE POUR LA PREMIÈRE FOIS

C'est his-to-rique. Soixante ans après sa découverte (voir "Le point sur" p. 104), l'ADN dévoile enfin son vrai visage : pour la première fois, une équipe de l'université de Gênes (Italie) a photographié sa fameuse double hélice ! Jusqu'ici, personne n'avait pu observer directement cette molécule. Pour obtenir ces images inédites, les scientifiques ne se sont pas contentés d'utiliser un microscope ultra-performant doté d'une résolution de l'ordre d'un angström (10^{-10} mètre). Ils ont aussi conçu leur propre dispositif. Ainsi, l'échantillon d'acide désoxyribonucléique a-t-il été déposé sur une plaque d'abord percée de trous minuscules, afin de laisser passer les faisceaux d'électrons émis par le microscope, puis truffée de nanopiliers de silicium, entre lesquels sont venus se suspendre les filaments d'ADN, à la manière d'une corde à linge. Petit bémol, les chercheurs n'ont pas pu photographier isolément une seule double hélice mais des "tresses" d'ADN obtenues en enchevêtrant plusieurs molécules. En effet, une seule n'aurait pas pu résister à la puissance des électrons émis par le microscope, qui l'auraient brisée. Il faudra donc encore patienter quelques années, le temps de mettre au point un instrument moins énergivore, pour voir comment une simple molécule d'ADN peut interagir avec d'autres et, notamment, avec des médicaments. S.Ba.



▲ Des chercheurs ont enfin pu observer directement dans leur microscope une "tresse" d'ADN.

R. BAUGHMAN - AFS - E. DI FABRIZIO ET AL.

500 km/h

C'est la vitesse de croisière que devrait atteindre le LO Series, un train japonais à sustentation magnétique dont un prototype a été dévoilé en novembre 2012. C'est 1,2 fois celle du plus rapide des trains commerciaux actuels. Mise en service annoncée pour 2027. G.S.



GRAPHÈNE

ENFIN PRÊT POUR L'ÉLECTRONIQUE

Véritable matériau miracle, le graphène s'apprête cette fois à révolutionner la microélectronique ! Les physiciens ont réussi à optimiser ses formidables propriétés électriques en gaufrant sa surface... ce qui l'a étonnamment rendu semi-conducteur.

C'était une première très attendue. Des physiciens du Georgia Institute of Technology d'Atlanta (Etats-Unis) ont réussi l'exploit de mettre au point du graphène adapté à la microélectronique. Déjà célèbre pour ses multiples propriétés qui révolutionnent la physique des matériaux, ce tissu d'atomes de carbone dans lequel les électrons se propagent presque sans entrave est enfin en mesure de devenir le composant électronique majeur, loin devant le silicium et les nanotubes de carbone.

Après sa découverte en 2004, des batteries de physiciens se sont échinées à le modeler en transistor, en diode ou en fil électrique pour concevoir des circuits électroniques plus performants. Mais ils se sont heurtés à la difficulté de rendre ce matériau véritablement semi-conducteur – c'est-à-dire tour à tour isolant ou conducteur, selon la tension qui lui est appliquée –, une étape pourtant

indispensable pour l'utiliser en électronique. Certes, en 2009, Feng Wang, de l'université de Berkeley, en Californie, avait pu réaliser une telle prouesse en appliquant un champ électrique perpendiculaire à sa surface. Mais des fuites de courant limitaient les possibilités d'applications en microélectronique.

"ON NE S'Y ATTENDAIT PAS!"

La solution présentée par cette équipe franco-américaine consiste à découper très finement le graphène, naturellement conducteur, en minuscules rubans, ce qui en modifie les propriétés électriques. Une recette qui s'inspire en quelque sorte du gaufrier : les chercheurs ont creusé sur la surface d'une plaque de carbure de silicium semi-conducteur de 4 millimètres de largeur des sillons étroits et rectilignes de quelques nanomètres de profondeur. Ils ont ensuite chauffé la plaque à 1 500 °C pour se débarrasser du silicium. Et ils ont vu les atomes

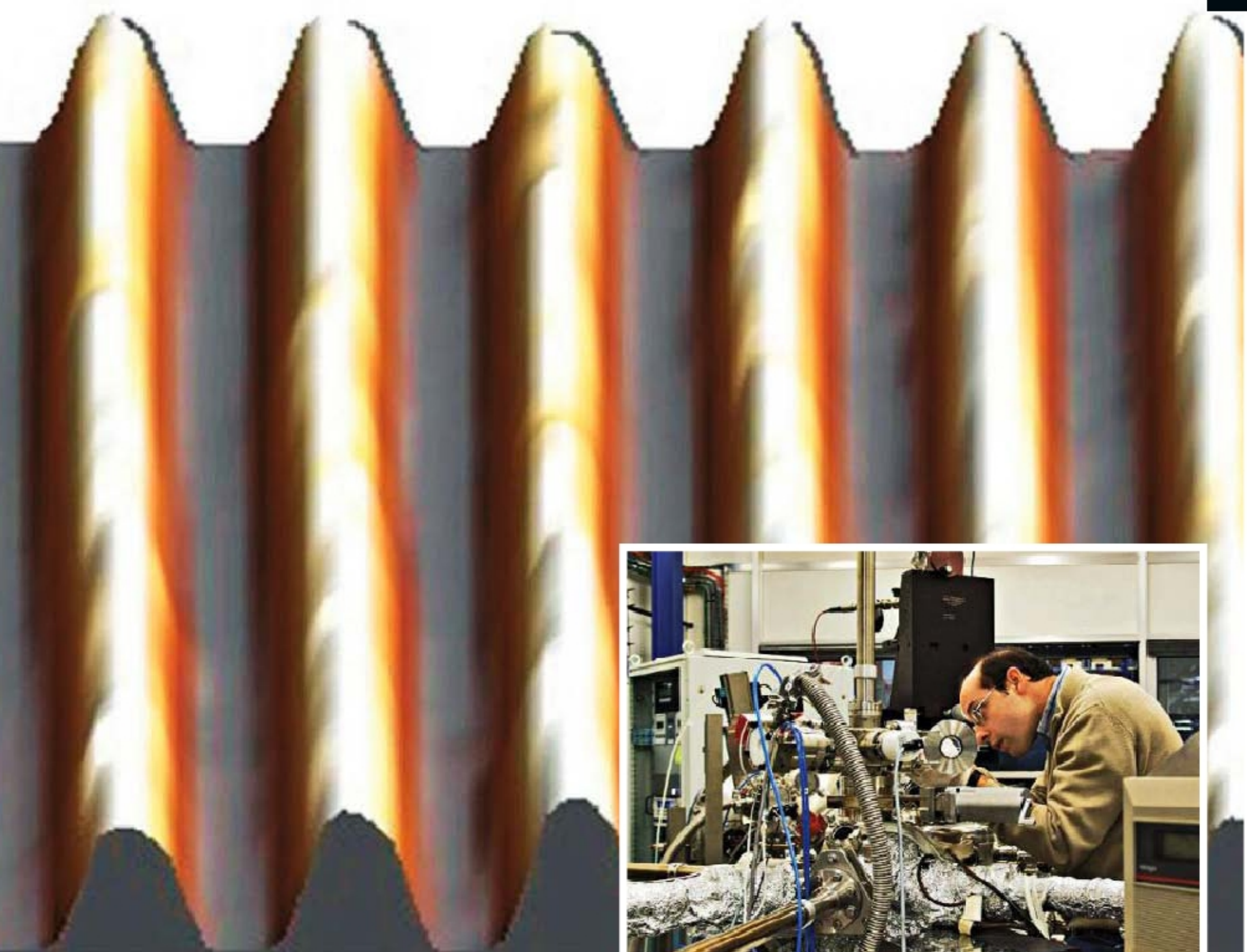
FAITS & CHIFFRES

Identifié en 2004, le graphène conduit **30 fois** mieux l'électricité que le silicium et est **200 fois** plus résistant que l'acier, tout en étant **6 fois** plus léger. Les électrons s'y déplacent à **1 000 km/s**, soit presque **150 fois** plus vite que dans le silicium. La Chine en produit **300 tonnes/an** pour un prix de revient de **500 dollars/kg**.

de carbone se réorganiser en nanorubans de graphène épousant la forme du substrat. Des rubans aux bords parfaitement réguliers et cinq fois plus fins que ceux obtenus avec la meilleure des lithographies. "Cette technique est très élégante car elle n'endommage pas les bords et est facilement reproductible", s'enthousiasme Annick Loiseau, une des meilleures spécialistes du domaine.

Et en y regardant de plus près, les physiciens ont constaté que les bords des centaines de rubans obtenus sont devenus semi-conducteurs. "On ne s'attendait pas à ce que ce soit le cas", reconnaît Claire Berger, coauteur de l'étude





réalisée en collaboration avec le CNRS. Or, le graphène obtenu cumule finalement deux fonctions essentielles à son avenir informatique : sa partie semi-conductrice pourrait en faire un interrupteur miniature ultrarapide, tout en conservant une conduction électrique hors norme grâce à sa partie centrale.

Reste à s'en assurer "*en mesurant la capacité de transport électronique du graphène ainsi produit*", avertit Mark Goerbig, du Laboratoire de physique des solides de l'université Paris-Sud. Mais les premières analyses en cours s'annoncent d'ores et déjà prometteuses. On n'en attendait pas moins de ce matériau miracle. **J.G.**

1 En gravant de fins sillons dans une plaque de carbure de silicium dans lesquels les atomes de carbone sont venus se réorganiser...

2 ... une équipe de physiciens franco-américaine a obtenu des nanorubans de graphène semi-conducteurs qui pourraient servir de mini-interrupteurs ultrarapides.

UN MATÉRIAU AUX TRÈS NOMBREUSES APPLICATIONS

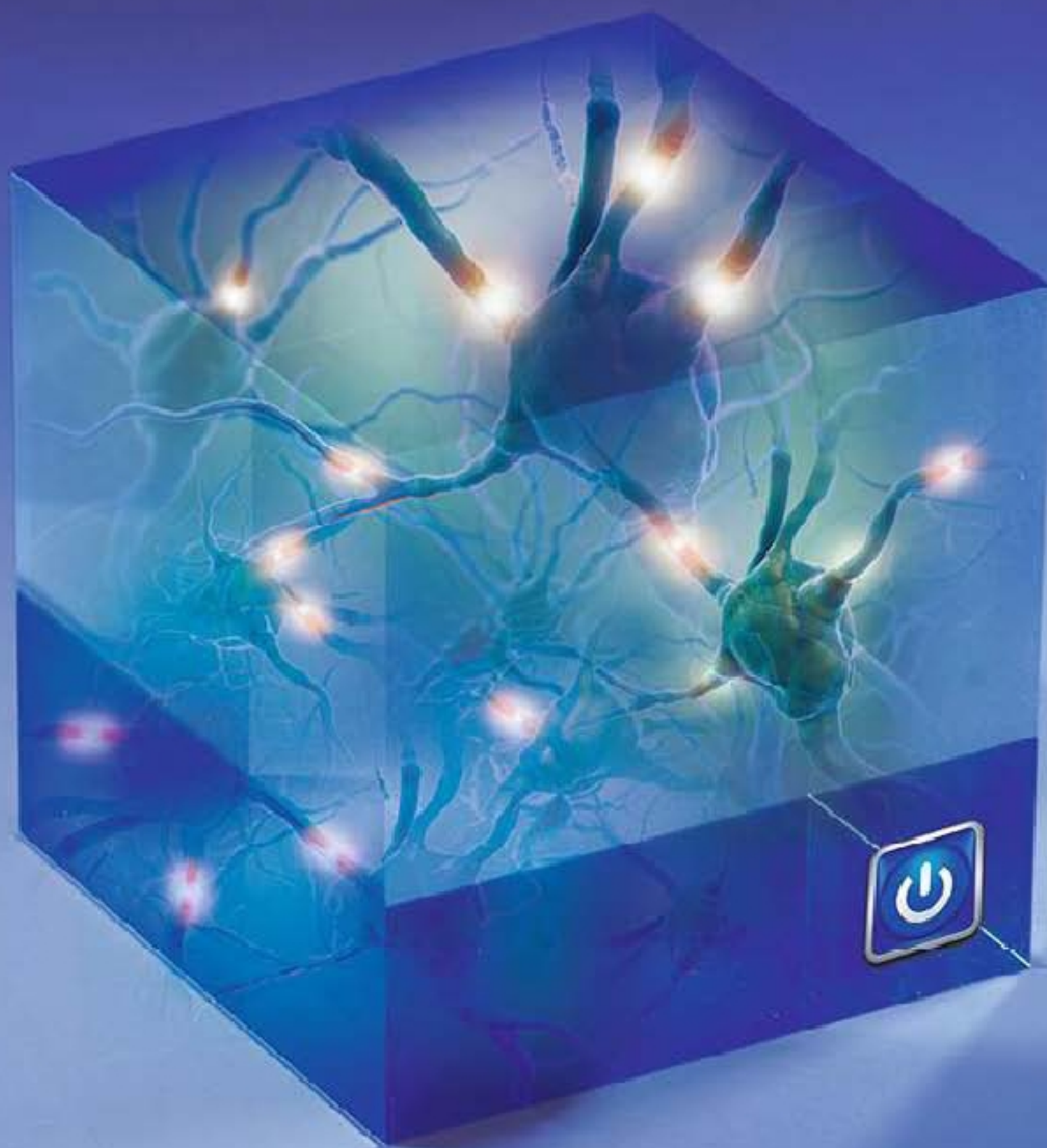
Le graphène connaît un succès retentissant dans six secteurs clés : l'électronique, l'informatique, l'énergie, la mécanique, l'imagerie et les biotechnologies. Ce sont d'abord ses propriétés physiques exceptionnelles qui ont intéressé les scientifiques, comme sa conductivité électrique et thermique, son hyperrésistance mécanique ou sa transparence. Mais c'est seulement depuis deux ans que les chercheurs osent modifier chimiquement ce nanomatériau pour faire apparaître de nouvelles propriétés. Ainsi, en accrochant un atome de fluor à chacun des atomes de carbone, le graphène ne conduit plus l'électricité mais se trouve doté de la même stabilité thermique que le Téflon.

CERVEAU ARTIFICIEL

SA FABRICATION A COMMENCÉ !

Vertigineux ! Le projet de réaliser, à partir de silicium et de puces électroniques, un cerveau capable de mimer le nôtre est en train de devenir une réalité. Structure, neurone, connexions... De par le monde, des dizaines de labos relèvent le défi d'une complexité hors-norme – et obtiennent déjà des résultats. A la clé ? Un fantastique outil de science, une aubaine médicale et... plein de questions !

PAR PIERRE-YVES BOCQUET, STÉPHANE BARGE, JÉRÔME GRENÈCHE,
ROMAN IKONICOFF, FRANÇOIS LASSAGNE ET L'ENSEMBLE DE LA RÉDACTION



L'ambition est tellement énorme qu'il est *a priori* difficile de la prendre au sérieux. Comment oser prétendre fabriquer un cerveau artificiel ? Comment croire qu'il est aujourd'hui possible de construire une machine capable de reproduire l'ensemble des phénomènes qui se trament sous nos boîtes crâniennes ? Les faits, pourtant, sont là : deux projets lancés ces dernières années ambitionnent de construire des systèmes électroniques répliquant la complexité et les incroyables capacités des cerveaux des mammifères, humains compris. Deux projets qui, par leur ampleur financière et leur

complexité technologique, entrent dans le cercle de la "Big Science" à la suite du LHC, le grand accélérateur de particules du Cern, ou d'Iter, le futur réacteur à fusion nucléaire.

D'un côté, il y a SyNAPSE, lancé en 2008, financé par le Darpa (le département d'études avancées de l'armée américaine) et mis en œuvre par IBM, HP et un réseau de laboratoires universitaires et privés américains (Columbia, Cornell, Wisconsin-Madison, HRL...). De l'autre, le Human Brain Project, lancé en 2010, financé pour sa part par l'Europe, et constitué du regroupement de 87 institutions de recherche in- →

Les 4 défis du cerveau artificiel

1 Tracer la carte complète du cerveau humain

Pour que la réplique électronique reproduise le plus fidèlement possible les capacités du cerveau humain, les chercheurs cartographient désormais dans les moindres détails l'original de chair : tracé des connexions, forme des neurones, nature et distribution des neurotransmetteurs... P. 48

2 Construire un neurone électronique

Les supercalculateurs informatiques assurent aujourd'hui des capacités de simulation inimaginables il y a dix ans. Ils n'en restent pas moins mal adaptés à la modélisation du cerveau. Les chercheurs inventent donc de nouvelles puces, mimant au plus près le fonctionnement des neurones biologiques. P. 50

→ tationales, autour de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne.

On le voit : il s'agit, de part et d'autre de l'Atlantique, d'une mobilisation aussi générale que prestigieuse qui, du seul fait qu'elle existe, donne un vrai crédit au projet de réaliser un cerveau humain en partant de zéro. C'est-à-dire, en pratique, d'assembler des milliards de neurones artificiels, faits de puces électroniques d'un nouveau genre, afin de reproduire les prouesses du cerveau (raisonnement, décisions, créativité...). Mais si les grandes manœuvres sont lancées, est-ce que cela signifie qu'elles vont aboutir ? Car, malgré tout, le doute persiste. Comment espérer fabriquer un organe dont les talents sont un secret encore si jalousement gardé ?

Il faut en effet reconnaître que les neurosciences sont incapables de comprendre comment fonctionne le cerveau humain, de dire comment, à

partir de ses 80 milliards de neurones enchevêtrés, naissent la conscience, l'intelligence, la créativité, la parole, à ces niveaux de finesse, de variété et d'amplitude sans égal dans le règne du vivant. On peut rassembler autant de chercheurs en neurosciences, d'informaticiens, d'ingénieurs et de mathématiciens que l'on veut : ils sont face à un organe qu'ils ne comprennent pas.

UN VIRAGE STRATÉGIQUE

Sauf que SyNAPSE et Human Brain Project ont justement un plan pour contourner l'obstacle : plutôt que d'attendre de comprendre le cerveau humain pour le répliquer, ils proposent de construire tout de suite une réplique fidèle... pour mieux le comprendre. Une nouvelle stratégie qui prend au pied de la lettre le prix Nobel de physique Richard Feynman, qui écrivait en 1988 : *"Ce que je ne peux pas*

créer, je ne peux pas le comprendre." En clair : l'idée part du principe qu'un cerveau répliqué dans le silicium peut être l'objet d'expérimentations – chose impossible avec l'original – qui vont dévoiler ses règles de fonctionnement au fil des différents réglages. A défaut de comprendre comment l'original fonctionne, il "suffit" que la cartographie de son organisation soit précise pour réussir à la répliquer fidèlement. Et dès lors, une fois la réplique construite puis comprise, c'est l'original qui n'aura plus de mystère...

Ainsi, les répliques en silicium du cerveau humain promettent-elles d'en dire long sur ce qui se passe dans notre tête et, plus spécifiquement, de mimer les phénomènes de dépression, d'autisme ou de schizophrénie, et donc de mieux comprendre les maladies cognitives... maladies qui touchent 30 % de la population européenne et dont le

**3**

Organiser les milliards d'interconnexions

Les prouesses du cerveau humain tiennent essentiellement aux motifs complexes que les connexions nerveuses dessinent dans les dizaines de régions qui assurent les fonctions cérébrales. Les chercheurs, peu à peu, parviennent à faire travailler entre elles des régions cérébrales virtuelles toujours plus nombreuses. P. 52

4

Alimenter le silicium en informations

Un cerveau artificiel vierge est comme celui d'un nouveau-né : il doit apprendre, par l'expérience et l'enseignement, à réaliser des tâches de plus en plus complexes. Les chercheurs savent désormais concevoir des machines capables de découvrir des concepts abstraits, sans que leur soit inculquée de connaissances préalables. P. 54

coût atteindrait près de 600 milliards d'euros par an. Un niveau bien supérieur à celui d'autres pathologies comme les maladies cardiaques, le cancer ou le diabète.

La promesse est belle... Il n'empêche ! En cinquante ans, les chercheurs en intelligence artificielle n'ont jamais réussi, dans la foulée de l'inspiration du "père" de l'informatique, Alan Turing, à écrire un programme qui mimerait toutes les subtiles facettes de l'esprit humain. Certains supercalculateurs ont beau effectuer des opérations inaccessibles à un esprit de chair, des logiciels de conversation ont beau réussir à se faire passer pour des interlocuteurs humains, passant ici sans problème le "test de Turing", il n'en reste pas moins que cent ans après la naissance du génial pionnier de la programmation, inventeur de cette épreuve réputée dire si une machine

est intelligente ou non, les informaticiens sont loin de savoir concevoir une machine qui, non contente de converser comme un humain, raisonnerait, inventerait, déciderait, s'enthousiasmerait ou, au contraire, s'emporterait... En clair : pourquoi l'intelligence artificielle (IA) serait-elle capable de faire aujourd'hui ce qu'elle n'arrive pas à faire depuis si longtemps ?

La réponse se trouve du côté technologique, là où, *in fine*, se mesure la crédibilité du projet. En premier lieu, il y a bien sûr l'explosion continue de la puissance de calcul, condition *sine qua non* à tout espoir de simulation cérébrale. Mais le point clé est ailleurs. Ou plutôt les points clés. Car dans cet Himalaya de l'IA qu'est la conception d'un cerveau artificiel, quatre grandes étapes ont été identifiées comme incontournables, quatre grands défis qu'il s'agit impérativement de relever. →

L'EUROPE PRÊTE À DÉBOURSER UN MILLIARD D'EUROS

Dans le cadre du plan Future Emerging Technologies, la Commission européenne va choisir, avant le printemps, parmi les disciplines scientifiques existantes, les deux projets qu'elle considère comme les plus prometteurs pour la décennie à venir. Ceux qui, à l'instar du programme Apollo (qui aboutit au premier pas sur la Lune) ou du Human Genome Project (qui mena au séquençage du génome humain), seront les vaisseaux amiraux de la recherche européenne, financés pour un milliard d'euros. Sur les 26 projets déposés en 2010, 6 sont encore en lice. Le Human Brain Project en fait partie. Mieux : il est favori.

→ Un, cartographier nos millions de milliards de connexions neuronales pour avoir les plans de construction. Deux, fabriquer des puces en silicium mimant le fonctionnement biologique du neurone. Trois, organiser leurs connexions selon les plans. Et enfin quatre, alimenter le tout de flots d'informations pour que la bête puisse évoluer comme un cerveau humain. Or, comme autant de raisons de croire aujourd'hui au cerveau artificiel, chacun de ces quatre défis a été relevé de manière significative ces derniers mois, ou est en passe de l'être.

UN VRAI PROJET TECHNOLOGIQUE

Pour le premier défi, celui de la cartographie, les données s'accumulent depuis quelques années à une vitesse impressionnante, en particulier grâce à une nouvelle technique d'imagerie révolutionnaire, l'IRM par diffusion. Au point que le projet Connectome humain annonce pouvoir fournir les plans de construction de la réplique électronique d'ici deux ans (voir ci-contre). Pour le second défi, celui de la construction d'une puce mimant le fonctionnement biologique d'un neurone, là aussi, la technologie progresse à un rythme effréné. En 2012, après quatre ans de recherches, IBM a fait fonctionner deux puces "neuromorphiques" et s'est assuré qu'il était possible d'en connecter plusieurs dizaines de milliards entre elles (voir p. 50).

En ce qui concerne l'organisation des connexions – un travail délicat où il s'agit de savoir quelle fonction affecter aux différentes zones du cerveau artificiel – les résultats du projet Spaun publiés fin 2012 sont on ne peut plus encourageants : une fois organisés, les 2,5 millions de neurones virtuels de cette simulation savent reproduire l'écriture manuscrite, compléter des suites logiques, compter... (voir p. 52) Enfin, pour le défi de l'apprentissage, les méthodes développées par le laboratoire de recherche de Google offrent des perspectives très engageantes. Ses algorithmes ont déjà réussi à conce-

Les défis du cerveau artificiel

1

Tracer la carte exacte

Projet CONNECTOME

Mené par le National Institute of Health (125 institutions de recherche, Etats-Unis)

Démarré en 2009

Fin prévue en 2014

Tout commence évidemment par là : avant d'espérer véritablement fabriquer un cerveau humain artificiel, encore faut-il savoir précisément à quoi ressemble le modèle naturel. Ce qui est un premier défi de taille. Bien sûr, tout serait plus facile si, pour comprendre ce qui se trame sous notre boîte crânienne, on pouvait l'ouvrir comme le capot d'une voiture et se mettre à étudier le moteur, à tester son comportement selon que l'on appuierait ici ou gratterait là... Sauf que notre cerveau n'est pas un moteur de voiture qu'on peut démonter et remonter. Comment dès lors en dresser les plans, en saisir l'architecture ? La réponse tient en un nom barbare : IRM à tenseur de diffusion. Grâce à

cette toute nouvelle technique d'imagerie de pointe, il est possible de cartographier à toutes les échelles les circuits de câblage du cerveau humain, jusqu'aux détails profonds, neurone par neurone. "Imaginez que vous survolez une ville en avion et que vous observez les routes, le déplacement des voitures. Vous pouvez alors commencer à réfléchir aux raisons de leurs trajets", décrit Paul Thompson, professeur de neurologie à l'université de Californie, spécialiste de cette technique révolutionnaire.

Etudier les neurones à leur plus petite échelle

Son principe ? Alors que l'IRM fonctionnelle, utilisée pour suivre l'activité cérébrale, se focalise sur l'oxygène présent dans les capillaires sanguins du cerveau, l'IRM de diffusion suit le passage de molécules d'eau à travers l'enchevêtrement complexe des axones,

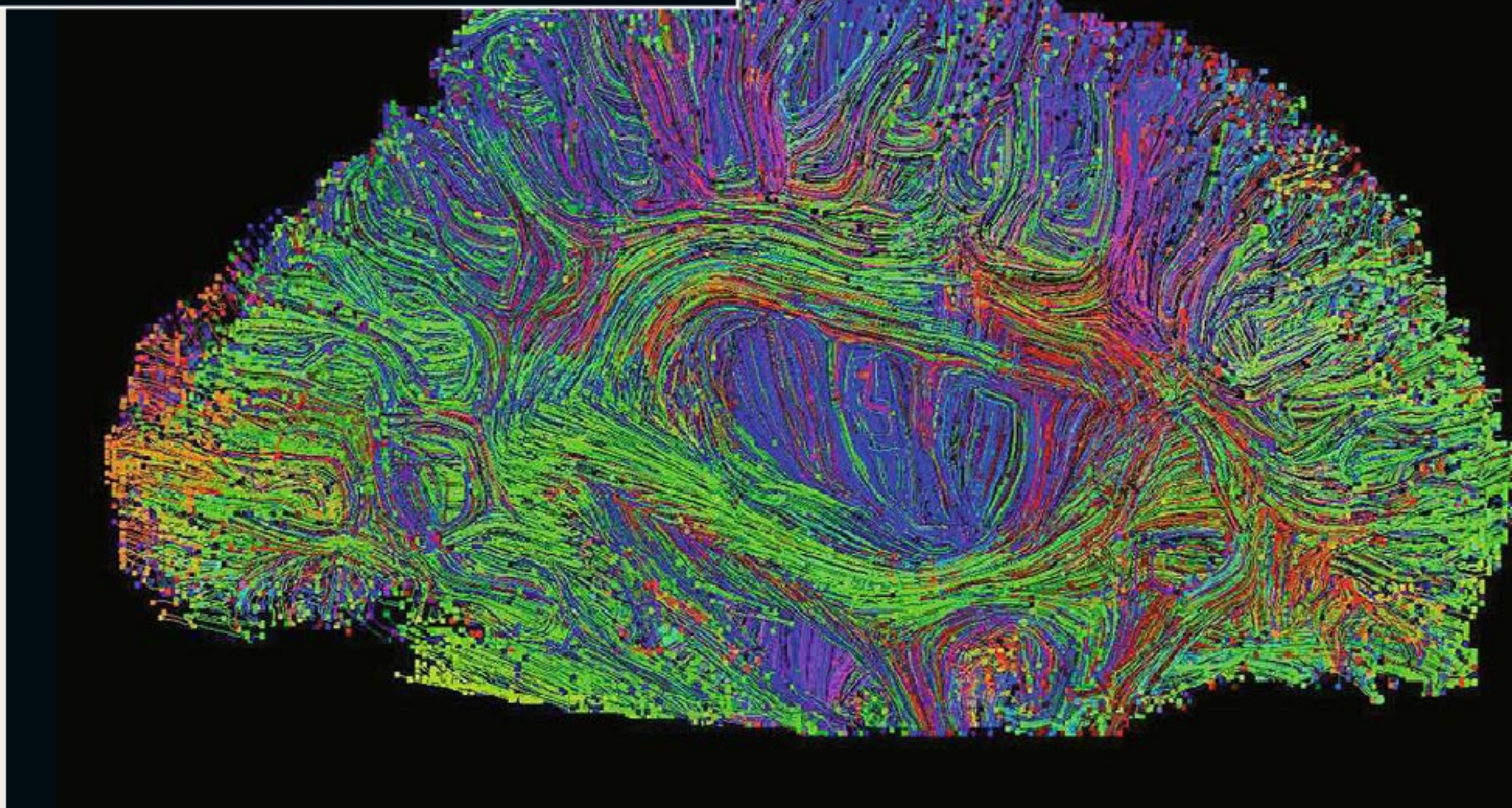


PAUL THOMPSON

PROFESSEUR DE NEUROLOGIE,
UNIVERSITÉ DE CALIFORNIE
(ETATS-UNIS)

Avec cette technique d'imagerie de pointe, nous voyons enfin comment les régions du cerveau communiquent

du cerveau humain



▲ L'IRM de diffusion suit les molécules d'eau à travers les fibres nerveuses qui relient les neurones, ce qui permet de dessiner une carte de leurs connexions.

ces fibres nerveuses qui relient les neurones entre eux. Ce qui donne des images 10 fois plus précises pour localiser les connexions entre les différentes régions du cerveau... et accéder à ses trois niveaux d'organisation: de l'échelle microscopique des neurones individuels, avec leurs connexions synaptiques et leurs neurotransmetteurs, à l'échelle macroscopique des régions cérébrales, de l'ordre du millimètre, en passant par l'échelle intermédiaire, dite mésoscopique, de l'ordre d'une centaine de micromètres. "Nous voyons enfin comment les régions de

notre cerveau communiquent!", s'enthousiasme Paul Thompson. Qui annonce d'ores et déjà que, "d'ici deux ans, il sera possible d'obtenir une cartographie complète des connexions cérébrales chez l'humain, étape majeure vers le cerveau artificiel." Une performance inimaginable il y a quelques années.

Au vu de telles prouesses, le neurologue californien, et avec lui des milliers de chercheurs appartenant à 125 institutions dans le monde, se sont lancés dans un très ambitieux projet: le Connectome humain, fédéré par l'Institut national de santé américain, qui vise à

dessiner les plans précis du cerveau humain à partir du scan du cerveau de 1200 adultes. Un projet au-delà des attentes avec 100 scans de plus obtenus en deux ans.

Observer les anomalies

Le décryptage de cette première collection de cartes cérébrales a déjà permis d'identifier plus de 100 variétés de neurones, et autant de neurotransmetteurs. En croisant 500 de ces scans avec les informations sur la santé des personnes, les chercheurs ont aussi commencé à identifier nombre de circuits neuronaux impliqués dans des comportements ou des capacités cognitives spécifiques. "Cela devrait per-

mettre de mieux comprendre comment se matérialisent notamment la prise de décision, la colère et le plaisir dans notre cerveau, détaille Paul Thompson. Nous avons déjà observé des anomalies dans les circuits neuronaux de personnes atteintes de maladies du cerveau comme l'autisme, ce qui promet d'améliorer leur prise en charge avec des traitements adaptés." Maladie d'Alzheimer, dépression, schizophrénie, les chercheurs du Connectome sont en train de passer toutes les maladies du cerveau au crible de cette nouvelle technique de cartographie. Avant, peut-être, de fournir les plans de construction de machines faites de puces et d'électrons... J.G.

Les défis du cerveau artificiel

2

Construire un neurone électronique

Projet TRUENORTH

Mené au centre de
recherche d'IBM, à
Almaden (Californie)

Démarré en 2008

Fin prévue en 2016

Pour fabriquer une machine qui ressemble à un cerveau humain artificiel, il ne suffit pas d'en avoir les plans, aussi précis soient-ils: il faut aussi savoir construire son élément de base, le neurone. Et même en construire des milliards, faciles à connecter entre eux. C'est ici le deuxième, et crucial, défi à relever. Surtout quand on sait que le fonctionnement des cellules nerveuses n'a rien à voir avec celui des circuits de transistors qui peuplent les disques durs de nos ordinateurs.

De fait, depuis plus d'un demi-siècle, tous les systèmes informatiques respectent une architecture imaginée par John von Neumann en 1943, où la

mémoire est séparée de l'unité de calcul, elle-même séparée de l'unité centrale qui gère les deux. Alors que le cerveau, lui, agit totalement différemment, chaque neurone jouant simultanément le rôle de mémoire, d'unité de calcul et d'unité centrale. Une solution beaucoup plus efficace en temps de calculs et en énergie. Ce qui oblige les informaticiens à une volte-face: il s'agit pour eux d'inclure dans des systèmes électroniques des puces en silicium mimant la structure du neurone, plus rapides

pour des tâches comme la reconnaissance des objets et consommant moins d'énergie que les puces classiques.

Deux neuro-puces
sont déjà à l'essai

Justement. Depuis quelques années, des projets de puces "neuromorphiques" sont en cours, dont le plus ambitieux, TrueNorth, est mené par deux mastodontes: IBM, qui a plus que contribué à installer l'architecture de von Neumann au cœur de l'informatique, et la Darpa,

la puissante agence de la Défense américaine pour les projets de recherche avancée. Le but que se sont fixé en 2008 ces deux géants: matérialiser chaque neurone par un nanocircuit électronique à transistors comprenant une unité de calcul élémentaire (le corps du neurone), des unités de mémoire (les synapses) et des câblages (les axones) le reliant aux nanocircuits (ou neurones) voisins, ceux-ci pouvant s'assembler comme des Lego pour former des systèmes à millions de neurones.



DHARMENDRA MODHA

DIRECTEUR DU GROUPE DE RECHERCHE
EN INFORMATIQUE COGNITIVE D'IBM
(CALIFORNIE, ETATS-UNIS)

**Notre puce est
particulièrement efficace
par rapport aux résultats
obtenus avec les systèmes
informatiques traditionnels**

→ voir, sans aide, des catégories abstraites d'images, à partir de collections hétéroclites (défi p. 54).

A elles quatre, ces avancées essentielles transforment le rêve d'un cerveau artificiel en véritable projet technologique. "Il est clair que si des tentatives de cartographie du cerveau telles que le Connectome, ou des simulations de fonctions cognitives comme Spaun n'existaient pas, nous n'aurions pas les données nécessaires pour atteindre notre objectif", résume Richard

Walker, membre du Human Brain Project à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

VERS UNE COOPÉRATION MONDIALE

Et voici où le puzzle du cerveau artificiel pourrait enfin voir ses pièces s'assembler: le projet européen, tout comme son homologue américain, a en effet pour vocation de fédérer toutes ces approches. Quand bien même chacun des deux projets suit une philosophie propre. SyNAPSE a dès le dé-

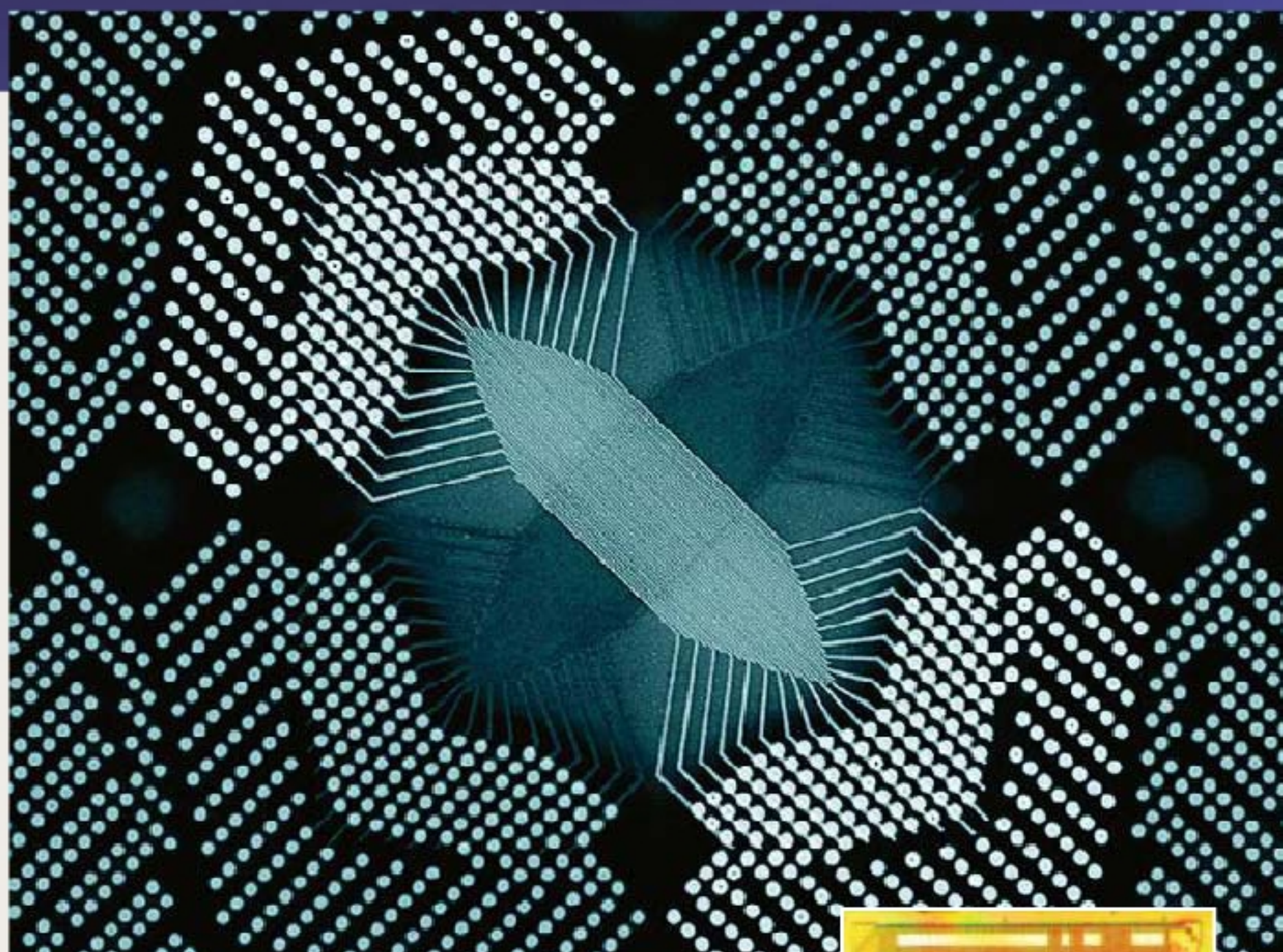
but placé au cœur de ses travaux la conception de circuits électroniques spécialement adaptés à la simulation des neurones biologiques. Tandis que le Human Brain Project a misé d'abord sur la collecte automatisée des constituants les plus détaillés possibles des neurones, pour alimenter aussi fidèlement que se peut une simulation numérique en extension constante sur des supercalculateurs.

C'est sans doute le projet européen qui embrasse le plus complètement

Sachant qu'il s'agit aussi de pouvoir programmer ceux qui se lieront entre eux.

Leur cahier des charges prévoit par ailleurs que chaque puce doit mesurer 3 mm de longueur sur 2 de largeur pour moins de 1 mm d'épaisseur, et contenir 256 nanocircuits: soit 256 neurones comportant chacun 1024 câblages leur permettant de se connecter (ce qui exige de graver plus de 260 000 synapses par puce)!

Aujourd'hui, deux "neuro-puces" respectant à la lettre ce cahier des charges sont en test. Et chacune a déjà livré quelques beaux résultats pour des tâches simples: reconnaissance visuelle de chiffre, conduite autonome en environnement virtuel simplifié... *"Notre puce est particulièrement efficace par rapport aux résultats obtenus avec des systèmes basés sur l'architecture de von Neumann. Notre but est de simuler une nouvelle architecture informatique cognitive"*, affirme Dhar-

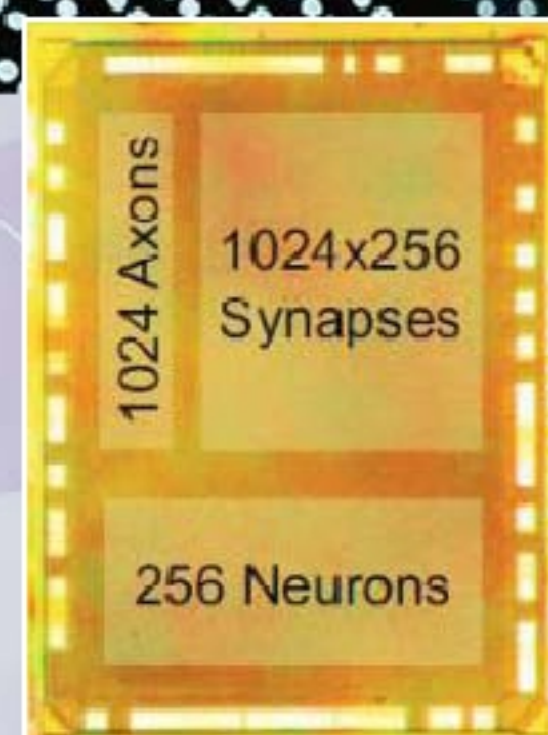


mendra Modha, qui dirige ces travaux.

IBM travaille dans le même temps à la conception de la console de pilotage. En novembre dernier, 96 armoires de supercalculateurs ont testé la circulation des influx dans un réseau virtuel de 530 milliards de neurones à 137 000 milliards d'interconnexions, soit autant que de synapses dans notre cerveau. Son équipe a aussi

réussi à traduire la carte des connexions d'un circuit de neurones du macaque en langage informatique TrueNorth. Reste à produire assez de puces en silicium et à injecter ce programme pour allumer... le premier morceau de cerveau électrique. Quand? Mystère. Mais tout indique que l'informatique est prête à s'engager dans une nouvelle voie. La voie de la neuro-informatique.

R.I.



▲ Les premières neuro-puces du projet TrueNorth réunissent 256 nanocircuits, chacun mimant un neurone, reliés entre eux par 260 000 "synapses".

le défi des défis. Il profite ici de la voie tracée par son fondateur, Henry Markram. Ce neuroscientifique sud-africain et son équipe du Blue Brain Project sont, en 2007, parvenus à simuler de façon encourageante une colonne corticale de rat, une entité du cortex qui regroupe environ 10 000 neurones (voir S&V n° 1086, p. 102). Et ils viennent d'annoncer que leur simulateur parvenait à prévoir comment les neurones se connectent avec une fidélité de 75 à 95 % par rapport à des observations

in vivo. *"Avec le Blue Brain Project, nous voulions confirmer la validité de notre méthode de simulation, explique Richard Walker. Avec le Human Brain Project, nous voulons aller beaucoup plus loin grâce à la coopération internationale. Si chaque équipe travaille dans son coin, on n'avance pas assez vite: environ 100 000 chercheurs rédigent 60 000 publications en neurosciences par an. Nous voulons créer une masse critique pour faire un bond en avant dans les connaissances."*

En pratique, le projet vise à réunir au service d'une seule simulation tout ce que la science sait du cerveau, en ne négligeant aucun savoir, en rassemblant tous les éclairages expérimentaux et théoriques, en extrayant de la littérature scannée les informations destinées à être injectées dans le modèle, en permettant aux scientifiques de déposer eux-mêmes leurs résultats sur une plateforme dédiée. *"Une fois créé, le modèle servira à la fois à l'étude du cerveau, et au développement →*

→ d'outils informatiques, détaille Richard Walker. Il sera mis à la disposition des chercheurs en neurosciences, qui pourront l'utiliser en temps partagé pour tester ou valider leurs hypothèses." Une approche qui explique que le projet compte déjà 150 équipes regroupant des milliers de chercheurs. Sur le papier en tout cas, car l'envol officiel n'a pas eu lieu, les arbitrages financiers européens étant attendus au printemps (voir encadré p. 47).

UNE SIMULATION QUI FAIT DÉBAT

Mais le Human Brain Project comme le projet SyNAPSE ne font pas l'unanimité. Car derrière ces belles promesses se cachent d'abord des enjeux moins affichables. "L'intelligence" est l'autre nom des services de renseignement, et la présence de la Darpa au cœur du projet américain démontre le caractère stratégique de ces travaux – caractère auquel l'Europe n'est sûrement pas non plus insensible.

Les critiques se focalisent pourtant sur leurs dimensions scientifique et technique. Ainsi, jusqu'à quel niveau de détail des "plans" de l'original biologique faut-il descendre pour obtenir un modèle suffisamment fidèle? Au niveau de la forme des neurones? Des molécules dont ils sont faits et qui circulent dans le cerveau? Au rang ultime de ce qui est mesurable en physique, comme le spin des électrons? S'agissant d'expliquer comment le cerveau pense, ressent, imagine... nul ne sait aujourd'hui s'il est indispensable de pouvoir décrire l'état de tous les atomes du cerveau, ou si se "contenter" de l'état électrique à la surface des cellules nerveuses suffit.

En s'arrêtant trop "haut" dans les détails, "le risque majeur est que l'information injectée dans le modèle soit trop faible, et que beaucoup de paramètres sur les types de neurones ou la connectivité soit ajustés au hasard", prévient Jean-Gaël Barbara, neuroscientifique et historien des sciences. C'est pourquoi de nombreux →

Les défis du cerveau artificiel

3

Organiser les milliards

Projet SPAUN

Mené à l'université de Waterloo (Canada)

Démarré en 2012

Pas de fin programmée

Pour mimer le cerveau humain, une fois les plans dessinés et les neurones électroniques de base construits, il faut encore organiser quelque cent mille milliards d'interconnexions entre cinquante milliards de neurones sans s'emmêler les fils. Un défi qui, là encore, donne le vertige. Mais qui n'apparaît pas hors de portée, comme le projet Spaun est en train de le démontrer.

Ce projet d'un cerveau logiciel, mis au point par des Canadiens de l'université de Waterloo, sait déjà lire, écrire, compter, mémoriser une liste de chiffres, et même raisonner en complétant des séries logiques. Une grosse tête, Spaun? Pas vraiment: avec ses 2 millions et demi de neurones virtuels, simulés sur ordinateur, son ciboulot

est plus proche de celui du cafard... Le secret de sa sagacité tient en fait dans l'organisation de ses connexions. "Jusqu' alors, la plupart des simulations se concentraient sur des modélisations très détaillées d'une seule portion cérébrale, explique Chris Eliasmith, le créateur de Spaun. Notre approche est tout autre: elle consiste à connecter de nombreuses régions pour les faire fonctionner ensemble."

Un puzzle cérébral...

Cette stratégie, aussi globale qu'inédite, permet de faire communiquer et interagir une dizaine de zones impliquées dans le traitement de la vision, la mémoire, la prise de décision, la coordination des mouvements et l'exécution de gestes. Car Spaun a un corps, matérialisé par un œil et un bras articulé pour formuler ses réponses par écrit. La connexion du



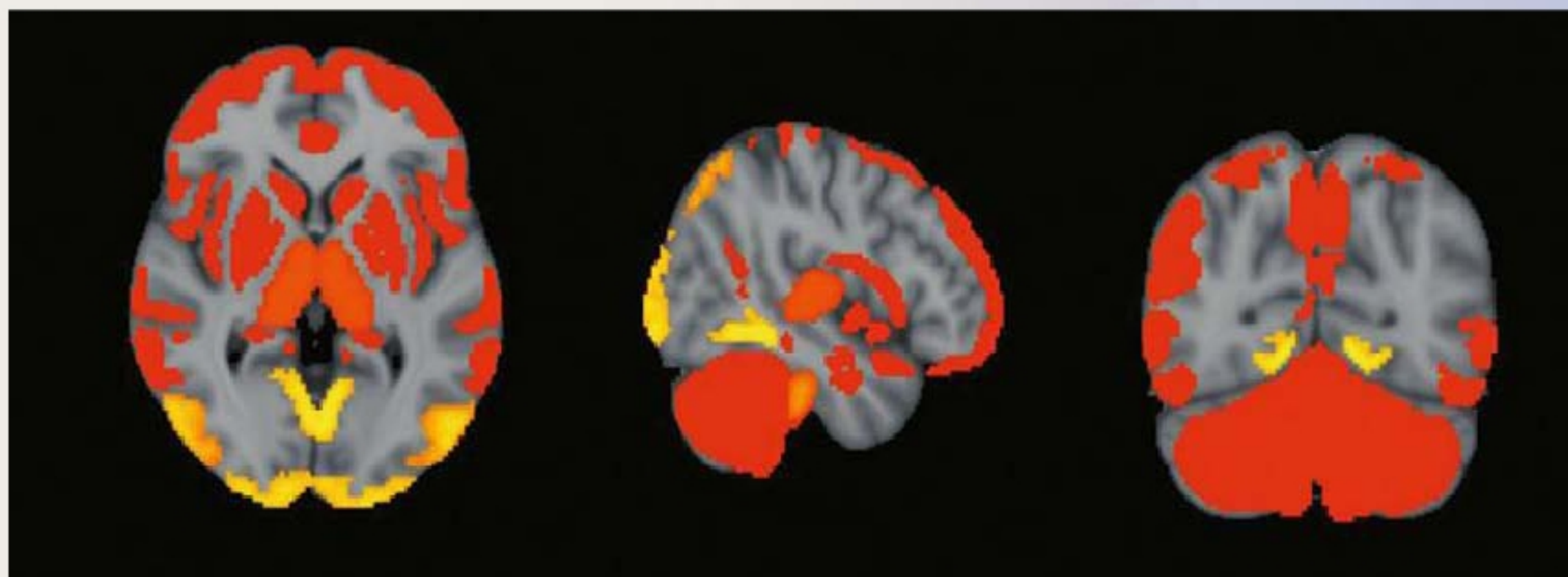
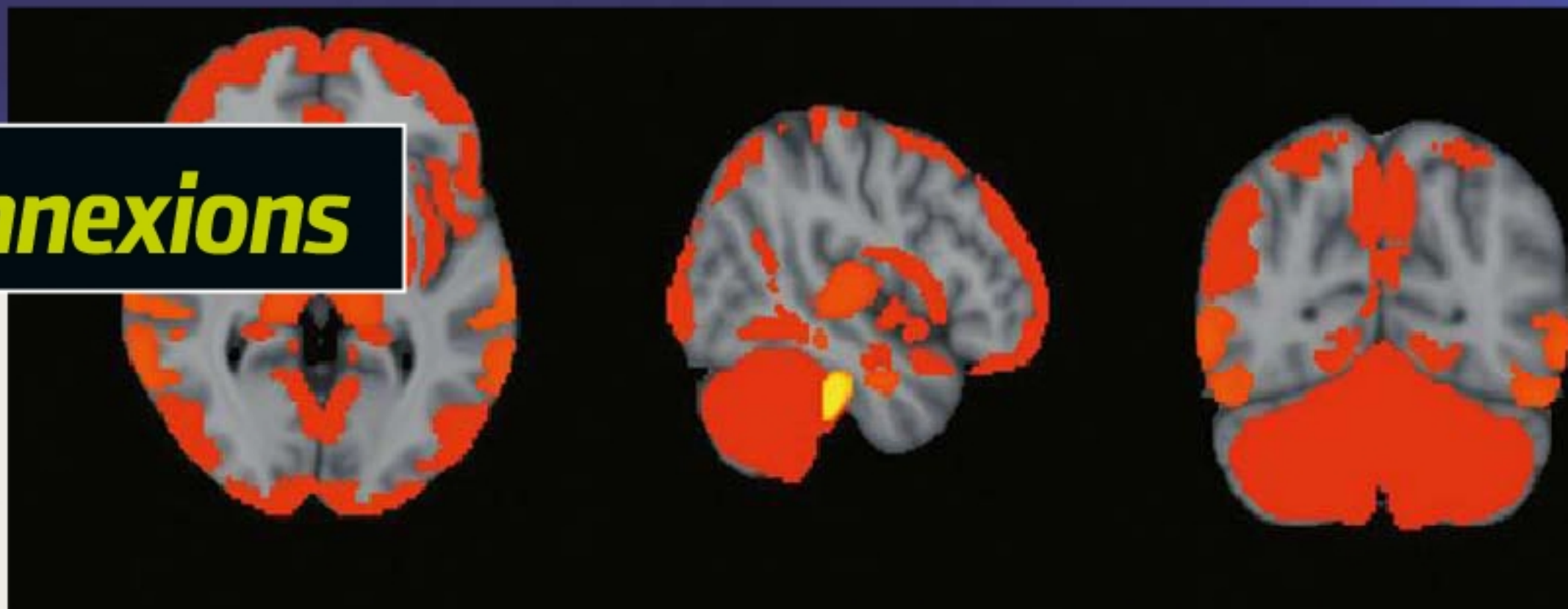
CHRIS ELIASMITH

FONDATEUR DU PROJET SPAUN,
UNIVERSITÉ DE WATERLOO (CANADA)

Notre cerveau-logiciel sait lire un code, l'interpréter et produire les gestes pour écrire la réponse

d'interconnexions

>v Les fonctions supérieures mobilisent des zones précises (à dr. en jaune, la conscience, en bas, la vision): les connaître permet de pouvoir les faire interagir.



cortex visuel au cortex moteur lui permet ainsi non seulement de voir, mais de recopier ce qu'on lui montre, jusqu'à imiter le style d'une écriture manuscrite! "En tout, complète Chris Eliasmith, il peut réaliser huit exercices distincts, que nous lui commandons via des codes visuels. Chaque fois, Spaun interprète ce code, transmet les informations aux régions du cerveau concernées, et produit les mouvements et les gestes pour écrire la réponse."

La clé de ces performances cognitives spectaculaires tient dans le réalisme de la modélisation des connexions. Chez Spaun, comme dans la réalité, les ganglions de la base, ces amas de cellules nerveuses enfouies sous le

cortex, jouent les chefs d'orchestre en contrôlant, grâce au thalamus, l'ordre des opérations; le cortex visuel primaire et ses sous-régions gouvernent la vision; les cortex postérieur pariétal et préfrontal dorso-latéral sont dédiés à la mémoire et aux échanges d'informations; d'autres à la coordination des mouvements et l'exécution des gestes, etc. Les neurones eux-mêmes sont modélisés à partir de leurs propriétés biologiques et physiologiques. Le détail va jusqu'à intégrer les propriétés des neurotransmetteurs (dopamine, acide gamma-amino butyrique), ces molécules qui stimulent ou inhibent l'activité cérébrale, en modulant la vitesse de transmission des influx.

Plusieurs pièces de ce puzzle cérébral sont toutefois manquantes. En particulier l'hippocampe, cette région, réputée pour son rôle dans la mémoire épisodique, qui compile nos vieux souvenirs. Chez Spaun, la mémoire se résume à une zone tampon dans laquelle transitent temporairement les informations à traiter.

... vorace en calculs

Son autre talon d'Achille est l'apprentissage, qui fait appel à un subterfuge informatique basé sur l'analyse des résultats enregistrés au cours de chaque exercice. Rien à voir avec le processus biologique qui entraîne un renforcement de certaines connexions neuronales. De plus, en dehors de ses huit types d'exercices

imposés, ce cerveau est incapable d'apprendre de lui-même à en réaliser d'autres. Enfin, il est lent, très lent. Simuler une seconde de réflexion prend plus de deux heures de traitement informatique!

Trop vorace en calculs, le logiciel n'est pas adapté aux structures informatiques traditionnelles. Pour doper sa vivacité, il lui faudrait tourner sur des calculateurs "neuromorphiques" spécialement conçus pour imiter l'architecture massivement parallèle de ces millions de neurones, comme ceux imaginés par IBM (voir p. 50). Spaun ne serait donc que le premier spécimen de programmes d'un nouveau type, capables d'assurer la connexion des neurones *in silico*. **S.B.**

Les défis du cerveau artificiel

4

Alimenter le silicium en informations

Projet **GOOGLE X**Mené par Google et
l'université Stanford

Démarré en 2011

Fin prévue en juillet 2012

Une fois le cerveau *in silico* fabriqué, reste à l'éduquer. Car ce n'est pas tout d'avoir une tête bien faite, encore faut-il qu'elle soit bien pleine. Puisqu'il n'est pas question de programmer tout le savoir nécessaire, le point clé est ici l'apprentissage. "Sans apprentissage, nous ne sommes pas des hommes. Ni même des rats", sourit Richard Walker, responsable du Human Brain Project. Or, en ce domaine, le laboratoire de recherche de Google et l'université Stanford viennent de réaliser une prouesse. Ils ont réussi à concevoir des concepts visuels complexes, tels que "visage d'homme" ou "tête de chat", à partir de collections hétéroclites d'images dont aucun élément n'in-

dique pourtant, au préalable, la nature. "L'exploit et la nouveauté de l'expérience, c'est d'avoir effectivement réussi à construire un cortex visuel non surveillé!", souligne David Bader, le directeur du département de calcul à haute performance au Georgia Institute of Technology.

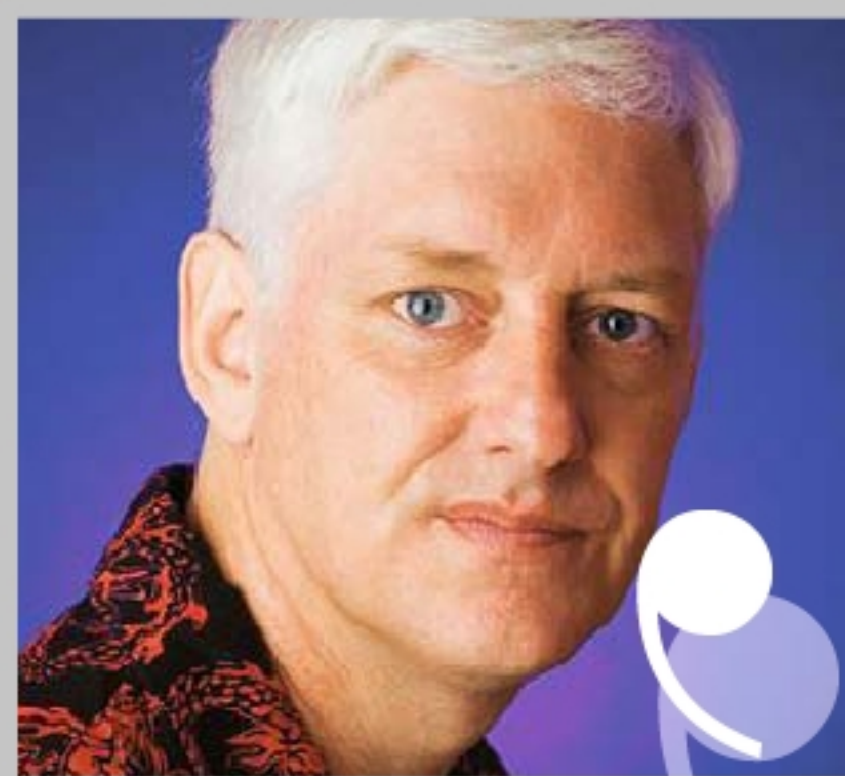
Comment cette prouesse a-t-elle été rendue possible? Grâce à la technique de programmation qui simule le mieux le fonctionnement cérébral biologique: un "réseau de neurones artificiels". La machine, un

groupe de mille ordinateurs reliés via le Web, simule l'activité d'une dizaine de milliers de neurones connectés par un milliard de synapses. L'organisation de ces connexions est, elle aussi, bio-inspirée: elle ménage neuf couches de neurones, la plus périphérique regroupant ceux qui recueillent directement les informations contenues dans les images soumises, les couches internes effectuant un travail de filtrage, d'association entre les informations de neurones voisins, et d'amélioration du

contraste. Un véritable défi en termes de calculs, car la modification d'une connexion entraîne un effet de cascade sur le réseau, dont il faut alors recalculer tous les paramètres. Mais pas pour Google, rompu au traitement massif et parallèle d'immenses quantités de données.

Des concepts visuels

Résultat: après avoir visionné durant trois jours plus de 37 000 images hétérogènes, dont seulement un tiers représentaient des figures

**PETER NORVIG**

DIRECTEUR DE RECHERCHE CHEZ GOOGLE

Les machines vont de mieux en mieux pouvoir apprendre sans aucune connaissance préalable

→ *neuroscientifiques ne croient pas dans la vertu explicative du modèle qui vise à réunir des niveaux d'organisation trop distants. On n'apprendra pas grand-chose... hormis l'identification de ce qu'on ne sait pas*. En clair: un cerveau artificiel trop "grossier", en se comportant de manière totalement différente de son inspiration biologique, montrerait avant tout... la nécessité d'en affiner les détails.

Une critique qui poursuit l'équipe d'Henry Markram depuis la naissance

de Blue Brain, et que Richard Walker connaît bien: "Nous n'avons pas la prétention d'atteindre la perfection. Ce ne sera pas un cerveau humain, ce sera une approximation. Mais si le modèle *in silico* ne se comporte pas comme nos observations *in vivo*, nous pourrions essayer de voir quelles modifications conduisent au bon résultat, et faire des allers-retours pour corriger nos hypothèses." Autrement dit, les cerveaux artificiels, comme ceux des humains, ne naissent pas "finis". Ils

auront besoin d'être continuellement ajustés. Ce qui pose l'épineux problème du temps d'apprentissage.

ET DEMAIN, SOIGNER LE CERVEAU?

Sachant qu'il faut environ deux ans à un petit humain pour que son cerveau lui permette de commencer à parler... les modélisateurs devront-ils attendre des mois avant que les esprits électroniques parlent, en ayant "assimilé" les données de leur apprentissage? "Nous sommes aussi conscients que même



humaines, la machine a réussi à dégager le concept général de visage humain, sans aucune information préalable ni supervision humaine. Le secret ? Le réseau des neurones artificiels change au fur et à mesure qu'il est exposé à une nouvelle image : le poids de chaque connexion est programmé pour encoder les caractéristiques physiques (contrastes,

orientation...) des images. Si bien que, statistiquement, peu à peu, quand un grand nombre d'images partagent des traits communs, ceux-ci finissent par "imprimer" la configuration du réseau. Et lorsque certaines configurations se stabilisent, c'est que des concepts visuels ("visage humain") ont été saisis par la machine. Autrement dit, la machine a réussi à pro-

▲ C'est l'immense masse de données stockées dans les *data centers* de Google qui a servi à alimenter et à "éduquer" son réseau de neurones artificiels.

duire une catégorie qui permet de trier les informations, de les classer dans des boîtes générales, de façon à plus facilement les reconnaître ensuite.

Elle a réussi le miracle de l'émergence d'une abstraction visuelle telle que les neuroscientifiques l'imaginent dans notre cerveau. "Au vu des résultats obtenus

par les chercheurs de Google, je pense que les machines vont de mieux en mieux apprendre sans aucune connaissance préalable", prévenait, en 2011, Peter Norvig, directeur de la recherche chez Google. Et le cerveau artificiel sera alors doué d'une autonomie intellectuelle pour appréhender la complexité du monde. **R.I.**

avec un ordinateur capable d'effectuer des milliards de milliards d'opérations à la seconde, la simulation serait encore 100 fois plus lente que la réalité, et il nous faudrait donc cent ans pour simuler un an d'apprentissage de la lecture, reconnaît Richard Walker. Mais nous pourrions faire des modèles à différents âges de la vie et simuler quelques secondes d'apprentissage, comme lorsqu'un enfant apprend à lire la lettre 'H'." Les découvertes fondamentales sur le fonctionnement du

cerveau, comme celles sur la neurobiologie de la lecture, pourraient, au début, exiger un peu de patience...

Quant à la promesse de soigner le cerveau grâce à ses avatars électroniques, elle ne va pas de soi. "Un cerveau artificiel pourrait être utile pour tester des traitements contre l'épilepsie ou la dépression, des maladies liées à des désordres de l'activité électrique ou de la neurotransmission, convient Jean-Gaël Barbara. Mais il sera inefficace contre des pathologies comme Alzheimer,

dont les origines sont liées à des protéines qui n'entrent pas encore dans les modèles numériques."

Et puis tôt ou tard, ces projets amèneront dans leur sillage d'autres questions, philosophiques et éthiques celles-là. Ces cerveaux artificiels feront-ils preuve d'émotions, voire de conscience ? Pourra-t-on leur donner un corps et sous quelle forme ? Quel statut leur accorder ? De quoi fortement stimuler les neurones dans les années à venir. Les vrais, cette fois. **P.-Y.B. et F.L.**

UN CERVEAU QUI POSE QUESTION

Réaliser un cerveau artificiel, oui, mais pour faire quoi? Faudra-t-il s'en méfier? Aura-t-il une conscience?... Les questions sont légion.



Son intelligence sera-t-elle supérieure?

On serait tenté de le croire, si l'on se rappelle qu'en 1997, l'ordinateur Deep Blue de la firme IBM battait aux échecs le champion Garry Kasparov. Ou si l'on songe au supercalculateur Watson (IBM, encore), qui en 2011 étrilla tous ses concurrents humains au jeu télévisé Jeopardy!, dans lequel il s'agit, à partir de réponses formulées en langage courant, de retrouver la question correspondante. Watson démontrait ainsi qu'il avait su saisir le sens des montagnes de données qui lui avaient été injectées.

Bien que remarquable, cette prouesse sémantique se situe encore loin d'une pleine intelligence humaine. A savoir, "cette capacité qui nous est propre d'inventer des solutions face à un problème inédit", décrit Frédéric Alexandre, du Laboratoire lorrain de recherche en informatique et ses applications. Ainsi, complète le neuro-éthicien Bernard Baertschi (université de Genève), que "notre faculté à développer des intentions ou notre capacité à l'oubli : toutes sortes de propriétés quasi impossibles à modéliser. D'où l'intérêt de partir du modèle du cerveau pour concevoir un ordinateur qui lui ressemble et voir émerger ces phénomènes".

Comme le confirme Chris Eliasmith, du projet Spaun (voir p. 52), "nos recherches visent à façonner un cerveau avec les mêmes forces que le nôtre, mais aussi les mêmes faiblesses : nous parviendrons donc à produire une

intelligence à bien des égards similaire à celle des humains – si tant est que ces machines disposent aussi de l'équivalent d'un corps". Similaire, mais pas tout à fait identique... En effet, poursuit-il, "pour des raisons de limites de capacités de calculs, nos systèmes ne parviendront certainement pas à reproduire toute la gamme de fonctionnement de nos neurones". Le résultat n'en serait pas moins bouleversant. "Cela pourrait donner lieu à une autre manière de penser, d'où jaillirait une musique ou une littérature que nous n'aurions même pas pu imaginer", s'enthousiasme Paul Thompson, du projet Connectome (voir p. 48).

Différente, sans doute un peu étrange, cette intelligence finira-t-elle par surpasser la nôtre? "Ce n'est pas exclu, car notre cerveau montre aussi des limites évidentes, analyse Frédéric Alexandre. Par exemple, notre cortex préfrontal ne peut traiter, à un instant donné, plus de deux stratégies en parallèle. Si l'on maîtrisait ce mécanisme, on pourrait programmer une troisième couche, une quatrième, ainsi de suite... Même chose pour la profondeur de notre raisonnement, qui plafonne à '7 coups d'avance'."

D'ici là, la mesure de l'intelligence de ces cerveaux-machines promet d'être épineuse. Le cerveau Spaun a beau avoir réussi dernièrement certaines épreuves de Q.I., ce fameux test fait l'objet de critiques nombreuses. Sans parler du "test de Turing", organisé pour les robots chaque année dans le cadre du prix Loebner : le but étant de se faire passer pour un humain lors

d'une conversation écrite avec un jury, les participants font étalage de duperie, mais sûrement pas d'intelligence – pour un résultat souvent risible. D'où deux questions tout aussi épineuses que l'accès des cerveaux artificiels à l'intelligence : s'ils rivalisent un jour avec le nôtre, saura-t-on même s'en rendre compte? Et si leur intelligence dépasse largement la nôtre, comment les comprendrons-nous? **V.N.**



Ressentira-t-il des émotions?

Ce serait presque la moindre des choses! Et pour cause, relève Frédéric Alexandre, chercheur en neurosciences computationnelles, "les émotions sont essentielles à nos prises de décisions. A l'heure d'opérer un choix entre deux éléments difficilement comparables – comme de l'argent et de la nourriture –, ou de se demander si telle récompense vaut la peine de faire un effort, nous faisons appel au souvenir de sensations telles que le plaisir ou la douleur". Tandis que, renchérit



Dominique Longin, de l'Institut de recherche en informatique de Toulouse, "dans les situations d'urgence, les émotions permettent de mobiliser toutes ses ressources afin de trouver au plus vite une solution". Une machine qui n'aurait pas d'émotions aurait donc le plus grand mal à résoudre un problème; le comble pour un cerveau!

Certains proposent donc d'implanter d'emblée dans les circuits des neurones de silicium toute la richesse d'une émotion. On parle même d'"informatique affective". Sachant que la complexité des cerveaux artificiels pourrait fournir le terreau d'où jailliraient spontanément des émotions. Le neurobiologiste Michel Baudry (Western University of Health Sciences) y croit, particulièrement "s'agissant d'une émotion aussi basique et primitive que la peur" – une question universelle de survie. Ce qui est nettement moins sûr "pour la culpabilité, une émotion très sophistiquée faisant appel à la conscience de soi", souligne Dominique Longin.

Seulement voilà: l'émotion étant une expérience intime, "nous ne pouvons

déterminer ce que ressentent ces machines, quand bien même elles présenteraient des activités neuronales proches de celles liées aux émotions", estime Richard Walker, du Human Brain Project. Ces cerveaux-machines éprouveront-ils des émotions ou ne feront-ils qu'en donner l'illusion? Le doute risque de planer longtemps. **V.N.**



Aura-t-il besoin de dormir?

Une chose est sûre, le sommeil est indispensable au bon fonctionnement du cerveau... humain. Sans lui, les fondements de la mémorisation sont en danger. Troubles de l'attention et de la mémoire surviennent très rapidement en cas de privation. Car le sommeil est le moment privilégié par le cerveau pour consolider et trier les informations emmagasinées pendant la journée, voire en oublier certaines, afin de ne pas saturer les neurones avec des informations inutiles. Pour autant, les avis divergent quant à savoir si un ordinateur qui mimerait un cerveau humain aurait

lui aussi besoin de se reposer pour fonctionner correctement... et quelle forme prendrait alors ce repos.

En 2004, Laurent Signac et Jean-Denis Fouks (université de Poitiers), associés notamment à Joël Paquereau (Centre du sommeil du CHU de Poitiers), ont travaillé sur les mésaventures d'un petit robot, simulé informatiquement pour apprendre à distinguer des sources de nourriture "bonnes" ou "dangereuses". Les chercheurs se sont vite aperçus qu'ils devaient absolument modéliser des plages de repos pour leur robot... sous peine de le voir accumuler trop d'informations sans parvenir à les organiser et de perdre en efficacité.

Plus étonnant encore, sans le prévoir, ils ont modélisé une sorte de "sommeil paradoxal", comparable sur certains points à celui des humains. En effet, leur robot devait s'abstenir de bouger pour revivre et trier ses informations. Une attitude assez semblable à celle du corps humain, bloqué par des fonctions cérébrales précises en phase de sommeil paradoxal, l'un des moments les plus intenses pour la mémorisation. Pour un cerveau artificiel, dépourvu de corps et donc de fonctions motrices, le sommeil paradoxal semble superflu... Il lui faudrait cependant se ménager des périodes de "compression" (pour réduire la taille des informations) ou de "défragmentation" (pour réorganiser les informations stockées dans ses unités de mémoire). Sachant qu'il reste →



→ possible d'imaginer qu'il ne dorme jamais, un peu à la manière d'Internet : certaines machines sont éteintes, mais le réseau veille toujours. Une insomnie d'autant plus crédible que le projet du cerveau artificiel s'appuie justement sur un réseau de plusieurs machines assez comparable au Web. Certaines apprendraient tandis que les autres, en alternance, trieraient. A défaut de ne dormir que d'un œil, on pourrait alors dire que le cerveau artificiel, lui, ne dormirait que d'un circuit... **C.T.**



Pourra-t-il remplacer un cerveau endommagé ?

La transplantation d'un cerveau artificiel sur un corps humain devrait relever encore longtemps de la science-fiction. Car à supposer qu'un tel organe existe et que les interdits éthiques soient levés, encore faudrait-il que les chirurgiens parviennent à relier le cerveau-machine avec l'organisme chargé de le porter. Or, sans préjuger des progrès à venir, ce geste chirurgical paraît pour l'instant très hypothétique, pour ne pas dire hors de portée, tant devront être grandes la précision et la minutie permettant de rétablir sans la moindre fausse note des connexions entre le corps et les millions de fibres nerveuses qui partent ou arrivent au cerveau. Et ce n'est pas tout : une batterie d'outils de mesure et de production des hormones devrait être mise au point et placée sous le contrôle tout puissant du cerveau greffé.

Pas de greffe totale en perspective, donc. Pour autant, les projets les plus avancés aujourd'hui (lire p. 44-55) devraient contribuer à la naissance d'une nouvelle génération de prothèses cérébrales. Autrement dit, des bouts de cerveau artificiel conçus pour être implantés dans un cerveau humain endommagé ! Jusqu'à présent, les seuls implants nerveux disponibles sont cochléaires (chez les malentendants, ils transforment le son en message électrique), rétiniens (chez les malvoyants, ils font de même avec la lumière) ou

en surface du cortex moteur (chez les tétraplégiques, ils traduisent un influx nerveux en geste effectué par un bras robotisé). *"Bien que très innovants, il ne s'agit que de récepteurs ou émetteurs vers le monde extérieur, explique le neurobiologiste Michel Baudry. Aucun d'entre eux n'est réellement intégré dans le fonctionnement cérébral, ni ne capte directement une information transmise par des neurones pour la transmettre à d'autres neurones."*

Mais les recherches avancent. En tête de pont des découvreurs, Théodore Berger et son équipe du département de neuro-ingénierie de l'université de Californie du Sud, avec laquelle Michel Baudry a souvent collaboré.



> Cette puce permet à un tétraplégique de piloter un bras robotisé.

Depuis dix ans, ces scientifiques n'ont de cesse d'améliorer leurs puces de silicone implantables, financées en grande partie par la Darpa, l'agence de développement technologique de l'armée américaine. Objectif ? *"Compenser les circuits lésés de la mémoire ou accroître les capacités de mémorisation d'un cerveau sain, explique le neurobiologiste. Créer des circuits dérivatifs dans lesquels les informations passent et sont modifiées avant d'être réintroduites dans le cerveau biologique."*

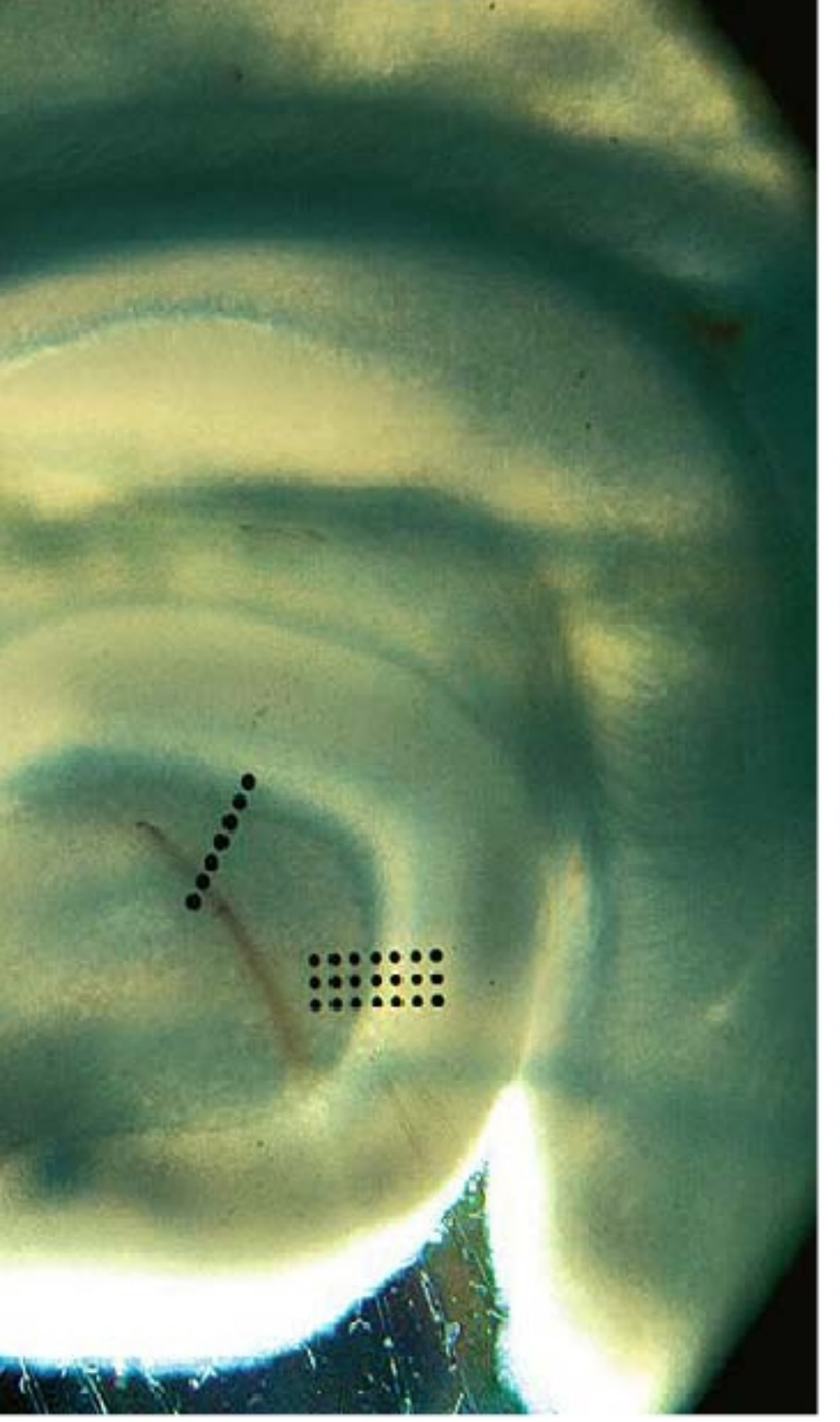
L'une de leurs premières prouesses en 2006 : la fabrication d'une puce reproduisant une partie de l'hippocampe, région cérébrale indispensable à la formation des nouveaux souvenirs. En 2011, leurs premiers tests sur des rongeurs ont montré que la puce s'intègre parfaitement. Grâce aux programmes

> Déjà, des puces ont pu améliorer la mémoire défaillante de rongeurs (en noir, les connexions dans l'hippocampe).

informatiques qu'elle contient, elle est capable d'analyser puis de relayer les influx nerveux au milieu de la boucle d'informations qui entrent et sortent en temps réel de l'hippocampe de l'animal. Il devient même possible de s'en servir comme d'un "interrupteur à mémoire". L'éteindre ? Les souvenirs ne se forment plus. La rallumer ? La mémoire peut de nouveau s'enrichir. Ainsi équipés, les rats ont même obtenu de meilleurs scores aux tests de mémorisation.

Ce n'est pas tout. En septembre 2012, ces prothèses cérébrales ont franchi un nouveau cap. Cette fois, ce sont des singes rhésus qui les ont reçues, tandis que la zone implantée se situait dans le cortex préfrontal, là où se joue en partie la prise de décision. Et les premiers résultats apparaissent tout aussi impressionnants. Pour l'expérience, les singes ont dû répondre à un jeu simple de mémorisation d'images. Une première sonde a transmis l'information neuronale correspondant à la "bonne décision" jusqu'à un ordinateur, chargé de l'analyser et de la modéliser. Puis, cette information modélisée a été





redirigée vers le cerveau du singe à chaque fois qu'il s'apprêtait à prendre une décision. Verdict : les scores des singes aidés par cette prothèse se sont améliorés !

Ces tâches sous-traitées par des prothèses peuvent sembler primaires par rapport au grand projet de modélisation intégrale d'un cerveau. Mais la rapidité des progrès devrait faire émerger des projets plus incroyables encore de cerveau humain augmenté. **C.T.**



Sera-t-il doué de conscience ?

Rien ne l'interdit *a priori*. En effet, *“les théories en vigueur suggèrent que tout système présentant une complexité suffisamment élevée fera émerger un état de conscience”*, expose le neurobiologiste Christof Koch, directeur du Allen Institute for Brain Science (Etats-Unis). La conscience naîtrait de la prodigieuse synergie d'une multitude d'informations parcellaires en perpétuelles interactions. Et peu importe que ce réseau complexe soit constitué de chair humaine ou de silicium ! Selon un nombre croissant de chercheurs,

nul besoin de la chimie d'une matière vivante pour se forger une perception du monde ou ressentir la beauté d'un ciel bleu. *“La conscience serait comme une propriété physique fondamentale des systèmes complexes, à l'instar de la masse ou de la charge électrique d'une particule”*, résume Julien Dubois, du California Institute of Technology. Ces concepts théoriques sont encore assez spéculatifs, et le débat n'est pas tranché. *“Seule une forme de vie humaine peut donner lieu à ces épisodes de conscience”*, continue de penser Daniel Andler, philosophe des sciences à la Sorbonne.

La seule complexité d'un organe artificiel ne suffira sans doute pas. Créer les conditions de l'émergence d'une conscience nécessitera des connexions pertinentes et une certaine organisation cérébrale – une complexité organisée, en somme. *“La synthèse de l'information dans le cerveau humain semble exiger des câblages spécifiques”*, observe Christof Koch. Frédéric Alexandre, chercheur en neurosciences computationnelles, pense qu’*“à force d'essayer de reproduire les mécanismes du cerveau, comme les circuits neuronaux de l'attention, les scientifiques pourront alors faire apparaître tôt ou tard la conscience – tel un épiphénomène”*. Pour Richard Walker, impliqué dans le Human Brain Project, *“nous serons capables un jour de reproduire des motifs d'activité neuronale proches de ceux associés à l'état de conscience. Mais cela sera-t-il pour autant la preuve d'une conscience?”*

Le problème, c'est qu'il est pour l'instant impossible de statuer sur l'état conscient d'un humain autrement qu'en le lui demandant. Chris Eliasmith, du projet Spaun, estime que *“le comportement de ces machines devrait nous indiquer si nous devons les traiter comme ‘quelque chose’ de conscient”*. Mais de quelle forme de conscience s'agirait-il ? *“Le spectre est large entre la plus primitive, qui correspond aux besoins essentiels de tout animal, le niveau intermédiaire des êtres capables*

d'attention, et le stade le plus élevé, qui correspond à la présence d'un langage, d'un récit autobiographique – l'apparition d'un langage au sein de ces machines est d'ailleurs déjà un sujet de recherche”, énonce Frédéric Alexandre. De quoi y réfléchir à deux fois avant d'éteindre, chaque soir, son cerveau-machine... **V.N.**



Devra-t-on le craindre ?

La révolte de la créature contre son créateur est un vieux mythe, dont se nourrit largement la science-fiction. Mais avec la perspective de voir émerger des cerveaux artificiels de plus en plus semblables aux nôtres, ce spectre ressurgit légitimement avec force. *“Il peut y avoir des situations dans lesquelles ils ne feront pas ce que l'on souhaite, prévient Jean-Gabriel Ganascia, expert en intelligence artificielle au Laboratoire d'informatique de Paris-VI. On peut imaginer atteindre un degré de complexité tel que nous ne soyons plus capables d'anticiper précisément ce qu'ils vont faire.”*

Le risque se nicherait donc, comme chez les hommes, dans la part d'imprévisibilité des décisions prises par ces machines pensantes. *“La mise en œuvre d'un algorithme d'apprentissage implique que même le concepteur ne pourra plus prédire les actions de sa machine lorsqu'elle sera placée dans un contexte nouveau et en tirera des enseignements”*, note Michael →

> Sans pilote, les drones peuvent décider seuls de leur parcours et être armés.



→ Decker, de l'Institut de technologie de Karlsruhe, en Allemagne.

De là à imaginer que ces cerveaux artificiels décident un jour d'eux-mêmes de prendre le pouvoir ou d'éliminer l'espèce humaine, trop imparfaite à leurs yeux, il y a un pas... *"Il faut les craindre car ils seront de plus en plus autonomes, et c'est justement ce que l'on cherche à obtenir! Pour autant, on ne peut pas parler d'intentions de nuisance chez les machines"*, nuance Hugues Bersini, directeur du Laboratoire d'intelligence artificielle de l'Université libre de Bruxelles. Reste que depuis quelques années, les experts se creusent la tête pour trouver le moyen de doter les robots les plus évolués d'une forme d'éthique (voir S&V n° 1133, p. 82). *"Doit-on leur permettre d'être totalement autonomes et de prendre eux-mêmes leurs décisions, au risque qu'ils désobéissent aux ordres donnés par l'homme?"*, s'interroge ainsi Matthias Scheutz, de l'université Notre-Dame (États-Unis).

Difficile de ne pas penser aux trois lois de la robotique édictées par l'écrivain Isaac Asimov en 1942. Rappelons simplement la première: *"Un robot ne peut pas porter atteinte à un être humain"*... Sachant que, pour être respectée à coup sûr, cette loi devrait aussi tenir compte de la folie soudaine, éventuellement meurtrière, que provoquerait un "bug". Car là réside, *in fine*, la faille consubstantielle à tout système informatique. Les bugs étant par nature imprévisibles, le risque apparaît inévitable... et la crainte légitime. **B.B.**



Sera-t-il sujet à des troubles mentaux?

Dépression, schizophrénie, accident vasculaire... Si un cerveau artificiel peut fonctionner comme un cerveau humain, *"non seulement il pourra dysfonctionner et connaître des troubles, mais c'est même une des motivations principales de leur développement"*, répond Frédéric Alexandre, chercheur au Laboratoire lorrain de recherche en informatique et ses applications. Ainsi, ces cerveaux pourraient être programmés, à la manière d'animaux de laboratoire génétiquement modifiés, pour développer des maladies spécifiques. Un formidable nouvel outil de recherche, en vue de soigner, ensuite, de véritables patients.

Mais ces pathologies pourraient-elles apparaître d'elles-mêmes, à l'insu des chercheurs? Paul Thompson, neurologue à l'université de Californie, est circonspect: *"Certes, les cerveaux artificiels pourraient planter, faire des erreurs, un virus pourrait perturber leur fonctionnement... Mais il est peu probable que cela mène aux mêmes dysfonctionnements qui touchent les cerveaux humains."*

Les troubles mentaux étudiés sont définis par une combinaison de symptômes précis: ils émergent en effet de causes biologiques (génétiques, développementales...) et sociales (relations familiales, par exemple) complexes, auxquelles les cerveaux artificiels ne devraient pas succomber spontanément. Ce qui ne signifie pas que des symptômes communs ne pourraient pas émerger: pertes de mémoire, activité ralentie, désorganisation des chemins de la prise de décision... Aucune raison, *a priori*, que les cerveaux artificiels n'y soient pas aussi confrontés! Il se pourrait même qu'ils développent des troubles spécifiques, que la biologie ignore... Mais Paul Thompson se veut rassurant: les cerveaux artificiels auront droit, en cas de coup dur, à la visite d'un spécialiste... en électronique. **E.A.**

> Nombre de laboratoires tentent aujourd'hui d'unir corps et esprit au sein d'humanoïdes.



Un cerveau sans corps est-il possible?

On serait tenté de penser que les cerveaux artificiels n'ont que faire d'une enveloppe de chair quand on voit les prouesses des superordinateurs, sans bras ni jambes ni organe sensoriel, tels que DeepBlue qui, en 1997, domina le champion Garry Kasparov aux échecs, ou Watson qui, en 2011, écrasa deux humains au Jeopardy!. Sauf que l'un comme l'autre sont parfaitement idiots une fois sortis de leur domaine de compétence, et incapables d'interagir avec leur environnement. Tout vainqueurs qu'ils soient en maths ou en logique, nous les dépassons largement en ce qui concerne de façon plus terre à terre la vie et la survie: reconnaître et comprendre ce qui nous entoure pour y réagir de manière appropriée.

Or, pour nombre de spécialistes, cette différence vient du corps: *"Il existe sûrement des aspects du cerveau que nous pourrions simuler sans faire référence au corps, ou en faisant référence à une seule partie du corps"*, estime Richard Walker, du Blue Brain Project à l'Ecole fédérale polytech-

▼ La chirurgie cérébrale s'appuie déjà sur des modèles numériques du cerveau.





nique de Lausanne. Mais la première fonction du cerveau est de contrôler le corps. Un cerveau sans corps serait donc un cerveau terriblement appauvri dans ses comportements et ses capacités d'apprentissage."

Cette idée de l'importance du physique s'est développée à la fin des années 1980, quand on a réalisé qu'il était beaucoup plus simple de simuler chez des cerveaux artificiels des tâches supérieures comme la logique que des capacités sensori-motrices héritées de millions d'années d'évolution.

Aujourd'hui, de nombreuses recherches visent à relier les premiers prototypes de cerveaux artificiels au monde qui les entoure. Spaun, à ce jour la simulation la plus réaliste de cerveau humain (p. 52), possède ainsi un "œil" et un bras. Pour Matej Hoffmann, du Laboratoire d'intelligence artificielle de l'université de Zurich (Suisse), *"l'intelligence développée par le cerveau est de fait influencée par le corps dans lequel il est intégré. Un cerveau ne peut donc pas être pleinement fonctionnel sans corps, biologique ou artificiel. Basiquement, il n'y a pas de frontière claire entre corps et cerveau..."* Jean-

Paul Baquias, spécialiste de l'intelligence artificielle, complète: *"C'est le corps qui fait remonter les informations sur lui-même et sur ce qui nous entoure via nos organes sensoriels. Ce n'est pas tant un corps dont l'anatomie respecte la nôtre qu'il faut donner au cerveau, mais des informations qui le stimulent pour qu'il puisse réagir, être capable de tester et de vérifier des choses, se situer dans l'espace..."* On peut ainsi envisager un même cerveau contrôlant différents types de "corps", par branchement ou une communication à distance. Et même pourquoi pas, un cerveau dont la source de "sensations" serait un monde virtuel... **E.R.**



Pourra-t-on y charger nos pensées ?

C'est un thème particulièrement cher à la science-fiction: le transfert de son esprit, de sa conscience vers un autre support qui lui assurerait, tant qu'à faire, l'immortalité... Les auteurs ont imaginé pour cela toutes les techniques possibles, allant de la préservation prolongée du cerveau biologique à l'élaboration de programmes mimant la personnalité de l'individu original – mais techniquement, pour les scientifiques, ce n'est pas encore au point... Car avant de "transférer" nos pensées vers un cerveau électronique, il faut encore savoir précisément quoi transférer.

Nous sommes esprits (souvenirs, pensées, préférences, émotions...), mais aussi corps, indissociablement. Pour bien faire, ce sont donc toutes ces composantes de notre identité globale – infimes détails de la physico-chimie cérébrale, mais aussi taux d'hormones et autres substances imprégnant nos tissus – qu'il faudrait récupérer. S'agissant de nos seuls souvenirs, les technologies actuelles nous offrent déjà, avec l'explosion des capacités de stockage, de quoi immortaliser photos, vidéos, écrits... comme autant de musées numériques de notre petite histoire. L'informaticien Gordon Bell, l'auteur de

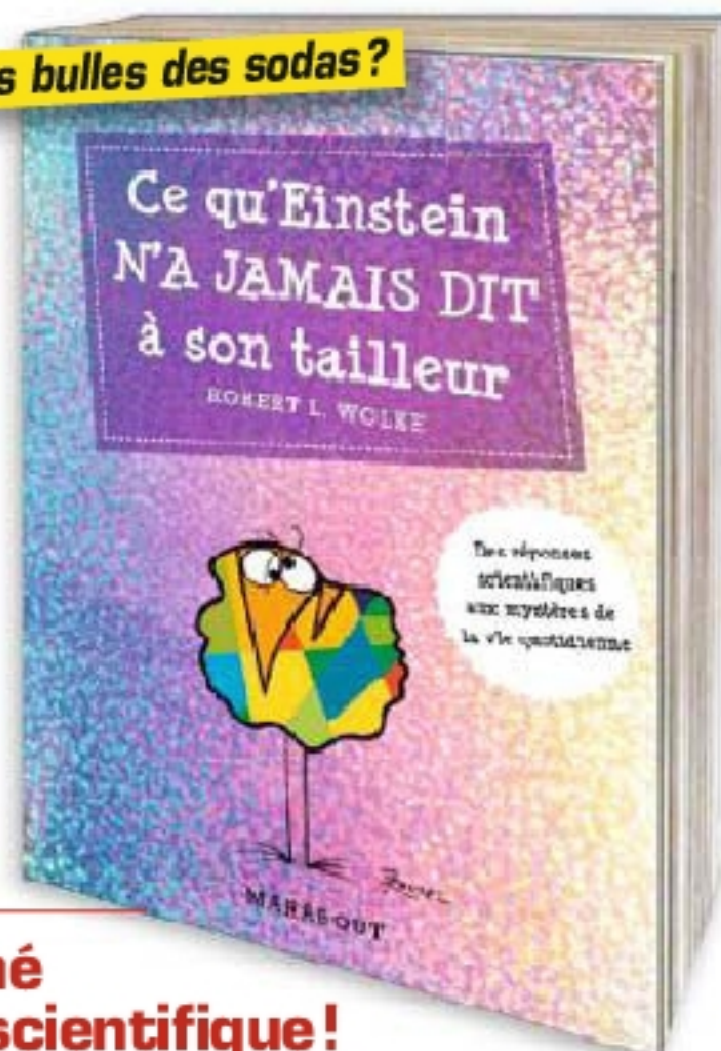
Total Recall, a pour lui-même poussé cette logique jusqu'au bout: depuis des années, il enregistre tout, absolument tout, ce qu'il vit.

Mais cela ne suffit pas. *"Il faudrait une intelligence organisationnelle derrière ce chaos, hiérarchiser les informations stockées, faire le profil virtuel de ce qu'on voudrait transmettre, de ce qu'on pense qui nous caractérise le mieux..."* relève Jean-Paul Baquias, spécialiste des problématiques entourant l'intelligence artificielle. *Il ne peut rien en ressortir seul.* Aussi, même si cette vie numérisée pouvait être intégrée sur un ordinateur et "rejouée" par une intelligence artificielle, ce ne sera jamais qu'une copie incomplète et partielle de l'original.

D'autres approches radicalement différentes commencent cependant à être évoquées, comme celle de Kenneth Hayworth, de l'université Harvard. Cet ingénieur s'est lui tourné vers le Connectome (lire p. 48), cette cartographie détaillée de nos neurones et de leurs connexions, dont il est un spécialiste reconnu. Pour lui, la forme physique de cet incroyable entrelacs est l'empreinte de notre personnalité, de notre conscience... La préserver, c'est conserver l'empreinte mentale d'un individu. Il se dédie donc à mettre au point une résine capable, à sa mort, de figer pour des dizaines d'années dans le silicone ce précieux connectome... jusqu'à ce que des ordinateurs soient assez puissants pour le reconstituer virtuellement et "faire tourner" des légions d'algorithmes parvenant à réexprimer sa personnalité.

Nombre de ses confrères n'y croient toutefois pas: pour eux, rien de "conscient" ne pourra émerger d'une telle "résurrection". Il manque là encore trop d'éléments: détails des cellules, du métabolisme... Sans parler de phénomènes dont on ignore encore la nature et le rôle. Et quand bien même la copie serait fidèle, rien ne dit que sa vie ultérieure – les pensées qui suivraient leur cours dans la machine – serait celle dont rêvait l'original... **E.R.**

D'où viennent les bulles des sodas ?



Un panaché d'humour scientifique!

Savez-vous d'où viennent les couleurs des feux d'artifice ou comment fonctionne un four à micro-ondes? Ce livre plein d'humour vous rend incollable aux questions de tous les jours, en pratiquant de petites expériences de physique ou de chimie.

Ce qu'Einstein n'a jamais dit à son tailleur - 8,99 €

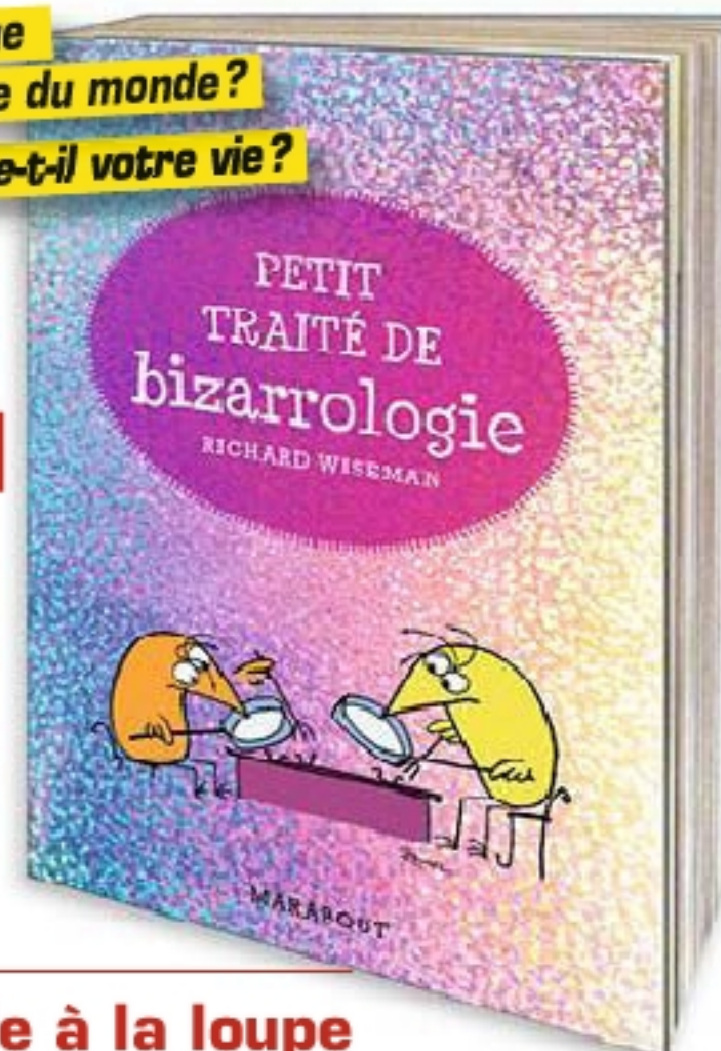
Robert Wolke. Dim. 12,5 x 17,8 cm. 286 pages. Marabout

Quelle est la blague la plus drôle du monde?

Votre surnom influence-t-il votre vie?

OFFRE SPÉCIALE
«Humour scientifique»

LES 2 LIVRES
17,08 €
au lieu de 17,98 € seulement



Le bizarroïde à la loupe

Chance, mensonge, humour, charisme, superstition... Découvrez les plus surprenantes études sur ces thèmes, menées par des scientifiques spécialistes en bizarrologie.

Petit traité de bizarrologie - 8,99 €

RICHARD WISEMAN. Dim. 12,5 x 17,8 cm. 286 pages. MARABOUT

LES INSOLITES DU MOIS

Le top de la Cuisine Moléculaire!

Réalisez des perles au cœur liquide et intégrez-les dans vos préparations les plus innovantes : cocktails, desserts, coulis...



Sphérification gourmande, coffret de cuisine moléculaire

Fiche technique et recettes (cocktail aphrodisiaque, risotto aux perles noires). 5 sachets alginate de sodium de 4 gr. 5 sachets lactate de calcium de 6 gr. 1 flacon verseur. 1 cuillère à perles. 1 toque de chef. Dim. : 25 x 15 x 15 cm.



LE KIT CUISINE
34,90 €
seulement

Vidéo explicative
sur notre site web!

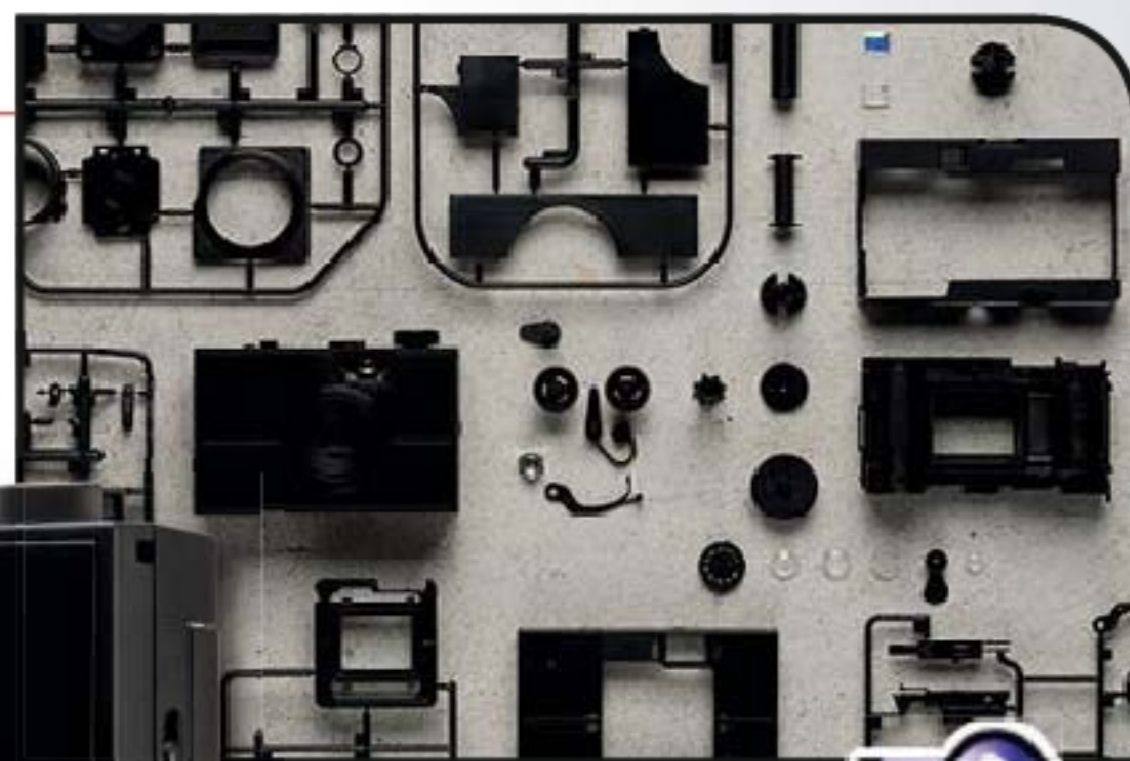
Fabriquez votre propre appareil photo!

En quelques heures, créez un appareil photo argentique 35 mm avec ce kit complet de montage muni de deux objectifs (standard 45 mm et grand angle 22 mm). Il a même 2 boîtiers interchangeables dont l'un permet des résultats surprenants grâce à des fuites de lumière!

Last Camera - Kit de montage appareil photo

Powershovel / Superheadz. À partir de 14 ans. Film (non fourni): 35mm. Dim. 3,3cm x 7cm x 11 cm. Vitesse d'obturation: 22mm approx. 1/125, 45mm approx. 1/100. Poids: 120g. Contenu de l'emballage: pièces de montage, un tournevis, une lentille de 22 mm, une lentille de 45 mm, 1 boîtier std et 1 boîte «light leak».

L'APPAREIL PHOTO
63,99 €
FRAIS DE PORT OFFERTS



Option «light leak»!
2 objectifs

Vidéo explicative
sur notre site web!

www.laBoutiqueScienceetVie.com



MONDADORI MAGAZINES FRANCE SAS - RCS 452 791 262 NANTERRE - CAPITAL : 56 957 458 €

SUMATRA

UNE PLAQUE TECTONIQUE EST EN TRAIN DE NAÎTRE

Les deux mégaséismes qui ont secoué l'océan Indien en avril 2012 témoignent d'un formidable bouleversement dans le sous-sol de la Terre. Au large de l'Indonésie, la plaque indo-australienne est en train de céder : la croûte terrestre se casse en deux ! Et pour la première fois, l'homme assiste à ce phénomène.

PAR ESTELLE BONNET-VIDAL



▲ Dans plusieurs millions d'années, au terme d'un long processus ponctué de séismes, l'Inde occupera probablement une plaque tectonique à part entière.

ANYFORMS DESIGN



1 Au nord, sa partie indienne est ralentie par sa collision avec l'Himalaya...

Sous tension, la plaque indo-australienne se casse en deux

La croûte terrestre est formée par 12 plaques tectoniques (ci-dessus). L'une d'elles, dite indo-australienne, percute l'Eurasie au nord, tandis qu'elle s'enfonce sous la plaque pacifique au sud-est. Les différences de vitesse de ces deux déplacements expliquent le déchirement de la plaque en deux; c'est sur cette faille qu'ont été observés les mégaséismes de 2012.

La Terre en a frissonné pendant six jours tant le fracas fut violent. Six jours de tremblements de terre tout autour de la planète, en réplique d'une double secousse hors norme, survenue le 11 avril 2012 au beau milieu de l'océan Indien. A l'ouest de l'île indonésienne de Sumatra, sous le plancher océanique, dans les profondeurs de ce que les géologues appellent la lithosphère, une immense masse rocheuse s'est soudainement rompue. A deux heures d'intervalle et 185 km de distance, deux mégaséismes de magnitudes 8,7 et 8,2 ont affolé les sismomètres.

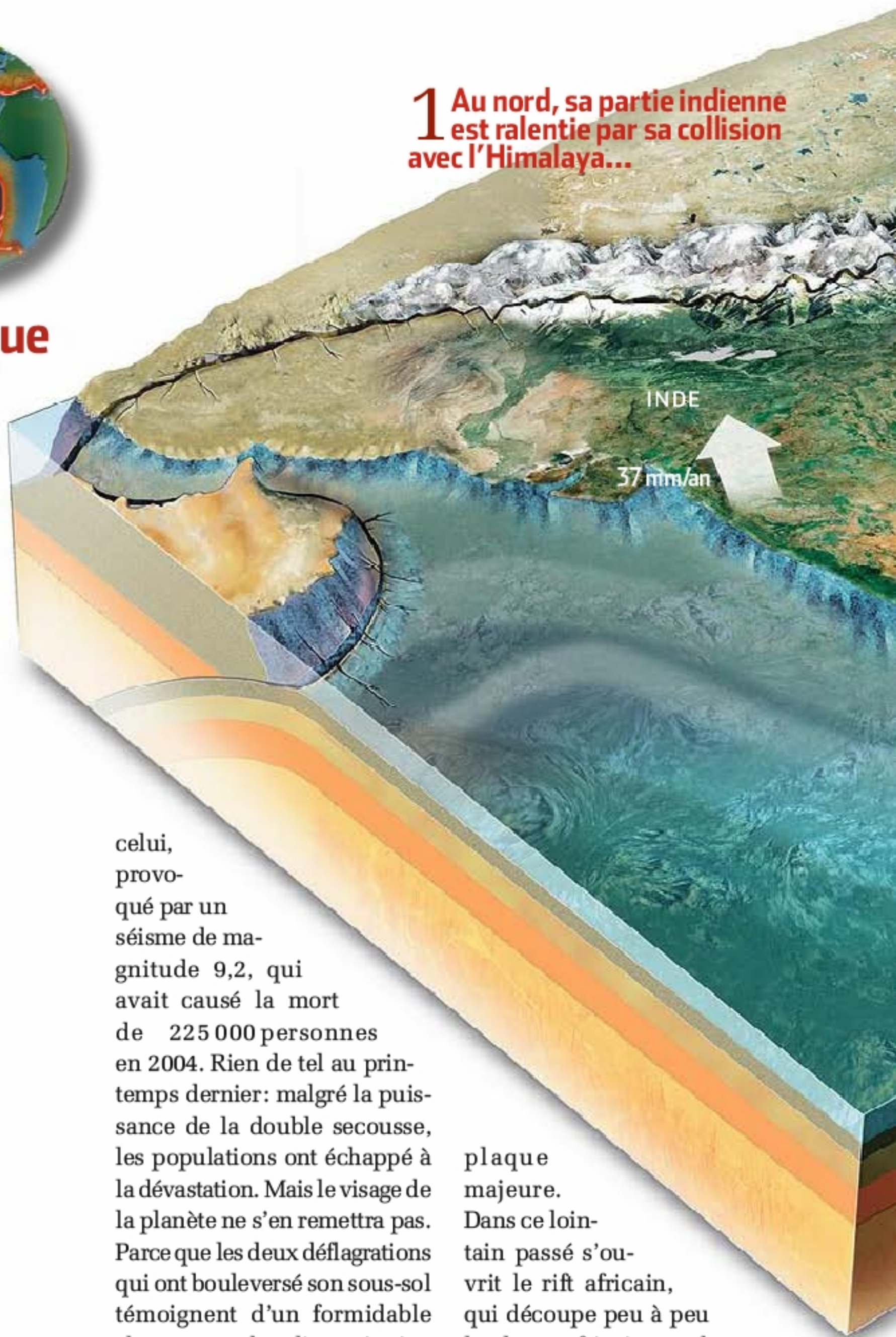
Dans le flot des actualités internationales, l'événement est pourtant passé presque inaperçu. C'est que, localement, dans la région de Banda Aceh, les conséquences ont été minimes. Pas de tsunami géant déferlant sur les côtes, comme

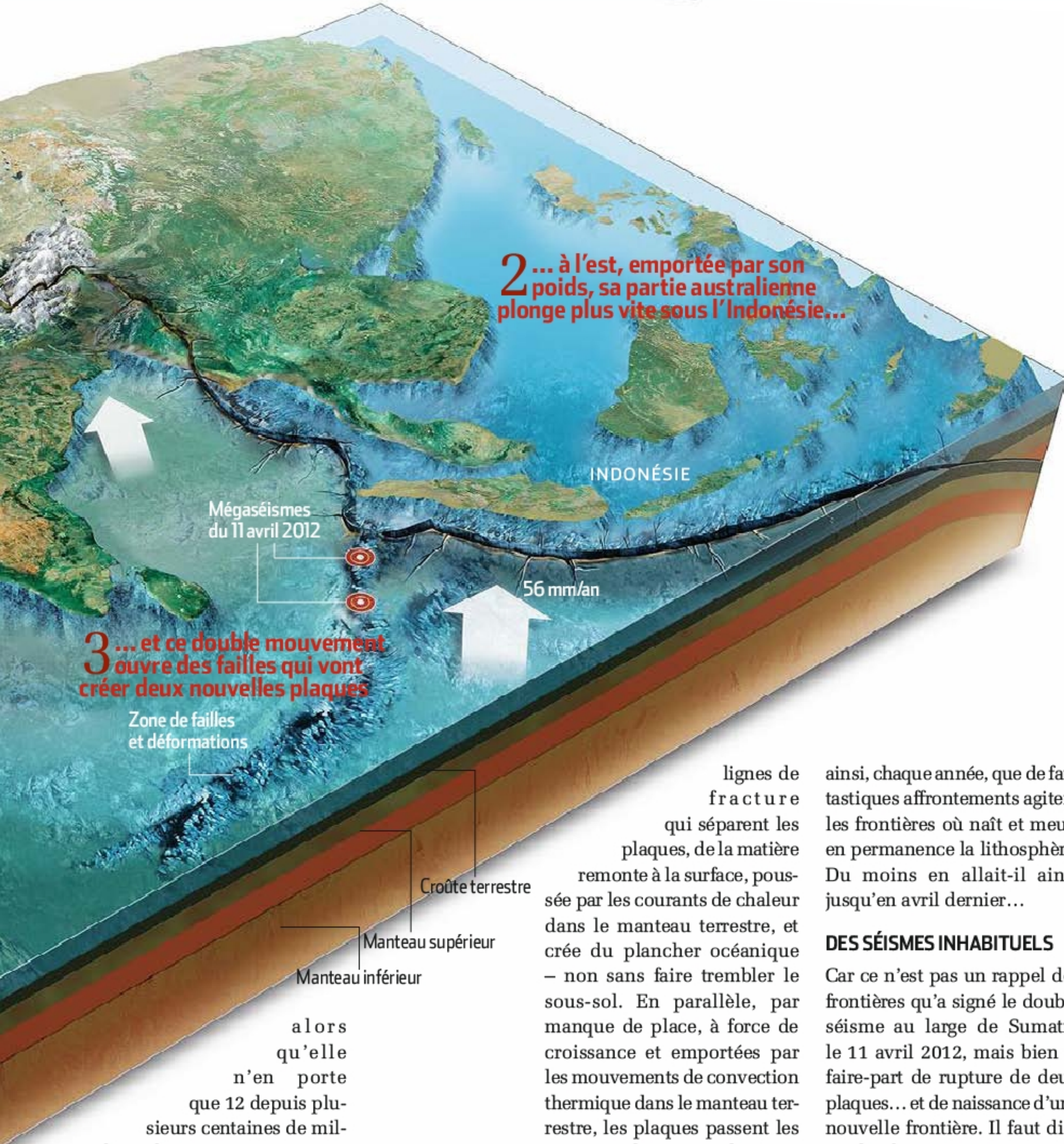
celui, provoqué par un séisme de magnitude 9,2, qui avait causé la mort de 225 000 personnes en 2004. Rien de tel au printemps dernier: malgré la puissance de la double secousse, les populations ont échappé à la dévastation. Mais le visage de la planète ne s'en remettra pas. Parce que les deux déflagrations qui ont bouleversé son sous-sol témoignent d'un formidable changement dans l'organisation de l'écorce terrestre: elles sont le signe de la naissance... d'une nouvelle plaque tectonique!

UNE MOSAÏQUE DE 14 PIÈCES

L'événement est exceptionnel. Pensez: il faut remonter 30 millions d'années en arrière pour trouver la trace, unique dans l'histoire connue de la planète, d'une autre création de

plaque majeure. Dans ce lointain passé s'ouvrit le rift africain, qui découpe peu à peu la plaque africaine en deux plaques séparées (lire l'encadré p. 69). Aujourd'hui, au large de Sumatra, le même phénomène titanesque est de nouveau à l'œuvre... Et l'humanité est, cette fois, aux premières loges. Au terme de ce processus, d'ici quelques millions d'années, ces deux mécanismes pourraient faire de l'enveloppe terrestre une mosaïque de 14 pièces,





2... à l'est, emportée par son poids, sa partie australienne plonge plus vite sous l'Indonésie...

3... et ce double mouvement ouvre des failles qui vont créer deux nouvelles plaques

Zone de failles et déformations

Mégaséismes du 11 avril 2012

56 mm/an

Croûte terrestre

Manteau supérieur

Manteau inférieur

alors qu'elle n'en porte que 12 depuis plusieurs centaines de millions d'années.

Pour comprendre ce prodige tellurique, il faut avoir présent à l'esprit que les plaques tectoniques, immenses fragments de roche solide et rigide qui composent la mosaïque terrestre, s'étirent sur des dizaines de kilomètres de profondeur en portant un océan, un continent, ou les deux. La matière qui les constitue se renouvelle en permanence. Car le long des

lignes de fracture qui séparent les plaques, de la matière remonte à la surface, poussée par les courants de chaleur dans le manteau terrestre, et crée du plancher océanique – non sans faire trembler le sous-sol. En parallèle, par manque de place, à force de croissance et emportées par les mouvements de convection thermique dans le manteau terrestre, les plaques passent les unes sous les autres. Il se joue ainsi un ballet immuable, qui déplace, au fil des millions d'années, continents et océans (lire "Repères" p. 68).

A l'échelle d'une vie humaine, cette lente dérive est imperceptible. Sauf quand le frottement d'une plaque contre une autre provoque tremblements de terre et éruptions volcaniques. Des centaines de milliers de séismes dévoilent

ainsi, chaque année, que de fantastiques affrontements agitent les frontières où naît et meurt en permanence la lithosphère. Du moins en allait-il ainsi jusqu'en avril dernier...

DES SÉISMES INHABITUELS

Car ce n'est pas un rappel des frontières qu'a signé le double séisme au large de Sumatra le 11 avril 2012, mais bien le faire-part de rupture de deux plaques... et de naissance d'une nouvelle frontière. Il faut dire que les deux secousses enregistrées n'avaient rien d'ordinaire. D'une part, leur origine : usuellement, c'est à l'aplomb des frontières entre plaques qu'adviennent les séismes les plus violents. Pas en plein milieu ! "C'était inhabituel d'avoir des séismes d'une telle ampleur au beau milieu d'une plaque tectonique", se souvient Fred Pollitz, géophysicien à l'Institut d'études géologiques →



MATTHIAS DELESCLOSE

GÉOPHYSICIEN À L'ÉCOLE NORMALE
SUPÉRIEURE DE PARIS

**Le mégaséisme
de 2004 à Sumatra
a été la petite goutte
d'eau venant remplir
un verre déjà plein**

→ des Etats-Unis. D'autre part, leur signature sur les sismogrammes les distinguait nettement des enregistrements habituels. Dans cette région où les séismes puissants sont le fruit de la rupture de roches se déplaçant le long de plans inclinés, les sismomètres détectaient un mouvement horizontal. *"C'était la première fois qu'un aussi gros séisme de décrochement [où les masses rocheuses coulissent horizontalement] était enregistré",* précise le chercheur.

A événement exceptionnel, attention exceptionnelle: une avalanche d'articles scientifiques a été publiée les mois suivants. Et le message envoyé par ce double séisme s'est peu à peu dessiné: la plaque indo-australienne est bel et bien en train de se rompre.

L'équipe de Matthias Delescluse, à l'Ecole normale supérieure de Paris, a proposé un scénario de cette rupture inattendue. Elle s'expliquerait en partie par le mégaséisme "classique" survenu... huit ans plus tôt, en 2004, à Sumatra. D'après leurs calculs, en effet, ce dernier n'est autre que le détonateur initial de la déflagration lithosphérique d'avril 2012. Malgré sa puissance phénoménale, il s'agissait à l'époque d'une secousse attendue, du point de

vue géologique. Dans sa plongée vers le manteau terrestre, la plaque qui porte l'Australie et l'Inde, à cause de la déformation et du frottement, avait accumulé les tensions internes au niveau de la frontière des plaques. Jusqu'à ce que la roche rompe brutalement, libérant les tensions... et provoquant séisme et tsunami dévastateurs.

UNE PLAQUE ÉCARTELÉE

Mais cette rupture le long de la frontière préparait aussi le coup fatal à venir au cœur de la plaque indo-australienne, déjà sous tension. Car celle-ci est constamment écartelée. Elle plonge au nord sous l'Himalaya et à l'est sous l'Indonésie... à des vitesses différentes. Globalement, elle file vers le nord-est depuis 45 millions d'années. Mais alors qu'au niveau de la fosse de la Sonde (la bordure occidentale de Sumatra), sa partie australienne plonge et s'enfonce rapidement (56 mm/an) dans les tréfonds du manteau, au nord, sa partie indienne est ralentie dans sa migration (37 mm/an) par une collision avec la plaque eurasiennne.

"C'est un peu comme si l'Australie était une moto et l'Inde, son side-car, explique Matthias Delescluse. Si le side-car percute un mur – l'Eurasie – et

1 La plaque indienne, libérée du "moteur" australien, exerce moins de pression sur l'Himalaya

Le futur visage de la Terre

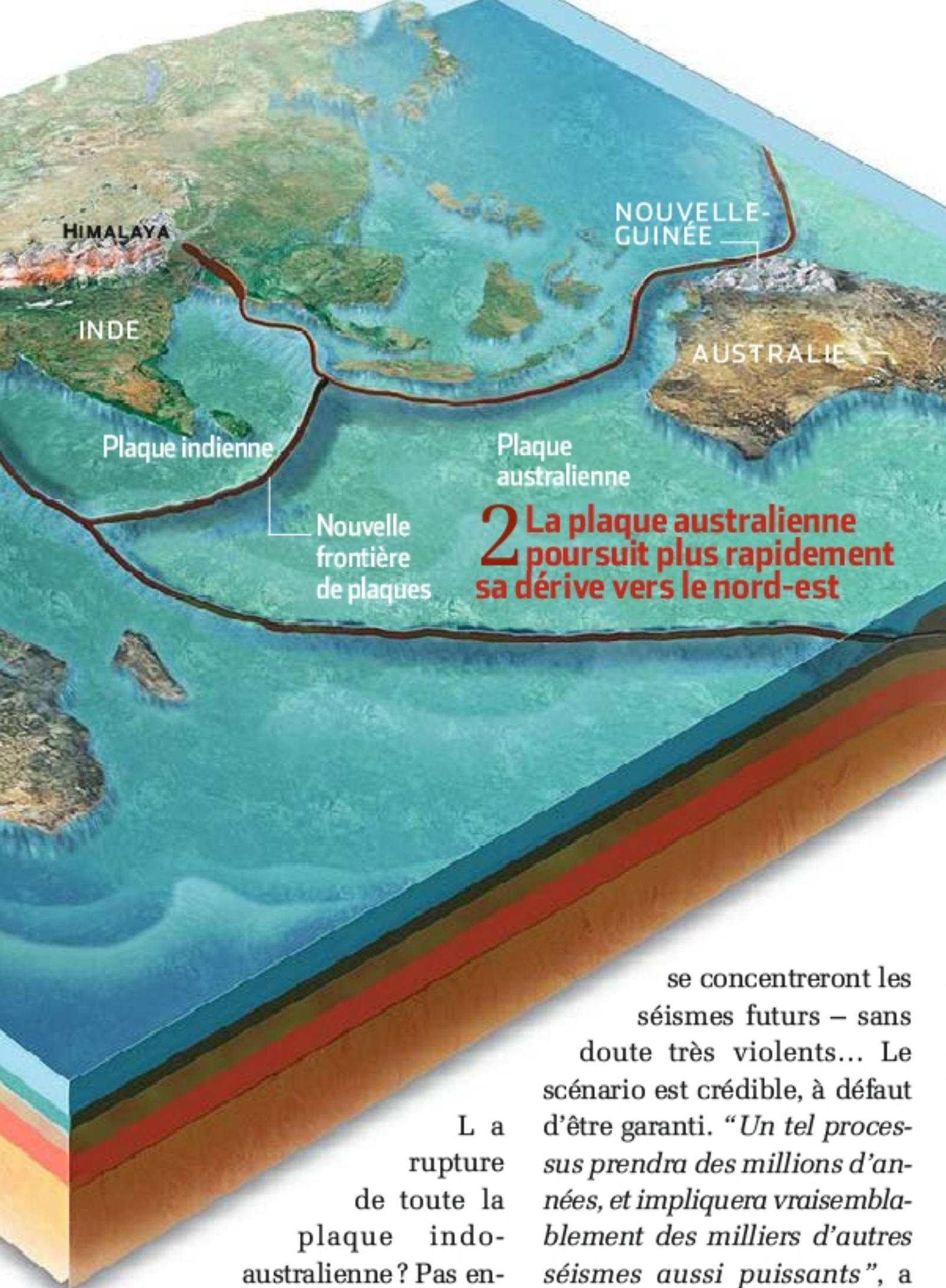
D'ici plusieurs millions d'années, la plaque indo-australienne devrait s'être rompue en deux: l'Inde ralentira alors sa course; l'Australie dérivera vers le nord jusqu'à heurter la Nouvelle-Guinée, ce qui se traduira par la naissance d'une chaîne de montagnes.

REPÈRES

Loin des rides océaniques où remonte la matière venue du manteau terrestre, les **plaques tectoniques**, plus froides et plus denses, s'enfoncent sous leurs voisines: c'est la subduction. Seules les plaques océaniques plongent. Quand deux plaques continentales se heurtent, la collision plisse la roche pour former des chaînes de montagnes.

que le pilote continue sa course avec la moto, à terme, la structure qui relie les deux engins se fragilise jusqu'à céder." Et cela d'autant plus facilement que le lien faisant tenir l'ensemble est sollicité brutalement. Ce qui a été le cas en 2004. "Pendant que les contraintes s'accumulaient à l'endroit où la plaque indo-australienne plonge sous l'Indonésie, elles augmentaient au large de l'océan Indien, explique le chercheur. Le séisme de 2004 a libéré les contraintes sur la faille de Sumatra, tout en mettant davantage sous tension les failles intra-océaniques. Comme si une petite goutte d'eau venait remplir un verre déjà plein! Et la rupture – le débordement du verre – est survenue le 11 avril 2012."





LE RIFT AFRICAIN, L'AUTRE FRACTURE DE LA TERRE

Scinder une plaque en deux ! La Terre n'en est pas à son coup d'essai. Ainsi, en Afrique, depuis 30 millions d'années, une limite de plaques n'en finit plus de se former dans la plaine des Grands Lacs. Dans ce lent processus, la plaque africaine se sépare, encore aujourd'hui, en deux entités tectoniques, la future plaque somalienne à l'est, et la future plaque nubienne à l'ouest, ouvrant l'espace d'un futur océan. Vue des hommes, la limite de plaques n'est qu'un chapelet de longues vallées (rift est-africain), de volcans actifs (Kilimandjaro...) et de vastes lacs (Victoria, Malawi...).

La rupture de toute la plaque indo-australienne ? Pas encore. Pour l'heure, les torsions subies par la plaque en son cœur se manifestent sous la forme de reliefs déformés et d'un réseau de failles, orientées du nord au sud et réparties sur une zone très large. La double rupture majeure d'avril dernier n'est qu'une étape préliminaire.

Comme le dit prudemment Jean-Yves Royer, directeur de recherche au CNRS, *"les deux secousses de 2012 s'inscrivent dans une sismicité importante à l'intérieur de la plaque indo-australienne, mais très diffuse, dans une région qui fait plusieurs milliers de kilomètres de largeur"*. Pour que se dessine une frontière nette, il faudra que les cassures successives dessinent, peu à peu, une ligne continue, le long de laquelle

se concentreront les séismes futurs – sans doute très violents... Le scénario est crédible, à défaut d'être garanti. *"Un tel processus prendra des millions d'années, et impliquera vraisemblablement des milliers d'autres séismes aussi puissants"*, a ainsi prévenu Keith Koper, géophysicien et directeur des stations de sismomètres de l'université de l'Utah (Etats-Unis), dans un récent communiqué.

UN MÉCANISME IMPRÉVISIBLE

Quel sera alors le nouveau visage de la Terre, d'ici quelques dizaines de millions d'années ? Difficile à dire. Les paramètres qui règlent le ballet des océans et des continents sur le "tapis roulant" du manteau terrestre restent en partie mystérieux. *"La subduction de Sumatra pourrait aller plus vite si la plaque australienne n'était plus ralentie par l'Inde"*, avance ainsi Matthias Delescluse. Au contraire, que l'Himalaya continue à s'épaissir sous l'effet du frottement entre les plaques in-

dienne et eurasiennne n'est pas sûr, car la rupture de la plaque indo-australienne libérerait l'Inde du "moteur" australien.

Si, d'ici là, des êtres se passionnent toujours pour ce qui se trame dans les profondeurs de leur planète, ils comprendront sans doute que la balafre barrant le plancher de l'océan Indien témoigne d'une histoire très ancienne. Comme nous savons aujourd'hui que le rift africain résulte d'une fracture ouverte il y a 30 millions d'années à travers la plaque africaine.

L'instant où la Terre se met à changer de visage échappe, toujours, à la curiosité des hommes. Sauf, première exception, au large de Sumatra. Une exception qui fait d'ores et déjà date chez les géologues, et leur offre une occasion unique d'observer, en direct, la naissance d'une nouvelle plaque. Les prochains séismes qui signeront les coups de pioche prolongeant la nouvelle frontière seront suivis de près. Mais s'ils sont certains, pour l'heure, personne ne sait dire quand les attendre. ■

SCHIZOPHRÉNIE, BAISSSE DE Q.I., DÉPRESSION...

LES DÉGÂTS IRREVERSIBLES DU CANNABIS

Alors que ce sont les jeunes qui en fument le plus, des études montrent que le cannabis perturbe la maturation du cerveau, au risque de troubles mentaux émergeant dix ou vingt ans plus tard ! De quoi en finir avec l'idée d'une drogue "douce"... Enquête.

PAR ELSA ABDOUN

> Des différences significatives de densité de matière grise ont été observées par IRM (ici, dans les zones en jaune), entre les cerveaux de jeunes adultes gros consommateurs de cannabis et ceux de non-fumeurs.



SOURCE: DRUG AND ALCOHOL
DEPENDENCE 77, 2005



Fumer à l'adolescence induirait 3 types de troubles mentaux à l'âge adulte

De plus en plus d'études alertent sur les risques neuropsychologiques, souvent perçus des années plus tard, d'une exposition du cerveau encore très vulnérable des adolescents au cannabis.



Certes, les effets immédiats du cannabis sont bien connus : une douce somnolence pouvant aller jusqu'à la torpeur, des envies de rire pour un rien, une baisse de la concentration (constatée notamment au volant), une perte diffuse de mémoire... Mais, pense-t-on, en quelques heures, tous ces effets se dissipent et, sauf à recommencer, l'organisme n'a aucun mal à éliminer cette drogue dite "douce". Eh bien non ! estiment aujourd'hui un nombre croissant de neuroscientifiques. Qui alertent :

les preuves s'accumulent sur les risques à long terme d'un usage régulier du cannabis. Car des années après l'arrêt de la consommation, le cerveau en garderait les traces. Et l'ampleur des dégâts serait d'autant plus grande que l'utilisateur est jeune. En effet, le cannabis perturberait en profondeur le développement des connexions neuronales qui se produit à l'adolescence,

SCHIZOPHRÉNIE

Les jeunes de 14 à 24 ans ayant fumé régulièrement du cannabis pendant plus de trois ans auraient un risque deux fois plus élevé que les non-fumeurs de présenter des symptômes psychotiques dix ans plus tard.

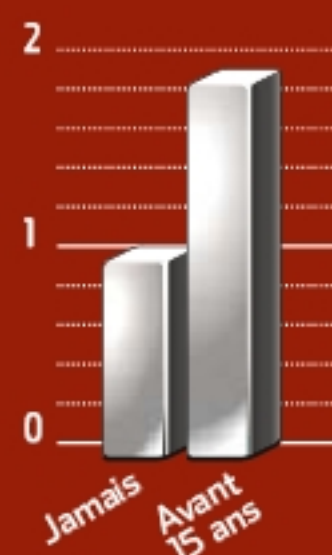
SOURCE : BMJ, 2011



DÉPRESSION

Quel que soit l'âge auquel ils ont commencé, les jeunes fumeurs de cannabis ont un risque accru de dépression à l'âge adulte. S'ils ont commencé avant 15 ans, ce risque serait environ 2 fois supérieur.

SOURCE : J. AFFECTIVE DISORDERS, 2012



au point de favoriser les troubles mentaux à l'âge adulte – dépression, schizophrénie –, et de diminuer les capacités intellectuelles.

Or, lorsqu'on se penche sur le profil des fumeurs de cannabis en Europe, et en particulier en France, on constate que les adolescents sont précisément devenus les plus gros consommateurs (voir ci-dessus). Un jeune de 17 ans sur quatre en consomme au moins une fois par mois ; un sur quinze, plus



DANIELA PAROLARO

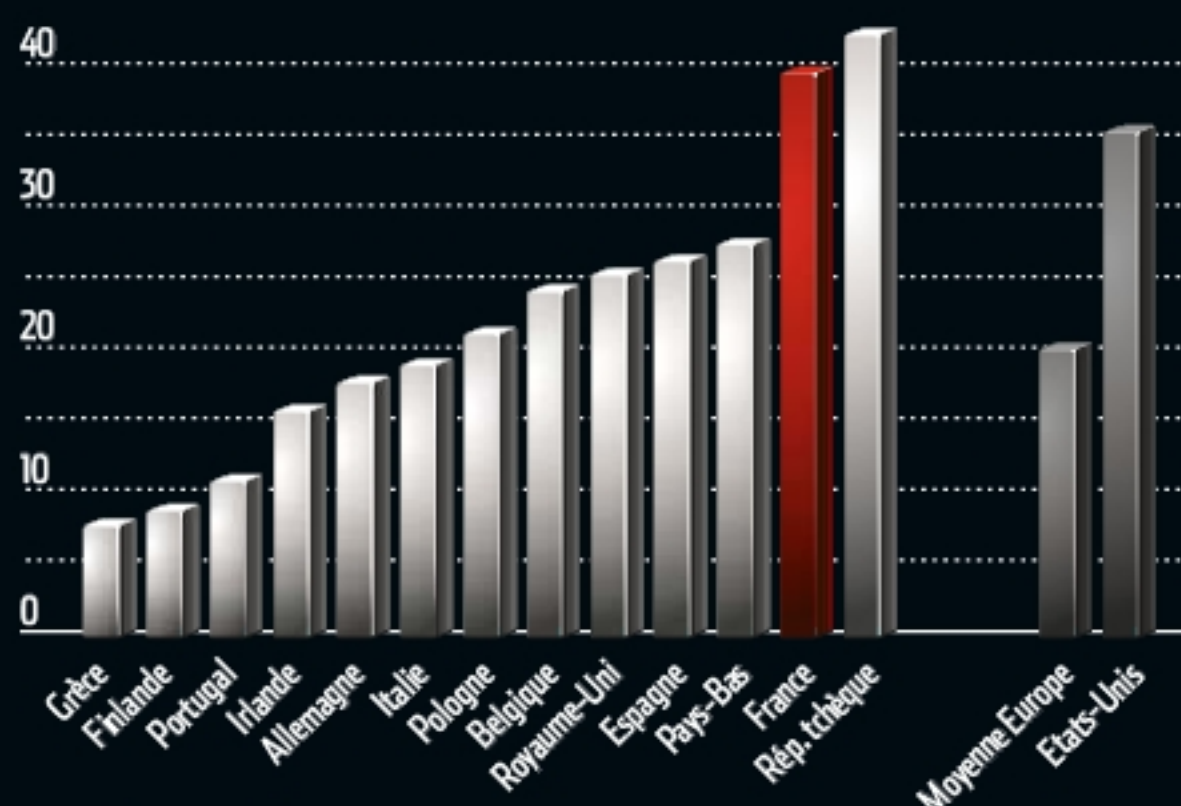
PHARMACOLOGISTE À L'UNIVERSITÉ DE L'INSUBRIE (ITALIE)

Nos modèles montrent que le cannabis perturbe la maturation des connexions neuronales à l'adolescence



Les Français sont particulièrement concernés

Avec 39 % de jeunes de 15-16 ans ayant déjà testé au moins une fois cette drogue, la France fait partie des pays européens où la consommation de cannabis à l'adolescence est la plus répandue.



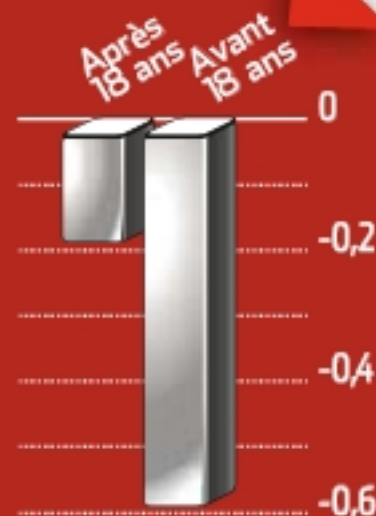
15,3 ans

C'est l'âge moyen auquel les jeunes Français testent pour la première fois le cannabis.

SOURCE : OBSERVATOIRE EUROPÉEN DES DROGUES ET DES TOXICOMANIES, 2012

BAISSE DE Q.I.

Les adultes dépendants au cannabis depuis longtemps perdent plus de points de Q.I. quand ils ont commencé avant 18 ans (ici, en unités de déviation standard).



SOURCE : PNAS, 2012

de dix fois ! Les cerveaux les plus vulnérables sont donc également les plus exposés.

Pourtant, cette plante, fumée pour ses propriétés relaxantes et euphorisantes, continue à jouir d'une réputation de drogue douce. Moins addictive que le tabac et moins toxique que l'alcool, elle est dépénalisée dans certains pays, voire proposée sur ordonnance. Anne-Michelle Demierre, présidente de l'association Parents Jeunes Cannabis, cite ainsi comme principales conséquences l'échec scolaire et le repli sur soi.

DE PLUS EN PLUS DE PREUVES

Si ces inquiétudes sont légitimes, elles sous-estiment largement l'ampleur du problème, en ne tenant pas compte des observations faites ces dernières années. Car jamais les soupçons sur le rôle actif du cannabis

dans l'apparition de troubles mentaux n'ont été aussi forts. Les études se multiplient, notamment sur les liens entre le cannabis et la schizophrénie. Cette psychose, caractérisée par une désorganisation des idées et du comportement ainsi que des hallucinations, touche environ 1 % de la population. Comme pour de nombreuses pathologies psychiatriques, son origine reste un mystère, mais on l'estime "multifactorielle" : elle présente à la fois des causes génétiques et environnementales (histoire familiale...).

Dès les années 1980, le cannabis avait été identifié comme

un potentiel facteur de risque. Pourtant, les décennies ont passé sans que soit établi un lien solide de cause à effet entre la plante et la pathologie. Certes, des études épidémiologiques avaient recensé davantage de malades dans des groupes de fumeurs. Mais les chercheurs pouvaient en tirer deux conclusions : soit le cannabis favorise l'apparition de la pathologie, soit son usage est plus fréquent chez les victimes de ces troubles.

"Beaucoup de jeunes colmatent leurs angoisses avec le cannabis", confirme Jean-Philippe Guéguen, psychiatre pour adolescents et jeunes adultes à l'hôpital Simone-Veil (Eaubonne). Et comme les expériences chez l'animal donnent peu d'informations fiables sur le développement des désordres psychiques, spécifiques à l'humain... La seconde hypothèse, celle d'une consommation vue comme la conséquence →

→ de la maladie, était la plus communément admise.

Si la tendance s'inverse aujourd'hui, c'est parce que plusieurs études épidémiologiques se sont enfin intéressées au profil des participants avant qu'ils ne commencent à consommer du cannabis. S'assurant ainsi, lors d'entretiens psychiatriques, que les jeunes adolescents suivis ne présentaient pas de signes d'une psychose naissante avant de devenir fumeurs.

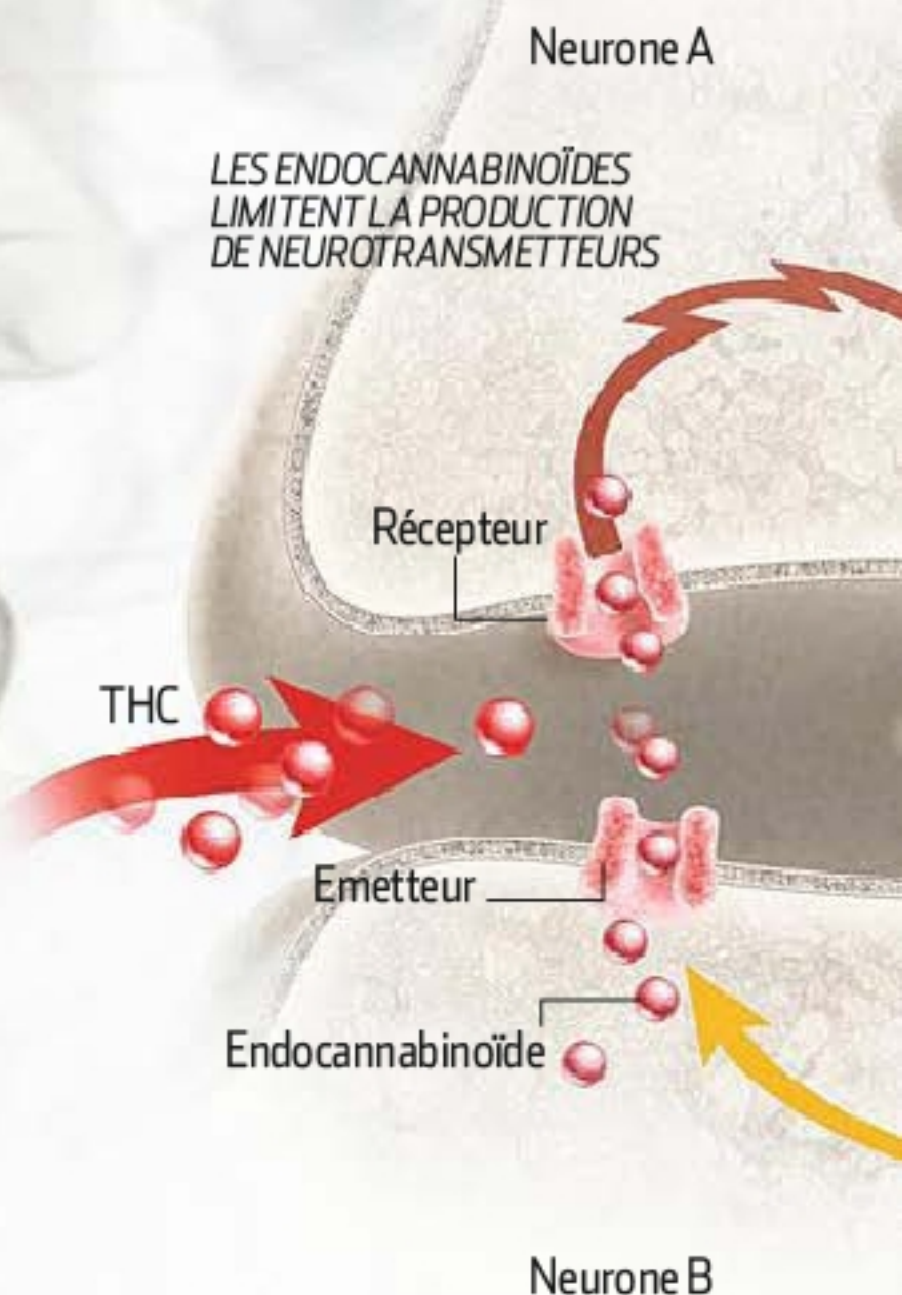
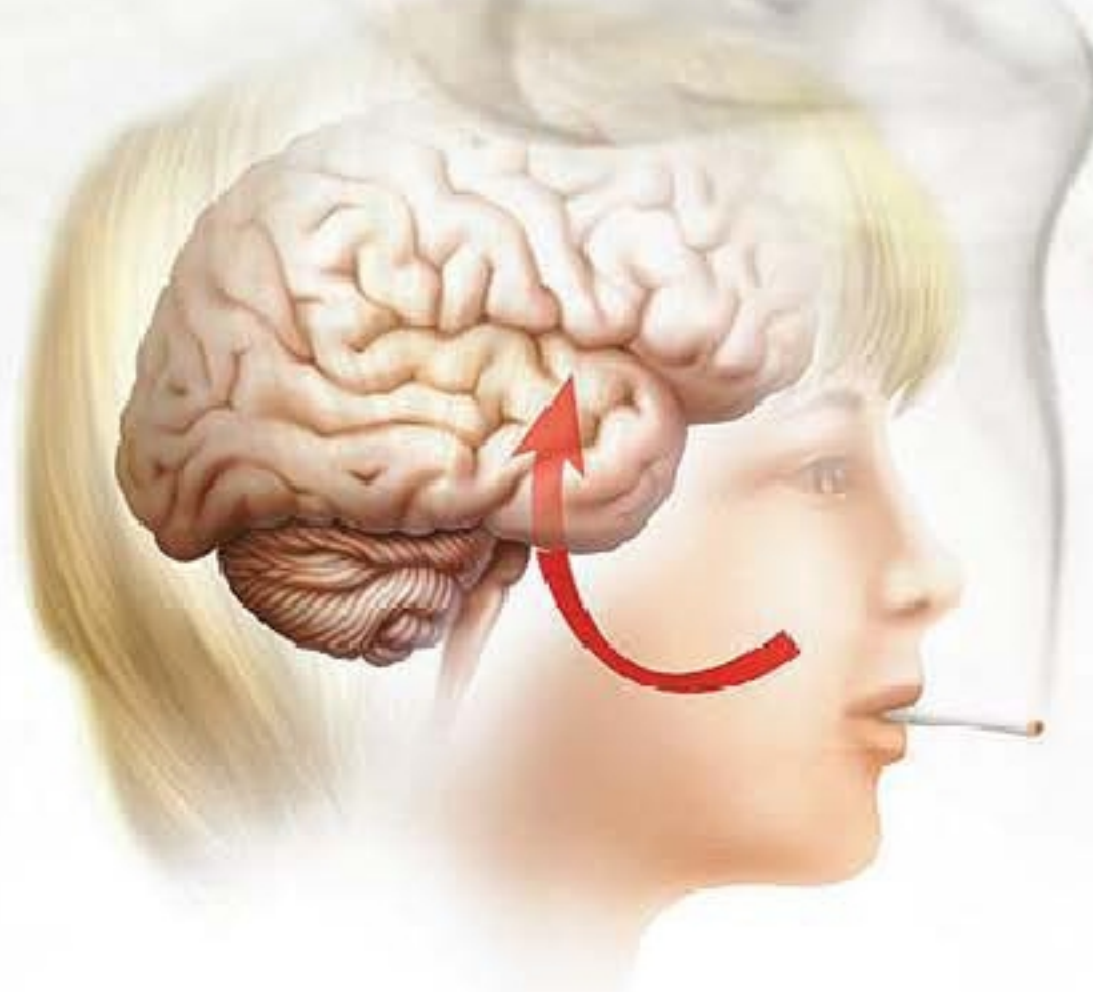
JUSQU'AU DOUBLEMENT DU RISQUE DE PSYCHOSE

Affranchie de ce biais et d'autres encore, comme le facteur socio-économique, une étude de 2011 menée à l'université de Maastricht (Pays-Bas) montre en moyenne un doublement du risque de psychose chez des jeunes ayant fumé du cannabis au moins cinq fois dans les dernières années. Une tendance déjà repérée en 2010, dans une étude de l'université du Queensland (Australie) menée uniquement chez des

Une drogue qui altère les connexions neuronales en plein développement

1 Alors que le cerveau adolescent est en train de se structurer...

À l'adolescence, le cerveau est en pleine maturation : de nombreuses connexions neuronales sont éliminées, d'autres sont renforcées. Le bon fonctionnement des neurones au cours de cette période est donc essentiel.



UN RISQUE ACCRU DE CANCER DU TESTICULE ?

Il n'a décidément plus rien d'une drogue douce... En novembre dernier, le cannabis révélait un autre de ses méfaits : son usage régulier doublerait le risque de cancer du testicule. Si ce dernier est très rare (1 % des cancers), il est le premier touchant les hommes de moins de 45 ans. En 2009 puis en 2011, deux études avaient déjà émis l'hypothèse d'un lien entre le cannabis et cette tumeur. Aujourd'hui, on sait que cette action passerait par un dérèglement du système endocannabinoïde, aussi impliqué dans la régulation des hormones sexuelles. Là encore, l'âge de la puberté serait le plus vulnérable... L'une des trois études sur le sujet a montré que plus la consommation commençait tôt, plus le risque de cancer augmentait.

frères et sœurs, pour limiter le biais lié aux prédispositions génétiques. Une autre observation capitale a été confirmée par cette étude : plus la consommation est précoce, plus le risque de développer une schizophrénie est important. En 2008, une étude de l'Institut pour la santé mentale GGZ Eindhoven, aux Pays-Bas, suggérait même que, en cas d'abandon du cannabis à l'âge adulte, le risque demeurerait identique.

Certes, d'autres études n'ont pas mis en évidence de lien statistique entre la consommation de cannabis à l'adolescence et le développement d'une schizophrénie quelques années plus tard. Mais en prenant en compte

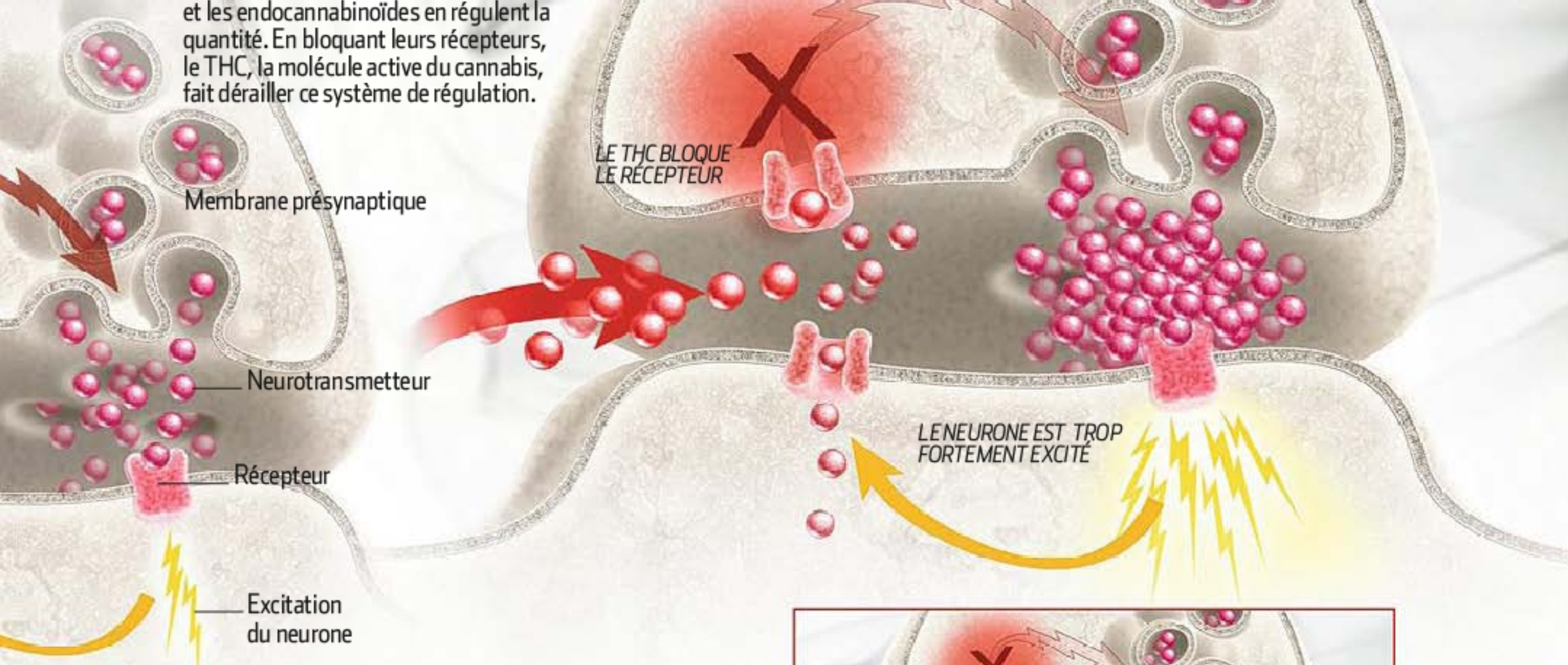
l'ensemble de la littérature scientifique publiée jusqu'en 2007, des chercheurs des universités anglaises de Bristol et de Cambridge ont quand même évalué à au moins 40 % l'augmentation du risque chez les adolescents consommant régulièrement du cannabis. Et la hausse serait encore plus importante chez les individus ayant déjà des prédispositions génétiques ou sociales au développement de cette maladie.

INÉGAUX FACE AUX EFFETS

La schizophrénie n'est pas la seule pathologie dans la ligne de mire des chercheurs. La dépression les inquiète également. Même si, pour cette ma-

2... le THC perturbe la réception des endocannabinoïdes...

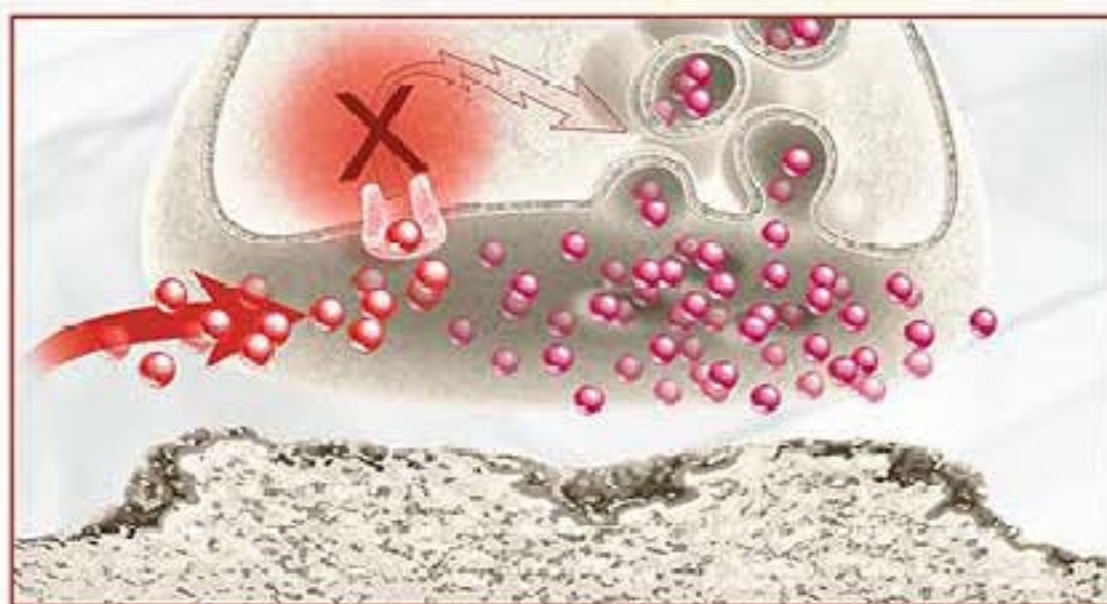
Des neurotransmetteurs (ici, excitateurs) sont envoyés d'un neurone à un autre, et les endocannabinoïdes en régulent la quantité. En bloquant leurs récepteurs, le THC, la molécule active du cannabis, fait dérailler ce système de régulation.



LES NEUROTRANSMETTEURS PROVOQUENT UNE EXCITATION DU NEURONE QUI DÉCLENCHÉ L'ÉMISSION D'ENDOCANNABINOÏDES

3... et peut entraîner la mort du neurone

Trop fortement excité, le neurone meurt. Dans le cas alternatif d'une transmission trop importante de neurotransmetteurs inhibiteurs, le neurone ne meurt pas, mais la connexion, inactive, risque alors d'être éliminée.



ladié qui touche près de 3 % de la population mondiale, les données scientifiques sont moins tranchées. En 2012, par exemple, une étude de l'université d'Etat du Michigan (Etats-Unis) montrait une augmentation de 60 % à 90 % du risque de dépression chez les fumeurs de cannabis; tandis qu'une autre, menée à l'Institut Karolinska de Stockholm (Suède), ne mettait en évidence aucun risque particulier.

Comment expliquer des résultats aussi contradictoires ? Pour Tiziana Rubino, chercheuse en pharmacologie à l'université de l'Insubrie (Italie), ces incohérences sont dues au fait que les études ne prennent pas

toujours en compte les mêmes types de fumeurs. "On devrait se concentrer sur les gros fumeurs, qui consomment plusieurs 'joints' par jour. C'est probablement seulement chez eux qu'il existe un risque", estime-t-elle. Mais même à consommation égale, deux personnes

n'en subiront pas forcément les mêmes conséquences. Ainsi, "il semblerait que les femmes soient plus sensibles aux effets du cannabis sur la dépression, et les hommes sur les psychoses", révèle la chercheuse.

Il existe un mal plus insidieux, qui rongerait en →

RAYMOND NIESINK

NEUROTOXICOLOGUE À L'UNIVERSITÉ D'UTRECHT (PAYS-BAS)

Une fois que le cerveau s'est développé dans une mauvaise direction, on ne peut pas totalement revenir en arrière





TIZIANA RUBINO

PHARMACOLOGISTE À L'UNIVERSITÉ
DE L'INSUBRIE (ITALIE)

**On devrait se concentrer
sur les gros fumeurs ; c'est
probablement seulement
chez eux qu'il existe un risque**

→ silence le cerveau de nombreux fumeurs de cannabis : la diminution lente, et persistante, de leurs capacités intellectuelles. Depuis dix ans, plusieurs études ont mis en évidence les moins bonnes performances des fumeurs face à différents tests de mémoire, logique, etc., même plusieurs jours après leur dernière consommation de cannabis.

DES MESSAGES NERVEUX
HORS DE CONTRÔLE

Mais l'année 2012 a marqué un tournant dans les recherches. Aux Etats-Unis, l'université Duke a dévoilé une étude qui élimine, pour la première fois, de nombreux biais. Les chercheurs ont ainsi collecté des données sur plus de mille Néo-Zélandais, suivis de leur naissance jusqu'à l'âge de 38 ans. Des tests neuropsychologiques ont été menés à 13 et 38 ans, et la consommation ou non de cannabis évaluée à 18, 21, 26, 32 et 38 ans.

Les résultats sont édifiants : les gros fumeurs, dépendants pendant au moins plusieurs années, subissaient entre l'adolescence et l'âge adulte une baisse moyenne de 8 points de quotient intellectuel (Q.I.), sur une valeur moyenne de 100, quand les non-fumeurs bénéficiaient d'une augmentation légère. Surtout, cette baisse de Q.I., observée à niveau d'édu-

cation égal, persistait plus d'un an après l'arrêt du cannabis, et était beaucoup plus importante chez les individus ayant commencé à consommer cette drogue avant 18 ans.

Schizophrénie, dépression, baisse de Q.I. : comment expliquer que le cannabis laisse une telle empreinte sur le cerveau adolescent, même des années après l'arrêt de la consommation ? La réponse est loin d'être évidente, car les rouages du cerveau sont encore très mystérieux. Un modèle d'action émerge cependant (voir l'infographie pp. 74-75). Ainsi, "*le cannabis perturberait la maturation des connexions neuronales qui se produit à l'adolescence*", explique Daniela Parolaro, pharmacologue à l'université de l'Insubrie.

Ce phénomène, essentiel au développement d'un cerveau adulte parfaitement fonctionnel, implique l'action d'un type particulier de neurotransmetteurs : les endocannabinoïdes. Ces derniers, découverts dans les années 1990, régulent l'intensité des nombreux messages nerveux envoyés d'un neurone à un autre en se fixant à des récepteurs spécifiques, présents à la surface de certains neurones. Ce mécanisme de régulation est essentiel à la bonne maturation du cerveau à l'adolescence.

Or, la molécule active du cannabis, le Δ -9-tétrahydro-

JARGON

Le **cannabis**, aussi appelé **chanvre**, peut être consommé de différentes façons. En France, il est principalement fumé avec du tabac dans des **joints**, sous la forme de résine (**haschich, shit...**), ou bien de tiges, fleurs ou feuilles séchées (**marijuana, herbe, beuh...**), qui peuvent aussi être fumées seules ou ingérées. L'huile, fumée avec une pipe, est plus rarement consommée.



cannabinol, ou THC, ressemble beaucoup aux endocannabinoïdes. Ce qui lui permet de se lier à leurs récepteurs à la place de ces derniers, qui ne peuvent alors plus faire leur travail de régulation des messages nerveux. C'est ainsi que le relargage de dopamine, neurotransmetteur du plaisir, n'est plus contrôlé, et que le cannabis induit une sensation de bien-être. Surtout, c'est ainsi que, chez l'adolescent fumeur régulier, les connexions entre neurones se développeraient anormalement, et donneraient naissance à un cerveau adulte au fonctionnement altéré.

Ainsi, quelques études ont montré des différences structurales entre les cerveaux des fumeurs et ceux des non-



ALCOOL : L'AUTRE ENNEMI DU CERVEAU

Autre drogue très prisée des adolescents : l'alcool. En France, 15 % des jeunes garçons de 17 ans et 5 % des filles en consomment régulièrement (au moins dix fois dans le mois); plus de la moitié déclare avoir bu plus de cinq verres dans une même soirée au cours du mois. Si le caractère neurotoxique de l'alcool est connu chez l'adulte, la science continue à révéler l'ampleur de ses dégâts sur le cerveau particulièrement vulnérable des adolescents.

En décembre dernier, une étude des universités du Colorado et de San Diego (Etats-Unis) ajoutait ainsi, aux déformations de l'hippocampe, du cortex préfrontal et du cervelet

déjà démontrées, un autre effet de l'usage abusif d'alcool à l'adolescence : la dégradation globale des fibres nerveuses. Conséquences de ces modifications structurelles ? Une diminution des capacités cognitives, en particulier de l'attention, des capacités visuo-spatiales et de l'apprentissage. Surtout, *"il y a des arguments en faveur d'une amélioration de ces capacités après une période d'abstinence, explique Ryan Vetreno, neurobiologiste à l'université américaine Chapel Hill. Malheureusement, la majorité des anciens buveurs adolescents le restent à l'âge adulte."*

▲ Alors que les adolescents sont devenus les plus gros consommateurs de cannabis, une prise en charge précoce peut limiter les dégâts.

fumeurs. C'est le cas de celle publiée en 2005 par l'équipe de Karen Bolla, de l'université Johns-Hopkins de Baltimore (Etats-Unis), qui montre des différences de composition entre substance blanche (fibres nerveuses) et substance grise (noyaux des neurones), dans différentes régions du cortex et de l'hippocampe (voir p. 70).

L'HEURE N'EST PLUS AU DOUTE

Quant au fonctionnement du cerveau des fumeurs de cannabis, de nombreuses différences y ont également été observées. Notamment, *"chez des rongeurs exposés au THC, un déséquilibre entre les neurotransmetteurs glutamate et GABA, équivalent à celui observé chez les schizophrènes"*, explique Tiziana Rubino. La

chercheuse se veut toutefois rassurante : *"Ces effets sont de longue durée, mais je ne pense pas qu'ils soient totalement irréversibles. Après l'arrêt de la consommation et avec une bonne prise en charge, la plasticité du cerveau, même à l'âge adulte, devrait pouvoir compenser."*

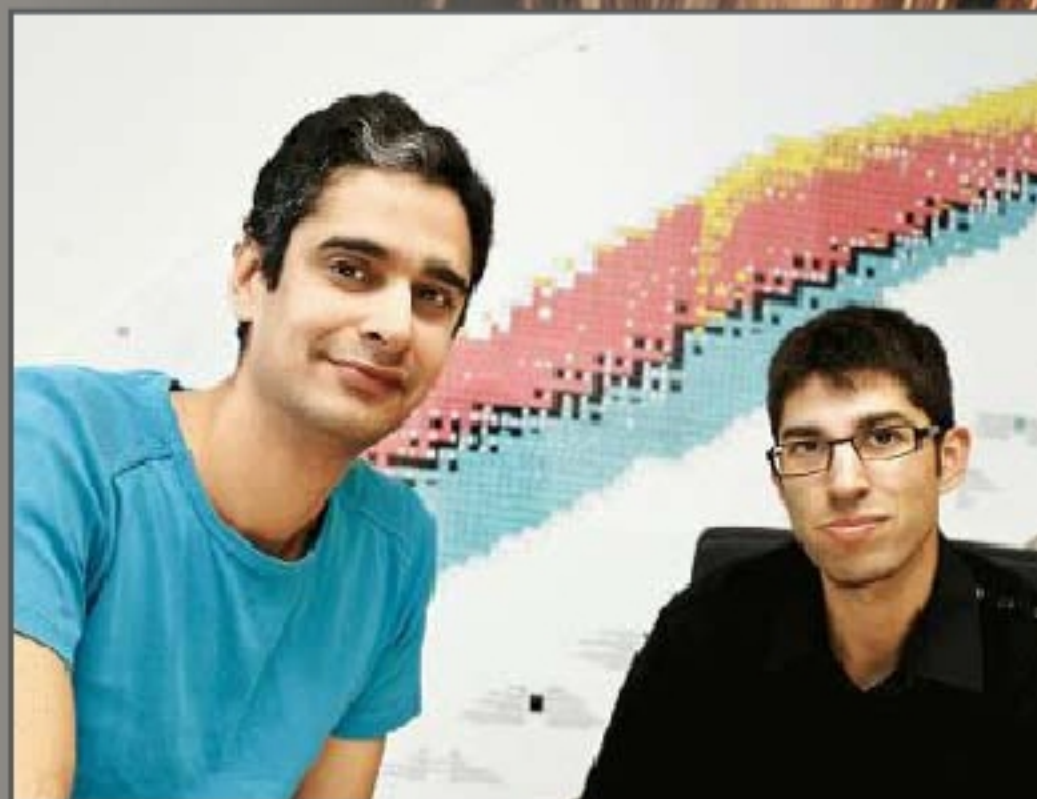
Un avis que ne partage pas Raymond Niesink, neurotoxicologue à l'université d'Utrecht (Pays-Bas) : *"Certaines parties du cerveau peuvent évoluer pour compenser, en partie, la perte de fonction des autres. Mais une fois que le cerveau s'est développé dans une mauvaise direction, on ne peut pas totalement revenir en arrière !"*

Des études épidémiologiques qui s'accumulent, des méca-

nismes biologiques de mieux en mieux compris... Logiquement, on pourrait s'attendre dans les dix prochaines années à une vague sans précédent des cas de schizophrénie chez les jeunes adultes. Pour l'instant, cependant, le nombre de malades ne semble pas avoir augmenté proportionnellement à l'importante hausse du nombre de jeunes fumeurs observée dans les années 1990. Mais cela pourrait s'expliquer par la baisse d'autres facteurs de risque (sociaux, environnementaux...) de la maladie. Il n'empêche : l'étau se resserre. Et en attendant que le débat soit clos, ce sont actuellement des millions d'adolescents dans le monde qui exposent leur cerveau aux dangers potentiels du cannabis...

LE NOYAU DE L'ATOME N'EST PLUS CE QU'IL ÉTAIT

On croyait l'affaire réglée : pour la théorie, le noyau d'un atome se résumait à une grappe de particules collées ensemble. Problème : des expériences révélaient des configurations atomiques... inexplicables ! C'était avant que deux jeunes chercheurs français élucident ce qui se passe vraiment au cœur de la matière. Un exploit.



PAR MATHILDE FONTEZ

Ni une sorte de framboise ou de mûre, ni une grappe de raisin : le noyau de l'atome n'a finalement rien de la boule de particules figées les unes contre les autres qui figure dans toutes les encyclopédies ! Voilà qui dit assez la portée de la nouvelle vision du cœur de l'atome que viennent de proposer deux physiciens, avec cette fois le gros avantage de coller à la réalité. D'où il ressort que le noyau est un amas

de matière turbulente et insaisissable, qui prend tantôt les atours d'une goutte liquide, tantôt ceux d'un réseau rigide et géométrique, d'une bulle d'écume ou d'une sphère couronnée d'un halo...

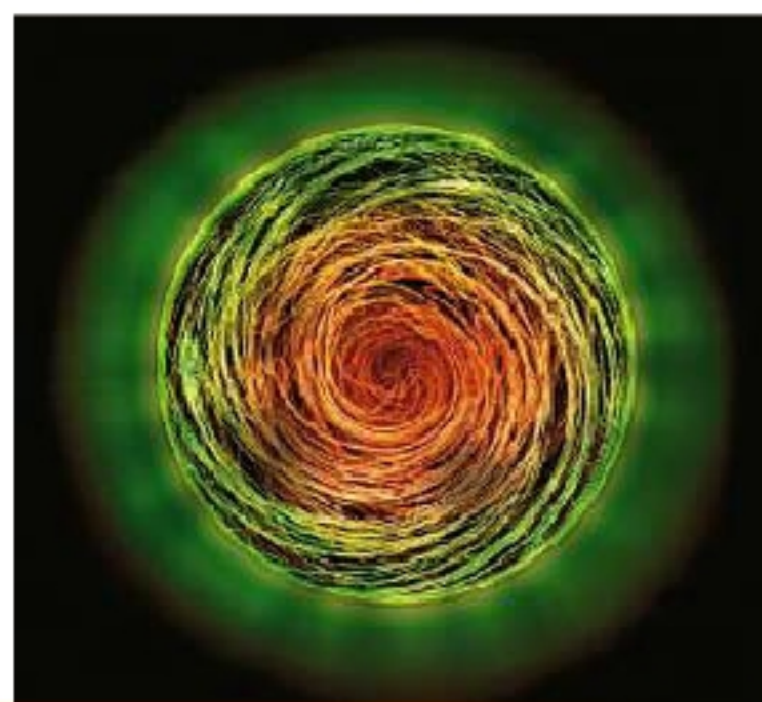
Le sujet est tout sauf anodin : les noyaux des atomes, avec leur concentré de protons et de neutrons, ont beau être minuscules – si l'atome et son cortège d'électrons avaient la taille d'une cathédrale, son noyau ne serait pas plus grand

qu'une mouche –, ils concentrent 99,9 % de la masse de l'Univers. Et en trouvant les lois qui régissent ses métamorphoses, en capturant, disséquant et modélisant la mouche qui se terrait au fond de la cathédrale, Elias Khan et Jean-Paul Ebran, physiciens à l'Institut de physique nucléaire d'Orsay et au CEA, en proposent une vision radicalement transformée, très éloignée des représentations naïves qu'experts →



▲ La théorie élaborée par les physiciens Elias Khan et Jean-Paul Ebran révolutionne notre représentation du noyau atomique !

L.VILLERET/DOLCE VITA - NEWGROUNDS.COM DR



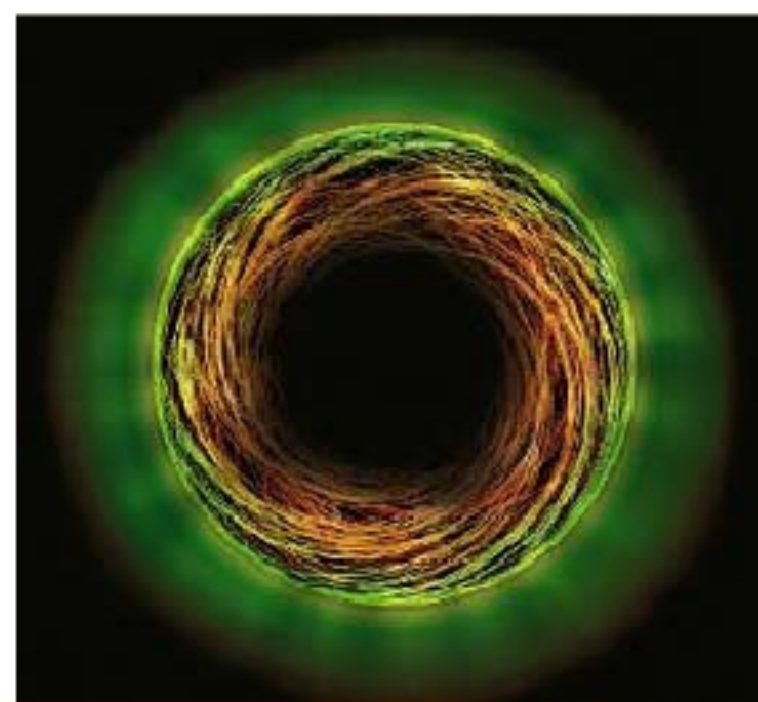
LE NOYAU LIQUIDE : des nucléons aux mouvements chaotiques

Premier résultat de la nouvelle théorie : en modélisant avec plus de finesse les interactions entre protons et neutrons, elle produit un nuage de nucléons turbulents, à l'opposé de la description classique du noyau.



LE NOYAU MOLÉCULAIRE : des nucléons concentrés en un réseau géométrique

Certains noyaux légers sont particulièrement stables parce que leurs nucléons s'assemblent en groupes, comme les atomes d'une molécule... comme ceux du noyau de néon produit par le nouveau modèle.



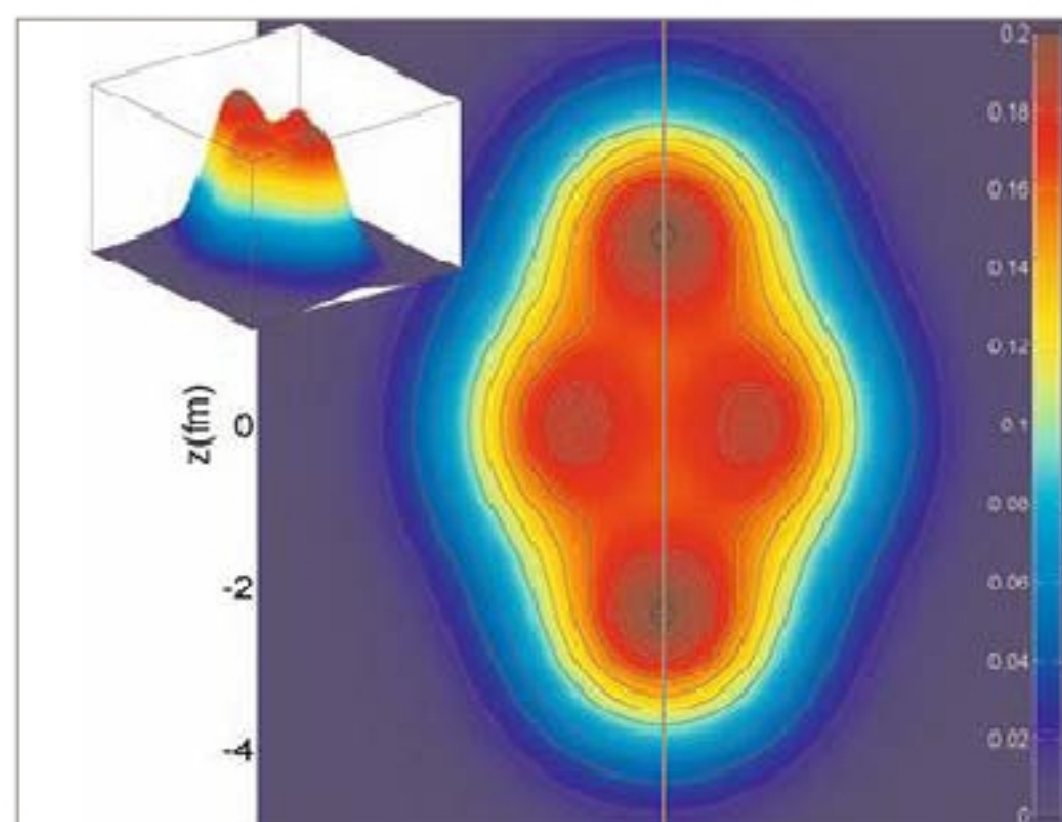
LE NOYAU BULLE : des nucléons concentrés en périphérie

Appliquée aux noyaux riches en protons, la nouvelle théorie donne naissance à des bulles : les nucléons se repoussent et forment une coquille. Un phénomène prédit par des modèles dédiés aux noyaux lourds.

→ et profanes avaient en tête. Au vrai, la première image moderne du cœur de la matière.

Qui l'eût cru ? Qui eût cru que la physique nucléaire avait encore quelque chose d'important à révéler ? Cette branche de la physique semblait en effet avoir accompli avec succès sa mission d'exploration du noyau atomique. On savait traduire la diversité des atomes par leur nombre de nucléons (c'est-à-dire le nombre de protons et de neutrons). Et prédire presque toutes les propriétés des noyaux avec une précision diabolique : pourquoi certains sont stables, pour-

▼ L'état caractéristique du noyau d'hélium (avec ses dix neutrons et ses dix protons concentrés en quatre points) a enfin pu être décrit grâce à la théorie.



quoi d'autres, radioactifs, se désintègrent en quelques fractions de seconde, et comment ils se scindent lors de la fission nucléaire. Le sort du noyau atomique semblait donc réglé et son étude promettait de ne plus être que querelles de détail dont la majorité des physiciens se désintéresseraient...

D'autant qu'entre-temps, la physique nucléaire était descendue de son piédestal. La découverte, dans les années 1960, des quarks, les vraies particules élémentaires qui constituent chaque neutron et chaque proton, lui a fait perdre son titre de science fondamentale. « Depuis les années 1980, beaucoup de têtes pensantes se sont tournées vers la physique des particules, l'étude de la théorie des cordes, de la supersymétrie, la quête du boson de Higgs... convient Jean-Paul Ebran. Mais on assiste à un revirement : il y a un renouveau théorique ! »

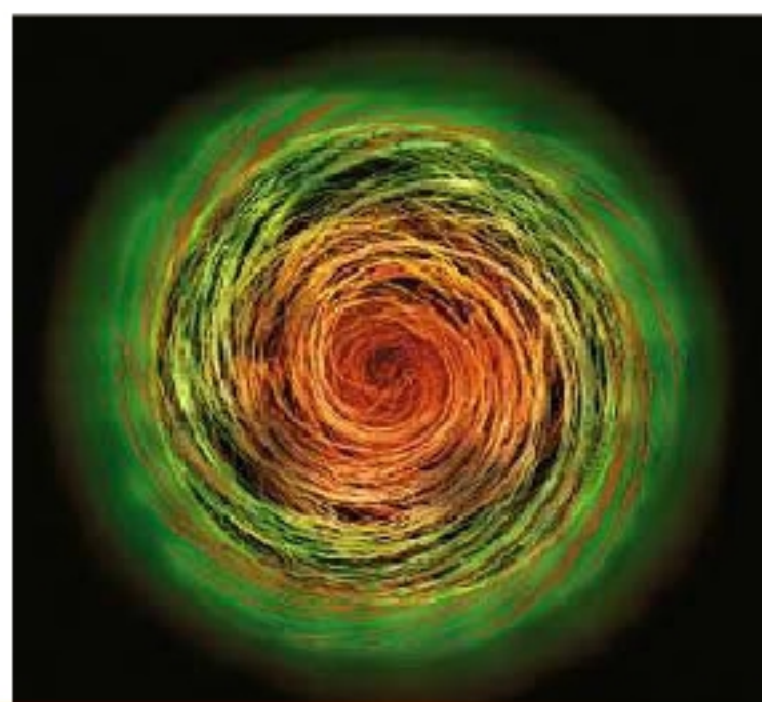
Il faut dire que tous les physiciens n'avaient pas quitté le navire. Restaient les expérimentateurs... Or, à force

de torturer le noyau dans de puissants collisionneurs, son extraordinaire diversité leur a sauté au visage.

TROP DE CAS PARTICULIERS

Ils ont vu des neutrons se mettre à tourbillonner loin de leurs congénères, d'autres se concentrer en coquille, prendre la forme d'un cigare, d'un ballon de rugby ou d'une poire... En poussant le noyau atomique hors de son état d'équilibre, l'obligeant à contenir toujours plus de nucléons, ils ont découvert une véritable cour des miracles, peuplée de noyaux marginaux... impossibles à décrire avec les théories classiques de la physique atomique ! De quoi renvoyer les théoriciens à leurs études, afin d'adjoindre à leurs corpus des monceaux de paramètres empiriques...

Peu à peu, la description du noyau s'est transformée en une accumulation de cas particuliers. Ainsi, impossible de prédire ne serait-ce que la stabilité de l'un de ces noyaux extrêmes sans donnée expérimentale. Au point que



LE NOYAU À HALO : des nucléons évadés hors des limites

On l'a découvert dans les années 1980, la nouvelle théorie vient de le modéliser : les noyaux trop riches en neutrons, comme le lithium 11, voient certains d'entre eux se désolidariser pour évoluer en périphérie.



LE NOYAU DÉFORMÉ : des nucléons à la trajectoire irrégulière

La majorité des noyaux n'a rien de sphérique : la plupart voient leurs nucléons tracer des trajectoires irrégulières... dont le nouveau modèle est capable de reproduire toute la diversité.

Tous les noyaux atomiques exotiques enfin modélisés

Le modèle était simple : le noyau de l'atome était un amas de protons et de neutrons collés les uns aux autres. Et leur nombre expliquait tous les atomes de l'Univers. Pourtant, les collisionneurs de particules n'ont cessé de produire des noyaux aux structures toujours plus exotiques, qui peuvent être regroupées en cinq groupes : liquide, molécule, bulle, halo ou nuage déformé. La nouvelle théorie de Jean-Paul Ebran et Elias Khan permet, pour la première fois, de reproduire chacune d'entre elles.

les théoriciens attendent la construction du collisionneur Spiral 2, au Grand Accélérateur national d'ions lourds (Ganil), à Caen, pour savoir s'il existe des noyaux stables au-delà de 118 protons... *"La découverte des noyaux atypiques nous a montré que nous n'avions pas bien compris la nature des interactions entre les nucléons"*, reconnaît Martin Freer, spécialiste du noyau atomique à l'université de Birmingham (Royaume-Uni).

Le noyau de l'atome avait fait mine de se laisser appréhender, mais c'était un leurre... Et pour cause, comme l'annonce d'office Jean-Paul Ebran : *"C'est même l'archétype du problème complexe ! Il est composé de trop de nucléons pour les méthodes de résolution exactes, et de trop peu pour les méthodes statistiques."* Pour le décrire, en effet, il devrait suffire de décrire les interactions des protons et des neutrons qui le constituent... ce que justement, la physique ne sait pas faire. Comme les astronomes le savent depuis longtemps, il est

impossible de prédire exactement la trajectoire de plus de trois corps en interaction. Les physiciens doivent donc se contenter d'appliquer une astuce éprouvée : *"Nous transformons le problème à 'n' corps en 'n' problèmes à 1 corps"*, détaille Jean-Paul Ebran. Nous faisons l'approximation que les nucléons sont indépendants les uns des autres et qu'ils baignent dans une sorte de champ moyen qui représente l'action de tous leurs congénères."

DES ÉLECTRONS RELATIVISTES

Voilà le point clé : c'est cette approximation qui a permis jusqu'au milieu des années 1990 de décrire presque exactement les noyaux atomiques à l'équilibre ; mais c'est cette même approximation qui a empêché jusqu'à aujourd'hui les modèles de prédire leurs états extrêmes. C'est donc à cette approximation que Jean-Paul Ebran et Elias Khan ont décidé de s'attaquer en 2011... à l'aide d'une arme qui a maintes fois prouvé son efficacité : la relativité d'Einstein. *"Depuis*

quelques années, on s'est aperçu que les protons et les neutrons au sein du noyau avaient des propriétés relativistes, raconte Elias Khan. Et on a commencé à penser qu'en tenant compte de ces effets, on parviendrait à améliorer notre modèle du noyau."

Les deux chercheurs ont poussé la logique à son paroxysme. En s'appuyant sur l'équation de Dirac, conçue pour décrire les électrons relativistes, ils ont expurgé l'ancien modèle d'une bonne part de ses paramétrages empiriques. Puis, en faisant tourner ce modèle sur ordinateur, ils ont vu se façonner des noyaux atomiques virtuels... Et un petit miracle s'est produit : *"Nous testions notre modèle avec des noyaux constitués de différents nombres de protons et de neutrons pour voir si ses prédictions collaient avec les observations, et nous sommes tombés sur quelque chose d'étrange pour le noyau du néon, explique Jean-Paul Ebran. Au lieu d'être répartis uniformément comme le prévoient les →*

REPÈRES

"Une mouche dans une cathédrale" : la fameuse formule a été inventée par le physicien néo-zélandais Ernest Rutherford, en 1911, lorsqu'en bombardant une fine feuille d'or avec des particules alpha, il s'aperçut qu'elles étaient déviées. Il semblait qu'une boule dense et impénétrable régnait au cœur de l'atome, contenant presque toute sa masse. Il avait découvert le noyau.

→ *autres modèles, ses nucléons semblaient concentrés en quatre points.* Or, cet état étrange du noyau atomique fait justement partie des bizarreries nucléaires observées expérimentalement, mais qui n'ont jamais été expliquées par une théorie... Les deux physiciens croient d'abord à une erreur. Ils tâtonnent quelques semaines... avant de se convaincre: non, il ne s'agit pas d'un artefact. *"Notre modèle, conçu pour décrire des noyaux atomiques classiques, était capable de générer un noyau atypique, résume Jean-Paul Ebran. Ce qui signifiait que nous avions potentiellement trouvé un corpus de lois universelles, une théorie capable de décrire la nature dans toute sa diversité!"*

Dès lors, les deux physiciens s'emballent: ils balayent toute la carte des noyaux, appliquant leur modèle aux poids lourds de centaines de nucléons comme aux poids plumes de quelques neutrons et protons... Avant de s'enflammer: leurs équations sont capables de donner naissance à toutes les formes de noyaux atomiques, des plus



simples aux plus étranges. L'exploit est historique. Pour la première fois, d'une unique théorie découlent naturellement les cinq grandes structures nucléaires... *"Le plus fou, c'est que cela aurait pu être fait il y a 20 ans, explique Martin Freer. Les moyens de calculs sont disponibles depuis longtemps... Il fallait juste prendre le temps d'intégrer la relativité!"*

Si ce nouveau modèle peut prédire la structure de n'importe quel noyau à partir d'un nombre de protons et de neutrons, reste à passer à l'étape suivante: prédire la stabilité ou la réactivité de n'importe quel noyau et, par là, résoudre l'un des grands mystères astrophysiques: comment les étoiles

▲ La nouvelle théorie pourrait prédire la stabilité des noyaux hyperlourds qui seront créés, à partir de 2015, dans le nouveau collisionneur Spiral 2 du Ganil, à Caen.

sont-elles parvenues à forger les premiers atomes lourds (voir l'encadré ci-dessous)? *"Nous commençons seulement les tests, mais nous voyons déjà que les prédictions de ce modèle sont bien meilleures que celles d'aucun autre auparavant", précise Jean-Paul Ebran.* En clair, la physique nucléaire vit le deuxième moment clé de son histoire. Pour la première fois, elle dispose d'une théorie qui embrasse toute la diversité de la nature...

REVENIR AU FONDAMENTAL

"On est probablement à la limite de ce que l'on peut faire avec un modèle qui ne considère pas directement les quarks, s'avance Jean-Paul Ebran. Mais décrire le noyau atomique directement à partir de la théorie de la physique des particules, cela revient à essayer de comprendre tout le corps humain avec la biologie moléculaire: c'est infaisable!" Pour aller plus loin, les physiciens ne pourront cependant pas se passer d'un retour au fondamental, en adaptant le corpus de la théorie des quarks au noyau de l'atome. Ils sont déjà à l'œuvre. Les supercalculateurs nécessaires pour supporter la fusion des quarks et des nucléons sont déjà opérationnels. Et la théorie qui promet de mettre un point final à la grande quête de la physique nucléaire a même déjà un nom: théorie effective de champ chirale. *"C'est mon projet de recherche pour les dix prochaines années", sourit Jean-Paul Ebran.*

L'essence de la matière, l'infime petite mouche qui avait fait mine de se laisser capturer leur avait échappé; les physiciens viennent de la rattraper. Et ils ne vont plus la lâcher. ■

ET SI CETTE THÉORIE EXPLIQUAIT LA NAISSANCE DE LA MATIÈRE?

L'histoire est connue, mais il manque un épisode. Dans le premier quart d'heure suivant le big bang, des nuages de neutrons, de protons, de photons et d'électrons émergent d'un vide quantique et fusionnent, donnant naissance aux premiers noyaux atomiques: hydrogène, hélium... 400 millions d'années plus tard, cette matière première s'embrace, des étoiles s'allument et, dans leur cœur, se forgent tous les atomes de l'Univers. *"Sauf que nos modèles ne peuvent pas aller au-delà de l'atome de béryllium parce qu'il est particulièrement stable, précise Elias Khan. Il y a une sorte de goulot d'étranglement dont on peine à sortir."* Les physiciens supposent qu'une matière exotique très instable a pu entrer en jeu: des noyaux atomiques à la structure étrangement... moléculaire. Restait à trouver une théorie qui les ferait émerger naturellement à partir de protons et de neutrons. Le modèle d'Elias Khan et Jean-Paul Ebran est l'outil qui manquait pour raconter l'histoire de la naissance de la matière.

ABONNEZ-VOUS À SCIENCE & VIE

55 €
seulement
au lieu
de 95,20 €.

**1 an d'abonnement
+ 4 hors-séries**



Recevez cette
radio vintage

UNE
RÉDUCTION DE

42%



VOUS POURREZ ÉCOUTER VOS STATIONS PRÉFÉRÉES MAIS AUSSI Y BRANCHER VOS BALADEURS MP3 ET IPOD.

- **Radio AM/FM « cub »** • **Connecteur pour baladeur Mp3 avec fond lumineux bleu**
- **Alimentation : 4 piles AA non fournies**



BULLETIN D'ABONNEMENT

À compléter et à retourner accompagné de votre règlement dans une enveloppe affranchie à:
SCIENCE & VIE ABONNEMENTS – B341 – 60643 CHANTILLY CEDEX

- Oui, je m'abonne**
à Science & Vie pour 1 an
 (12 numéros + 4 hors-séries)
 + **radio au design rétro** pour seulement 55€
 au lieu de 95,20€ soit plus de 42% de réduction



- ☐ **Je préfère seulement m'abonner à Science & Vie**
pour 1 an (12 n°+4 HS) pour 49€ au lieu de 70,20€*
(prix kiosque) soit 30 % de réduction

- ☐ **Je commande uniquement radio au design rétro**
au prix de 25€ et je joins à mon courrier le règlement
total de ma commande

➤ **Voici mes coordonnées :**

Nom : _____ Prénom : _____

Adresse :

Complément d'adresse (résidence, lieu dit, bâtiment...) :

Code Postal : Ville :

Tél : Grâce à votre n° de téléphone (portable) nous pouvons vous contacter si besoin pour le suivi de votre abonnement

E-mail : _____

Je souhaite recevoir des newsletters du magazine et des offres promotionnelles des partenaires de Science & Vie (groupe Mondadori) ☐

➤ **Mode de paiement :** ☐ Chèque bancaire ou postal à l'ordre de Science & Vie


















Date et signature obligatoires

Expire à fin Code Crypto
Les 3 chiffres au dos de votre CB

*Prix public et prix de vente en kiosque. Offre valable pour un 1^{er} abonnement livré en France métropolitaine jusqu'au 01/03/2013 et dans la limite des stocks disponibles. Je peux acquérir chacun des numéros mensuels de Science & Vie au prix de 4,20€, chacun des hors-séries au prix de 4,90€ et les éditions spéciales au prix de 5,90€. Radio au design rétro vous sera adressée dans un délai de 4 à 6 semaines après réception de votre commande. Vous ne disposez pas du droit de rétractation pour l'abonnement au magazine. Vous disposez du droit de rétractation pour radio au design rétro. Conformément à la loi «informatique et libertés» du 6 janvier 1978, cette opération donne lieu à la collecte de données personnelles pour les besoins de l'opération ainsi qu'à des fins de marketing direct. Ces informations sont nécessaires pour le traitement de votre commande. Vous disposez d'un droit d'accès et de rectification des informations vous concernant ainsi que votre droit d'opposition, en écrivant à l'adresse ci-après. Vous êtes susceptible de recevoir des propositions commerciales de notre société pour des produits et services analogues à ceux objet de l'opération. Si vous ne le souhaitez pas, veuillez cocher la case ci-contre ☐ **Science & Vie** – Service Abonnements - 8 rue François Ruy 92543 MONTROUGE CEDEX - Mondadori Magazines France SAS RCS 422 791 262 NANTERRE

SCIENCE & VIE

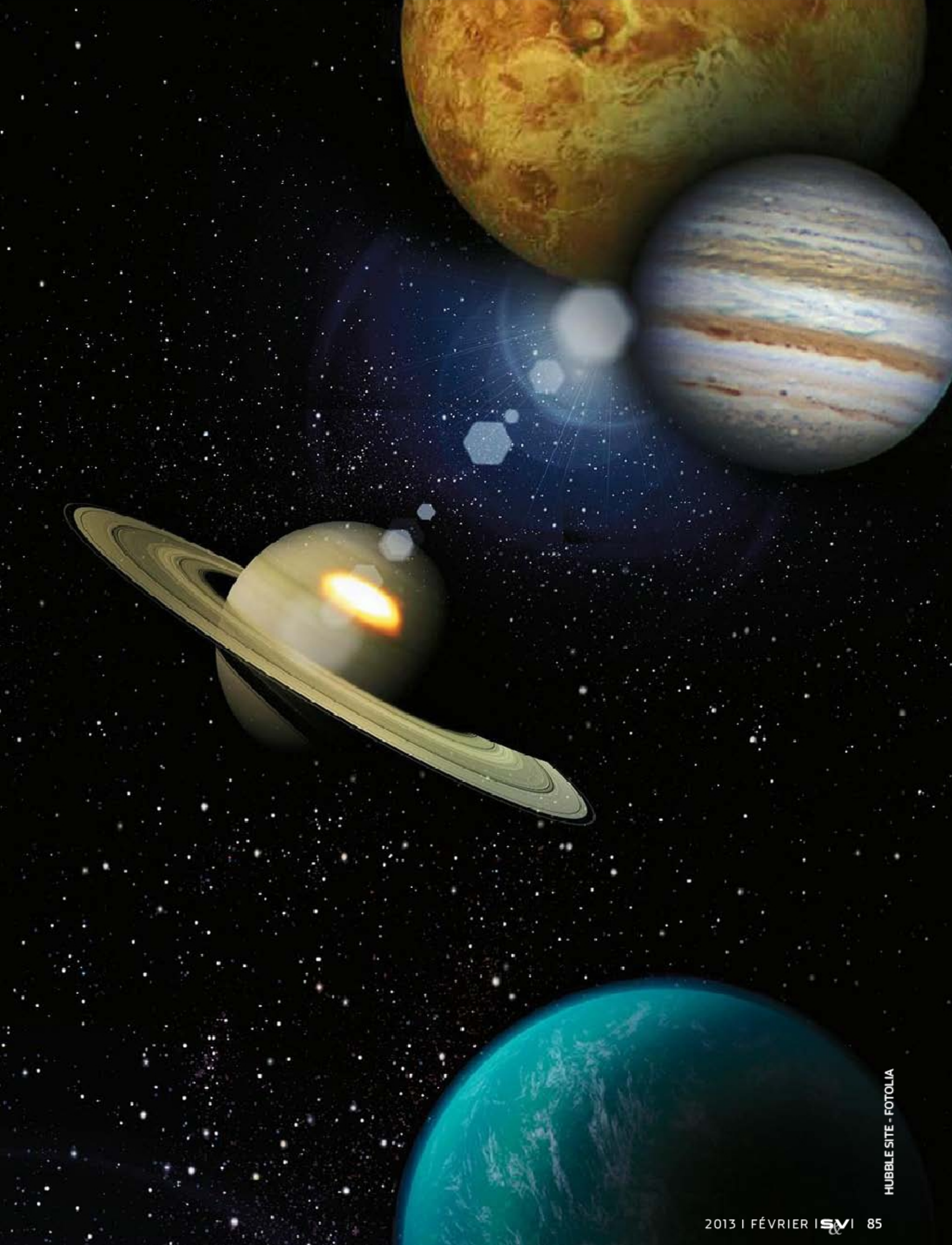
PLUS D'OFFRES ET
D'AVANTAGES SUR
www.kiosquemag.com

VÉNUS,
SATURNE,
MARS...

Leur climat nous intéresse

Observer le temps qu'il fait ailleurs pour mieux comprendre celui qu'il fait ici : tel est le credo des "astro-climatologues". Car que ce soit sur Vénus, Mars, Saturne ou encore Triton, les conditions particulières qui y règnent sont autant d'enseignements permettant d'affiner les modèles climatiques de notre planète. En cinq étapes planétaires, voici la première moisson d'un nouvel état d'esprit, où quitter la Terre permet d'en rendre mieux compte.

PAR MATHILDE FONTEZ,
AVEC MATHIEU GROUSSON





a tête dans les nuages, les pieds sur terre et... les yeux rivés sur les autres planètes. C'est dans cet état d'ubiquité très particulier que se trouvent aujourd'hui les spécialistes du climat et de la météorologie. A la fois focalisés sur les circonvolutions de l'atmosphère terrestre et portant leurs regards vers des contrées aussi lointaines et exotiques que Vénus, Triton, Saturne, on ne sait plus trop s'ils sont climatologues ou astronomes. Jusqu'à là, c'était plutôt la Terre qui servait de base pour expliquer les extravagances des astres et les astronomes qui utilisaient les modèles des climatologues ; or, pour ces "astroclimatologues", c'est la fureur climatique des planètes et des lunes qui est maintenant appelée à la rescousse pour comprendre la température météorologique de la planète bleue. Ils y voient le seul moyen de dépasser le cas particulier, et d'atteindre l'objectif ultime : le modèle climatique planétaire universel, le seul apte à prédire l'avenir de la Terre.

Les pieds sur terre... car les modèles climatiques ont beau prendre en compte des effets toujours plus complexes, leur maillage toujours plus fin ont beau explorer dans les moindres détails le plus petit des tourbillons... ils n'en demeurent pas moins élaborés sur, pour et à partir du seul cas de la Terre. Une limite d'ailleurs brandie en étendard par ceux qui doutent de l'existence d'un réchauffement d'origine humaine : comment être sûr qu'un modèle est bon puisqu'il a été façonné pour décrire un cas particulier ? " Cette limite est d'autant plus cruciale dans le contexte du réchauffement climatique, convient François Forget, climatologue au laboratoire de météorologie dynamique de Paris. Pour prévoir un environnement différent, les modèles doivent s'affranchir de méthodes trop empiriques issues des observations actuelles, et se baser sur des équations physiques universelles. Il est donc utile de les appliquer aux autres planètes pour les valider. "

Or, les monceaux de mesures ramenées depuis trente ans par les dizaines de sondes spatiales qui ont observé dans leurs moindres détails les autres atmosphères du système solaire offrent

ce nouveau point de vue. Les climatologues l'ont adopté avec une méthode implacable : trouver chez les voisines de la Terre une variante extrême d'un phénomène dont il est difficile d'évaluer l'effet, l'intégrer ensuite comme une condition initiale au modèle et se livrer alors à des comparaisons. " Le système Terre est très complexe et l'effet de chaque phénomène peut être difficile à isoler, détaille ainsi Anni Määttänen, météorologue au Laboratoire atmosphères, milieux, observations spatiales, à Guyancourt. Sur les autres planètes un des effets peut dominer, on peut donc mieux le comprendre, et revenir appliquer ce qu'on a appris sur Terre. Et cela peut révéler des éléments négligés ou des théories trop simplifiées. " Nos astroclimatologues regardent donc les tornades qui s'enroulent sur le sol de Mars pour mieux comprendre la naissance des nuages, ils foulent la banquise de Triton pour prédire l'évaporation future de notre calotte glaciaire, ils plongent dans la fournaise vénusienne pour évaluer l'impact de la stratification de l'atmosphère, ils gravitent autour de Saturne pour comprendre le vortex de l'Antarctique, ils naviguent dans les fleuves de Titan pour tester le cycle de l'eau terrestre (voir modules).

LES RÉSULTATS SONT DÉJÀ LÀ...

Et les résultats commencent à tomber. " Il y a quelques semaines, le célèbre planétologue Bill Hartmann saluait la capacité des modèles climatiques à prédire la formation des glaciers martiens !, se félicite François Forget. Le même modèle marche pour Mars et pour la Terre, c'est signe qu'il est réaliste. " A l'inverse, " nous avons découvert que la théorie de condensation, souvent utilisée pour simuler les nuages sur Terre, n'est pas applicable aux nuages de CO₂ martiens, détaille Anni Määttänen. Cela montre qu'il y a quelque chose que nous n'avons pas encore compris. "

On se rappellera que cette démarche a déjà porté ses fruits : en 1982, c'est en voyant des poussières en suspension sur Mars absorber la lumière du Soleil que le célèbre Carl Sagan sut convaincre l'humanité de la menace d'un hiver nucléaire. Aujourd'hui, s'ajoute celle du réchauffement, qu'il s'agit d'établir et de prévoir. Et comme leur prédécesseur, les astroclimatologues ont à nouveau les yeux rivés sur les autres planètes. Avec les pieds bien sur Terre. La preuve en images dans les pages qui suivent.





TRITON

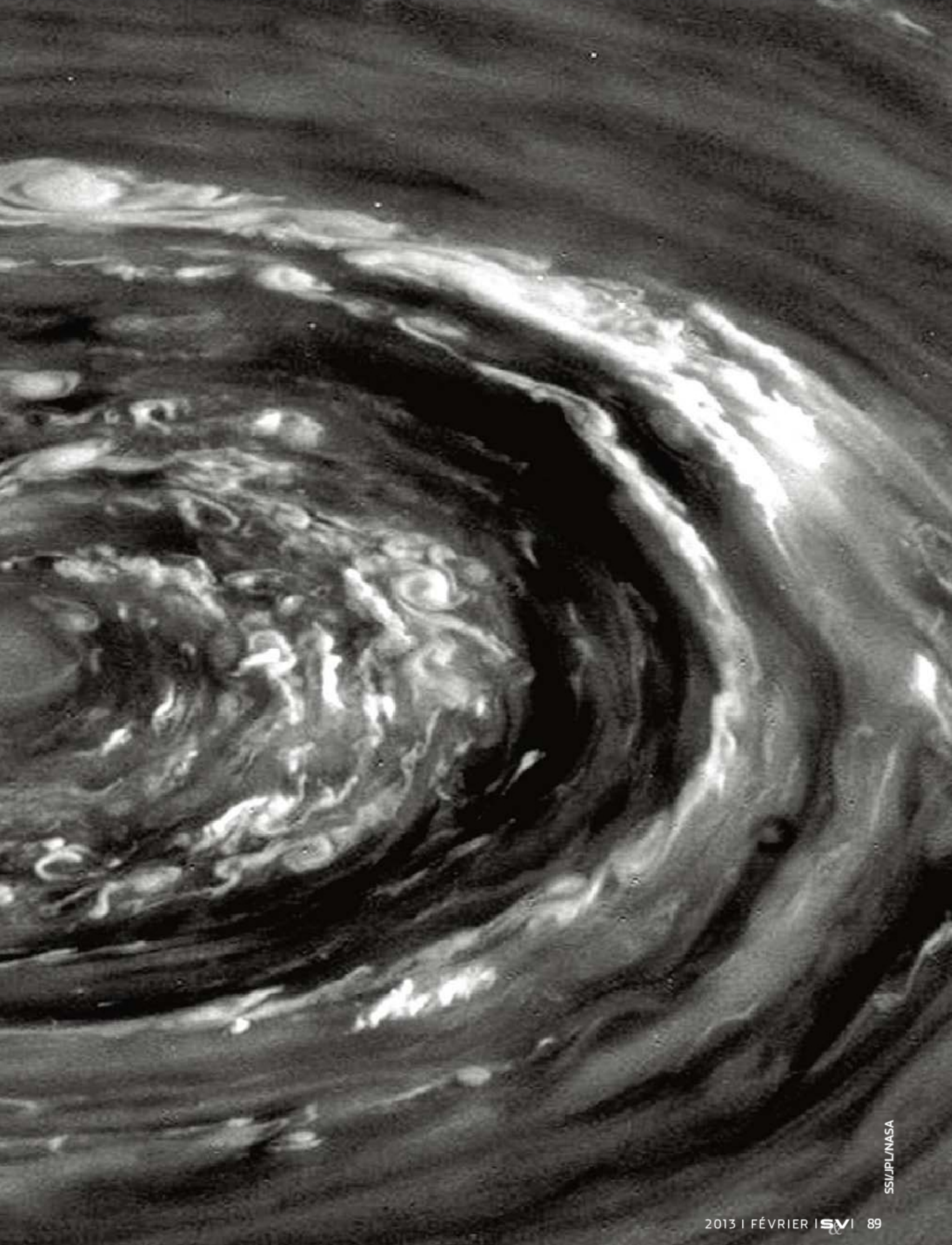
L'évaporation de sa calotte polaire préfigure les effets du réchauffement

Triton n'est même pas une planète... mais elle préfigure l'avenir de la Terre. Car ce petit corps glacé issu des confins du système solaire, cette insignifiante lune neptunienne possède une atmosphère et une calotte d'azote gelée qui ne cessent d'échanger de la matière... tout comme notre petite planète bleue. *"Sur Terre, l'évaporation de la calotte polaire peut contribuer à une augmentation de la pression atmosphérique, confirme François Forget, au Laboratoire de météorologie dynamique, à Paris. L'effet est aujourd'hui très léger mais, on sait qu'il ne va cesser de s'accroître à mesure que la quantité de dioxyde de carbone augmentera."* Aussi les climatologues se servent-ils déjà des mesures réalisées sur la petite lune pour calibrer leurs modèles de réchauffement et, surtout, en évaluer les résultats.

SATURNE

Son gigantesque vortex nourrit la théorie générale des tourbillons

Les climatologues avaient besoin d'un cyclone extrême pour améliorer leur théorie générale des tourbillons et modéliser précisément la circulation de l'atmosphère... et ils ont trouvé le monstre qu'ils cherchaient dans l'atmosphère de la géante aux anneaux. Ci-contre, sur cette incroyable image prise par la sonde *Cassini* le 27 novembre dernier, on voit seulement l'œil du cyclone et il couvre déjà 9 millions de kilomètres carrés : le pôle Nord de Saturne est pris dans un gigantesque tourbillon formé par des vents de 700 km/h, réplique, en plus intense, du vortex qui s'enroule au-dessus du pôle Sud de la Terre. Or, s'il se fait discret – il est quasi invisible sur les images des satellites – le vortex de la Terre est d'une importance cruciale sur le climat : il détermine les échanges de chaleur entre la région polaire et tout le reste du globe. En s'appuyant sur les données collectées sur Saturne, Aymeric Spiga, au Laboratoire de météorologie dynamique, à Paris, est en train, pour la première fois, d'en modéliser le climat global dans l'espoir qu'en reproduisant son gigantesque vortex il comprenne enfin son petit frère terrestre.



VÉNUS

Ces conditions climatiques extrêmes révèlent des phénomènes mal connus

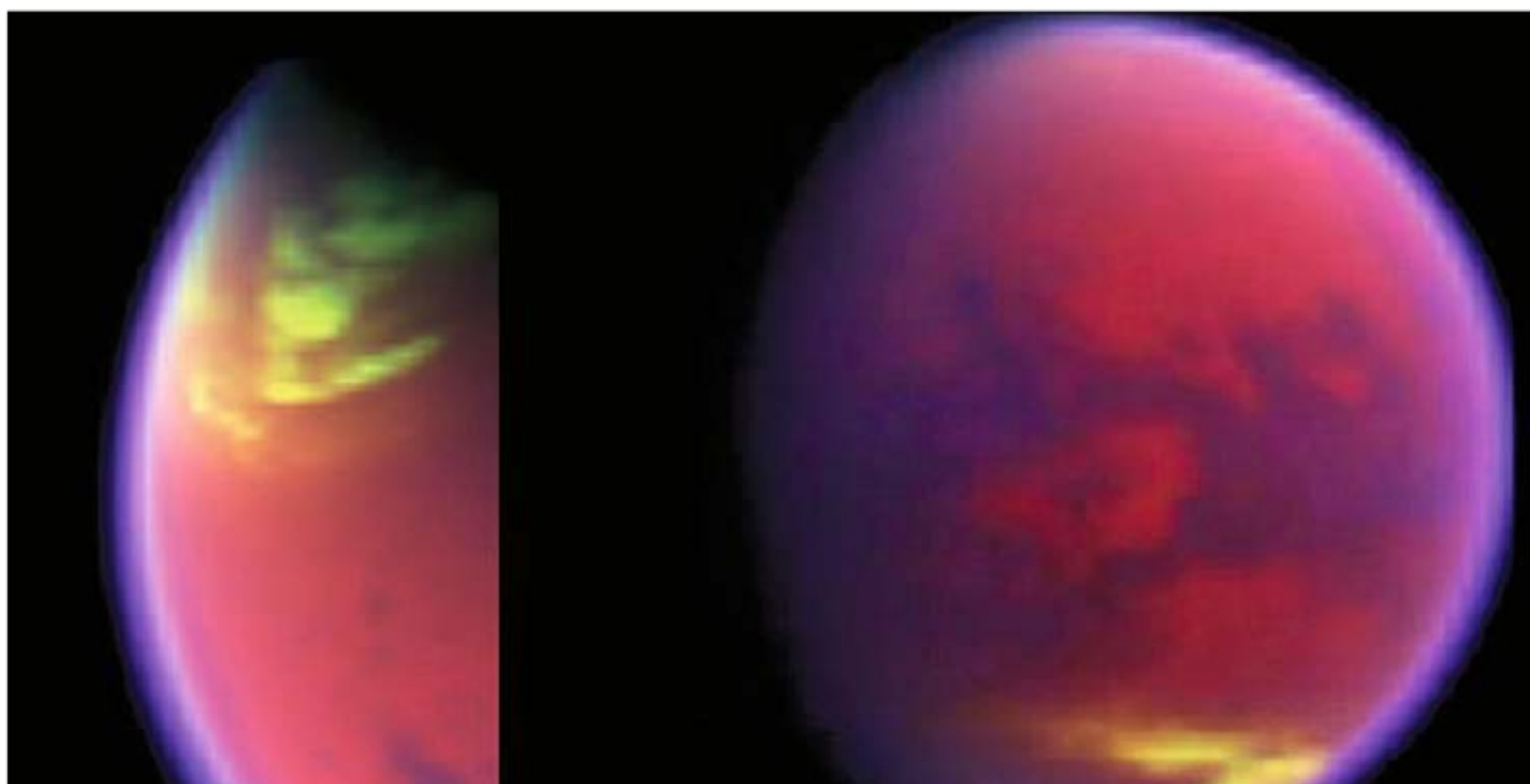
Vénus est à la fois un cauchemar et une aubaine pour climatologues : 93 bars de pression, 470 °C en surface, des nuages géants d'acide sulfurique et des vents de plusieurs centaines de kilomètres par heure qui font le tour de la planète plus vite qu'elle ne tourne sur elle-même... Vénus est un monstre climatique, idéal pour les simulations. *"Les modèles terrestres qui, tous, donnent à peu près le même résultat lorsqu'ils sont appliqués à la Terre, conduisent à des solutions différentes appliqués à Vénus, ce qui, nous permet de révéler certains défauts"*, explique François Forget, au Laboratoire de météorologie dynamique (LMD), à Paris. En rendant visibles des effets qui sur Terre seraient noyés dans la masse des complexes rétractions du climat, les conditions de la petite planète permettent de s'attaquer aux petites causes qui pourraient avoir de grands effets... comme la stratification de l'atmosphère.

MSSS/JPL/NASA - OBS. DE PARIS, VIRTIS-VENUS X IASF-INAF/ESA
UNIV. PARIS DIDEROT/UNIV. OF NANTES/UNIV. ARIZONA/JPL/NASA

MARS

Ses petites tornades de poussières expliquent la formation des nuages

Mars est le laboratoire idéal pour étudier les mouvements de l'atmosphère. Du contraste entre son air sec et froid et son sol chauffé par le Soleil naissent en permanence des tourbillons de poussières. De petites tornades tellement généralisées qu'elles ont été vues par toutes les sondes qui ont approché la planète rouge depuis *Viking Orbiter*, en 1978... Au point que comme l'indique Aymeric Spiga, au Laboratoire de météorologie dynamique (LMD), à Paris, *"le phénomène est bien mieux documenté sur Mars que sur Terre!"* Une chance car justement, ces circonvolutions d'air sont une illustration extrême de l'un des phénomènes les plus difficiles à modéliser : ce mouvement d'air de bas en haut qu'on appelle convection. *"Parce qu'elle est à l'origine de la formation des nuages, la convection est une problématique centrale pour le développement des modèles climatiques fiables"*, ajoute le chercheur. Et à l'aide des données martiennes, les climatologues espèrent le reproduire avec plus d'exactitude.



TITAN

Son méthane confirme le cycle de l'eau

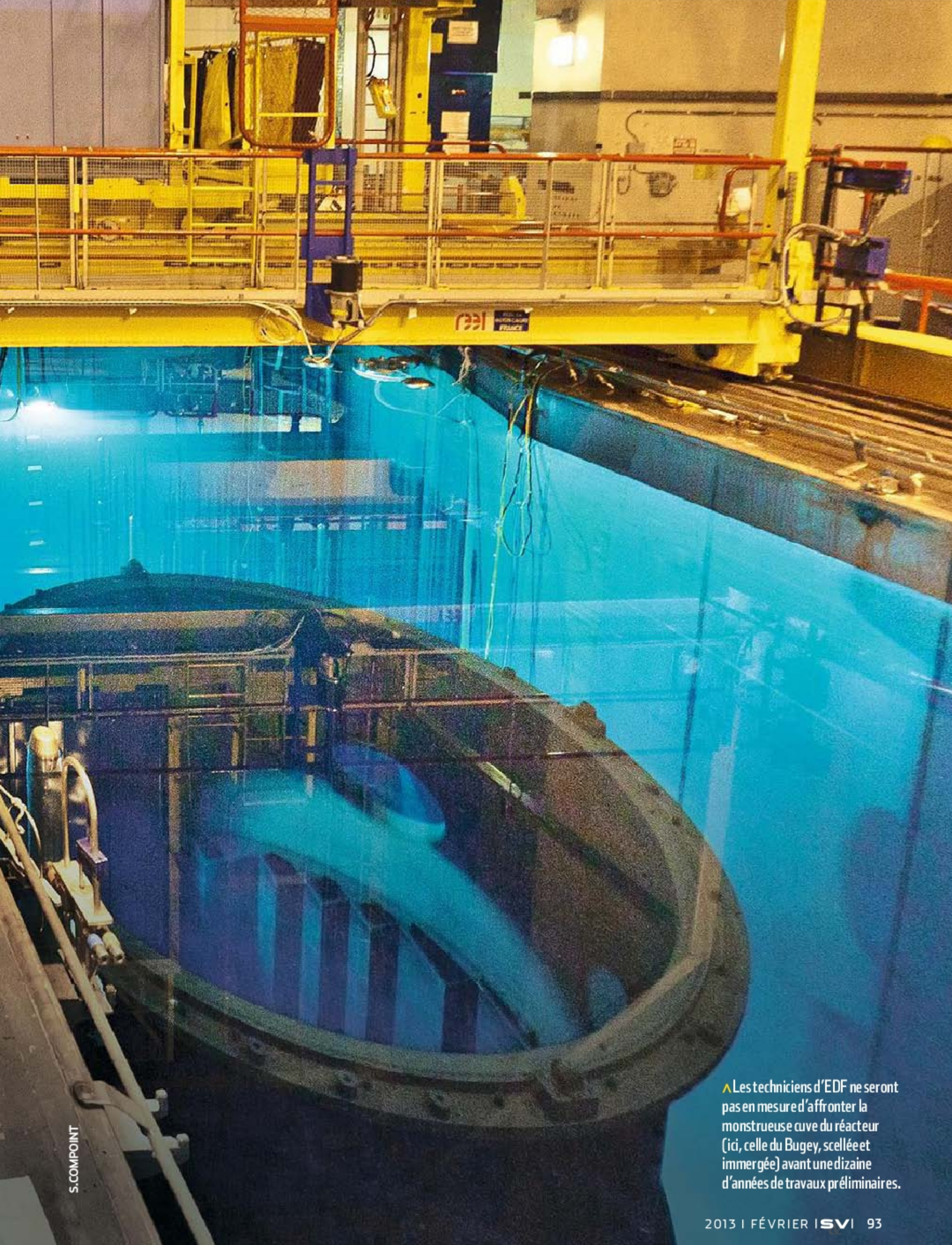
"Notre prédiction du climat de Titan avec un modèle initialement conçu pour la Terre est l'un des plus grands succès de la climatologie!", assène François Forget, du laboratoire de météorologie dynamique (LMD), à Paris. Des fleuves, des lacs, de la pluie, des nuages... à peine avait-on découvert les paysages de cette énorme lune qui gravite autour de Saturne via les caméras de la sonde *Cassini* qu'on l'avait qualifiée de jumelle de la Terre. *"A ceci près qu'à la place de l'eau, sur Titan, il pleut du méthane"*, précise Sébastien Lebonnois, au LMD. *Les deux cycles sont très ressemblants, mais ils présentent des schémas différents."* Aussi les climatologues ont-ils eu l'idée de tester leurs modèles terrestres sur Titan... Bien leur en a pris: ils ont prédit la naissance de nuages avant même qu'ils n'apparaissent sur les détecteurs de *Cassini*.

DÉMANTÈLEMENT NUCLÉAIRE

MAIS COMMENT EDF VA S'Y PRENDRE ?

Le compte à rebours est lancé : après que le président Hollande a annoncé la fermeture de la centrale de Fessenheim en 2016, EDF doit dès cette année proposer un plan concret de démontage. Car le démantèlement d'une centrale nucléaire demande un maximum de préparation. Or, jusqu'ici, l'opérateur français n'a jamais mené à bien pareil chantier...

PAR VINCENT NOUYRIGAT



▲ Les techniciens d'EDF ne seront pas en mesure d'affronter la monstrueuse cuve du réacteur (ici, celle du Bugey, scellée et immergée) avant une dizaine d'années de travaux préliminaires.

V

endredi 14 septembre 2012, la sentence est tombée comme un couperet sur la tête de l'électricien EDF: "La centrale de Fessenheim, qui est la plus ancienne de notre parc, sera fermée à la fin de l'année 2016." Une décision prononcée par le président de la République François Hollande en personne, lors de son discours d'ouverture de la Conférence environnementale, où devait se discuter la baisse drastique de la part du nucléaire dans notre mix énergétique.

Fermer une centrale nucléaire encore vaillante, en France, pays de l'atome roi? L'annonce, historique, n'a pas manqué de provoquer une furieuse levée de boucliers ni de soulever d'épineuses questions juridiques. "Il s'agit d'une déclaration politique, aucune décision administrative n'a encore été prise", se borne-t-on à répéter pour l'instant chez EDF, dans un mélange de sentiment d'injustice et de déni. Sauf que ces tergiversations ne pourront plus durer! La réglementation nucléaire française est en effet implacable: "Trois ans avant

FESSENHEIM, PREMIER DE LA LISTE

Les deux réacteurs situés dans le Haut-Rhin devront s'arrêter avant fin 2016. Et seront ensuite démantelés. Une opération délicate qui attend tôt ou tard les 56 autres réacteurs français.

l'arrêt définitif d'un réacteur, l'exploitant doit nous livrer les modalités générales de son démantèlement, modalités qui devront ensuite être considérablement détaillées", énonce Anne-Cécile Jouve, chargée du démantèlement à l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN).

Le calcul est dès lors vite fait: la date limite de fermeture annoncée de Fessenheim étant fixée au samedi 31 décembre 2016, l'opérateur est donc sommé de présenter dès cette

année les grandes lignes du démontage de ses deux réacteurs à eau sous pression. EDF n'aura bientôt plus le choix, sachant que cette opération est destinée à servir d'exemple: ce démantèlement sera le premier d'une longue cohorte qui concerne les 56 autres unités en marche disséminées dans l'Hexagone, toutes à peu près coulées dans le même moule et vouées à fermer à plus ou moins court terme.

VOICI EDF AU PIED DU MUR

Mais l'électricien français sait-il seulement comment s'y prendre? La question peut surprendre s'agissant du plus puissant acteur du nucléaire mondial. Il faut pourtant savoir

LES 5 ÉTAPES D'UN CHANTIER D'AU MOINS 20 ANS

1. Mise à l'arrêt

Déchargement du combustible, vidange des circuits

3 ans

2. Premiers démontages

Démontage des parties annexes, retrait des câbles électriques

8 ans





QUEL IMPACT POUR LE RÉSEAU ÉLECTRIQUE ?

La fermeture d'une centrale nucléaire n'est pas anodine pour le réseau électrique. Concernant la disparition de Fessenheim, les études d'impact publiées en novembre dernier par le Réseau de transport d'électricité (RTE) sont même assez inquiétantes : plus encore que la perte de 1800 MW (soit 1,4 % de la production électrique française), le problème vient du rôle essentiel que tiennent

ces deux réacteurs dans la maîtrise des flux de courant et de la stabilité de la tension dans la région. Sans Fessenheim, des surcharges fatales risquent de se multiplier sur les lignes... jusque dans les Alpes. Ce qui nécessiterait de nouvelles lignes, de nouveaux transformateurs, condensateurs... Autant de mesures qui, selon RTE, doivent être planifiées dès aujourd'hui.

que la fin de vie des réacteurs a longtemps été négligée. Cette étape était même devenue si nébuleuse, quasi fantasmagorique, que nombre d'associations antinucléaires ont dénoncé l'impossibilité du démantèlement... *"Tandis que les pro-nucléaires agitaient ce même argument pour s'opposer à la fermeture prématurée du réacteur Superphénix"*, se souvient Roland Desbordes, président de la Commission de recherche et d'information indépendantes sur la radioactivité (Criirad).

N'allez surtout pas imaginer démolir ce genre de bâtiment à l'explosif, comme une vulgaire barre d'immeubles, sous peine de soulever un nuage

méchamment radioactif. Au vrai, le démantèlement d'une centrale exige de pénétrer jusque dans les recoins les plus obscurs et mortels du monstre contaminé pour en scier, dévisser, démonter pièce

en cobalt de certains composants du circuit nucléaire ont produit, sous irradiation, un puissant radionucléide, le cobalt-60, problématique pour le démantèlement". Le choix des matériaux aurait pu être plus judicieux, et le tracé des circuits moins propice aux dépôts crouissants de radioactivité ; surtout, la question du démontage serait restée moins confuse si, une fois les réacteurs en marche, l'électricien n'avait cessé de la repousser à plus tard, sans vraiment oser l'affronter.

Dans les années 1980, EDF indiquait ainsi que ses réacteurs, à l'heure de la retraite, seraient scellés et gardés vingt-cinq à cinquante ans, pour →

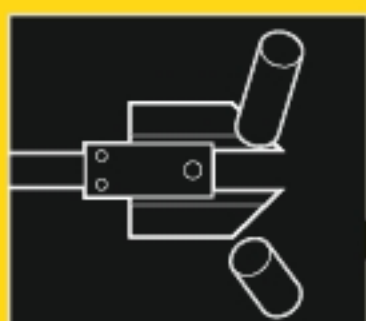
PROBLÈME : LES CENTRALES N'ONT PAS ÉTÉ CONÇUES POUR ÊTRE DÉMONTÉES...

par pièce chaque composant. Or, la conception même des réacteurs n'a guère été pensée pour faciliter un tel démontage en toute sécurité. Pierre Bacher, ex-directeur technique d'EDF chargé dans les années 1970 de bâtir la centrale de Fessenheim, reconnaît que *"les revêtements*

M. KONTENTE - G. UZAN/CAMMA

3. Démantèlement du cœur nucléaire

Découpe des circuits et des gros composants hautement radioactifs



16 ans

4. Assainissement des bâtiments

Arasage des parties en béton contaminé



18 ans

5. Destruction finale

Démolition classique du bâtiment, éventuelle réhabilitation du site



→ être ensuite dépecés en profitant de la décroissance radioactive (notamment du cobalt-60). Ce qui faisait peser la responsabilité de la besogne sur les générations futures, *“sans parler des risques de vols de matériaux, comme sur une banale friche industrielle”*, souligne Monique Sené, fondatrice du Groupement des scientifiques pour l'information sur l'énergie nucléaire (GSIEN).

UN CHANGEMENT DE DOCTRINE

Les installations déjà arrêtées – réacteurs de première génération, prototypes, installations de recherche – ont ainsi été entretenues dans ce grand flou. Il aura fallu attendre 2001 pour que l'électricien établisse enfin une doctrine ferme et lisible : à savoir, un démantèlement cette fois immédiat, ou selon la formule consacrée dans les *“délais aussi courts que possible”*, après la mise à l'arrêt. D'où l'urgence actuelle pour EDF !

Comment expliquer ce revirement ? *“Au tournant des années 2000, il y avait une forte attente pour voir disparaître la vieille centrale de Brennilis, plantée au milieu du parc naturel régional d'Armorique, raconte Alain Ensuke, directeur*

du Centre d'ingénierie de déconstruction et environnement (Ciden), un bureau d'études d'EDF dédié au démantèlement et créé justement en 2001. En même temps, une première étude tendait à montrer que le démantèlement immédiat, même s'il obligeait à côtoyer une radioactivité plus intense, n'était pas beaucoup plus cher qu'une mise sous scellés pendant deux décennies, tout en étant techniquement faisable avec l'apport des robots.”

Depuis, les 570 ingénieurs et techniciens du Ciden se focalisent sur le démontage, souvent très laborieux, des premiers bâtiments de ces vieux réacteurs fermés dans l'anonymat et l'indécision il y a plusieurs décennies (voir l'encadré ci-dessous). De quoi laisser quelques regrets. Car intervenir immédiatement présente beaucoup d'avantages, comme celui d'éviter les risques liés à la corrosion de certaines structures. Cette stratégie permet aussi de recueillir sur le vif le témoignage des anciens employés de la centrale. Objectif ? Retracer l'histoire des petits incidents qui ont émaillé la vie du réacteur sans forcément avoir été consignés : telle



fuite d'effluents jamais nettoyée ; telle tache suspecte liée à l'entreposage d'un déchet ou, complète Alain Ensuke, *“cet incendie dont les fumées ont pu contaminer, via les gaines de ventilation, une salle située à l'autre bout de la centrale”*.

Ce haut responsable d'EDF insiste : *“Pour s'approprier une installation, et éviter les mauvaises surprises, l'expérience montre qu'il nous faut faire*

CES DÉMANTÈLEMENTS QUI N'EN FINISSENT PAS...



Fermés dans les années 1980-1990, neuf réacteurs EDF de première génération n'en sont toujours qu'aux premiers stades de leur démantèlement. Les raisons de ce blocage vont de l'imbroglio administratif aux difficultés techniques propres à certaines technologies, en passant par les retards de

construction du centre d'entreposage des déchets radioactifs à vie longue, au Bugey (Ain).

Le cas du petit réacteur à eau lourde de Brennilis (Finistère), stoppé en 1985, est emblématique (photo). Après avoir obtenu un feu vert réglementaire en 1996, les travaux ont plusieurs fois été interrompus : décisions

administratives pour des manquements divers et variés, incendie, inondation...

Autre épine dans le pied d'EDF : les vieux réacteurs graphite-gaz de Saint-Laurent, Chinon et Bugey, aux cœurs nucléaires particulièrement volumineux et complexes. *“Au vu des difficultés techniques, nous ne*



LE RETOUR D'EXPÉRIENCE DE CHOOZ

EDF profite du démantèlement en cours du réacteur Chooz A, dans les Ardennes, pour s'exercer : il s'agit en effet de l'ancêtre des réacteurs à eau sous pression du parc nucléaire français.

appel à tous ces souvenirs.

Autant de témoignages qui seront croisés avec une batterie de prises d'échantillons sur les murs des réacteurs, de mesures d'émissions gamma ou l'historique des flux de neutrons au

commencerons à les démonter qu'à partir de 2022, opération qui prendra de sept à dix ans", souffle Philippe Bernet, d'EDF. Pendant ce temps, à Creys-Malville (Isère), les techniciens s'affairent à vidanger les 5520 tonnes de sodium qui circulaient dans Superphénix : le sodium s'enflammant à l'air et explosant au

contact de l'eau, l'opération, très délicate, se déroule au goutte-à-goutte. Or, confie Alain Ensuke, du bureau d'étude d'EDF, "nous avons eu la mauvaise surprise de découvrir que le sodium s'était solidifié à certains endroits du circuit". Ce problème est réglé, mais le clap de fin sur ce réacteur n'est pas attendu avant 2028.

sein du réacteur. Un état des lieux très poussé qui pourrait prendre deux ans. Et un préalable indispensable pour pouvoir décider s'il est plus prudent, à tel ou tel endroit, d'envoyer au front un robot plutôt qu'un homme, leur combinaison intégrale étant impuissante à stopper, par exemple, les rayons gamma.

Préparation, calcul, analyse de risque : "Le démantèlement nucléaire n'est pas une entreprise de démolition, mais une opération aussi méthodique que la construction d'une centrale, insiste Alain Ensuke. Chaque réacteur nécessite pas moins de cinq années d'étude pour déterminer la meilleure trajectoire de 'déconstruction'. Le mouvement général étant toujours de s'approcher pas à pas du cœur nucléaire." Un chantier de longue haleine qui devrait durer, dans le cas de Fessenheim, entre quinze et vingt ans. Soit deux décennies sous le feu des projecteurs

pour ce démantèlement pilote, et des millions d'heures de travail scrutées par les autorités de contrôle. Sachant que, avertit Anne-Cécile Jouve de l'IRSN, "le principal danger sur ces chantiers, où interviennent des outils de découpe, est l'incendie susceptible de propager des fumées radioactives vers l'extérieur." EDF n'aura pas le droit à l'erreur... Et le calendrier presse.

UNE LENTE PROGRESSION...

Cela dit, l'électricien français ne part pas totalement de zéro. Ne serait-ce que parce que "ses 58 réacteurs ont subi des chantiers de maintenance poussée, lors desquels de gros composants ont pu être démontés et retirés", observe Thierry Charles, chargé de la sûreté nucléaire à l'IRSN. Par ailleurs, même si seuls 17 réacteurs nucléaires, de technologies certes très disparates, ont été entièrement liquidés dans le monde, toutes sortes de techniques de découpe de matériaux dans des conditions dantesques ont pu y être testées. Enfin, et surtout, EDF bénéficie actuellement d'un prototype idéal avec le démantèlement en cours du réacteur de Chooz A (Ardennes), premier réacteur français à eau sous pression, arrêté en 1991. En dépit d'une puissance trois fois inférieure à celle des réacteurs actuels, et donc des composants moins volumineux, ce chantier entamé il y a cinq ans présente tout l'éventail des difficultés techniques propres à ces réacteurs. Comme un avant-goût de la disparition de Fessenheim...

Quel est donc le plan d'EDF ? Selon le bureau d'études de l'opérateur, la toute première action consistera à retirer les barres de combustible brûlant du cœur du réacteur pour →

DES PRÉPARATIFS À HAUT RISQUE



LA DÉCOUPE

A ce stade, le principal risque est la dispersion des poussières radioactives : les ouvriers sont protégés, les salles maintenues en dépression.

→ les envoyer refroidir en piscine dans un bâtiment annexe, avant de les expédier à l'usine de retraitement de la Hague. Cette seule opération, ajoutée à la vidange de l'eau du circuit nucléaire, permettrait de se débarrasser de 99,9 % de la radioactivité totale ! Oui, mais le 0,1 % restant suffit, à lui seul, à justifier les précautions les plus draconiennes.

... VERS LE CŒUR RADIOACTIF

Le circuit nucléaire, en l'occurrence, reste encrassé par des dépôts de poussières radioactives. Ces particules proviennent de l'effritement des alliages des différents composants ou tuyaux ; charriées par le flux, ces particules métalliques (cobalt, nickel, argent) ont été rendues radioactives au moment de leur passage dans le cœur du réacteur sous l'effet du bombardement neutronique. Cette pollution nécessiterait

au moins un rinçage en bonne et due forme. *"Hélas, les opérateurs de Chooz A n'ont pas pris cette précaution au moment de l'arrêt du réacteur, il y a vingt ans, si bien que la contamination s'est incrustée depuis"*, regrette Philippe Bernet, directeur adjoint du Ciden. Il apparaît donc encore une fois que l'impréparation du démantèlement complique la donne.

On l'aura compris : si les câbles électriques ou les équipements logés dans des bâtiments annexes se laissent aisément tailler en pièces, il en va autrement du circuit nucléaire... aussi monumental qu'irradiant. Déconnecter ses plus gros organes, comme le générateur de vapeur, un échangeur de chaleur aux 1670 tubes encrassés de poussière toxique, demande une bonne dose de dextérité et de sang-froid : *"Les techniciens, en combinaison intégrale, s'entraînent sur des*

Le démontage d'une centrale prend tout son caractère dramatique au moment d'aborder le circuit nucléaire. Ses organes, ayant accueilli l'eau de refroidissement du combustible en fission, sont hautement contaminés.



maquettes pour placer au plus vite la scie circulaire sur le tuyau à sectionner", dévoile Estelle Obert, responsable du démantèlement de Chooz A. Ces composants de 115 tonnes et 15 m de hauteur une fois libérés doivent être soulevés et évacués. *"Notre toute première tentative, en 2011, s'est soldée par un échec, à la suite d'un calcul erroné de quelques centimètres du centre de gravité de l'engin"*, témoigne Philippe Bernet. Depuis, les quatre générateurs de Chooz A ont été déposés sans encombre.

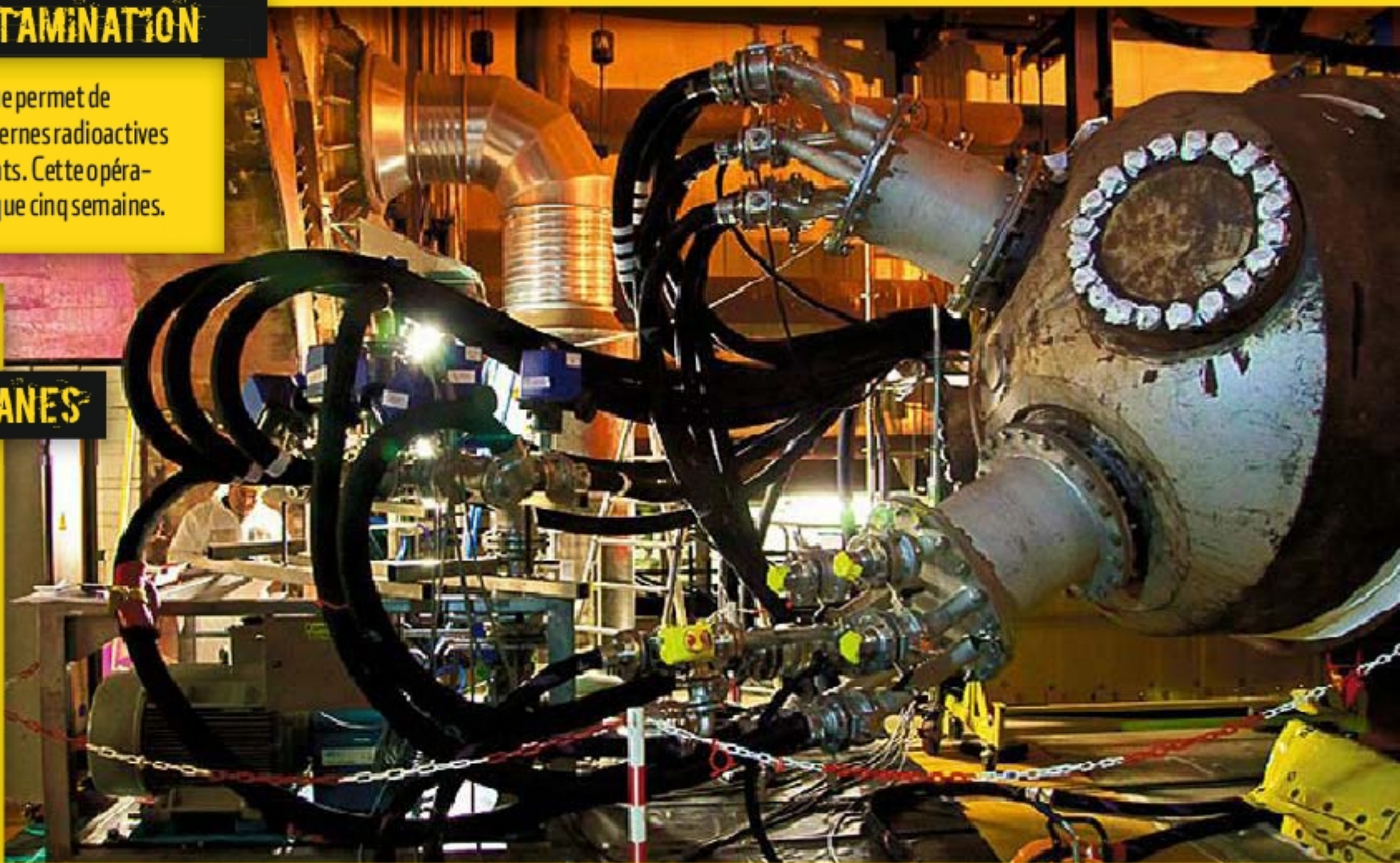
Problème : aucun centre de déchets ne peut décemment recevoir ces mastodontes aux entrailles si radioactives. Mais une solution vient d'être expérimentée : *"Nous injectons une solution chimique, portée à 90 °C, qui arrache par oxydo-réduction la couche*

LA DÉCONTAMINATION

Une solution chimique permet de décapier les parois internes radioactives des grands composants. Cette opération s'étend sur quelque cinq semaines.

L'EXTRACTION DES GROS ORGANES

Ces grands composants contaminés, affichant souvent plus de 300 tonnes, sont séparés du circuit avec mille précautions. À l'image, ici, du monumental générateur de vapeur – un échangeur de chaleur – qui doit être levé et déplacé au centimètre près, sous peine de le voir basculer dans le vide.



superficielle de métal polluée, explique Estelle Obert. Résultat, au bout de cinq semaines de traitement, la contamination est réduite d'un facteur mille." Suffisant pour que les ouvriers puissent s'approcher de la bête.

Pour autant, le danger n'aura pas totalement disparu : en effet, une centaine de tuyaux échappent à ce décapage chimique pour la bonne raison qu'ils ont été solidement bouchés à la suite de fuites ou de fissures datant de l'exploitation de la centrale. Le diable du démantèlement se loge dans d'insoupçonnés détails... "Chacun sait qu'il est beaucoup plus facile de planter une cheville dans le mur que de la retirer : eh bien, nos agents ont parfois mis plusieurs semaines pour retirer, en tenue étanche, certains bouchons récalcitrants", raconte Estelle Obert. Ces derniers

tubes seront donc décapés par un violent sablage. "Cette manœuvre a l'avantage de s'épargner le périlleux découpage des gros composants, tout en concentrant la radioactivité dans des effluents dont le traitement ne cause pas de difficulté", souligne Bruno Cahen, directeur industriel de l'Agence nationale pour la gestion des

EN COMBINAISON INTÉGRALE, LES TECHNICIENS DOIVENT S'ENTRAÎNER À AGIR VITE

déchets radioactifs (Andra). Jusqu'ici, tout va bien...

Oui mais jusqu'ici, les hommes d'EDF ne se sont pas encore frottés au principal problème, autant dire l'Himalaya de la déconstruction : la cuve. Soit le cœur du réacteur, où se sont précisément déroulées les réactions de fission, durant près de quarante ans dans le cas des

deux réacteurs de Fessenheim. Imaginez, en guise de boîte de Pandore, une marmite de près de 180 tonnes, encastrée tout au fond d'une piscine, le plus loin possible des humains, et dont les épaisses parois et l'équipement interne ne peuvent être abordés que par des robots. Au passage, précisons qu'un exploitant de centrale nucléaire préférera toujours fermer pour de bon un réacteur, plutôt que de devoir changer sa cuve défectueuse, tant l'opération apparaît complexe et coûteuse. Alors, que peut faire EDF des deux chaudières atomiques de la centrale alsacienne ?

"A Chooz A, nous avons pour l'instant seulement préparé la cuve du circuit principal, indique Estelle Obert. Ce ne fut déjà pas une mince affaire : près d'un mois et demi a été nécessaire pour sectionner huit conduits que les architectes n'avaient pas songé →

→ à rendre accessibles”, l’endroit étant, il est vrai, peu fréquentable. Ensuite ? “Ensuite”, répond Philippe Bernet, nous avons établi un scénario détaillé, dont l’idée principale consiste à noyer la cuve sous une forte profondeur d’eau afin de protéger les opérateurs des radiations, tout en piégeant les poussières lors des opérations de découpe. Une technique qui a déjà été éprouvée, notamment sur un réacteur suédois.”

CONVAINCANT SUR LE PAPIER

Le sort de la cuve de Chooz A devrait être réglé vers 2019, “quand elle aura été cisailée en 127 morceaux en forme d’écailles de tortue, répartis dans des colis plombés”, s’amuse Estelle Obert. Voilà donc les plans d’EDF, révélés avec un niveau de détail inédit (voir l’infographie, ci-contre). Ensuite, après les vaisseaux sanguins, les grands organes et le cœur, il ne restera plus qu’à ronger le squelette du bâtiment du réacteur. Ou, plus exactement, à assainir sols, murs et plafonds ayant été en contact avec des éléments radioactifs.

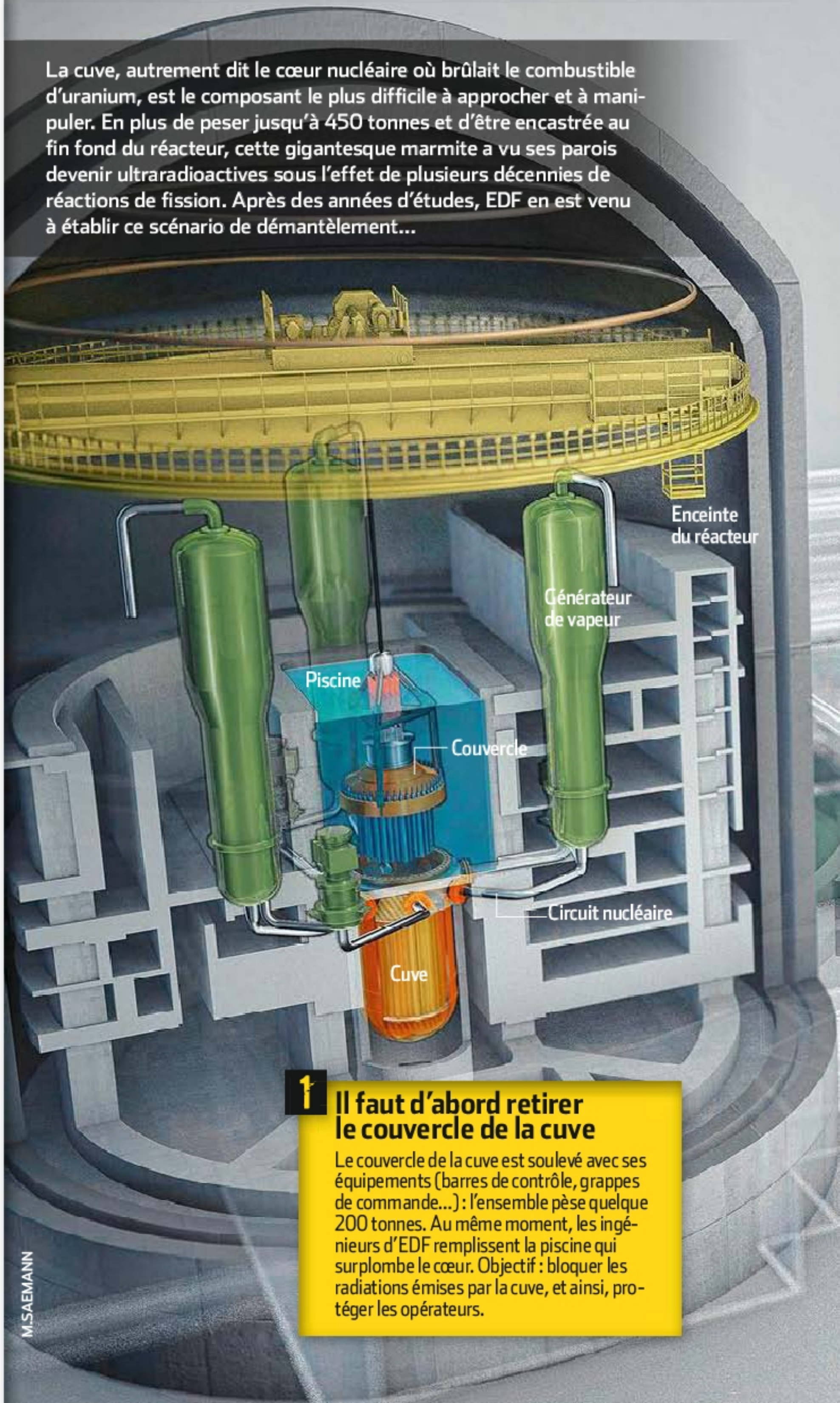
De manière générale, la vitesse de migration des radioéléments au sein des matériaux est difficile à calculer. S’il suffit parfois d’un coup de chiffon humide, il faut souvent utiliser une fraiseuse ou un câble diamanté afin de retirer 2,5 cm d’épaisseur de béton d’un plancher sur lequel un effluent aurait été versé, voire jusqu’à 35 cm pour les structures les plus proches de la cuve. Une fois nettoyée, la centrale perdra son statut d’installation nucléaire pour devenir... un bâtiment comme un autre.

Sur le papier, ce scénario général paraît assez convaincant. Même si, “dans la pratique, →

DÉMANTÈLEMENT NUCLÉAIRE

LE DÉFI DU DÉMONTAGE DE LA CUVE

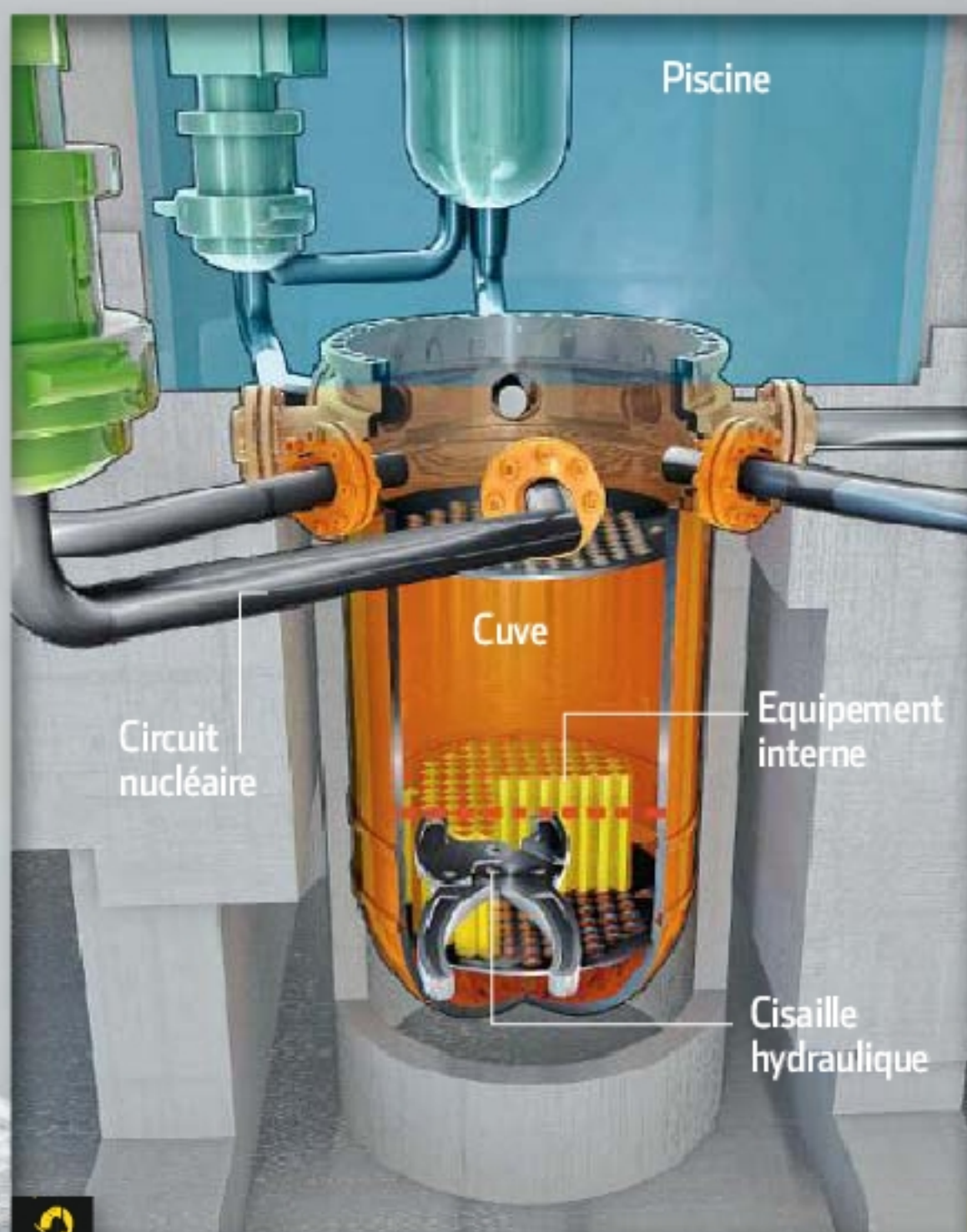
La cuve, autrement dit le cœur nucléaire où brûlait le combustible d’uranium, est le composant le plus difficile à approcher et à manipuler. En plus de peser jusqu’à 450 tonnes et d’être encastrée au fin fond du réacteur, cette gigantesque marmite a vu ses parois devenir ultraradioactives sous l’effet de plusieurs décennies de réactions de fission. Après des années d’études, EDF en est venu à établir ce scénario de démantèlement...



1

Il faut d’abord retirer le couvercle de la cuve

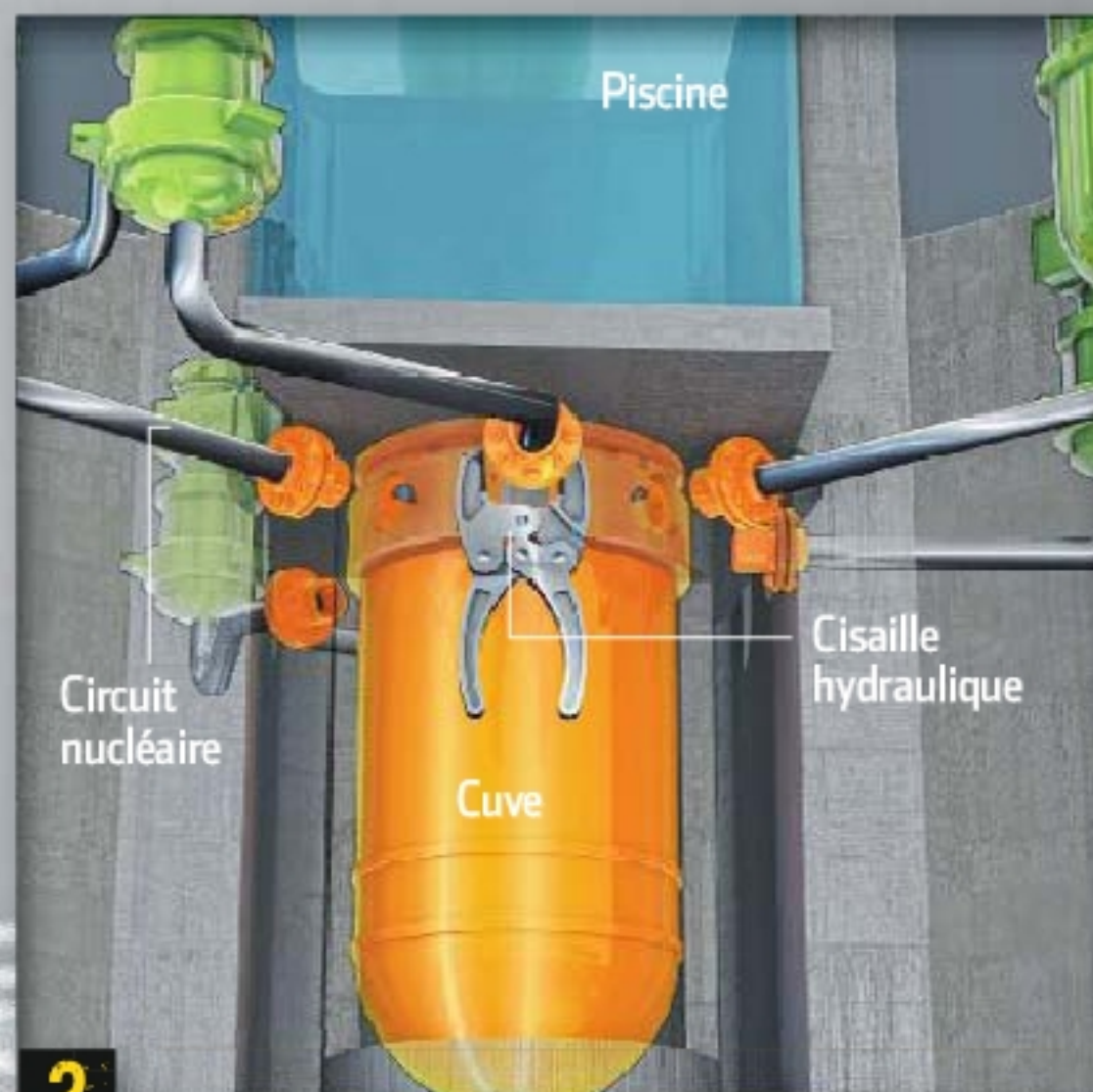
Le couvercle de la cuve est soulevé avec ses équipements (barres de contrôle, grappes de commande...) : l’ensemble pèse quelque 200 tonnes. Au même moment, les ingénieurs d’EDF remplissent la piscine qui surplombe le cœur. Objectif : bloquer les radiations émises par la cuve, et ainsi, protéger les opérateurs.



2

Un robot découpe l'équipement interne de la cuve...

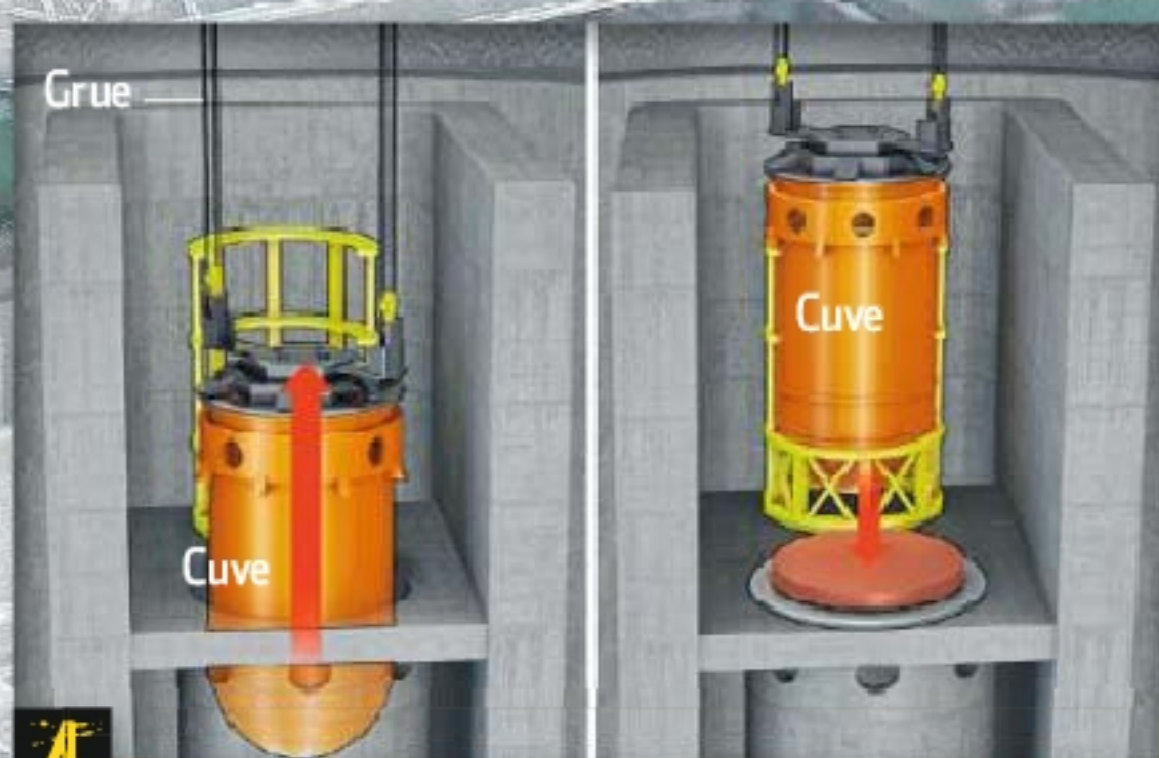
Un bras robotisé, armé d'une cisaille hydraulique, vient dépecer les équipements internes de la cuve. Ces structures, qui servaient à maintenir en place les barres de combustible, sont particulièrement enchevêtrées et radioactives.



3

... qui est ensuite désolidarisée du circuit nucléaire...

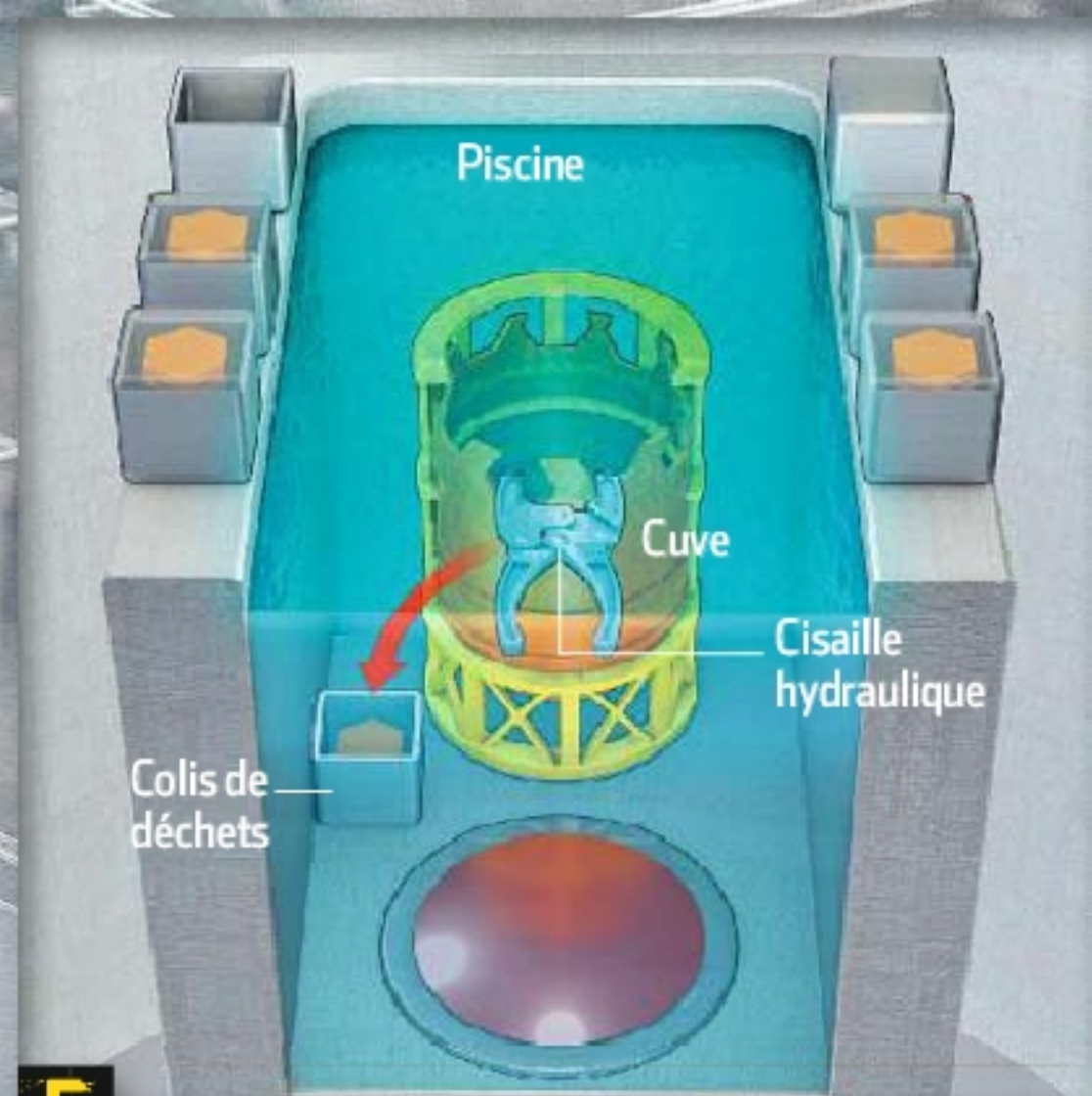
Pour désolidariser la cuve du reste du circuit nucléaire, les hommes d'EDF doivent se rendre dans les bas-fonds du réacteur, sous le plancher de la piscine. Le découpage de ces six épais tuyaux s'opère dans un endroit difficilement accessible et très contaminé.



4

... extraite de son logement...

Une fois libérée de ses liens, la monumentale cuve va être soulevée par une grue et déposée à côté, dans un "atelier" aménagé au fond de la piscine. Une opération à laquelle les opérateurs assistent de très loin: en effet, la manœuvre doit se dérouler à sec – c'est-à-dire sans la protection fournie par l'eau –, le temps que la piscine soit hermétiquement refermée.



5

... et enfin taillée en morceaux

Une fois la piscine de nouveau remplie, l'électricien envoie ses outils robotisés découper la cuve posée au fond de la piscine. Opérer sous l'eau évite la dispersion des poussières contaminées, tout en protégeant les opérateurs des radiations de la cuve. Si tout se passe bien, la cuve sera réduite en 127 morceaux, jetés ensuite dans des colis de plomb.

LE PROBLÈME DES DÉCHETS



LES SOLIS

Béton, aciers et câbles radioactifs sont classés en fonction de leur degré de virulence. Ils sont ensuite emballés ou placés dans des fûts hermétiques.

Réglementairement, EDF ne peut débuter aucun démontage sans avoir réglé la question, toujours en suspens, des déchets radioactifs...



→ conteste Roland Desbordes, du Criirad, *EDF se trouvera confronté à de nombreux imprévus et mauvaises surprises*. Quant à Thierry Charles, représentant du gendarme nucléaire, il note de son côté que *“les démantèlements déjà menés à l'étranger montrent qu'il n'y a rien de techniquement insurmontable”*. En tout cas, la technologie de réacteur à eau sous pression (REP) utilisée sur le parc français semble se prêter plus volontiers à la déconstruction que les autres procédés à graphite-gaz... sans parler des ateliers de retraitement du combustible à la Hague, absolument impénétrables!

Le réacteur REP américain de Maine Yankee a ainsi été éliminé en moins de dix ans, devant des ingénieurs d'EDF ébahis. Une performance que la rigueur des procédures

françaises rend inenvisageable à Fessenheim. Quant aux cinq réacteurs de la centrale allemande de Greifswald, *“leurs cuves ont toutes été retirées, annonce Gudrun Oldenburg, de l'entreprise de démantèlement EWN. Même si cela a été un défi technique et logistique, et que certaines situations*

IL NE FAUT PAS S'ATTENDRE, À CE QU'UN SITE DÉMANTÉLÉ DEVIENNE UNE VERTE PRAIRIE

nous ont obligés à revoir nos calculs.” De là à présenter l'élimination des 58 réacteurs français comme une simple formalité, *“il faut se garder de toute extrapolation brutale, chacune de ces unités ayant de plus ses caractéristiques propres”,*

rétablit Alain Ensuke, du Ciden. Une chose est sûre, le marché promet d'être juteux pour les industriels.

Encore faudra-t-il trouver des exutoires adaptés à tous ces déchets, plus ou moins dangereux, sous peine de sérieux blocages! Deux centres de stockage, situés dans le département de l'Aube, accueillent d'ores et déjà les détritus à vie courte, de très faible à moyenne activité, issus du démontage des laboratoires et des vieux réacteurs. Mais la contestation du permis de construire du centre d'entreposage des rebuts les plus virulents au Bugey (Ain), censé ouvrir en 2014, entrave actuellement bien des démantèlements. Bruno Cahen tient pourtant à préciser que *“l'Andra sera prête à accueillir, en flux tendus, les futurs déchets de Fessenheim. Nos travaux de recherche ont*

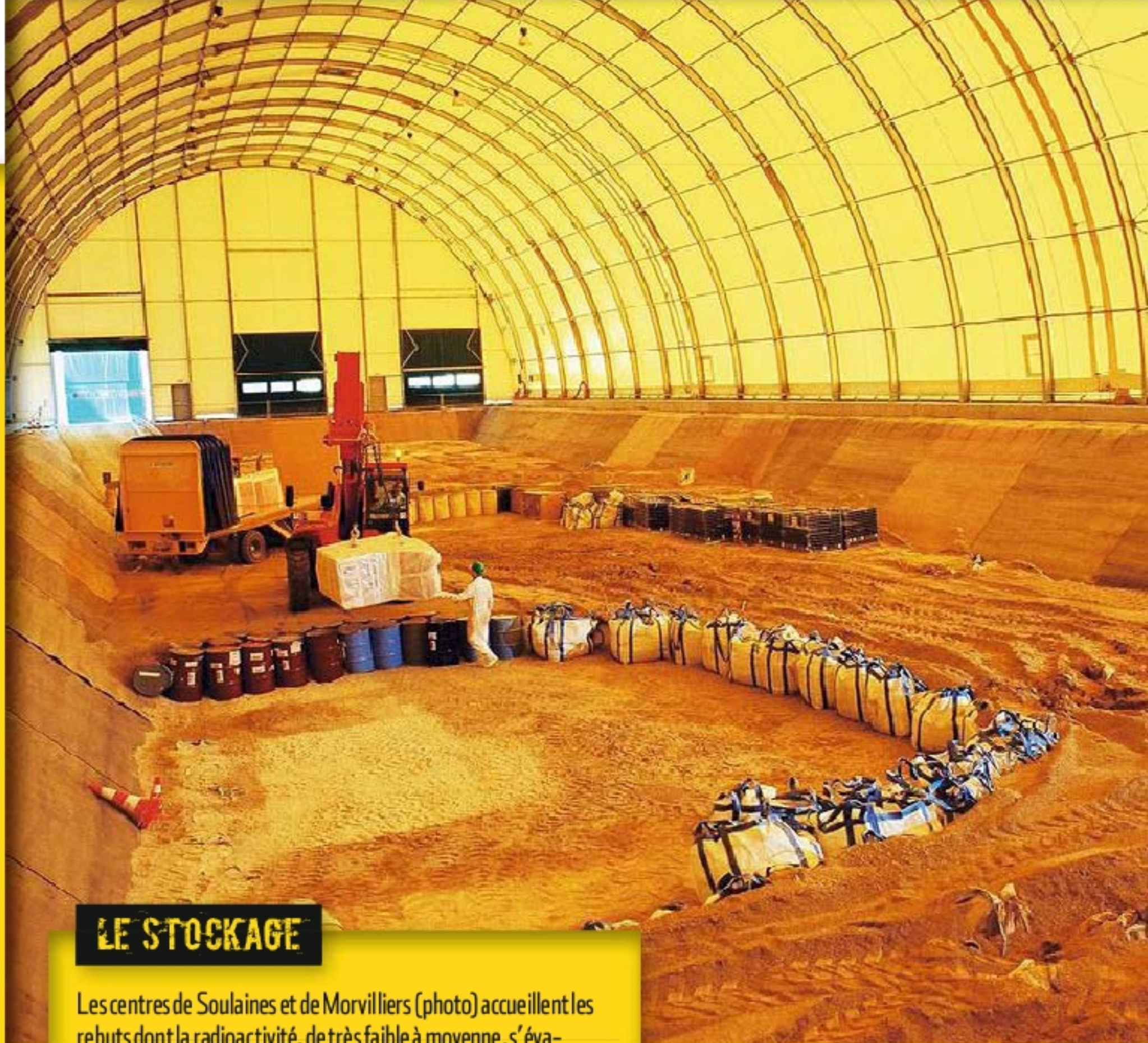
LE TRANSPORT

Les colis de déchets sont acheminés, en flux tendus, vers les deux centres de stockage de l'Andra situés dans le nord-est de la France.



LE STOCKAGE

Les centres de Soulaïnes et de Morvilliers (photo) accueillent les rebuts dont la radioactivité, de très faible à moyenne, s'évanouira avant trois cents ans. Mais les déchets les plus dangereux attendent toujours un site d'entreposage...



d'ailleurs permis d'améliorer le compactage des rebuts de 40 %, et nous réfléchissons à l'idée de recycler certains matériaux contaminés dans l'industrie nucléaire: les métaux pourraient devenir colis de déchets". Il n'est pas non plus exclu que, les poubelles débordant, EDF soit contraint de stocker ses déchets sur certains de ses 19 sites nucléaires...

Car il ne faut pas se tromper: le site de Fessenheim, situé en bordure du Grand Canal d'Alsace, ne deviendra sûrement pas une prairie verdoyante! EDF compte réutiliser ses précieux espaces pour la production d'électricité ou tout autre usage industriel. De toute manière, argumente Roland Desbordes, "l'électricien serait particulièrement présomptueux de promettre un 'retour à l'herbe', car il restera toujours dans le sol

des traces radioactives de ces installations"; les centrales connaissent parfois des incidents ou des fausses manœuvres qui libèrent des effluents dans la nature.

Tandis que la dépollution totale est un travail herculéen, qui exige d'arracher des millions de mètres cubes de terre. "Quand bien même nous penserions avoir retiré jusqu'au

dernier becquerel d'un site, l'Autorité de sûreté continuerait de prendre des précautions en ne permettant pas, par exemple, d'y installer un jardin d'enfants", convient Alain Ensuque. Avant de se faire plus solennel: "Il faudra d'une manière ou d'une autre garder la mémoire de l'usage très particulier de ces lieux." Rendez-vous à Fessenheim, vraisemblablement vers 2036, lorsque le site aura été démantelé. ■

LE COÛT DU DÉMANTÈLEMENT EN QUESTION

EDF affirme que le démantèlement des 58 réacteurs de son parc actuel lui coûtera 18,1 milliards d'euros... "seulement", serait-on tenté de dire. Car, selon un récent rapport de la Cour des comptes, ce calcul théorique paraît bien optimiste: pour ce même parc, la méthode d'estimation utilisée au

Japon donnerait plutôt un résultat de 39 milliards d'euros, voire 46 milliards selon le mode de calcul en vigueur en Grande-Bretagne... et jusqu'à 60 milliards en Allemagne! Une disparité reflétant les grandes incertitudes qui règnent dans ce domaine.

LE POINT SUR...

60 ANS APRÈS SA DÉCOUVERTE

LES NOUVEAUX MYSTÈRES DE L'ADN

PAR EMMANUEL MONNIER

28 FÉVRIER 1953

**"NOUS AVONS
TROUVÉ LE SECRÉ
DE LA VIE"****P. 106**

ADN

**UNE MOLÉCULE
AUX PROPRIÉTÉS
EXCEPTIONNELLES****P. 108**

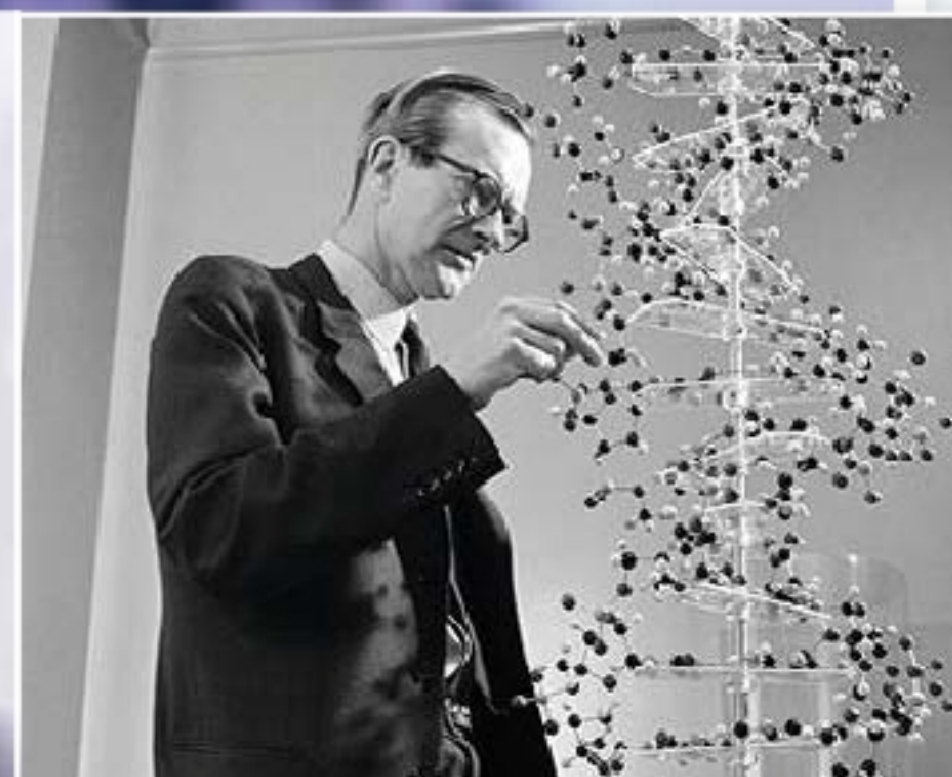
GÉNOMIE

**LES 5 DÉFIS QUI
ATTENDENT
LE XXI^e SIÈCLE****P. 110**

ÊTRES VIVANTS

**VERS UNE
NOUVELLE
COMPRÉHENSION****P. 112**

Lorsque Crick et Watson découvrirent la structure en double hélice de l'ADN, toute la biologie bascula dans la génétique. Plus d'un demi-siècle plus tard, une nouvelle compréhension du vivant a bien eu lieu... mais pas celle que l'on croyait. Car passée l'illusion que les gènes expliqueraient tout, les vrais défis se sont posés...



▲ Les travaux de Maurice Wilkins (ici, en 1962) sur la diffraction des rayons X ont ouvert la voie à la découverte de la structure en double hélice de l'ADN.

28 FÉVRIER 1953 "NOUS AVONS TROUVÉ LE SECRET DE LA VIE!"

Ce jour-là, Francis Crick et James Watson exultent : ils sont les premiers à élucider le mystère de l'ADN. Une date historique.

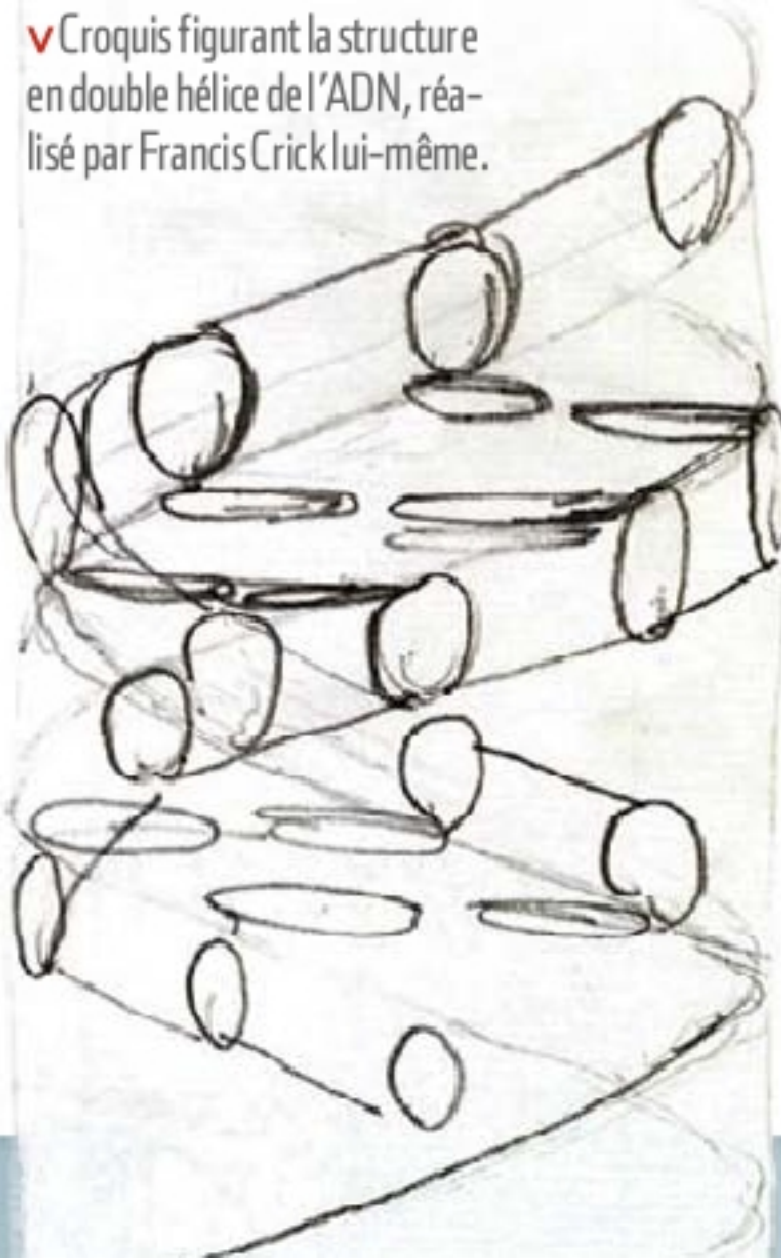
Au Eagle, un pub de Cambridge où il a ses habitudes, Francis Crick n'en finit plus de jubiler. "Nous avons trouvé le secret de la vie!", fanfaronne-t-il. L'humilité, c'est vrai, n'a jamais été son fort. "Jamais je ne [l]'ai vu d'humour modeste", lâchera son complice, James Watson, dans ses mémoires. Tous deux ont pourtant de bonnes raisons, ce 28 février 1953, d'exulter : après des mois d'essais infructueux, ils viennent d'élucider la structure de la molécule emblématique de la vie : l'acide désoxyribonucléique, ou ADN. Les perspectives sont immenses. Car on sait alors que c'est elle qui porte l'hérédité. Et coiffer sur le poteau Linus Pauling, l'un des chercheurs les plus renommés au monde, n'est pas le moindre de leur plaisir.

PAULING SE TROMPE, C'EST CERTAIN !

Après avoir percé en partie, grâce aux rayons X, la structure des protéines, le grand Pauling comptait bien ajouter l'ADN à son tableau de chasse. Mais le modèle qu'il publiera dans quelques jours est erroné. Son hélice à trois branches ne peut pas fonctionner. Watson le sait : il l'a lui-même proposée il y a un peu plus d'un an. A 23 ans, le biochimiste venait d'intégrer le laboratoire Cavendish de Cambridge pour tra-

vailler sur la structure de l'ADN avec le physicien Crick. Les premiers clichés de diffraction aux rayons X, réalisés par la cristallographe Rosalind Franklin du King's College de Londres, suggéraient une structure en hélice. Leur premier modèle, à trois chaînes, fut un fiasco. "Rosy" a tout de suite vu qu'il contenait dix fois moins d'eau que ce que révélait l'analyse chimique. Et la jeune femme leur a bien fait sentir qu'elle n'attendait rien d'eux, qui bricolaient des modèles à la va-vite au lieu d'analyser les clichés de diffraction.

✓ Croquis figurant la structure en double hélice de l'ADN, réalisé par Francis Crick lui-même.

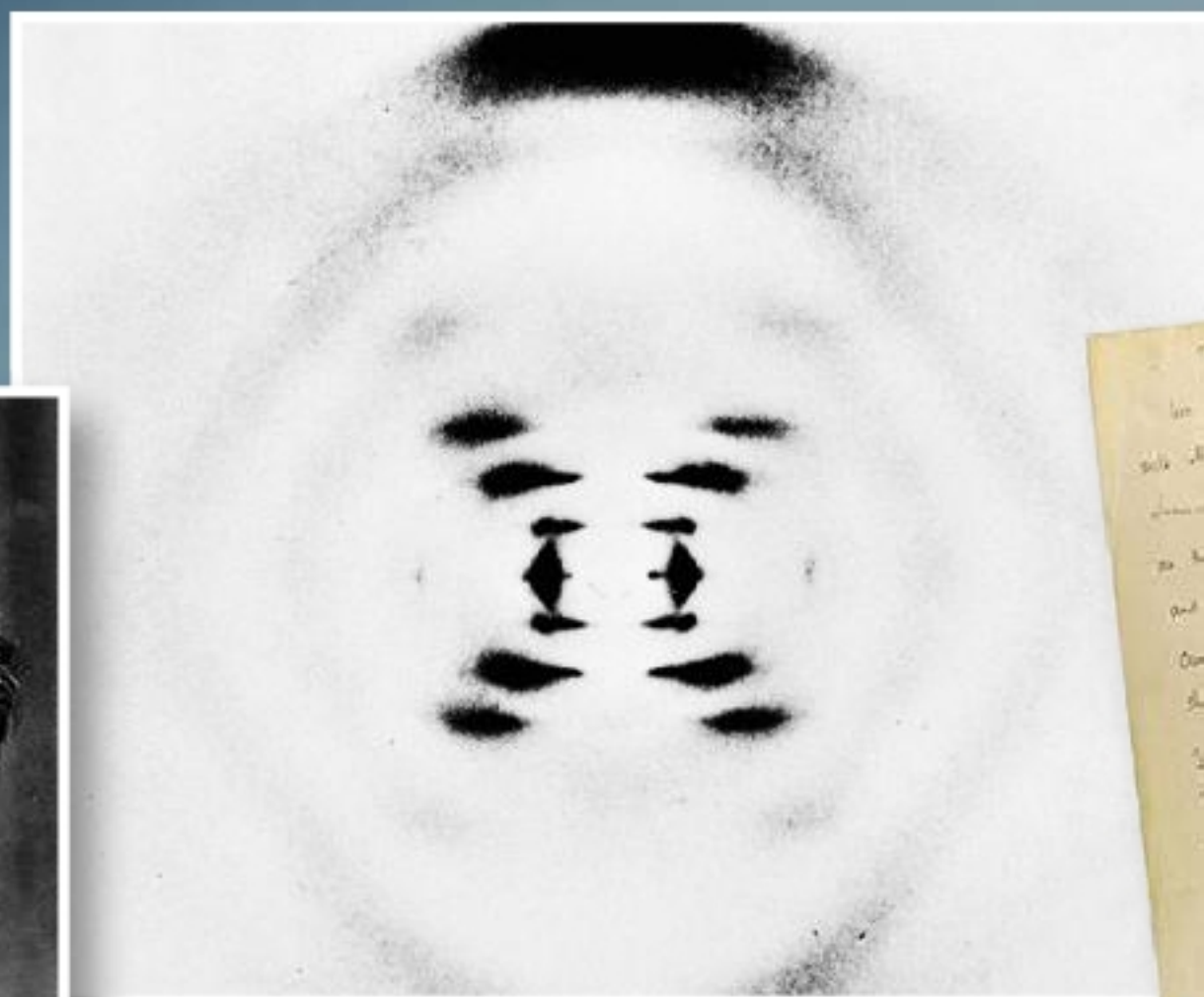


Mais lorsque Maurice Wilkins, du King's College, lui a montré à la dérobée, le 30 janvier, le cliché n° 51, pris par sa consœur huit mois plus tôt, Watson est resté bouche bée : l'ADN y dévoilait une structure en hélice, mais avec deux chaînes et non trois ! Comment les atomes s'y agençaient-ils ? Watson a "cuisiné" Wilkins, le soir même, dans un restaurant de Soho. Une dizaine de jours plus tard, il s'est procuré le rapport d'activité – semi-confidentiel – du King's College : les mesures consignées par Rosy ont permis à Crick d'affirmer que l'orientation des deux brins était opposée.

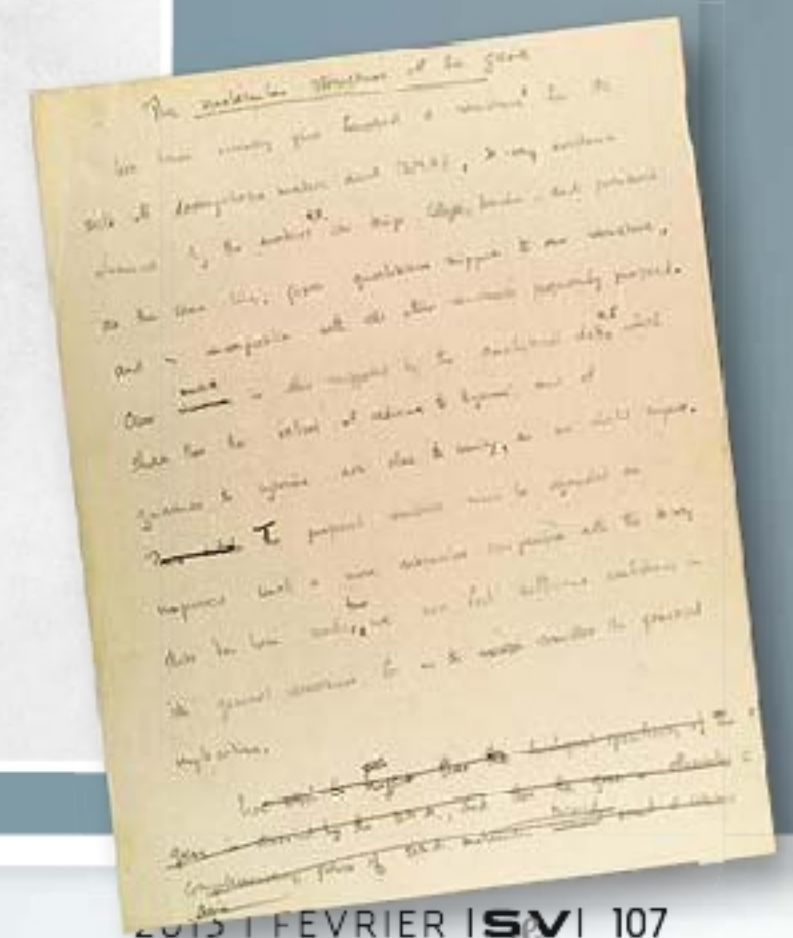
Restait à savoir comment ils étaient maintenus ensemble. Les quatre bases – adénine, guanine, cytosine et thymine – devaient être repliées entre les brins. Sauf qu'aucune n'avait la même forme. Watson a essayé toutes les combinaisons, jusqu'à ce que Donohue, un chimiste qui partage son bureau, lui donne la clé. Les bases peuvent se présenter sous deux formes : "énol" et "céto", qui possède un atome d'oxygène libre permettant une liaison. Et c'est la forme "céto" qu'il faut garder. Le puzzle s'est alors assemblé : une paire adénine-thymine unie par des liaisons hydrogène avait la même forme qu'une paire cytosine-guanine. Voilà pourquoi on trouvait toujours ces paires dans des proportions identiques ! Ce 28 février, Watson et Crick savent que leur modèle tient désormais la route. Et qu'ils ouvrent, grâce à lui, une nouvelle ère de la biologie.



> C'est le cliché n° 51 (à droite) pris au King's College par la cristallographe Rosalind Franklin, qui mit Watson et Crick sur la piste d'une structure de l'ADN en hélice avec deux chaînes, et non trois comme ils le supposaient...



> ... ce qui leur vaudra le prix Nobel. Ci-dessous, brouillon de l'article publié deux mois plus tard dans la revue *Nature*.



ADN UNE MOLÉCULE AUX PROPRIÉTÉS EXCEPTIONNELLES



Forme, structure, compacité, flexibilité, stabilité... Les propriétés de l'acide désoxyribonucléique sont uniques, et chacune concourt à protéger et à transmettre fidèlement le message du vivant. Décryptage en 9 points.

UNE FORME EN DOUBLE HÉLICE

Adénine (A), thymine (T), cytosine (C) et guanine (G) : en s'associant chacune avec un sucre (le désoxyribose) et un groupement phosphate, ces quatre bases azotées forment des nucléotides capables de s'accrocher les uns aux autres pour tricoter un brin de longueur indéfinie. Mais ces quatre bases peuvent en outre se lier deux par deux (A avec T, C avec G), via des liaisons hydrogènes, en couples complémentaires de longueur égale. Résultat ? Telle une fermeture éclair, deux brins s'accrochent, d'une paire de bases à l'autre, en prenant la forme caractéristique d'une double hélice.

DES STRUCTURES MULTIPLES

Le principe d'une double hélice permet différentes formes. La plus fréquente est de loin l'ADN-B, une double hélice tournant vers la droite et effectuant un tour complet tous les 10 nucléotides (chaque paire de bases étant décalée de la précédente d'un angle de 36°). Mais d'autres formes existent, comme l'ADN-A, plus court et plus large, qu'on retrouve dans les milieux déshydratés, ou l'ADN-Z, tournant alternativement vers la gauche et la droite et effectuant ainsi des zigzags. Des biochimistes ont même obtenu, par étirement et torsion, un ADN-P dans lequel les bases azotées se retrouvent à l'extérieur de la double hélice. La double hélice d'ADN peut, en outre, en particulier chez les virus et les bactéries, décrire un cercle et n'avoir, dès lors, aucune extrémité.

UN CODE QUASI UNIVERSEL

Les quatre bases azotées ne servent pas qu'à construire une double hélice. Elles constituent l'alphabet à partir duquel est écrite l'information qui constitue notre hérédité. Toutes les protéines sont bâties à partir d'acides aminés, selon une séquence codée par la succession des différentes bases. Une succession de 3 bases forme un codon. Il y en a donc $4^3 = 64$ possibles, parmi lesquels, 61 désignent un acide aminé, les trois autres constituant un signal de terminaison. Comme il n'existe que 20 acides aminés dans la nature, il y a plus de codons que d'acides aminés. Le code est donc redondant : plusieurs combinaisons codent pour un même acide aminé. Mais il est quasi universel : d'une espèce à l'autre, chaque triplet code, en général, le même acide aminé, permettant des interactions entre génomes.

UNE ÉNORME CAPACITÉ DE STOCKAGE

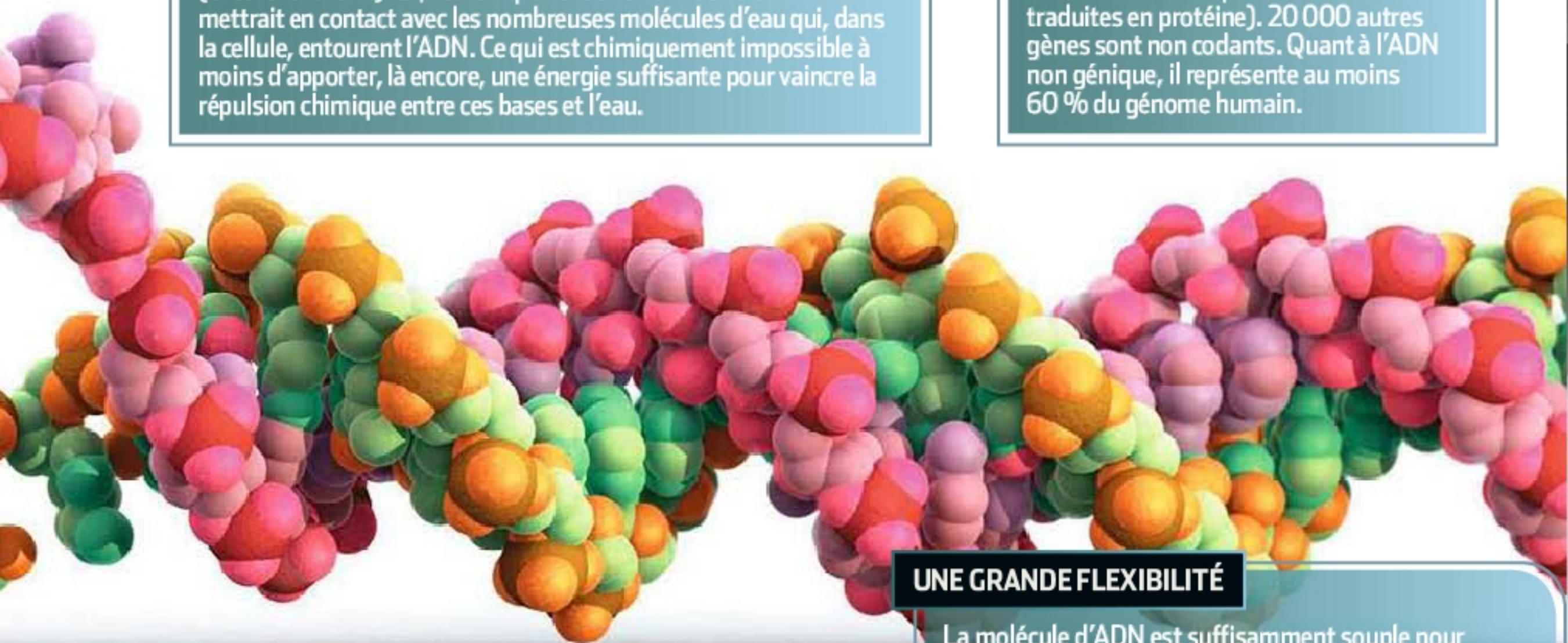
La très grande taille de la molécule d'ADN permet de stocker une quantité très importante d'informations : de mille (pour le génome le plus court) à plus de 600 milliards de paires de bases, pour le génome le plus long jamais observé, celui d'une... amibe (*Amoeba dubia*). Il n'y a donc pas de corrélation directe entre la taille du génome et la complexité de l'organisme, le génome pouvant s'accroître par duplication de certaines séquences ou intégration d'ADN étranger. Celui de l'espèce humaine est néanmoins d'une taille respectable, puisqu'il contient (dans les gamètes) près de 3,2 milliards de paires de bases.

UNE STABILITÉ MAXIMALE

L'ADN est particulièrement stable. Car la double hélice renferme un grand nombre de liaisons faibles (liaisons hydrogène et interactions entre nuages électroniques) disposées de telle sorte que la plupart ne peuvent rompre sans que soient brisées simultanément de nombreuses autres liaisons. Ce qui, pour y parvenir, exige une énergie considérable. Les liaisons accidentellement rompues ont donc plutôt tendance à se reformer spontanément. D'autant que les bases azotées qui sont à l'intérieur de la double hélice sont hydrophobes (elles fuient l'eau). Or, toute rupture locale de la double hélice les mettrait en contact avec les nombreuses molécules d'eau qui, dans la cellule, entourent l'ADN. Ce qui est chimiquement impossible à moins d'apporter, là encore, une énergie suffisante pour vaincre la répulsion chimique entre ces bases et l'eau.

UNE COMPLEXITÉ CROISSANTE

La majeure partie du génome, chez les êtres pluricellulaires, ne sert pas à coder des acides aminés. À quoi sert cet ADN hâtivement qualifié d'"ADN poubelle" ? La suppression de certaines portions entraîne des anomalies de développement. Elles réguleraient donc l'expression des gènes. D'autres – les pseudogènes – sont manifestement d'anciens gènes ayant perdu leur fonction au cours de l'évolution. Quant au reste, il est constitué pour l'essentiel d'éléments répétés de multiples fois, et dont la fonction est, pour l'essentiel, non connue pour l'instant. Ainsi, le séquençage complet du génome humain a révélé un nombre relativement faible de gènes codant une protéine : de l'ordre de 20 000 (chacun comprenant en moyenne 27 000 paires de bases, dont 1 300 – soit 5 % à peine – concrètement traduites en protéine). 20 000 autres gènes sont non codants. Quant à l'ADN non génique, il représente au moins 60 % du génome humain.



UNE COMPACTITÉ EXTRÊME

L'ADN est une chaîne extrêmement longue : chaque cellule humaine en contient 1,8 mètre, dans un noyau qui ne fait pourtant que... 6 micromètres de diamètre. Comment est-ce possible ? La double hélice s'enroule d'abord autour de molécules appelées histones, chaque boucle constituant un nucléosome. Ce premier procédé permet, à lui seul, d'obtenir une molécule d'ADN six fois plus condensée. Ces nucléosomes s'enroulent à leur tour pour former un solénoïde comportant 6 nucléosomes par tour de spire, ce qui permet de condenser encore d'un facteur 40. Cette fibre solénoïde forme enfin des "super-boules", qui permettent, cette fois, de condenser encore mille fois plus l'ADN.

UNE GRANDE FLEXIBILITÉ

La molécule d'ADN est suffisamment souple pour s'adapter aux différentes torsions de la double hélice sur elle-même. Quant aux bases azotées (A, T, C, G) qui se trouvent à l'intérieur, elles peuvent même pivoter pour sortir momentanément de la double hélice. Une opération peu gourmande en énergie, dès lors qu'une seule base est retournée à la fois, et qui permet à certaines enzymes de réparer les bases endommagées qui font ainsi saillie.

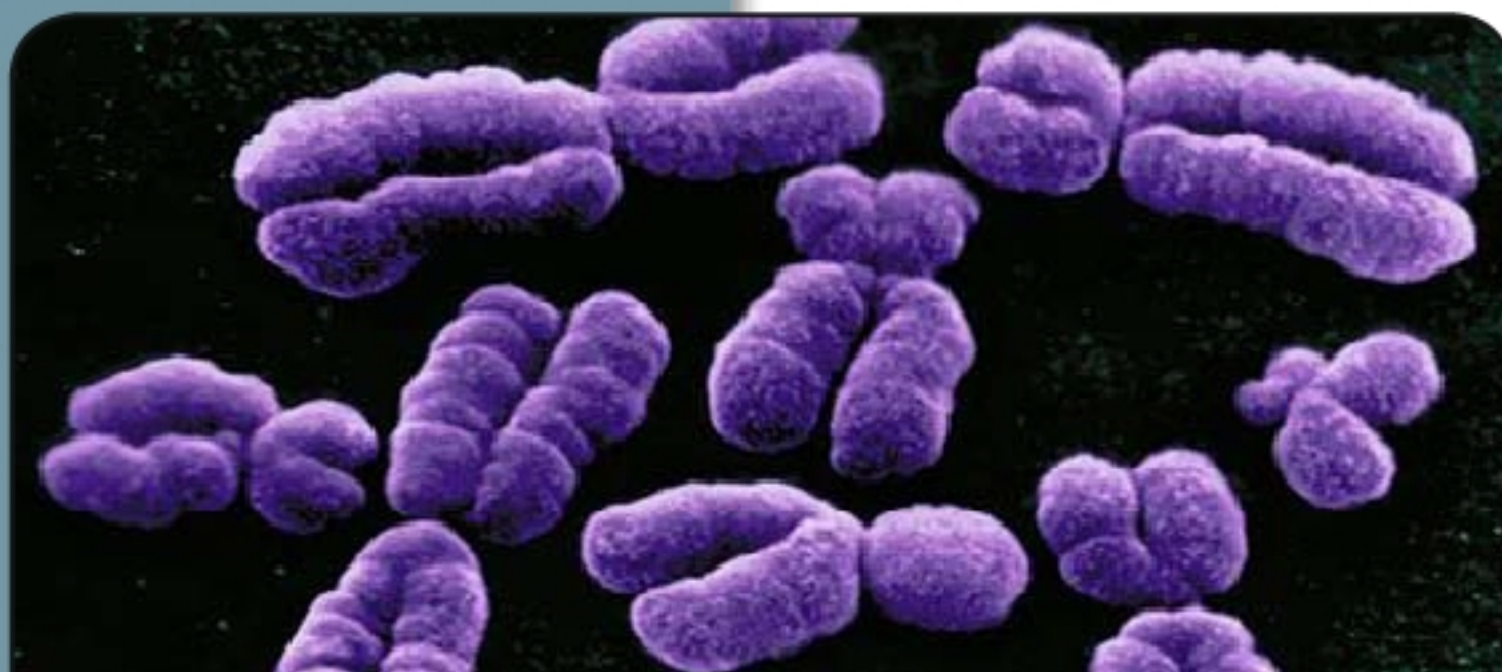
UNE RÉPLICATION FACILE

A avec T, C avec G... chaque base ayant sa base complémentaire, dupliquer un brin d'ADN repose sur un principe simple : il suffit de séparer les deux brins et de reconstituer avec chacun d'eux une nouvelle double hélice, strictement identique à la première, en synthétisant le brin complémentaire.

GÉNOMIE LES CINQ DÉFIS, QUI ATTENDENT LE XXI^e SIÈCLE

La révolution génétique n'en est qu'à ses débuts. Et déjà, l'espoir de grandes avancées médicales est né. Reste à décrypter tous les mécanismes de l'incroyable complexité du vivant. Voici les cinq défis majeurs.

LE DÉFI DU GÉNOME



L'automatisation des techniques de séquençage a permis d'obtenir, à la fin des années 1990, le génome complet d'organismes simples (virus, bactéries, levure...), puis d'espèces plus complexes (mouche drosophile en 2000, souris, et espèce humaine en 2003). D'abord en fournissant la succession brute des nucléotides, puis en identifiant et en localisant dans cette séquence les différents gènes. Le nombre de gènes humains a surpris : de l'ordre de 20 000 seulement, soit guère plus que les 13 000 de la drosophile et bien moins... qu'un grain de riz (37 000). Prochaine étape : cartographier les variations d'un génome à l'autre. En effet, bien

que 99,9 % de la séquence d'ADN soient semblables d'un humain à l'autre, le 0,1 % variable a un rôle important dans la prédisposition aux maladies ou la réponse à certains médicaments. Les sites où la séquence d'ADN ne varie que d'une seule base – ces variations sont appelées polymorphismes nucléotidiques simples (SNP) – représentent la majorité des différences génétiques d'un individu à l'autre. Il en existe environ 10 millions. L'objectif est de déterminer les profils types de polymorphismes prédisposant à certaines maladies ou entraînant des réponses particulières à certains traitements, dans le cadre d'une médecine sur mesure.

LE DÉFI DU MÉTAGÉNOME

Les bactéries, dans notre corps, sont de 5 à 10 fois plus nombreuses que nos propres cellules. Disséminées partout (peau, bouche, intestins, poumons), elles jouent un rôle important dans notre bien-être. Pourtant, elles sont encore très méconnues. Sont-elles différentes d'un individu à l'autre ? Et quel impact ces différences peuvent-elles avoir sur notre métabolisme ? Les biologistes ont décidé de recenser le millier d'espèces qui nous colonisent et de dresser leur génome complet – ou métagénome – qui représenterait 2 à 3 millions de gènes. Un inventaire titanesque afin d'établir différents profils bactériens et voir comment ils interfèrent avec notre santé.



LE DÉFI DU TRANSCRIPTOME



Avant d'être utilisée pour fabriquer une protéine, l'information génétique doit d'abord être lue et sortir du noyau où l'ADN est enfermé. Cette information est donc d'abord copiée sous la forme d'ARN (acide ribonucléique), molécule très proche de l'ADN, mais qui se présente en général sous forme d'un simple brin, dans lequel la base thymine (T) est remplacée par l'uracile (U). Cette copie de l'information sous forme d'un ARN dit "messager" est appelée transcription. Et elle varie d'une cellule à l'autre. D'abord parce que différents gènes peuvent être éteints ou activés : un neurone, par exemple, n'utilisera pas les mêmes gènes,

pour fonctionner, qu'une cellule du foie. Ensuite, parce que l'ARN n'est pas une copie fidèle de l'ADN. Les gènes présentent en effet une succession de portions codantes (les exons) et non codantes (les introns, porteuses d'informations de découpage). Lors de l'assemblage de l'ARN, la cellule utilise les introns pour déterminer, en fonction de divers paramètres, quels exons vont être conservés et lesquels seront finalement supprimés. Un même gène peut donc, d'un tissu à l'autre, être traduit en une multitude d'ARN différents. Déterminer l'ensemble des ARN présents dans une cellule donnée est l'objectif de la transcriptomique.

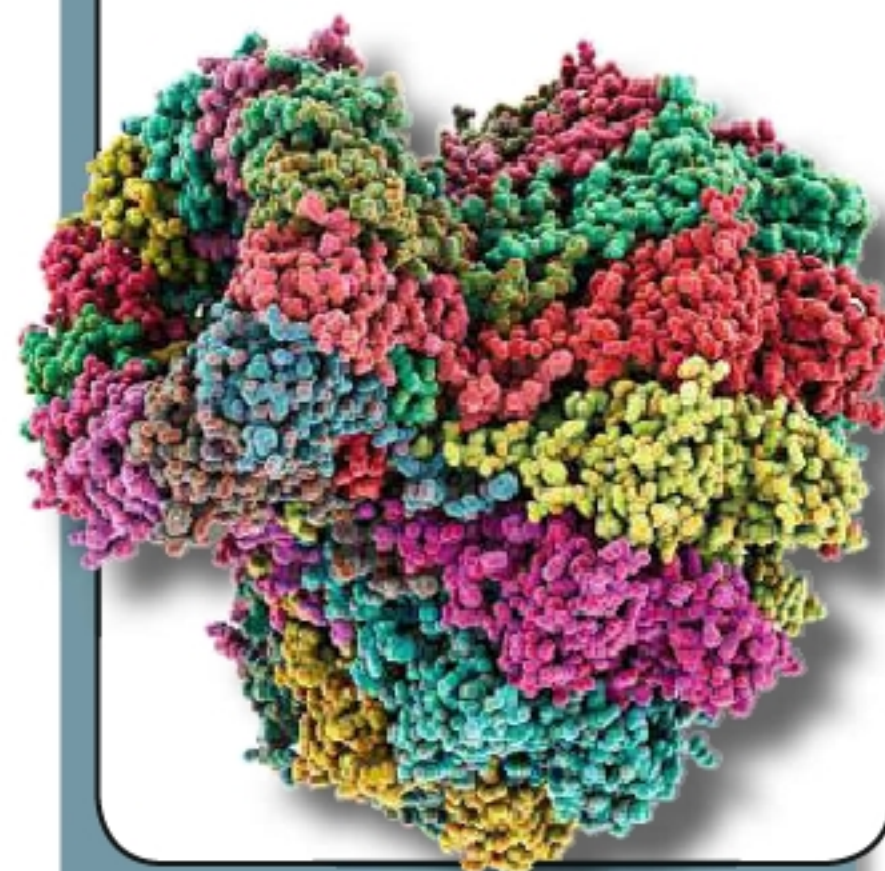
LE DÉFI DE L'ÉPIGÉNOME

Gènes activés ou éteints, ARN messager assemblé différemment d'une cellule à l'autre, puis traduit en fonction de la présence, ou non, de certaines protéines... un même ADN peut donc, selon les circonstances, être lu de multiples façons. Ce qui explique qu'un même génome puisse engendrer des cellules si différentes dans notre corps. L'épigénétique s'efforce de comprendre comment l'environnement cellulaire modifie l'expression des gènes, expliquant

ainsi, en partie, pourquoi deux jumeaux peuvent ne pas déclarer les mêmes maladies. Par quels mécanismes ? Les histones, protéines autour desquelles l'ADN s'enroule (voir "Faits & chiffres"), joueraient un rôle dans l'activation ou l'extinction de certains gènes. Un autre processus appose un groupement méthyl au début des gènes, ce qui bloquerait leur transcription. Ainsi, un stress important peut, par méthylation, agir durablement sur certains gènes. Et

LE DÉFI DU PROTÉOME

Une fois sorti du noyau, l'ARN messager est traduit en protéine. Quelles sont les protéines produites dans une cellule, un tissu, un organe ? En quelles quantités ? C'est ce que cherche à établir la protéomique, qui produit des instantanés de l'état et du fonctionnement des cellules. Reste ensuite à comprendre les multiples interactions entre ces protéines. D'autant qu'elles peuvent, en retour, activer ou éteindre d'autres gènes, modifier leur transcription ou influencer la traduction finale des ARN. Après le protéome, qui démarre à peine, se profile donc déjà un "interactome", inventaire effroyablement complexe de toutes les interactions dans une cellule donnée.



ce marquage peut, ensuite, se transmettre à la descendance, l'ADN des cellules sexuelles étant lui-aussi méthylé. Une méthylation différente de l'ovule et du spermatozoïde expliquerait aussi qu'un même gène ne s'exprime pas de manière identique selon qu'il a été transmis par le père ou par la mère. Dresser notre épigénome, – l'ensemble des modifications épigénétiques d'une cellule –, permettrait de faire le lien entre notre ADN et son expression réelle.

ÊTRES VIVANTS VERS UNE NOUVELLE COMPRÉHENSION

Le principe d'un "programme" du vivant a vécu. Désormais, on parle d'auto-organisation. Une vision qui ouvre d'insondables perspectives.

En annonçant, le 20 mai 2010, avoir réussi à créer une bactérie dotée d'un ADN artificiel, le biologiste et homme d'affaires Craig Venter peut-il prétendre, à l'instar de Francis Crick en 1953, avoir à son tour "trouvé le secret de la vie"? L'homme ambitionne de déterminer le génome minimal nécessaire à toute cellule vivante. Et d'en faire un châssis modifiable à volonté, à partir duquel pourraient naître, par l'ajout des gènes adéquats, des cellules synthétiques pour produire biocarburants ou nouveaux vaccins. Un rêve qui va bien au-delà du séquençage complet du génome humain. Et qui illustre la nouvelle ambition que les biologistes affichent depuis quelques années.

Le principe formalisé par Crick – un gène, un ARN, une protéine, une fonction – a en effet vécu. L'importance des mécanismes dits épigénétiques, par lesquels l'environnement influe sur l'expression des gènes dans un ballet d'interactions entre ADN, ARN et protéines (voir "Mécanismes"), a sonné le glas de cette trop belle simplicité. Au point qu'il devient difficile pour les biologistes d'admettre encore que l'ADN contient des "gènes" au sens historique du terme. Quant à la notion d'un programme génétique sous forme de séquence d'instructions codées dans

l'ADN qui déterminerait les étapes de notre développement, cette métaphore a pris également du plomb dans l'aile.

En effet, puisque toutes les cellules d'un embryon démarrent avec le même programme, comment se sont-elles, par exemple, différenciées? L'étude des premiers stades du développement de la drosophile a montré qu'un nouveau cadre théorique était à inventer. Chez cette petite mouche, l'entrée du spermatozoïde dans l'ovule déclenche la traduction localisée de protéines, qui vont diffuser dans la cellule et y créant des gradients de concentration. L'embryon, qui possède plusieurs noyaux avant même sa première division, les voit donc rapidement exposés à des environnements différents. Du coup, leurs génomes s'expriment différemment et engendrent des cellules différentes.

UN REMISE EN QUESTION PROFONDE

Conclusion? Le "programme de développement" n'est pas contenu dans le seul ADN puisqu'il dépend largement ici du hasard d'une dynamique chimique... Ce qui éclaire l'impasse des recherches d'un gène spécifique à chacune des fonctions ou des caractères finaux (il n'y a pas un gène dédié à la taille des pieds...).

Serions-nous alors essentiellement le fruit du hasard? C'est l'idée que défendent des biologistes comme Jean-Jacques Kupiec, Pierre Sonigo (1) ou Henri Atlan (2). Pour eux, c'est d'un ensemble d'interactions possibles mais aléatoires entre molécules qu'émerge la diversité. Celles qui ne permettent pas à la cellule de s'adapter sont éliminées, les autres renforcées. Ainsi, quelques dizaines de milliers de gènes suffisent à un embryon pour connecter ses milliards de neurones. Ils se connectent au gré des facteurs de croissance présents dans leur environnement, à travers un jeu complexe d'interactions aléatoires et une sélection féroce des configurations qui fonctionnent. Le "secret de la vie" a donc plusieurs facettes: au côté de l'ADN se tient le hasard... et l'auto-organisation. →



▲ Les progrès du séquençage ont permis de déterminer l'ADN d'espèces disparues comme le mammoth...



▲ Craig Venter ambitionne de mettre au point un génome grâce auquel, en ajoutant des gènes appropriés, il créerait des cellules synthétiques pour produire biocarburants, vaccins, etc.



rmis de
th Khroma...



▲... ou de mieux évaluer la biodiversité actuelle via l'étude de ses multiples génomes (ici, la mission Tara, qui collecte le plancton marin des océans)...



▲... tandis que la nouvelle lecture du vivant permet des premiers succès en thérapie génique ou de personnaliser le traitement de certaines maladies.

→ Auto-organisation? Le concept est presque classique en physique. Mais en biologie, les exemples commencent aussi à être repérés : Denis Duboule, de la faculté des sciences de Genève, a décrit comment nos doigts se développaient non pas d'une commande inscrite dans des gènes précis, mais d'un faisceau d'interactions dynamiques entre facteurs de croissance et signaux provoquant la mort de cellules.

Il est donc tentant aujourd'hui pour les généticiens d'aller plus loin dans la remise en question de leurs paradigmes. D'affirmer que l'ADN ne contient pas de séries d'instructions pour la cellule, pour la bonne raison qu'elle n'en a pas besoin : c'est son métabolisme qui, de façon distribuée, réalise le "programme de développement" qu'on croyait trouver dans l'ADN – tout comme les fourmis développent leur fourmilière sans besoin de cerveau organisateur. La vie serait une succession de réactions physicochimiques, dont chaque étape est déterminée par la précédente. Mais alors, à quoi sert l'ADN ? Il ne serait rien de moins que la banque centrale où sont stockées les données brutes qui nous définissent.

La découverte de la structure de l'ADN ouvrait l'ère du décryptage du programme génétique ; cette nouvelle vision exige de l'étendre bien au-delà de la double hélice et de multiplier les approches scientifiques. Pour com-

prendre comment les interactions structurent collectivement et spontanément un système vivant capable de s'adapter aux changements, la biologie s'ouvre ainsi à l'analyse des réseaux et au monde des ingénieurs. Elle importe des concepts de physique théorique permettant de prédire le comportement global qui émerge du mouvement désordonné de milliards de particules. Elle emprunte à l'informatique le traitement distribué de l'information. Et elle n'oublie pas celui qui est à l'origine de cette explosion : l'ADN, qui a encore beaucoup à dire – surtout maintenant que là où il fallait 3 milliards de dollars et une décennie pour lire un génome humain il y a 10 ans, il ne faut plus que... une journée et un millier de billets verts ! C'est désormais une ruée vers les génomes et les épigénomes de toute nature qui est enclenchée : bactéries, virus, plantes et animaux.

GIGANTESQUE TRAVAIL DE SYNTHÈSE

Texte et programme d'exécution, pour dispersés qu'ils soient, sont donc le double Graal des chercheurs... Et pour unir ces données disparates, l'heure est dorénavant à un titanesque travail de synthèse, qui s'annonce riche de promesses. Du reste, cette nouvelle façon de concevoir le vivant porte déjà ses premiers fruits. En médecine, après des années de déconvenues, les thérapies géniques enregistrent en effet

leurs premiers succès ; la lutte contre le cancer marque des points, avec des traitements mieux ciblés et plus personnalisés ; une meilleure maîtrise de la croissance des tissus permet d'espérer bientôt régénérer des organes malades ou blessés, sans problème de compatibilité. L'identification rapide des génomes aura des répercussions en médecine légale, comme en écologie ou en génétique des populations.

Il est aussi devenu possible de lire le génome d'espèces disparues, comme Neandertal ou le mammoth, et de cerner leurs spécificités. Et un pan de la biologie, la biologie synthétique, dont Craig Venter est une des figures de proue, se nourrit de cette nouvelle compréhension du vivant pour créer des circuits d'interaction inédits. Les objectifs de ces pionniers sont multiples : produire des systèmes de soin biocompatibles (par exemple, un mécanisme inséré dans l'organisme d'un diabétique qui injecterait spontanément de l'insuline), résoudre des problèmes environnementaux, créer des formes de vie inédites, etc. Les projets de biologie de synthèse n'en sont encore pour la plupart qu'au stade de la recherche. Mais, soixante ans après la découverte de l'ADN, la révolution génétique ne fait que commencer. ■

(1) *Ni Dieu ni gène. Pour une autre théorie de l'hérédité*, Jean-Jacques Kupiec, Pierre Sonigo, Seuil, 2003.

(2) *Le vivant post-génomique, ou qu'est-ce que l'auto-organisation ?*, Henri Atlan, Odile Jacob, 2011.

DANS SCIENCE & VIE

Après la découverte de la molécule, celle de son code : la manière dont l'enchaînement des bases d'ADN produit de l'information est entièrement déchiffrée en 1966, et annoncé par *Science & Vie* dès octobre 1965. Les applications s'enchaînent alors rapidement. La revue relate ainsi la synthèse du "premier gène artificiel" en 1970, la lecture des ori-

gines des populations dans l'ADN, et les débuts du "business des manipulations génétiques" (pour produire des médicaments, des OGM...), en 1979, son utilisation pour l'identification de suspects dans des affaires criminelles en 1986, etc.. Nombre de questions subsistent cependant : A quoi servent les 90 % du code génétique qui ne gouvernent la



synthèse d'aucune protéine, s'interroge notamment la revue en 1997. Le séquençage du génome humain, présenté en

juin 2000 comme "l'an 1 de la médecine du futur", ne fait qu'accélérer les recherches. L'émergence de l'épigénétique, en 2003, l'intérêt croissant des physiciens pour l'ADN, en 2004, les débuts de la thérapie génique, en 2008, la découverte d'un nouveau code génétique, en 2010... ces sujets font ainsi, chacun à leur tour, la une de *Science & Vie*. **E.A.**

EN PRATIQUE

116 **BON À SAVOIR**
En direct des publications scientifiques et autres rapports et études.

118 **ZOOM DU MOIS**
Apprenez à reconnaître vos "biais cognitifs"

124 **QUESTIONS/RÉPONSES**
Envoyez-nous vos questions et gagnez un abonnement d'un an à *Science & Vie*.

130 **TECHNOFOLIES**
Les lunettes anti-décalage horaire...
et les dernières innovations technologiques.

136 **LE CIEL DU MOIS**





EN PRATIQUE

BON À SAVOIR

LES BILLETS NEUFS FREINENT LA DÉPENSE

D'après 5 études canadiennes, l'aspect des billets a une influence sur la dépense. Dans diverses situations expérimentales de consommation, les cobayes ont dépensé plus de deux fois plus avec des billets sales qu'avec des neufs. "JCR", nov. 2012

LES ADOLESCENTS MUSCLÉS VIVRONT PLUS LONGTEMPS

Les adolescents musclés risquent moins de mourir avant 55 ans, et ce, indépendamment de leur poids et de leur pression artérielle. Non seulement ils meurent moins de maladies cardiovasculaires, mais aussi... de suicide, à cause notamment de la moindre incidence chez eux de troubles mentaux (schizophrénie, dépression). Les chercheurs de l'institut Karolinska (Suède), qui ont suivi plus d'un million de garçons de 16 à 19 ans pendant vingt-quatre ans, n'ont par contre mis en évidence aucun lien avec le risque de cancer. Les effets chez les femmes restent à étudier, mais semblent, d'après de précédentes études, moins importants. "BMJ", nov. 2012



LE TABAGISME PASSIF FAIT LE LIT DE LA MÉNINGITE

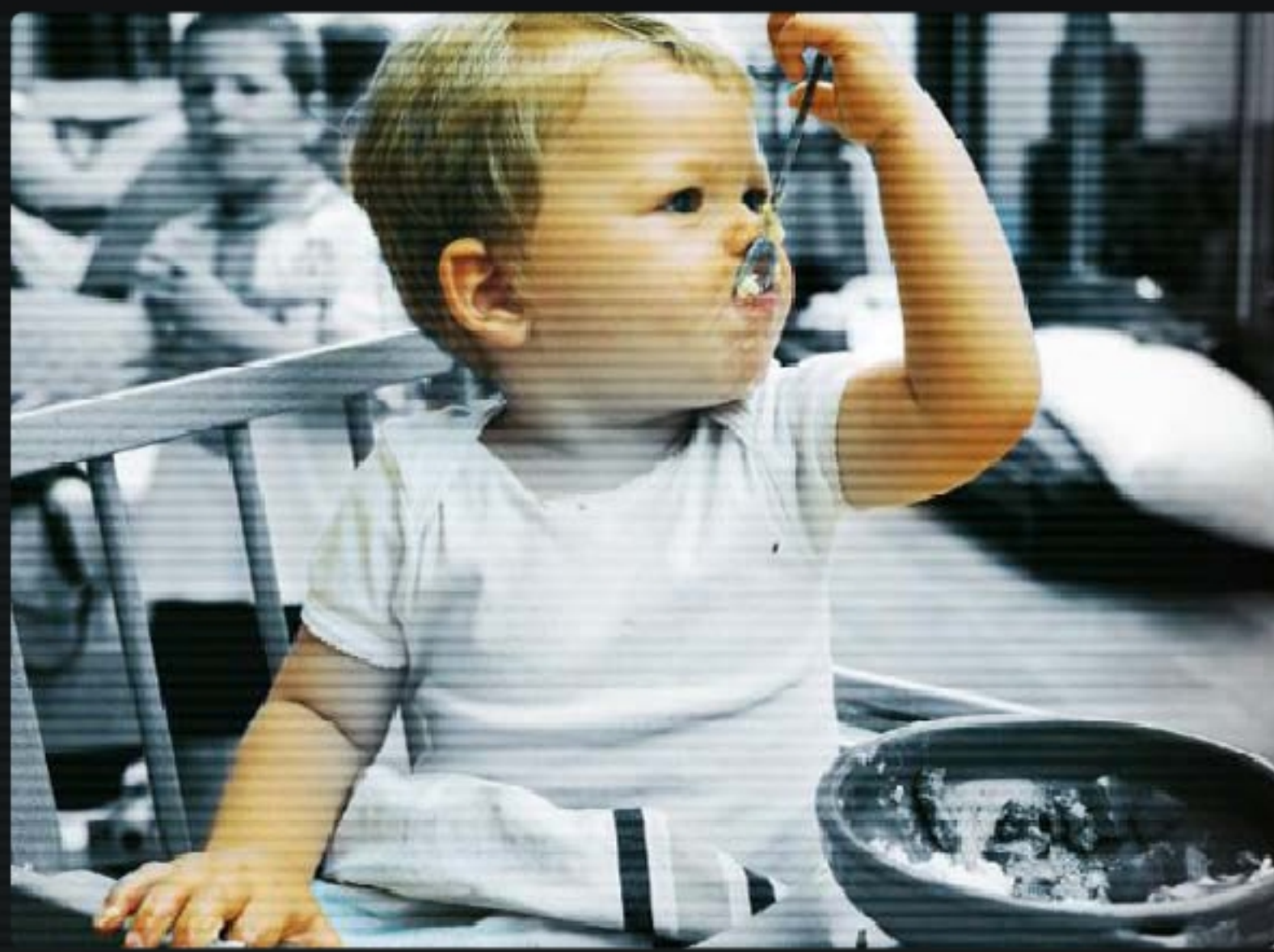
Des chercheurs anglais ont montré que chez les enfants de moins de 5 ans exposés au tabagisme des parents, le risque d'infection à méningocoque est plus que doublé. Il triple même chez les enfants dont la mère a fumé pendant la grossesse. "JNNP", déc. 2012

TOUTES LES INFOS SUR NOTRE CONSO D'ÉNERGIE

La consommation d'électricité en France en temps réel, son origine, la production de CO₂ par KWh... Toutes ces données sont disponibles en un clic sur la page "éCO₂mix" du site de RTE. "www.rte-france.com"

MANGER GRAS EST BON POUR LES TOUT-PETITS

Les petits Français ne mangent pas assez gras: 28 % seulement de leurs apports caloriques proviennent des lipides à 10 mois, et 32 % à 2 ans, alors qu'un apport en gras de 40 à 60 % jusqu'à 6 mois, descendant progressivement à 35 % à 2 ans, est conseillé. Des chercheurs de l'université Paris-XIII ont montré que ce déficit favorise le surpoids à l'âge adulte. En effet, parmi les 73 enfants suivis pendant vingt ans, ceux qui mangeaient le moins gras étant bébés étaient ceux qui développaient le plus de masse grasse plus tard. Leur métabolisme aurait "appris" à stocker le gras pour compenser. "Int. J. Obes.", nov. 2012





VIEILLIR REND MOINS SUSPICIEUX

Ce n'est pas un hasard si les personnes âgées sont les premières victimes d'arnaques. Des chercheurs de l'université de Los Angeles viennent de montrer que ces dernières sont moins aptes à déceler les signaux de danger. Face à des photographies de visages provoquant, chez les jeunes, la méfiance, les personnes âgées expriment des sentiments beaucoup plus confiants. Une différence qui se retrouve dans leur activité cérébrale : le cortex insulaire antérieur, associé aux sentiments instinctifs, aux *a priori*, s'avère beaucoup moins actif chez les personnes âgées. Avec l'âge, mieux vaut donc réfléchir à deux fois plutôt que de se fier à sa première impression. "PNAS", déc. 2012

TROP D'EXERCICE EST MAUVAIS POUR LE CŒUR

Faire du sport est bon pour la santé... mais point trop n'en faut ! Au-delà de 45 min par jour d'effort physique intense, les bénéfices cardio-vasculaires et cérébraux s'estompent, voire régressent, laissant notamment place à des atteintes du muscle cardiaque. "Heart", nov. 2012

C'EST LE CORPS QUI DIT LE MIEUX NOS ÉMOTIONS

Un test mené avec des photos de joueurs de tennis venant de remporter ou perdre un point a montré que le seul visage ne permet pas d'identifier l'émotion. Même en mettant les visages des vainqueurs sur les corps des perdants, l'expression corporelle est déterminante. "Science", nov. 2012

LA FAIM, C'EST D'ABORD DANS LA TÊTE...

Sur 100 personnes, celles qui pensent (à tort) avoir mangé 500 ml de soupe ont moins faim, trois heures après le repas, que celles qui croient en avoir consommé 300 ml. La sensation de faim dépendrait donc du souvenir que l'on garde de notre dernier repas. "PlosOne", déc. 2012

ON RAISONNE MIEUX DANS UNE LANGUE ÉTRANGÈRE

Si vous êtes tenté de jouer au casino, faites-le plutôt... à l'étranger. C'est ce que semble indiquer une étude de l'université de Chicago, selon laquelle nos choix sont plus rationnels quand un problème est posé dans une langue étrangère. Les décisions sont alors moins biaisées et plus logiques, comme l'ont montré six tests sous forme de jeux d'argent menés sur plus de 100 personnes aux langues maternelles et étrangères différentes. En se distanciant du problème, on réagirait plus lentement et de manière moins instinctive. "Psychol. Sci.", 2012





EN PRATIQUE

ZOOM DU MOIS

Par Coralie Hancock

ERREURS DE JUGEMENT, PERCEPTIONS ERRONÉES...

Apprenez à reconnaître vos "biais cognitifs"

Notre cerveau nous trompe. Face à un afflux rapide d'informations, il induit parfois des décisions illogiques. Comment ? Voici 9 biais inconscients qui façonnent nos raisonnements. Les connaître, c'est déjà minimiser leur impact.

Nous prenons des décisions, émettons des avis, avons des certitudes... sans nous rendre compte que, dans bien des cas, notamment lorsque les statistiques et les probabilités sont en jeu, notre esprit nous trompe, victime de ce que les psychologues appellent des "biais cognitifs". C'est-à-dire des défauts inconscients du raisonnement. Ainsi, la majorité d'entre nous – mathématiciens, économistes et traders compris – ne s'appuie que partiellement sur la pensée rationnelle et le raison-

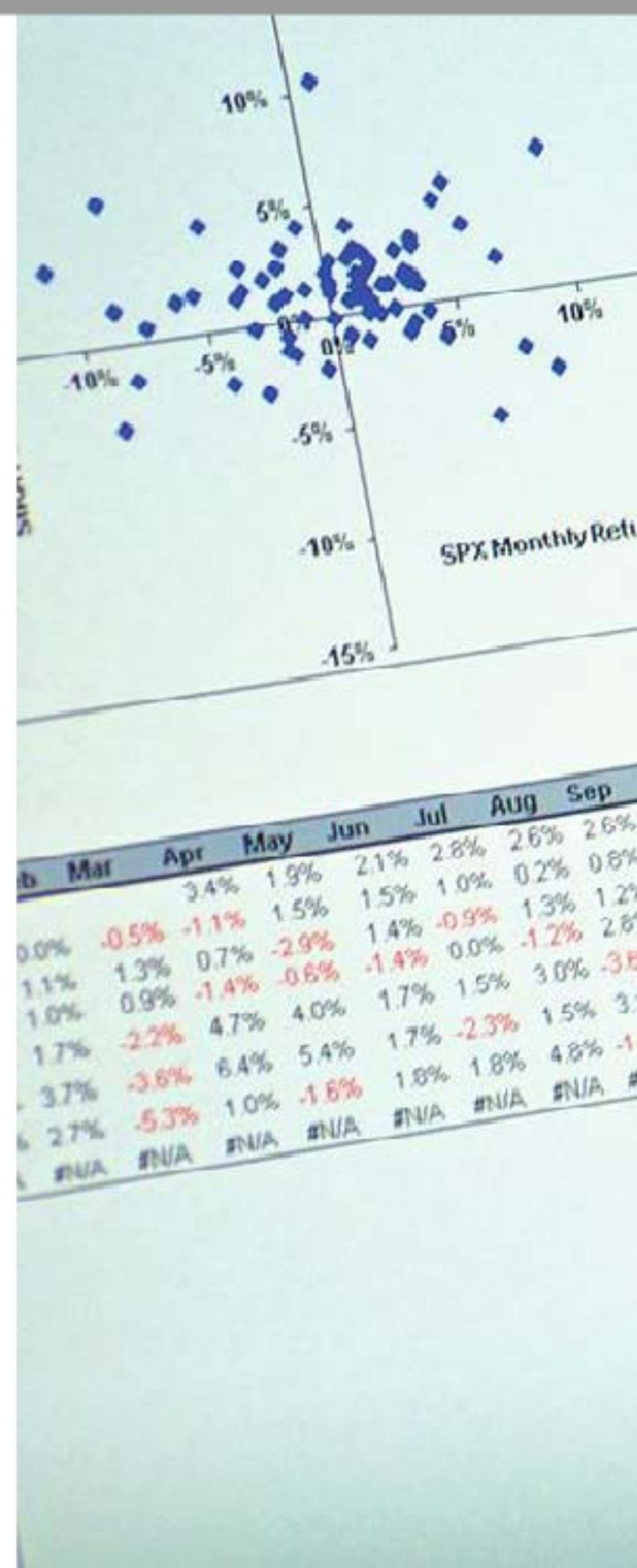
nement. Si les psychologues ont démontré qu'un petit enfant avait un sens inné de la grammaire (il sait, sans qu'on lui apprenne, placer dans le bon ordre un sujet, un verbe et un complément), il n'en est pas de même en matière de logique mathématique.

En cause ? Notre cerveau. Incapable de traiter la somme ahurissante des informations à sa disposition pour prendre une décision rationnelle et objective dans un laps de temps court, il trie, sélectionne, déforme parfois certaines d'entre elles. Il en

résulte une prise de décision rapide (utile chez nos lointains ancêtres face à un danger), mais souvent illogique, voire parfois carrément absurde. Perception erronée de l'aléatoire, simplification de la réalité, négligence de la fréquence d'un événement, stéréotypes... Autant de biais cognitifs que les psychologues parviennent de mieux en mieux à identifier.

DIFFICILE D'Y ÉCHAPPER...

Parmi ceux qui les ont le plus étudiés, figure l'Américain Daniel Kahneman, célèbre pour avoir montré, à contre-courant de ce que ses confrères appelaient l'*Homo economicus*, que même en matière d'économie et de finance, l'homme prend rarement les décisions les plus rationnelles. D'après ses travaux, ainsi que ceux d'autres psychologues, nous vous présentons 9 biais cognitifs parmi les plus répandus. Ce qui signifie qu'ils ont toutes les chances de vous concerner. Et s'il est bien difficile de leur échapper, vous verrez cependant qu'il suffit de savoir qu'ils existent pour minimiser leurs effets.

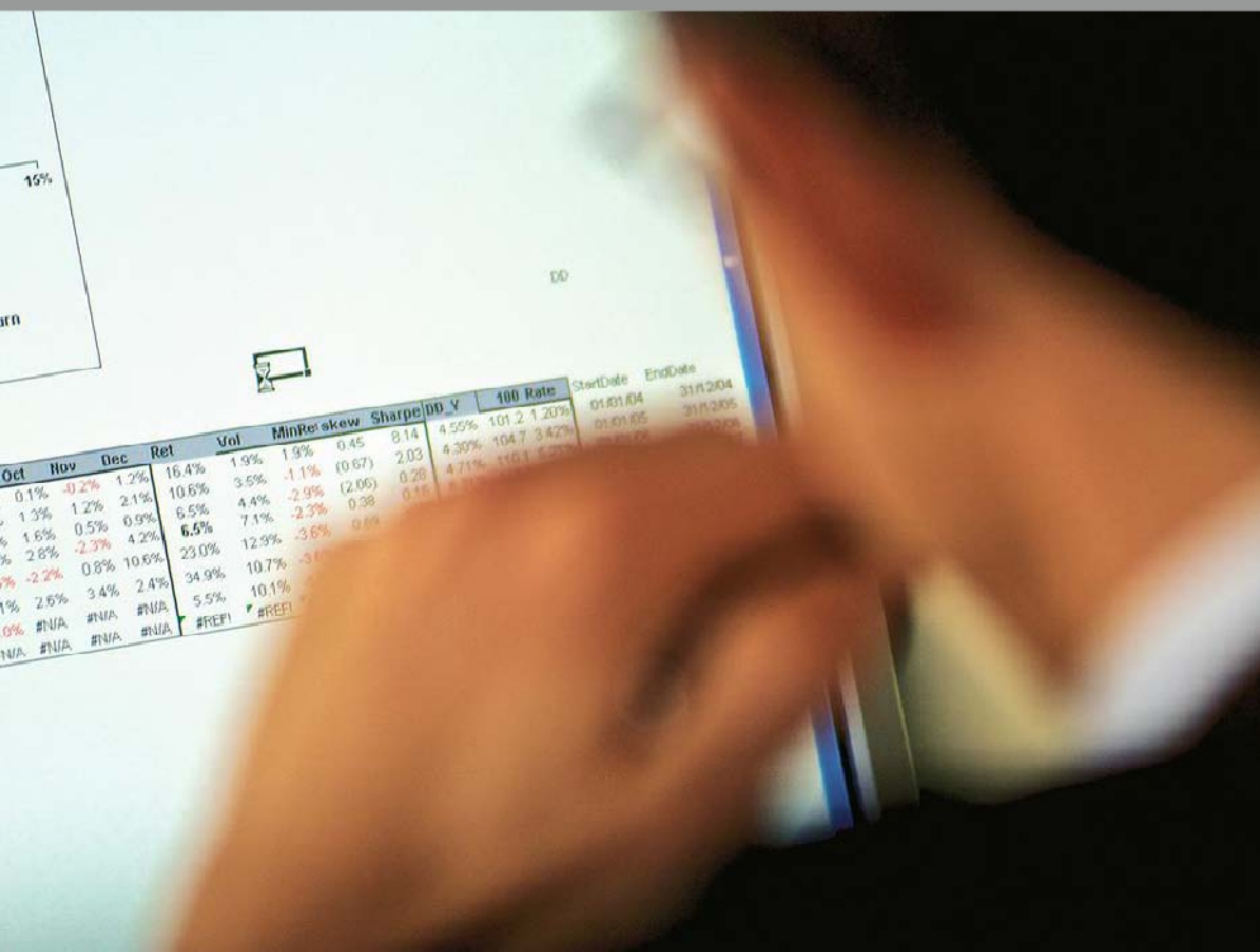


LE BIAIS DE... *la loi*

La "loi des petits nombres" est ce biais cognitif qui, faussant les résultats des sondages, nous conduit à prendre pour certaines des informations qui ne sont pourtant pas étayées. Daniel Kahneman donne, notamment, l'exemple d'une étude sur l'incidence du cancer du rein dans 3141 comtés des Etats-Unis : elle apparaît la plus faible dans les comtés les plus ruraux, les moins peuplés et localisés

Une nouvelle analyse des processus de décision

Pour ce dossier, nous avons puisé à la source la plus riche et la plus approfondie : les travaux de Daniel Kahneman, prix Nobel d'économie en 2002. Psychologue du comportement et de la cognition, il a créé une "théorie des perspectives" et ouvert une nouvelle discipline : la finance comportementale. Au cœur de ses analyses se trouve l'importance des biais cognitifs dans les processus de décision.



des petits nombres

dans des Etats du Midwest républicain, du sud et de l'ouest du pays.

Gare à l'échantillon étudié

Faut-il en conclure, rejetant l'idée qu'être républicain puisse protéger de la maladie, que c'est le mode de vie rural qui protège du cancer ? On est tenté de le croire... sauf que cette étude ne permet pas de le savoir. Le faible taux de cancer dans ces comtés n'est pas établi

sur une population assez large (ce sont des Etats peu peuplés). Pour preuve, Daniel Kahneman remarque dans cette même étude que dans d'autres comtés présentant les mêmes caractéristiques, l'incidence du cancer du rein y est la plus élevée ! Plus l'échantillon sur lequel est établie une statistique est petit, plus les résultats obtenus seront donc aberrants, avec de fortes variations par

rapport à la moyenne. Un phénomène très fréquent dans les sondages d'opinion, dont on ne peut donc que conseiller de regarder de près le nombre de sondés avant de leur accorder quelque crédit, sous peine de déductions hâtives.

A noter : cette "loi des petits nombres" s'applique aussi dans le temps. Même si la fréquence d'un événement (météorologique, par

exemple) est faible, il peut se reproduire deux années consécutives : ces deux années constituent alors un trop petit échantillon pour être forcément conforme à la probabilité établie sur plusieurs décennies de relevés météo. Ne sous-estimez donc pas un risque, de crue centennale par exemple, sous prétexte qu'une crue centennale a déjà eu lieu l'année précédente.

**LE BIAIS DE...****la régression vers la moyenne**

Le biais de la "régression vers la moyenne" nous fait prendre des variations pour des tendances... Et de mauvaises décisions.

Imaginons que vous ayez remarqué qu'après avoir félicité un enfant pour une bonne note, celui-ci a obtenu un moins bon résultat à l'évaluation suivante. Au contraire, alors que vous en avez puni ou réprimandé un autre à la suite d'une mauvaise note, celui-ci a mieux réussi le

contrôle suivant. Vous pourriez en déduire que les punitions sont plus efficaces que les félicitations. Une conclusion bien trop hâtive ! Car c'est omettre que la performance peut connaître des fluctuations aléatoires (alors que la moyenne établie sur le long terme exclut, elle, ces variations aléatoires). En effet, celui qui a réussi son premier contrôle a peut-être tout simplement eu de la chance ou été meilleur

que d'habitude et, selon la loi de "régression vers la moyenne", il a toutes les chances d'obtenir de moins bonnes notes lors des examens qui vont suivre. A l'inverse, les élèves ayant eu de moins bonnes notes vont, eux aussi, se rapprocher de leur propre moyenne en obtenant de meilleures notes que la précédente.

Le changement qui s'opère juste après votre intervention n'est donc pas

forcément révélateur d'un véritable changement, mais peut simplement être un résultat aléatoire indépendant de la punition infligée ou des félicitations accordées.

Considérez la durée de la période concernée

Cette "régression vers la moyenne" est aussi prise en compte par les scientifiques quand ils évaluent l'efficacité d'un traitement, ou par les pouvoirs publics lorsqu'il s'agit de tester

**LE BIAIS DE...****négligence du taux de base**

Les psychologues appellent "négligence du taux de base" le biais qui déforme notre lecture des probabilités, nous amenant par exemple à nous inquiéter pour rien. Imaginez : après avoir effectué le test de dépistage d'une maladie rare touchant une personne sur 10 000 en France, vous recevez un courrier de l'hôpital vous annonçant que ce

test, efficace à 99 %, s'est révélé positif. L'inquiétude vous saisit : la probabilité que vous soyez malade vous semble être de 99 %. Faux : cette probabilité est inférieure à... 1 %.

Les probabilités vous réservent des pièges

L'erreur d'appréciation vient de ce que nous oublions une information essentielle : la fréquence du phénomène

lui-même (1/10 000 pour la maladie rare). Raisonnons au lieu de paniquer : si 10 000 personnes passent ce test à l'hôpital, statistiquement, il y en aura en moyenne une qui sera atteinte de la maladie et pour laquelle le test sera positif. Mais puisqu'il n'est fiable qu'à 99 %, il se révélera aussi positif (à tort) pour une centaine de

personnes parmi les 9 999 non touchées. Une centaine de lettres sera donc envoyée pour seulement 1 personne réellement malade. Autrement dit, la fiabilité d'un test n'indique pas la probabilité que l'événement testé ait eu lieu, surtout si la fréquence de cet événement est rare. Or, faut-il le préciser, ce qui est rare n'est pas le plus probable...

LE BIAIS DE...

la disponibilité en mémoire

l'effet d'un nouvel équipement sur le nombre d'accidents (un rond-point ou un radar automatique, par exemple).

Dans tous les cas, il est nécessaire de prendre en considération une période assez longue pour comparer les périodes "avant l'intervention" et "après l'intervention", ou de comparer l'évolution avec d'autres éléments (autre élève, effet placebo, fragments de route similaires, etc.).

Le biais de la "disponibilité en mémoire" nous fait prendre un événement récent pour un événement fréquent. Ainsi, lorsqu'un crash d'avion se produit, nous avons tendance à surestimer la probabilité qu'un autre accident survienne... ce qui renforce la peur de prendre l'avion. Or, ce n'est pas parce qu'un événement vient d'avoir lieu qu'il a forcément plus de chances de se reproduire. Or, cette tendance à

privilégier les informations les plus récentes, ou celles qui nous viennent le plus facilement à l'esprit, s'accroît lorsque des événements émotionnellement forts nous touchent personnellement.

Ne vous focalisez pas sur les faits récents

Ainsi, *"une erreur judiciaire en votre défaveur affectera davantage votre confiance en la justice que si vous lisiez dans les journaux le récit de cette même erreur*

judiciaire, mais survenue à quelqu'un d'autre", explique Daniel Kahneman. Il est donc nécessaire de garder en mémoire les événements du même type qui se sont déjà déroulés, même lointains, pour ne pas céder à ce biais. Une précaution essentielle en matière de prévention des risques.



LE BIAIS D'...

ancrage

Le "biais d'ancrage" est celui qui nous défavorise dans une négociation. Daniel Kahneman l'a démontré en demandant aux visiteurs d'un centre de protection des oiseaux marins combien ils étaient prêts à donner pour soutenir le centre. Résultat : 64 dollars en moyenne. Mais s'il leur demande s'ils sont prêts à donner au moins 5 dollars,

leur intention de contribution n'est plus que de 20 dollars. Au contraire, lorsqu'un chiffre élevé est évoqué (400 dollars), leur contribution s'élève en moyenne à 143 dollars.

Fixez vos propres bases dans une négociation

Pour les psychologues, le premier chiffre avancé (5 ou 400 dollars) influence notre réponse. Une astuce bien

connue des professionnels du marchandage. En annonçant un prix volontairement élevé, le vendeur crée chez l'acheteur un ancrage qui va conduire celui-ci à surestimer la valeur du bien alors même qu'il cherche à en faire baisser le prix. Conclusion, il est préférable de parler le premier et donc de créer soi-même l'ancrage, après avoir estimé la valeur

qu'on est prêt à accorder au bien convoité. Il s'agit de garder à l'esprit que le vendeur aura plus à perdre à ne pas vendre qu'à le faire à bas prix. Face à l'annonce d'un montant excessif, mieux vaut faire mine de clore la négociation que de tenter de le faire baisser. Afin de tenter de repartir sur de nouvelles bases, plus profitables pour vous.

**LE BIAIS DE... confirmation**

Le "biais de confirmation" donne un air de vérité à ce que nous croyons. Nous en voulons pour exemple la récente étude qui montrait, images chocs à l'appui (des souris affreusement difformes), le pouvoir cancérigène des OGM. Etude largement approuvée par les associations écologistes, qui voyaient enfin confirmé ce contre quoi elles se battent depuis des années. Et cela même si cette étude n'a pas démontré le danger des OGM (ni sur les rats ni sur les hommes).

Sans qu'il soit ici question de soutenir l'innocuité des OGM, force est de constater que chacun d'entre nous a tendance à faire un tri dans les informations et les preuves qu'il reçoit, l'amenant insensiblement à sélectionner celles qui confirment ses hypothèses ou ses croyances antérieures. Un phénomène qui se produit

de manière d'autant plus sensible que l'incertitude est grande et que la polémique fait rage. Ce processus n'épargne d'ailleurs pas les scientifiques eux-mêmes, bien qu'ils en soient conscients. Des psychologues ont clairement mesuré à quel point les chercheurs évaluent d'autant plus favorablement les publications de la littérature scientifique que celles-ci apportent des résultats conformes à ce qu'ils croient, tandis qu'ils accueillent moins favorablement celles qui contredisent leurs convictions.

Ne négligez pas les points de vue contraires

Un tel "biais de confirmation" prend toute sa dimension nuisible lorsqu'il s'agit d'innover, quand des idées iconoclastes ou des résultats atypiques cherchent à trouver un écho dans leur domaine. S'en défendre nécessite de prendre en

compte tous les éléments à disposition, qu'ils soient conformes ou non à votre opinion, voire d'essayer d'adopter le point de vue contraire au vôtre. Un ancien agent recruteur de la CIA au temps de la guerre froide, Richard Heuer, ayant remarqué qu'il n'était pas de grand secours d'avoir conscience de ce biais, proposait d'y remédier, au moins en partie, en se consacrant à ce qu'il appelait "*l'analyse des hypothèses concurrentes*".

A noter que le biais de confirmation est différent de celui dit de "prophétie auto-réalisatrice" par lequel notre esprit se persuade d'une chose qui finit par arriver, tout simplement parce qu'inconsciemment, nous avons tout fait pour que cela arrive : croire qu'on va échouer est donc un assez bon moyen pour ne pas réussir.

LE BIAIS DE... l'aversion pour la perte

La peur de perdre est bien mauvaise conseillère. Dès les années 1970, Daniel Kahneman avait suggéré la propension des individus à être plus affectés par la perte que par le gain. Il introduisait l'idée que les décisions, notamment celles des financiers, n'étaient pas aussi rationnelles qu'on pouvait l'espérer. Une intuition confirmée par l'étude menée par Terrance Odean (université Berkeley, Californie)

entre 1987 et 1993 auprès d'un certain nombre d'investisseurs américains.

La peur de perdre aggrave vos pertes

Celui-ci a en effet montré qu'un investisseur avait tendance à conserver dans son portefeuille d'actions celles qui étaient les moins performantes, afin de ne pas souffrir de leur vente à perte. Il préfère alors en vendre d'autres, au rendement pourtant meilleur. Résultat,

la rentabilité des titres conservés était en moyenne inférieure de 3,4 % à celle des titres vendus. La peur de perdre aggrave donc les pertes. Ce processus survient notamment lorsque l'investisseur cherche à se convaincre que la baisse d'une valeur est passagère et qu'elle va nécessairement se rapprocher de ce qu'il considère comme sa vraie valeur. Rien d'inutile en ces temps de crise économique...





LE BIAIS DE... *cadrage*

Prendre conscience du “biais de cadrage”, c’est mesurer à quel point nous sommes influençables. Daniel Kahneman l’a démontré en 1981 lors d’une expérience restée célèbre. Le chercheur a interrogé deux groupes de personnes sur la décision à prendre alors qu’une hypothétique maladie pourrait causer la mort de 600 personnes. Dans le premier groupe, les participants avaient le choix entre deux solutions : l’option A permettait de sauver 200 personnes, tandis que l’option B avait 33 % de chances de sauver 600 personnes, mais 66 % de risques de ne sauver personne. Dans le cas de l’option B, un rapide calcul permet de montrer que le nombre de survivants

attendu est le même que dans l’option A, soit 200 personnes. Mais compte tenu du risque de ne sauver personne, 72 % des participants au test choisissaient l’option A.

L’énoncé d’une question influence votre réponse

Les probabilités de survie soumises au second groupe étaient les mêmes, mais leur formulation était modifiée : l’option A provoquait la mort de 400 personnes, tandis que dans l’option B, il y avait 33 % de chances pour que personne ne meure et 66 % de risques que tout le monde meure. 78 % des participants ont alors choisi l’option B. Clairement, la façon dont on énonce une question influence donc beaucoup la réponse.

LE BIAIS DE... *représentativité*

Scientifiquement appelé “heuristique de représentativité”, ce biais nous fait privilégier les stéréotypes. Il consiste à baser notre jugement sur des informations “personnalisantes” et des stéréotypes plutôt que sur les statistiques.

Méfiez-vous des préjugés

Un exemple ? Paul est quelqu’un de réservé, timide, méticuleux, cultivé et précis. A votre avis, est-il bibliothécaire, commerçant ou pilote de ligne ? Sans doute allez-vous répondre bibliothécaire, la description de Paul correspondant intuitivement à l’image que nous nous fai-

sons du bibliothécaire. En réalité, la réponse ayant la plus forte probabilité d’être exacte est “commerçant”, ces derniers étant bien plus nombreux que les bibliothécaires et les pilotes de ligne. Ce qui ne présage en rien de la profession du vrai Paul : les probabilités ne font que maximiser les chances de répondre juste.

Quant aux préjugés qui orientent notre vision du monde, est-il utile de dire qu’il faut s’en méfier et s’efforcer de tenir compte de toutes les informations à notre disposition avant de prendre une décision ?



EN PRATIQUE

QUESTIONS RÉPONSES



Comment sait-on qu'une substance doit être classée "cancérogène"?

Cette question vous a peut-être été inspirée par le classement, en juin 2012, des émanations des diesels dans la catégorie des "cancérogènes". Ou par la désignation, en mai 2011, comme "peut-être cancérogènes pour l'homme" des ondes électromagnétiques émises par les téléphones portables. Ce qui pose, vous avez raison, la question de savoir pourquoi une substance ou une technologie se voit ainsi étiquetée.

Ces deux annonces officielles proviennent du Centre international de recherche sur le cancer (Circ). Cet institut, qui travaille pour l'Organisation mondiale de la

Question de Djilali Sahi, Rosny-sous-Bois (93)

santé, procède régulièrement à des mises à jour des données sur les risques associés à la cancérisation. Si des résultats inquiétants s'accumulent autour d'une substance ou d'une technologie, le Circ mandate des experts qui analysent les études épidémiologiques disponibles (elles comparent par exemple la fréquence des cancers dans deux groupes d'individus exposés et non exposés), expérimentales (sur des animaux) ou cellulaires (sur les mécanismes d'action). Puis il édite une monographie et émet, ou non, un nouvel avis: un agent peut ainsi entrer dans le classement du Circ... ou y changer de groupe.

5 CATÉGORIES DE RISQUE

Car toutes les places ne se valent pas dans la liste des agents étudiés par l'institut. En pratique, cinq groupes ont été définis en fonction de la solidité des preuves étudiées. Le groupe 1 réunit les agents "cancérogènes pour l'homme", tels que les boissons alcoolisées ou le benzène. Le groupe 2A est celui des agents "proba-

blement cancérogènes pour l'homme", comme travailler dans un salon de coiffure; et le groupe 2B, celui des téléphones portables, "peut-être cancérogènes pour l'homme". Le groupe 3 référence le plus grand nombre de membres: c'est celui des inclassables, pour lesquels la science admet être impuissante à se prononcer, comme le thé et plus de la moitié du millier d'agents évalués à ce jour par le Circ. Enfin, le groupe 4 correspond au club très fermé des agents "probablement pas cancérogènes pour l'homme"... qui ne compte qu'un seul membre: le caprolactame, une substance utilisée dans la synthèse du Nylon.

Comment se décide le passage d'un groupe vers un autre? Dans le cas des émanations de diesel, leur arrivée dans le groupe 1 n'a pas surpris les cancérologues. Déjà, en 1988, ces émanations avaient été classées comme "probablement cancérogènes" (groupe 2A), ce qui signifiait que les études sur les animaux étaient solides mais celles sur l'homme →

➤ Les tests sur les risques de cancer d'un agent permettent aux experts de l'OMS de trancher, comme en 2012 sur les émanations du diesel.



→ encore insuffisantes. Depuis, les preuves se sont accumulées. Et lorsqu'en 2012 les scientifiques se sont à nouveau réunis, ils avaient à leur disposition une étude récente portant sur 12 000 personnes... Ses conclusions sont sans appel: le risque de cancer du poumon est environ trois fois plus important chez les sujets les plus exposés. Pour de nombreux chercheurs cependant, ce classement dans le groupe des cancérogènes arrive bien tard. Ce caractère avait en effet selon eux été suffisamment démontré chez l'homme depuis la fin des années 1990.

Mais toute modification apportée au classement du Circ nécessite un très long travail de préparations et de recherche du consensus. L'avis émis ne reflète d'ailleurs pas systématiquement celui de tous les chercheurs du domaine. Et peut même susciter des polémiques, comme l'illustre la désignation des ondes électromagnétiques comme "peut-être cancérogènes" (groupe 2B) en mai 2011. Ici, le mot "peut-être" signifie que le lien entre

5 niveaux de risque établis en fonction de 4

Les substances étudiées par le Centre international de recherche sur le cancer sont divisées en 5 groupes. Pour les classer, les experts recourent à 3 types de données (épidémiologiques, expérimentales, biologiques). La solidité des preuves est évaluée et permet ensuite de définir plusieurs "cas types".

1 Les experts étudient les risques de cancer d'une substance à partir de 3 types d'études...



Etudes sur l'homme

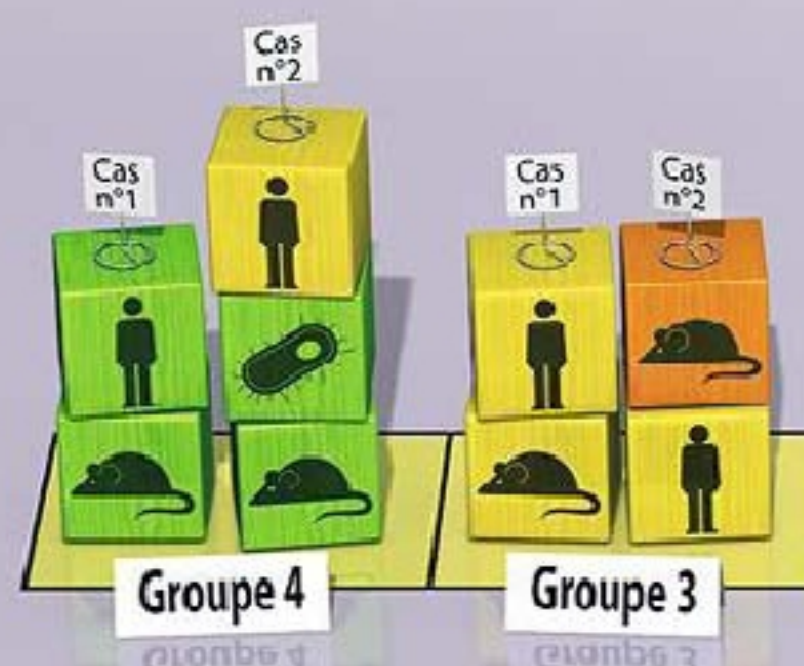


Etudes sur l'animal



Etudes sur la cellule

2... qui, en fonction de la solidité des résultats, permettent de la classer dans un de ces 5 groupes



Groupe 4
"Agent probablement pas cancérogène pour l'homme"

1 agent
Caprolactame

Groupe 3
"Agent inclassable quant à sa cancérogénicité pour l'homme"

508 agents
Ex.: le thé, le café, le paracétamol, le cholestérol...

les ondes et l'apparition d'un cancer est "crédible", mais "sans que cette relation de cause à effet ait pu être démontrée avec certitude" et "sans que puisse être éliminé le hasard, un biais ou des facteurs de confusion".

C'est ainsi que les radiations émises par les téléphones ont rejoint le DDT, le travail dans un pressing ou les pickles à la mode asiatique dans le groupe des "peut-être cancérogènes". Or, pour certains épidémiologistes ou médecins, les ondes auraient mérité d'être classées dans le groupe 2A... Quand, à l'inverse, d'autres penchaient pour le groupe 3.

AUX ÉTATS DE LÉGIFÉRER

Mais le Circ se veut le garant d'une science "officielle" et, au final, son action est largement saluée par la communauté scientifique. "Notre rôle se limite à mettre à disposition la base de données scientifiques la plus récente et la plus juste", explique Nicolas Gaudin, du Circ. Et cette liste n'a aucune valeur réglementaire. C'est aux au-

torités nationales qu'il revient ensuite de légiférer.

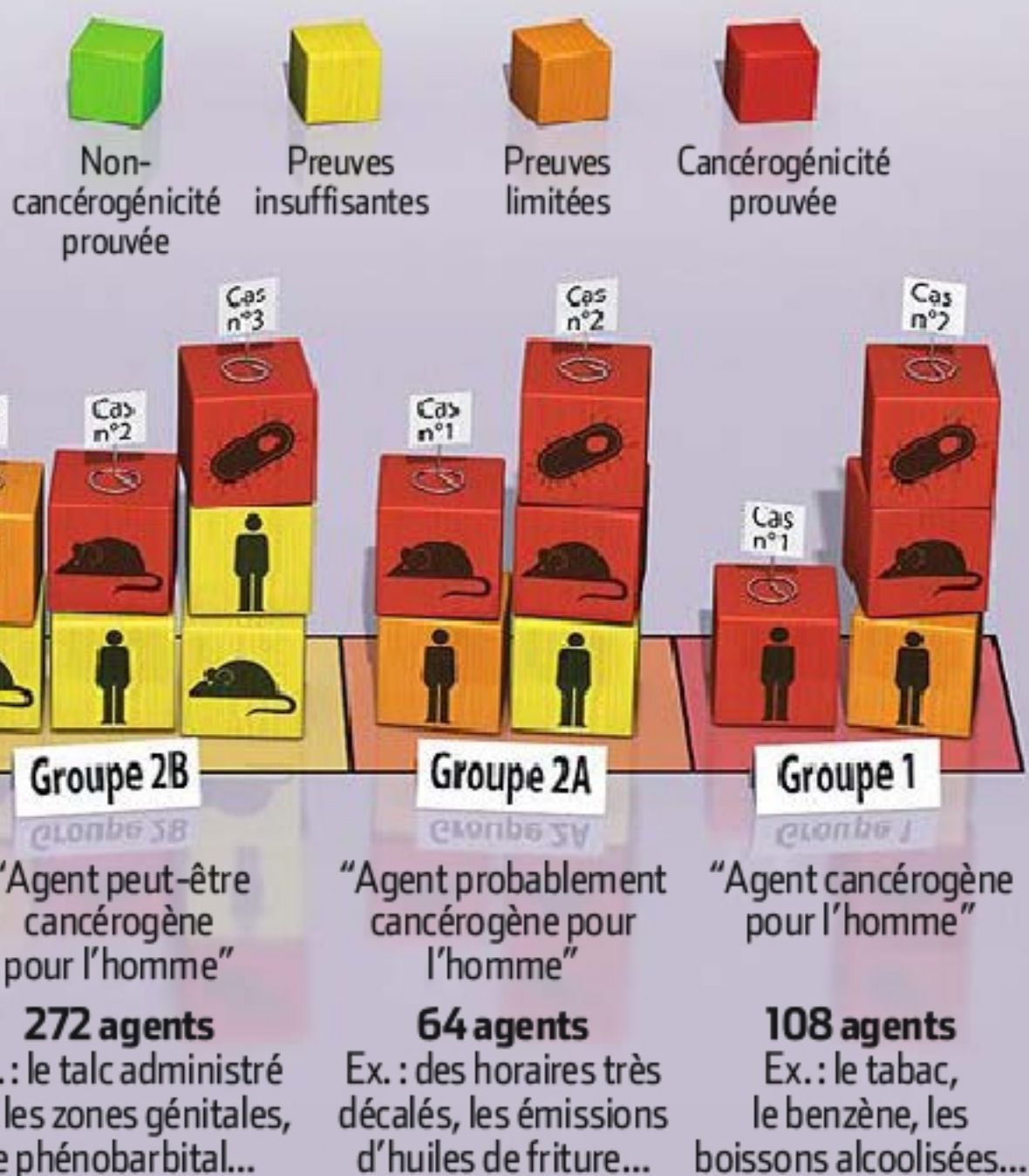
En France, la législation s'appuie sur les règlements européens CLP (Classification, Labelling, Packaging) et Reach (Registration, Evaluation and Authorisation of Chemicals), qui postulent que l'évaluation revient aux industriels. A eux d'étudier le potentiel cancérogène des substances dont la production ou l'importation est supérieure à 1 000 tonnes par an. Si les données fournies paraissent insuffisantes à l'Agence européenne des produits chimiques (Echa), le fournisseur est alors tenu de proposer le protocole d'une étude plus approfondie. "Ces études de cancérogénicité sont longues, coûteuses et sacrifient des milliers d'animaux", explique Anne-Christine Macherey, direc-

LE CAS DU FORMALDÉHYDE

"C'est la seule substance qui n'a pas la même place dans les deux classifications", souligne Anne-Christine Macherey (CNRS). Ce composé volatil présent dans les meubles en aggloméré et certains produits d'entretien est, pour le Circ, un cancérogène avéré, mais seulement suspecté pour l'UE. En France, la réglementation a tranché: les travaux exposant au formaldéhyde sont considérés "cancérogènes", mais le risque est jugé négligeable pour les particuliers par l'Agence nationale de sécurité sanitaire. Elle a pourtant, en 2011, déposé auprès de l'Agence européenne des produits chimiques une proposition de reclassement du formaldéhyde dans la catégorie 1A. Ce qui ne devrait pas être sans conséquences économiques et technologiques...

degrés de preuves

LES PREUVES RASSEMBLÉES SUR LA CANCÉROGÉNÉCITÉ D'UN AGENT SONT CLASSÉES SELON LEUR SOLIDITÉ :



trice de l'unité Prévention du risque chimique au CNRS. Raisons pour lesquelles leur réalisation n'est pas toujours imposée... ni nécessaire.

En effet, si une substance est considérée comme un mutagène (provoquant des mutations de l'ADN) avéré ou présumé, elle est par défaut considérée comme probablement cancérogène. Elle entre alors d'office dans le groupe des "cancérogènes, mutagènes, toxiques pour la reproduction" (CMR), ce qui impose des limites en termes de mise sur le marché, de protection des travailleurs et des consommateurs (1 300 agents sont concernés).

Les méthodes d'évaluation utilisées par l'Europe sont proches de celles du Circ, mais le classement des dangers est différent. Pour chaque catégorie de CMR, il

existe trois niveaux qui varient avec le degré de preuve : effet avéré (catégorie 1A), effet qui peut être considéré comme réel (catégorie 1B), et effet suspecté d'être nuisible mais pour lequel les données sont insuffisantes (catégorie 2). Les substances classées 1A et 1B sont interdites à la vente au grand public, et les professionnels doivent leur trouver des substituts.

Si des données poussant à suspecter une substance contredisent les résultats présentés par les industriels, un Etat membre peut proposer à l'Echa une révision du classement ou demander une réévaluation. Ce sera alors aux autorités sanitaires de lever ou de confirmer le doute. Plus de 110 substances seront ainsi réévaluées par les Etats de l'Union européenne d'ici à 2015. **V.E.**

Pourquoi jouer des notes aiguës est si difficile au violon ?

Question de Benoît Ducoin, Paris 19^e

Quiconque a déjà assisté aux débuts d'un violoniste, d'un altiste ou d'un violoncelliste sait à quel point exécuter des notes aiguës peut donner des résultats douloureux pour les oreilles. Un phénomène commun à tous les instruments sur lesquels le musicien produit lui-même les notes, à la différence des guitares ou des claviers par exemple. La difficulté tient à ce que, sur une même corde, la distance entre les notes aiguës est plus faible qu'entre les notes graves, ce qui exige une plus grande précision.

CAR LA CORDE SE RÉDUIT...

Imaginons une corde qui produit un *do* quand elle vibre à vide. Réduite de moitié (par exemple en la bloquant sur le manche de l'instrument par une pression du doigt), cette corde produit un deuxième *do*, plus aigu d'une octave. En renouvelant l'opération, nous obtenons un troisième *do*, plus élevé d'une octave supplémentaire... Or, au sein d'une octave, il y a toujours

le même nombre de notes (12 demi-tons). Pour passer d'une note à l'autre, il faut donc réduire la corde d'une longueur d'autant plus petite que l'on progresse vers l'aigu.

Ce phénomène suit une courbe logarithmique qui correspond à notre mode de perception : notre oreille est sensible au rapport entre les fréquences sonores et non à leur différence. Nous percevons le même intervalle d'un ton (9/8 de la fréquence de la note précédente) entre le *do* (264 Hz) et le *ré* (297 Hz) d'une octave, qu'entre le *do* (528) et le *ré* (même rapport de 9/8 = 594) de l'octave supérieure. Pourtant, la différence entre les fréquences est, elle, plus grande : 33 Hz entre les premiers *do* et le *ré*, contre 66 Hz à l'octave supérieure. Une petite erreur de doigté dans l'aigu entraîne donc une modification importante du rapport de fréquence entre les notes, plus sensible à l'oreille que dans les graves. Un véritable défi pour les débutants. **C.H.**

GAGNEZ UN ABONNEMENT D'UN AN À

SCIENCE & VIE

Cette rubrique est la vôtre, écrivez-nous !

Nous ne pourrions répondre à toutes et à tous, mais les auteurs des questions que la rédaction sélectionnera se verront offrir un abonnement d'un an à Science & Vie (pour eux-mêmes ou pour une personne de leur choix). La question doit impérativement être rédigée sur une carte postale.

SCIENCE & VIE, QUESTIONS/RÉPONSES
8, rue François-Ory, 92543 MONTROUGE CEDEX.



A part boucher nos oreilles, à quoi sert le cérumen ?

Question de Jean-Louis Salf, Saint-Maximin (83)

On peut effectivement se demander quelle est la fonction de cette substance jaunâtre qui, en encombrant les oreilles, gêne l'audition, provoquant parfois céphalées et vertiges. Eh bien, elle sert à... protéger le tympan : sa viscosité empêche l'intrusion de poussières et de bactéries. Ce liquide est naturellement sécrété par les glandes cérumineuses situées dans la peau du conduit auditif. Il est ensuite chassé vers l'extérieur par les mouvements d'articulation liés à la mastication et la phonation. Quand ce mouvement est contrarié,

un bouchon se forme alors, soit que le conduit auditif est trop étroit (chez les enfants), soit que la peau est trop sèche (personnes âgées). Mais l'usage du coton-tige, fortement déconseillé, est surtout pointé : *"Plus on frotte, plus la sécrétion devient importante et épaisse, et le cérumen est repoussé à l'intérieur"*, insiste Christiane Lobryeau-Desnus, phoniatre à La Pitié-Salpêtrière, à Paris. Pour éliminer un bouchon de cérumen, il suffit souvent de le ramollir avec un peu d'eau savonneuse ou un bain d'oreille spécifique. **L.V.**



Peut-on rester anonyme quand on surfe sur Internet ?

Question de Arnaud Delaporte, Hirson (02)

Oui... mais les techniques efficaces exigent des compétences et des moyens hors de portée du grand public. Cela étant, chacun peut prendre certaines précautions afin d'empêcher autant que faire se peut les sites de vous suivre ou de vous "espionner", sachant que dès que vous vous connectez, ils récupèrent des informations précises sur votre connexion. Vous pourrez l'observer en faisant l'expé-

rience proposée par la Commission nationale de l'informatique et des libertés (1).

Première mesure à prendre : régler les options de son navigateur web (Firefox, Internet Explorer...) pour supprimer les cookies, ces petits fichiers que les sites consultés inscrivent dans votre ordinateur. Revers de la médaille : en n'étant plus reconnu par les sites que vous fréquentez régulièrement, ceux-ci n'afficheront

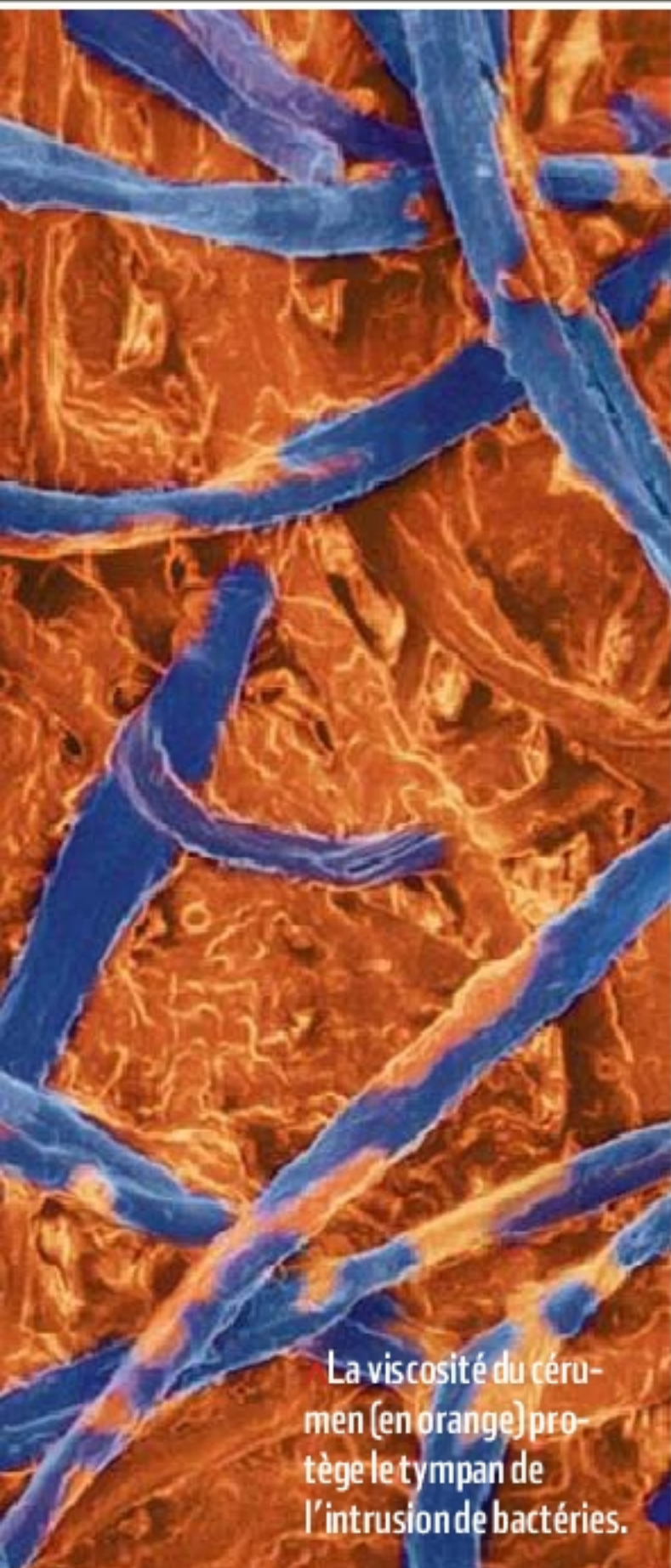
plus de pages personnalisées présentant diverses informations qu'il vous faudra ressaisir. Pour éviter ce désagrément, vous pouvez conserver certains cookies... et éliminer les autres.

ALLEZ DANS UN CYBERCAFÉ

La seconde solution permet de ne pas être "espionné" sur un réseau public. Elle consiste à installer l'extension "HTTPS everywhere" compatible avec Firefox et Chrome. Dès que vous vous connectez à l'un des 1 500 sites répertoriés dans la

liste de ce module (Google, Twitter, Wikipédia...), il vous redirige vers sa version "https", une liaison sécurisée (un petit cadenas s'affiche dans la barre d'adresse). Cette option est utile lorsque vous vous connectez à une borne wi-fi publique.

Troisième technique : masquer son adresse IP (Internet Protocol), c'est-à-dire la plaque d'immatriculation de tout appareil raccordé à un réseau, grâce à un proxy (un ordinateur qui sert d'intermédiaire entre votre connexion et le site que vous visitez). Vous pouvez passer par des services spécialisés comme (www.anonymizer.com, megaproxy.com) ou utiliser un logiciel qui se connectera,



La viscosité du cérumen (en orange) protège le tympan de l'intrusion de bactéries.

Pourquoi la bonne odeur du café se perd-elle au goût ?

Question de Frédéric Namur, Paris 3^e

Si le goût du café semble moins agréable que son odeur, ce n'est pas simplement parce que paraît souvent meilleur en imagination que dans la réalité ce que l'on désire... C'est parce qu'en le dégustant, l'odeur se transforme et que, dans ce cas précis, s'y mêle alors une sensation d'amertume.

Le goût résulte de la somme de deux perceptions principales difficiles à dissocier : la saveur (amer, sucré, salé...), perçue grâce aux papilles et au palais ; et le parfum en bouche, l'arôme. Celui-ci diffère du parfum dans l'air, car si

l'odeur parvient aux mêmes récepteurs olfactifs situés au sommet des fosses nasales, elle y parvient depuis le fond de la bouche et non directement par le nez.

Le goût du café nous paraît moins bon que son odeur, car les deux composantes qui forment son goût, l'arôme et la saveur, sont moins agréables. L'odeur en bouche est altérée par la destruction ou la libération de molécules volatiles sous l'action de la salive et du changement de température. Quant à la saveur amère, *"cette perception provoque naturellement le rejet,*

car les molécules amères, comme le cyanure, sont en général dangereuses", explique Jean-Claude Pernollet, neurobiologiste à l'Institut national de la recherche agronomique (Jouy-en-Josas). Dans la nature, la caféine protège le caféier des insectes qui le consomment en les dégoûtant ou en les empoisonnant. Chez l'homme, il stimule le cerveau de façon plaisante... Du coup, on apprend à accepter son goût amer.

Ce qui est vrai pour le café l'est aussi pour le chocolat, les amandes ou la bière. A l'inverse, certains, comme le fromage, possèdent une odeur moins appréciée que leur goût. **K.B.**

via votre navigateur, à des proxy (comme Ultrasurf). Cette solution présente trois limites. Premièrement, c'est le proxy qui stocke votre adresse IP et vos mots de passe ; il faut donc faire confiance à cet intermédiaire. Deuxièmement, le paramétrage depuis le navigateur n'est pas évident pour le grand public (si ce n'est Ultrasurf qui est automatique, mais avec Internet Explorer seulement). Enfin, la navigation devient plus lente puisque la connexion transite par le proxy. Finalement, pour rester anonyme, le plus simple est d'utiliser les machines d'un cybercafé... **P.R.**

(1) <http://www.cnil.fr/vos-libertes/vos-traces>



▲ L'odeur en bouche du café (l'arôme) est altérée sous l'effet de la salive et sa saveur révèle de l'amertume.



EN PRATIQUE

TECHNOFOLIES

Les lunettes anti-décalage horaire

Sur cette paire de "surlunettes" : un dispositif lumineux capable d'avancer ou de retarder l'horloge biologique du porteur. Une solution pratique pour ceux qui, comme les voyageurs, souffrent de cycles du sommeil perturbés.

Finis les insomnies causées par le décalage horaire. Adieu les somnifères pour éviter les nuits blanches. Grâce aux Re-timer, cette toute nouvelle paire de "surlunettes" venue d'Australie,

les grands voyageurs vont retrouver le sourire. Car il s'agit ni plus ni moins du premier système au monde non médicamenteux conçu pour recaler leur horloge interne.

Son principe ? Il repose sur le fonctionnement de notre rythme diurne et nocturne, bien connu des scientifiques. "Chaque être humain dispose d'une horloge biologique, qui a son propre rythme. Elle est synchronisée avec l'alternance du jour et de la nuit sur une période de vingt-quatre heures", explique Marie-Paule Felder-Schmittbuhl, du département de neurobiologie des rythmes de l'Institut des neurosciences cellulaires et intégratives de Strasbourg.

Cette horloge, qui contrôle le cycle veille/sommeil, est réinitialisée tous les jours à l'aide des stimuli envoyés par des cellules sensibles à la lumière vive, situées dans la partie interne de la rétine. Durant le jour, l'horloge garde le cerveau en alerte. La nuit, elle pousse la glande pinéale à sécréter

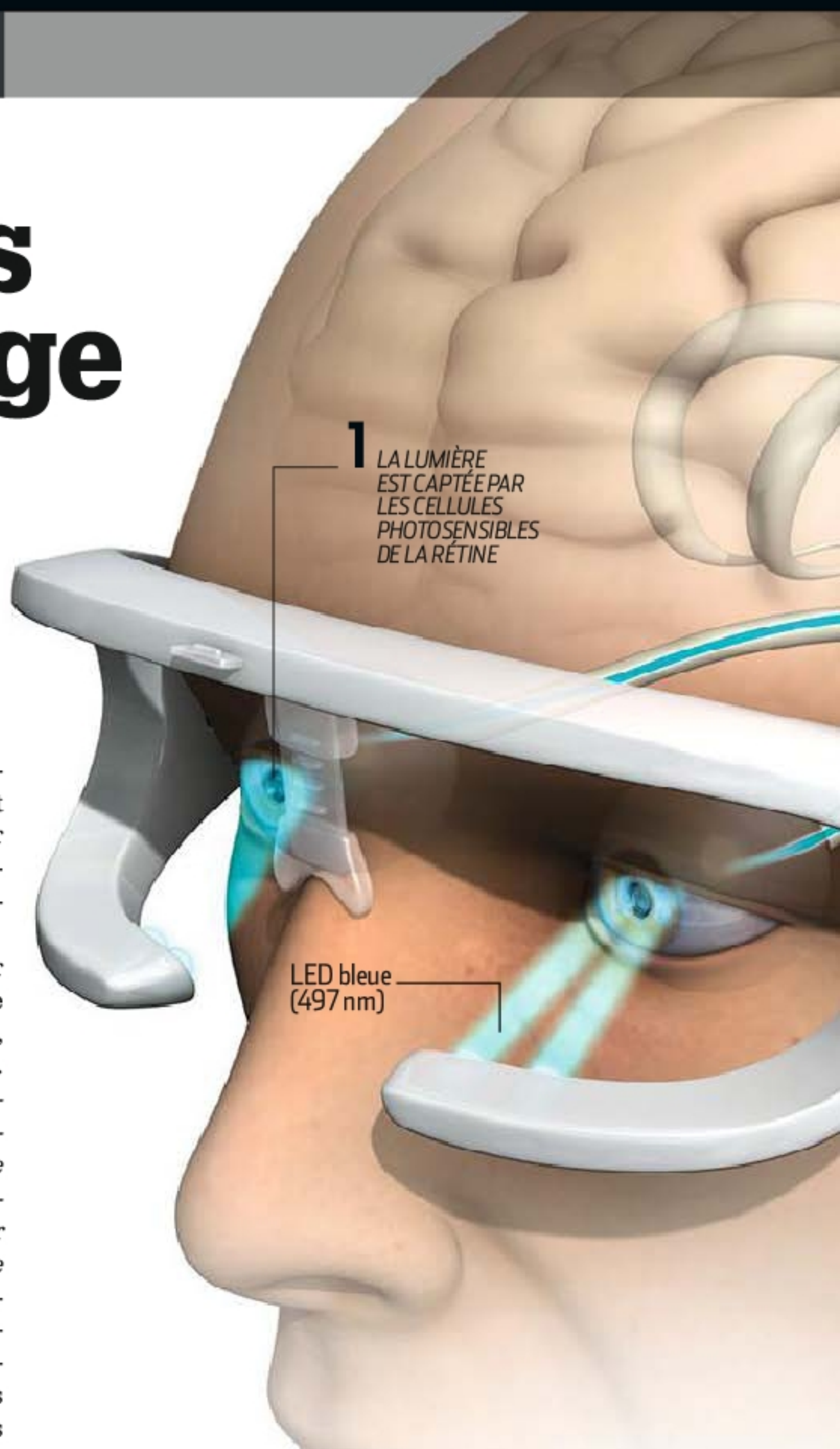
de la mélatonine, "l'hormone du sommeil", ce qui nous fait dormir. Quand tout va bien, ce cycle se coordonne parfaitement avec l'alternance du jour et de la nuit.

DES SIGNAUX LUMINEUX...

Mais dans certaines situations, la synchronisation peut se dérégler : c'est le cas notamment chez 10 %

des insomniaques, chez les personnes qui travaillent en trois-huit, ou après un décalage horaire lié à un voyage faisant traverser plusieurs fuseaux horaires.

Pour résoudre ce problème, un professeur en psychobiologie du sommeil, Leon Lack, et sa consœur Helen Wright, de l'Institut pour la santé du sommeil de



3 DATES CLÉS

1729

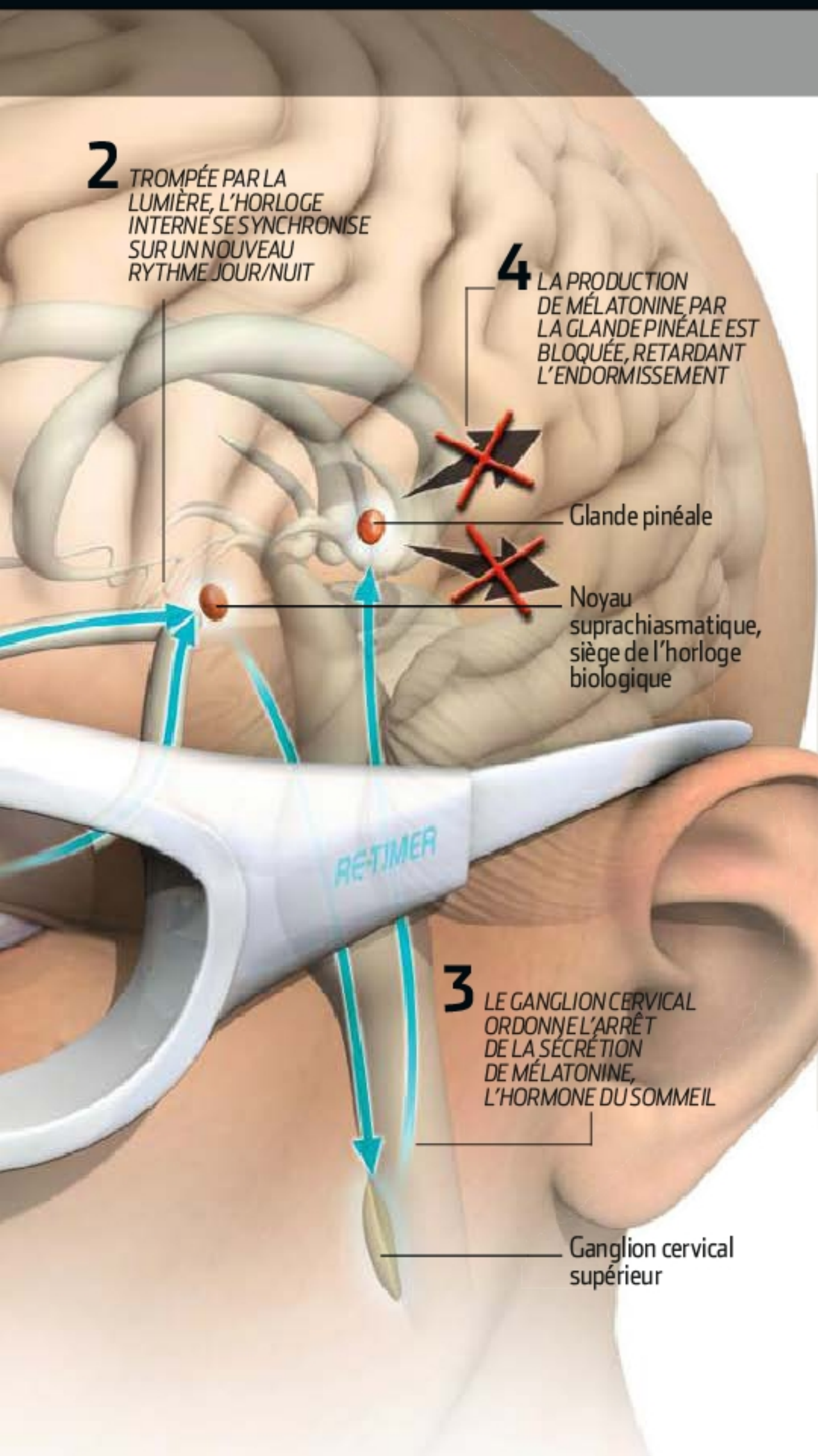
Le savant français Jean-Jacques Dortous de Mairan décrit l'alternance jour/nuit de l'horloge biologique, présente chez la plupart des organismes vivants.

1984

Norman E. Rosenthal, de l'Institut national de santé mentale américain, conçoit le premier appareil de luminothérapie pour traiter la dépression.

2001

Un prototype de lunettes équipées de LED est mis au point à l'université Flinders (Australie).



2 TROMPÉE PAR LA LUMIÈRE, L'HORLOGE INTERNE SE SYNCHRONISE SUR UN NOUVEAU RYTHME JOUR/NUIT

4 LA PRODUCTION DE MÉLATONINE PAR LA GLANDE PINÉALE EST BLOQUÉE, RETARDANT L'ENDORMISSEMENT

Glande pinéale

Noyau suprachiasmatique, siège de l'horloge biologique

3 LE GANGLION CERVICAL ORDONNE L'ARRÊT DE LA SÉCRÉTION DE MÉLATONINE, L'HORMONE DU SOMMEIL

Ganglion cervical supérieur

l'université Flinders d'Adélaïde (Australie), ont eu l'idée, au début des années 2000, de créer cette paire de "surlunettes" spéciale. Équipée de LED bleu-vert situées sur la partie basse de la monture, à 12 mm des yeux, elle envoie régulièrement des signaux lumineux vers les yeux du porteur. C'est que les deux chercheurs ont observé

qu'une lumière vive, administrée à des moments précis de la journée, était inoffensive et sans effet sur la vue, mais capable de faire avancer ou reculer le rythme biologique, dit "circadien", des patients (voir infographie).

"Une lumière vive, équivalente à 2000 lux, de couleur bleu-vert, a la capacité de modifier le séquençage

Comment ça marche ?

Les lunettes produisent une lumière bleue qui agit comme la lumière du jour sur les cellules photosensibles de la rétine (1). Ces cellules transmettent des stimuli à l'horloge biologique logée dans le noyau suprachiasmatique, situé dans l'hypothalamus, à l'arrière du chiasma optique – là où les nerfs optiques se croisent (2). Le noyau mobilise le ganglion cervical supérieur (3) qui va stopper la sécrétion de mélatonine, l'hormone du sommeil produite par la glande pinéale (4). L'endormissement peut ainsi être décalé d'environ une heure par jour.

Un réglage progressif

Un exemple : le voyageur parisien qui se rend à New York retardera son horaire de coucher habituel (23 h) d'une heure par jour en portant les lunettes les quatre jours précédant son départ.

Horaire new-yorkais

15h 16h 17h 18h 19h 20h 21h 22h 23h 0h 01h 02h

Horaire parisien (décalage de six heures)

	21h	22h	23h	0h	01h	02h	03h	04h	05h	06h	07h	08h
	Phase d'éveil			Phase de sommeil								
J-3												
J-2												
J-1												
J												

des rythmes via son action directe sur le cerveau", explique Leon Lack. Au début de la nuit, ces signaux lumineux retardent le cycle. Résultat : l'envie d'aller dormir vient plus tard. Tandis qu'aux premières lueurs de l'aube, ils avancent l'horloge interne du porteur, anticipant ses réveils.

... POUR ÉVITER LE JETLAG

Des essais cliniques réalisés dès 2001 ont montré que passer deux heures avec les Re-timer sur le nez pouvait décaler nos cycles jusqu'à quarante minutes. Le système consiste donc à les porter de trente à cinquante minutes, tous les jours durant

les trois jours précédant le décollage (dans le cas d'un voyage), afin de décaler progressivement l'horloge sur le nouveau fuseau horaire. Puis à refaire quelques séances après l'atterrissage.

Pour aider le porteur à connaître le bon dosage, la société qui commercialise ces lunettes a mis au point un calculateur de "jet-lag", disponible sur son site Internet. De quoi redonner le sommeil même aux plus insomniaques. Avec l'avantage, contrairement aux médicaments, de ne pas risquer de provoquer l'assoupissement dans la journée.

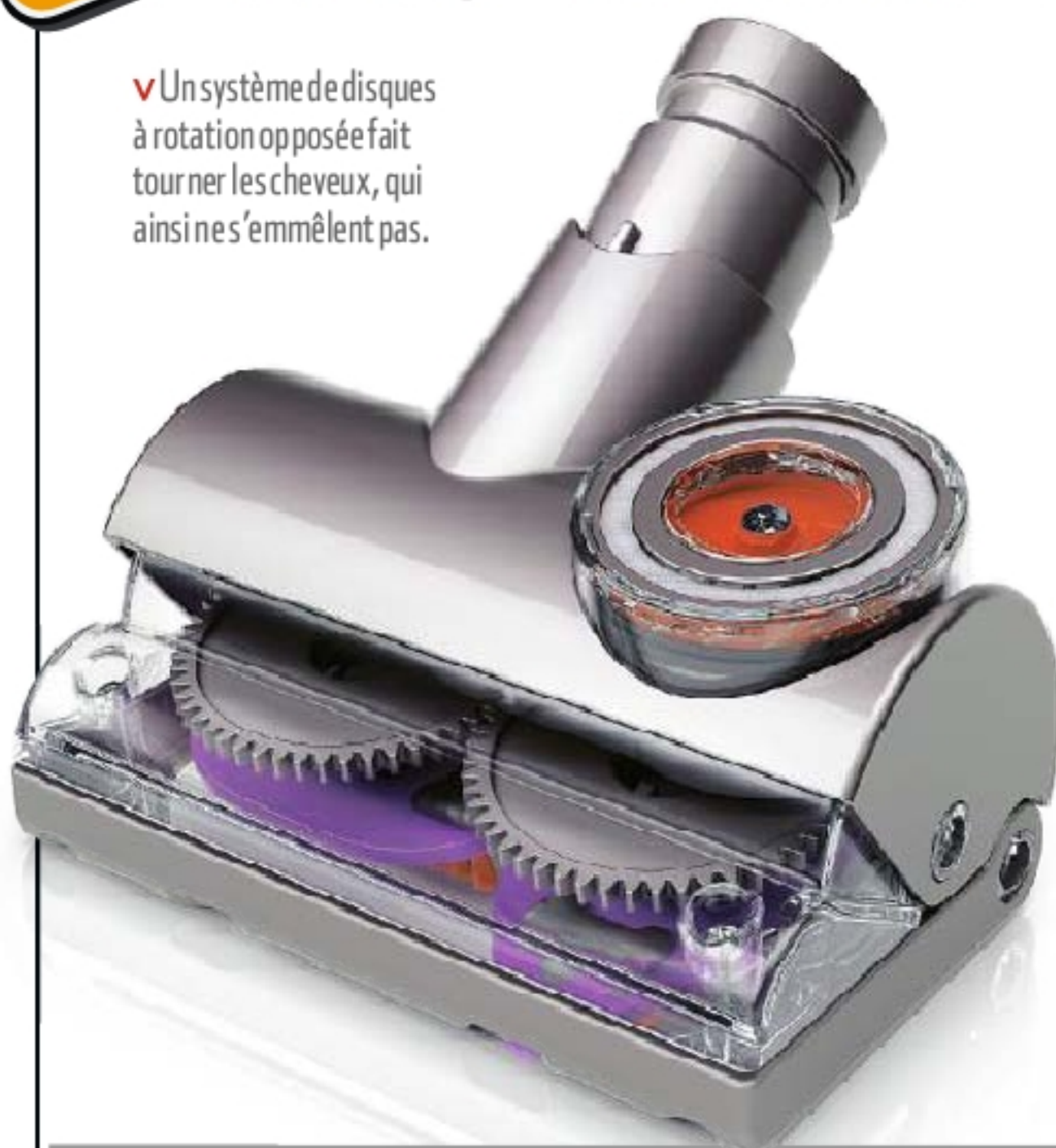
E.T.-A.

Prix : env. 240 €.

Rens. : www.re-timer.com



✓ Un système de disques à rotation opposée fait tourner les cheveux, qui ainsi ne s'emmêlent pas.



Elle aspire sans effort les cheveux sur la moquette

Cette brosse autodémêlante est un nouvel accessoire qui s'adapte sur toute la gamme des aspirateurs Dyson. Elle apporte une réponse à la question suivante : comment aspirer efficacement les cheveux sans qu'ils s'enroulent ou s'accumulent sur la brosse de l'appareil ? L'entreprise britannique a découvert qu'en faisant tourner les cheveux de manière circulaire sur le sol, ils ne s'emmêlaient pas. Ainsi, la barre

rotative des brosses conventionnelles a été remplacée par deux disques à rotation opposée. Ce mouvement ramène les cheveux au centre afin qu'ils soient facilement aspirés par le flux d'air. En outre, la flexibilité des disques en plastique souple de la brosse et la rigidité des poils fixés dessous ont été optimisées pour ramasser un maximum de saleté. **L.B.**

Prix : env. 50 €.

Rens. : www.dyson.fr

Une luge high-tech profilée pour les fous de la vitesse

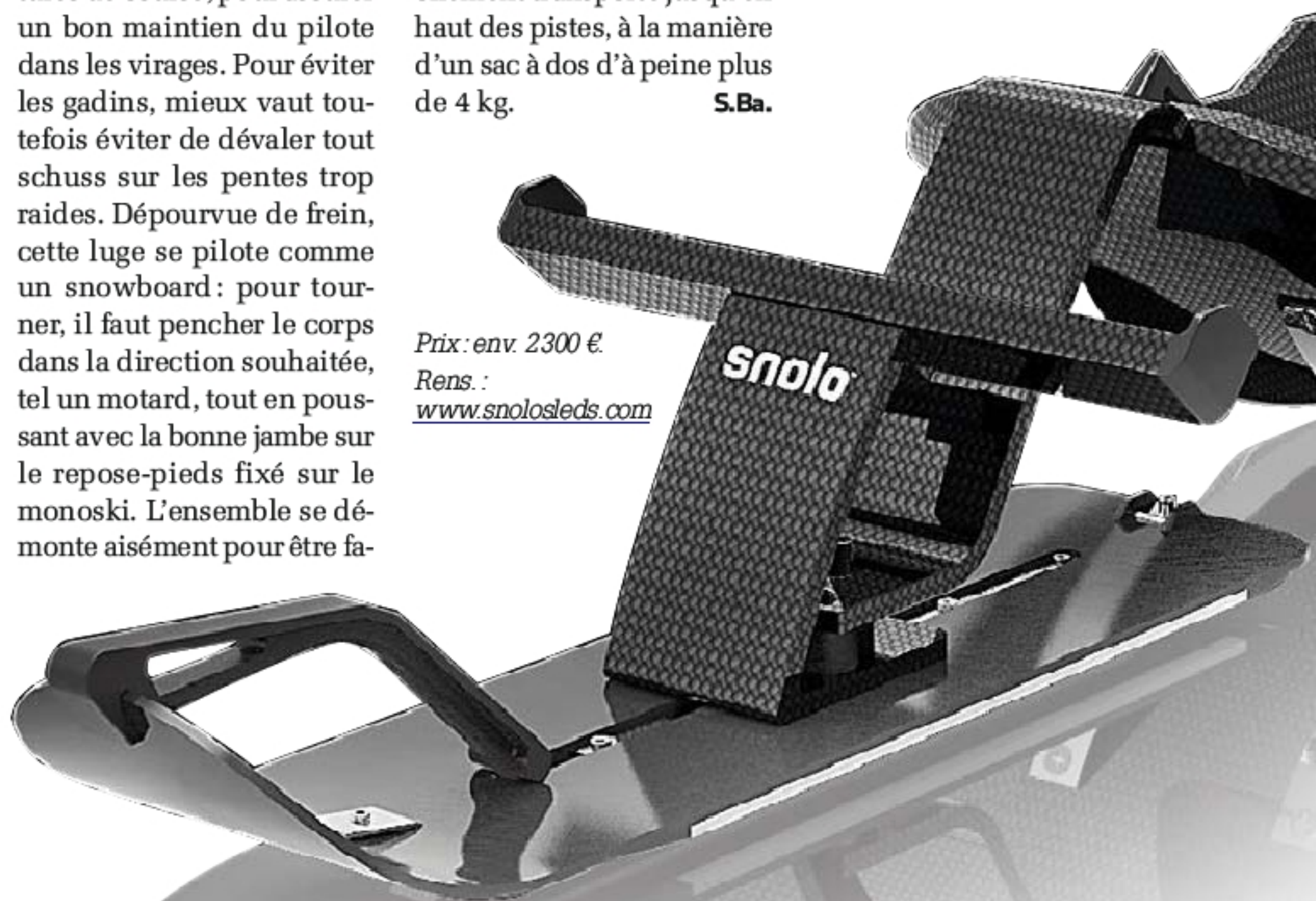
Envie de sueurs froides sur les pistes, cet hiver ? La luge Stealth-X est faite pour vous. Mis au point par le spécialiste néozélandais Snolo Sleds, ce bolide des montagnes qui a nécessité six années de recherche et développement est aussi à l'aise sur la neige dure que dans la poudreuse et s'élance à plus de 100 km/h, assure son concepteur. Son secret ? Il réside dans sa résistance aux frottements : réduite au maximum, la surface en contact avec le sol est encore inférieure à celle mesurée sur les skis qui détiennent le record du monde de vitesse, établi à 253 km/h ! Conçue en fibres de carbone, Stealth-X est dotée d'un monoski attaché à un baquet qui imite le siège des voi-

tures de course, pour assurer un bon maintien du pilote dans les virages. Pour éviter les gadins, mieux vaut toutefois éviter de dévaler tout schuss sur les pentes trop raides. Dépourvue de frein, cette luge se pilote comme un snowboard : pour tourner, il faut pencher le corps dans la direction souhaitée, tel un motard, tout en poussant avec la bonne jambe sur le repose-pieds fixé sur le monoski. L'ensemble se démonte aisément pour être fa-

cilement transporté jusqu'en haut des pistes, à la manière d'un sac à dos d'à peine plus de 4 kg. **S.Ba.**

Prix : env. 2300 €.

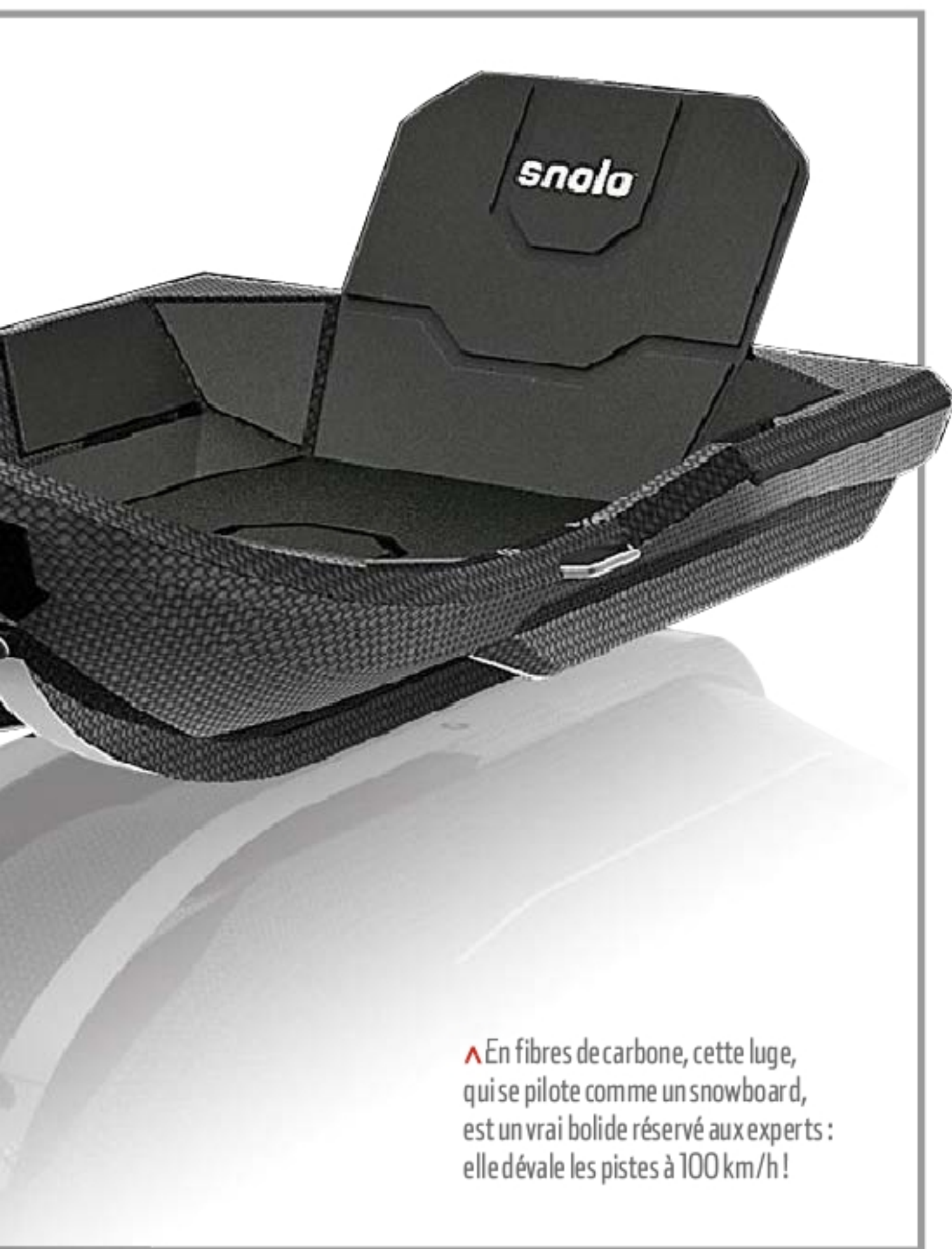
Rens. : www.snolosleds.com



LE REFLEX LE PLUS COMPACT DU MARCHÉ

Avec cet EOS 6D, l'entreprise Canon réalise un compromis inédit: intégrer pour la première fois un "grand" capteur 24x36 mm de 20,2 Mpx dans un boîtier compact et léger (moins de 800 g). Grâce à cette belle taille de capteur, chaque photosite mesure 6,6 micromètres, ce qui permet de monter jusqu'à des sensibilités extrêmes, au-delà de 100 000 ISO! Doté de toutes les fonctions essentielles, plus quelques gadgets (GPS et wi-fi), ce 6D conviendra aux utilisateurs exigeants, pros comme amateurs, qui recherchent la qualité maximale... sans le mal de dos! J.-C.B.

Prix: env. 2 100 € (boîtier nu).
Rens.: www.canon.fr



▲ En fibres de carbone, cette luge, qui se pilote comme un snowboard, est un vrai bolide réservé aux experts: elle dévale les pistes à 100 km/h!

LE COIN DES PROTOTYPES

LA VALISE CAPABLE DE VOUS FILER LE TRAIN

Voici Hop!, une valise conçue par un inventeur espagnol, Rodrigo Garcia Gonzalez, qui vous suit à distance. Ainsi, vous pouvez transporter de lourdes charges sans fatigue. A l'intérieur du bagage, trois capteurs reliés à un microprocesseur communiquent en permanence via Bluetooth avec votre smartphone. Ils déterminent ainsi votre position et votre vitesse de déplacement pour en déduire le mouvement de la valise: un système à air comprimé active alors deux chenilles pour lui permettre de suivre votre déplacement. Ce prototype peut aussi être contrôlé manuellement ou configuré pour suivre d'autres valises du même type en file indienne. En cas de perte du signal, une alerte s'affiche sur le téléphone tandis que le bagage se verrouille automatiquement. Attention, c'est un prototype, Hop! n'est pas encore capable de franchir des escaliers ou un trottoir. G.S.

Rens.: www.cargocollective.com/ideactionary/hop



UN ROCKING-CHAIR QUI RECHARGE VOTRE TABLETTE

Voici un bel aperçu des objets du futur qui se rechargeront tout seuls ou qui serviront de batterie à d'autres objets. Pour, par exemple, dépoussiérer un meuble aussi traditionnel que le rocking-chair, on pourrait y ajouter un support pour joujou high-tech (smartphone, tablette...) et surtout, un système à dynamo utilisant le balancement du corps pour recharger ces appareils. On obtiendrait alors ce prototype, l'iRock, inventé par la société suisse Micasa Lab. Selon ses concepteurs, après soixante minutes de bascule, cette chaise permettrait de récupérer 35 % de la batterie d'un iPad 3. Fabriqué en bois peint, ce modèle de 18 kg est équipé d'enceintes fixées sur le dossier, au niveau de la tête.

G.S.

Rens.: www.irocknow.ch



Des lumières d'ambiance *via* le smartphone

Une ampoule télécommandable par Internet, voilà l'idée de départ du néerlandais Philips. Et grâce à la technologie LED, l'ampoule Hue (en anglais, "teinte") se pilote à distance à l'aide d'un smartphone ou d'une tablette, en changeant de couleur et d'intensité, au gré de vos envies. A l'intérieur de ce qui semble être une ampoule à vis classique (l'équivalente d'une 60 watts), 11 diodes rouges, vertes et bleues produisent des nuances du blanc jaune au blanc bleuté, ainsi que toutes les couleurs de l'arc-en-ciel. Pour créer une ambiance personnalisée, il suffit de télécharger l'application dédiée sur son terminal mobile (sous iOS ou Android). Les instructions sont alors transmises en wi-fi vers la box de la maison sur laquelle est branché un adaptateur qui communique avec l'ampoule grâce à une liaison radio Zigbee. Le système est pratique pour créer des ambiances lumineuses variées ou pour éteindre à distance la lumière dans différentes pièces. Un bémol: son prix. **L.B.**

Prix: env. 200 €.
(pack de 3 ampoules + un adaptateur).
Rens.: www.philips.fr

> Cette ampoule d'ambiance à LED se pilote grâce à une application téléchargeable.



La carte bancaire hyper sécurisée pour payer en ligne

Réaliser des achats sur Internet avec votre carte de paiement, une prise de risque? Peut-être plus pour longtemps! Une révolution se prépare dans le domaine des cartes de paiement. La "Display Card" de Mastercard est une carte bancaire intelligente intégrant une technologie qui permet à son utilisateur de générer un code de sécurité, à usage unique, à taper avant chaque opération en

ligne. Conçue par la société suisse NagraID Security, cette carte est dotée sur sa face avant d'un petit écran LCD, d'un clavier numérique tactile à 10 chiffres (13 touches) avec un bouton On/Off, un autre pour valider et le dernier pour effacer la saisie. Ce système devrait permettre de mieux sécuriser les transactions en ligne. **J.J.**

Prix: non communiqué.
Rens.: www.mastercard.com

AVEC LUI, ON PEUT TRACER EN UN TOURNEMAIN TOUTES LES FIGURES GEOMETRIQUES

Une règle, un compas, un rapporteur, une équerre, le tout réuni dans un instrument de 14 cm de largeur, 6 cm de hauteur... Voici ce que propose un ancien professeur de physique appliquée, Thierry Delattre, avec le thaMographe. Cet outil, dépourvu de pointe dangereuse, permet aussi bien de tracer des cercles, des parallèles, des polygones réguliers... Parmi ses secrets: sa règle centrale et son système d'axe, en thermoplastique Rubber (TPR), qui adhère bien à la feuille, et permet ainsi de réaliser des cercles parfaitement réguliers, en faisant simplement tourner son crayon. Astucieux! **E.T.-A.**

Rens.: www.thamtham.fr. Prix.: env. 5 €.



Cher ami lecteur,

Numéro après numéro, nous mettons tout en œuvre pour mériter votre confiance. Et c'est pour cela qu'aujourd'hui nous faisons appel à vous.

Nous souhaiterions vous associer à notre réflexion sur Science & Vie dans le but de réaliser des numéros qui correspondent aussi parfaitement que possible à vos attentes et à celles de tous les lecteurs. Aussi souhaiterions-nous vous donner la parole ! Que pensez-vous de Science & Vie en général ? Et de ce numéro en particulier ? Quels articles vous ont attirés et comment les avez-vous appréciés ?

Lisez votre magazine comme d'habitude et ayez la gentillesse de participer à notre enquête quand vous aurez lu ce numéro, si possible dans les prochains jours.

Pour participer, rendez-vous sur www.enqueteSV.fr

Nous avons vraiment besoin de vos réponses, qu'elles soient critiques ou élogieuses, que vous ayez lu beaucoup d'articles dans ce numéro ou très peu. Votre aide nous est précieuse.

Très cordialement.

Matthieu Villiers
Directeur de la rédaction

LA RÉDACTION DE SCIENCE & VIE A BESOIN DE VOUS !

Que vous connaissiez très bien Science & Vie ou très peu (même si vous le lisez pour la première fois), votre avis nous intéresse !

RÉPONDEZ À NOTRE ENQUÊTE SUR
www.enqueteSV.fr



Pour vous remercier de votre participation à notre étude, un tirage au sort sera organisé. Vous aurez ainsi la possibilité de remporter :

**LE LIVRE "100 merveilles du ciel"
ou LE DVD : "L'univers invisible" !**





EN PRATIQUE

CIEL DU MOIS

Par Serge Brunier

NORD

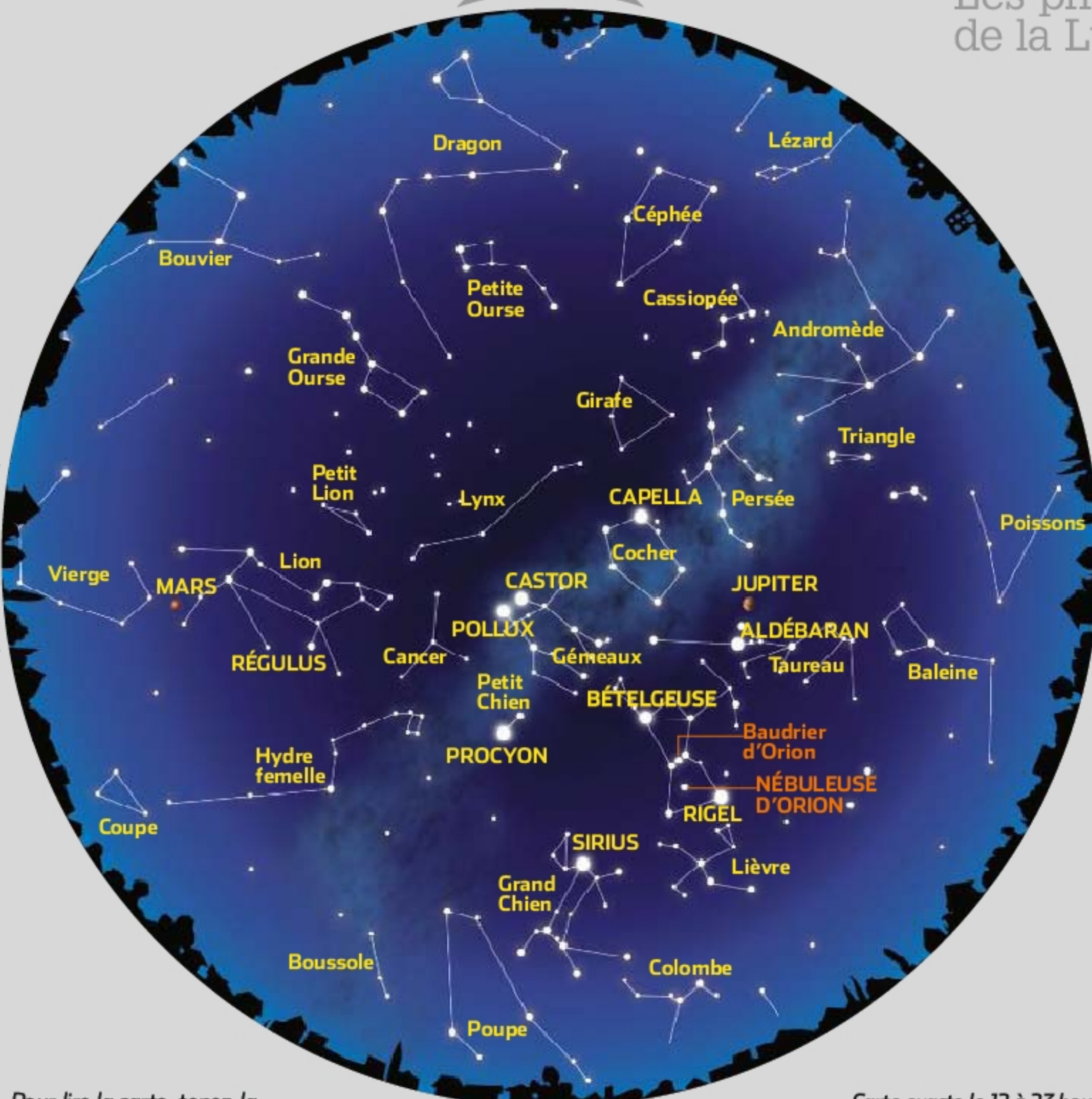
Les phases de la Lune



EST

OUEST

SUD



Pour lire la carte, tenez-la au-dessus de votre tête et orientez le nord avec le nord réel: les quatre points cardinaux seront ainsi bien orientés.

Carte exacte le 12 à 23 heures

À NE PAS MANQUER... LE 18

Ce soir, au-dessus de l'horizon sud, La Lune, Jupiter, Aldébaran et l'amas des Pléiades apparaissent regroupés ! C'est la Lune en quartier qui se révèle d'abord: elle est visible en plein jour. Puis, la géante Jupiter, à sa droite, émerge du fond bleu nuit crépusculaire; enfin, avec la nuit, l'étoile Aldébaran et l'amas d'étoiles des Pléiades apparaissent à leur tour. Ce spectacle magique est visible à l'œil nu et aux jumelles. Vertigineuse perspective: la Lune est à 400 000 km, les Pléiades à plus de 400 années-lumière...

< Un ballet exceptionnel qui regroupe la Lune, Jupiter, Aldébaran et l'amas des Pléiades.





▲ Photographiée avec un télescope d'amateur, elle paraît rouge, alors qu'à l'observation, elle est verte.

LA NÉBULEUSE D'ORION

A plus de 1300 années-lumière, la nébuleuse d'Orion est l'un des plus beaux astres du ciel. Cela peut sembler surprenant : cette minuscule étoile floue, en dessous des trois étoiles brillantes du Baudrier d'Orion, est perceptible à l'œil nu... même en pleine ville ! Par une nuit sans lune en pleine campagne, des jumelles permettent déjà de distinguer ses volutes gazeuses, et dans un petit télescope, la nébuleuse, où naissent des centaines d'étoiles, évoque un immense oiseau aux ailes vertes phosphorescentes... Vertes ? Oui, l'œil humain est très sensible à l'oxygène ionisé, l'un des constituants de la nébuleuse, et insensible au rouge profond de l'hydrogène ionisé, son principal constituant. Ce qui explique la différence entre les photos de l'astre, à dominante rouge, et son aspect visuel...



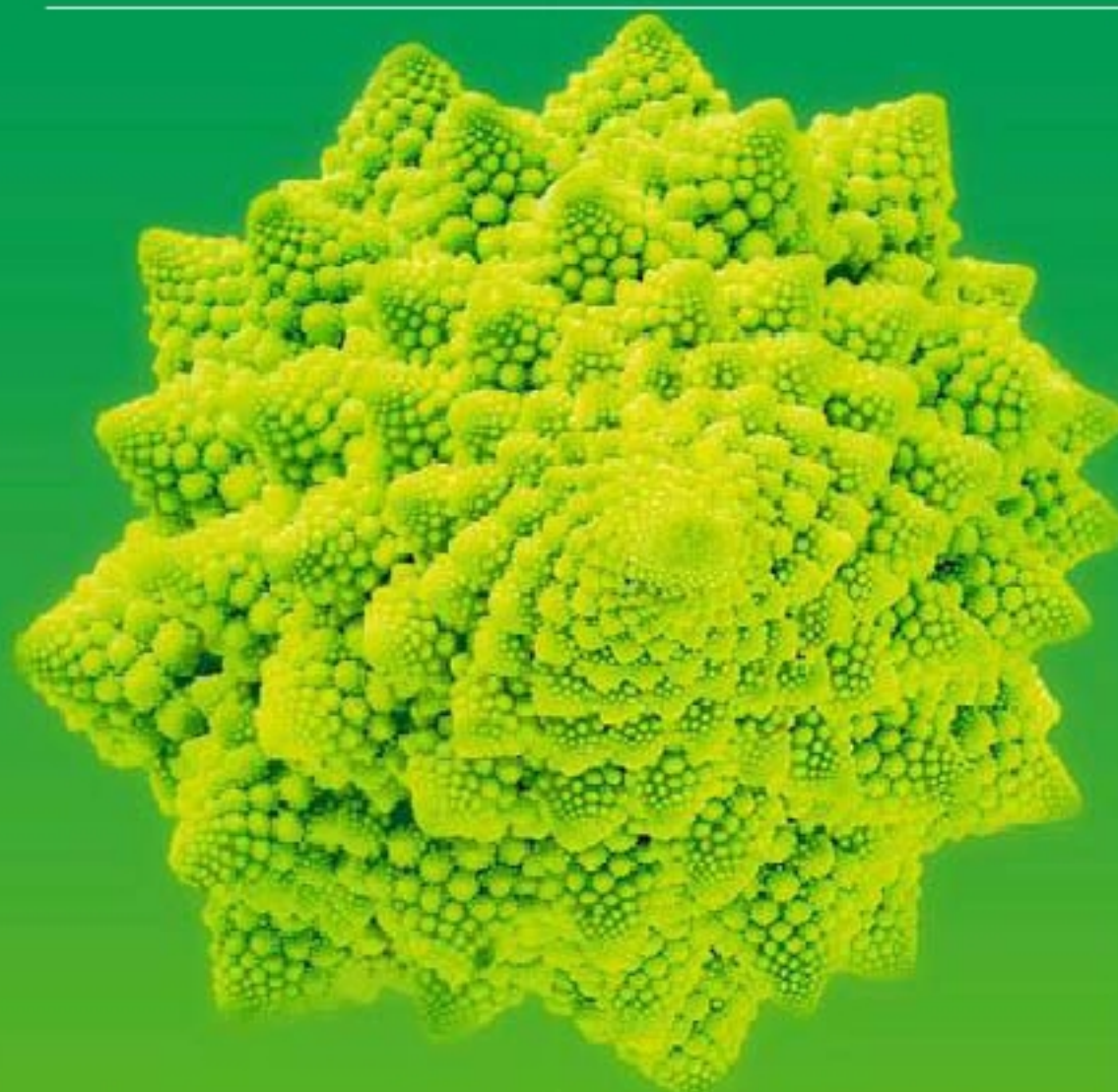
Retrouvez la chronique "Du côté des étoiles" sur France Info

tous les samedis et sur www.france-info.com

la science se livre

Mathématiques

Le chou romanesco, un exemple de fractale naturelle



02 > 22 fév 2013

Ateliers, débats
conférences, spectacles
dans les bibliothèques
et structures culturelles
des Hauts-de-Seine

Plus d'infos : 01 47 29 34 26
www.hauts-de-seine.net
rubrique culture



(BnF) Bibliothèque nationale de France

le réseau des bibliothèques

le réseau des bibliothèques



CONTRE-SOMMAIRE

Petit florilège des mots de ce numéro... par A.G.

73,6 millions de spermatozoïdes p. 32	Feuille de haricots p. 25
Adolescents musclés p. 116	Fruit du hasard p. 112
Ailes vertes p. 136	Gaufrier p. 42
Arnaques p. 117	Harengs p. 24
Astuce éprouvée p. 81	Homme d'affaires p. 112
Aversion pour la perte .. p. 120	Hue p. 134
BaBar p. 11	Inventaire titanesque p. 110
Ballon de rugby p. 80	Jouer au casino p. 117
Baptisé Sabre p. 39	Joueurs de tennis p. 117
Baudrier d'Orion p. 136	L'absence d'araignées p. 25
Beaucoup à dire p. 114	La bonne odeur du café p. 129
Bien moins qu'un grain de riz p. 110	Le plus fou p. 82
Bulle d'écume p. 78	Mérion superbe p. 18
C'est his-to-rique p. 41	Moins suspicieux p. 117
C'est infaisable! p. 82	Mousse anticrevaison p. 36
Cannibale p. 12	Nuit crépusculaire p. 136
Champ de bataille p. 36	Ceufs de coucous p. 18
Chez le porc p. 36	Papillons de mer p. 24
Cliché n° 51 p. 106	Petit bémol p. 41
Coup de vieux p. 25	Petite erreur de doigté ... p. 127
Cour des miracles p. 80	Petite voix intérieure p. 17
Crise de la quarantaine... p. 16	Pub de Cambridge p. 106
Dans le coma p. 32	Rocking-chair p. 133
De beaux jours p. 22	Rosy p. 106
Défauts inconscients p. 118	Sauver 200 personnes ... p. 121
Différence des guitares .. p. 127	Sorte de framboise p. 78
Douloureux pour les oreilles p. 127	Spectacle magique p. 136
Envie de sueurs froides.. p. 132	Spirochètes p. 25
Equipe hawaïenne p. 34	Stress important p. 111
Erreur judiciaire p. 121	Super-boules p. 109
Etre républicain p. 119	Tourner les cheveux p. 132
Eviter les gadins p. 132	Train japonais p. 41
Excentrique p. 16	Très élégante p. 42
Faisselles modernes p. 13	Trop long p. 36
Fameux effet p. 24	Un air de vérité p. 120
Fanfaronne-t-il p. 106	Vieux mégots p. 25
	Voici Hop! p. 133
	Yakoutie p. 34

SCIENCE & VIE

Une publication du groupe

MONDADORI FRANCE

PRÉSIDENT : Ernesto Mauri

RÉDACTION

8, rue François-Ory
92543 Montrouge CEDEX.
Tél. : 01 46 48 48 48 - Fax : 01 46 48 48 67
E-mail : svmens@mondadori.fr

DIRECTEUR DE LA RÉDACTION

Matthieu Villiers,
assisté de Christelle Borelli

RÉDACTEUR EN CHEF

Hervé Poirier

RÉDACTEURS EN CHEF ADJOINTS

Philippe Chambon, Grégoire Bouillier (édition),
François Lassagne

DIRECTRICE ARTISTIQUE

Yvonne Diraison

CHEF DE SERVICE

Valérie Greffoz (actualités)

CHEF DE RUBRIQUE

Caroline Tourbe (médecine)

RÉDACTEURS

Elsa Abdoun, Boris Bellanger, Germain Chambost,
Mathilde Fontez, Vincent Nouygrat, Emilie
Rauscher, Muriel Valin

SECRÉTAIRE GÉNÉRAL DE RÉDACTION

Jean-Luc Glock

SECRÉTAIRES DE RÉDACTION

Anne Riera, Clara Baudel

MAQUETTISTES

Valérie Samuel-Charrier (1^{re} maquettiste),
Elisabeth de Garrigues

SERVICE PHOTO-INFOGRAPHIE

Anne Levy (chef de service photo),
Clémence Gérard; Emmanuel Jullien
(chef de service infographie)

DOCUMENTATION

Marie-Anne Guffroy

ONT COLLABORÉ À CE NUMÉRO

S. Aquino, S. Barge, J.-C. Béchet, K. Bettayeb,
L. Blancard, P.-Y. Bocquet, E. Bonnet-Vidal,
B. Bourgeois, S. Brunier, O. Capronnier,
L. Cavicchioli, G. Girade, S. Dessert, O. Donnars,
E. Dorey, S. Fay, J. Grenèche, P. Grisot,
M. Grousson, E. Haentjens, C. Hancock,
R. Ikonickoff, J. Jongwane, M. Kontente,
E. Leburgue, P. Lefèvre, C. Lembezat, E. Leroy-
Terquem, M. Mayo, E. Monnier, A. Rambaud,
B. Rey, P. Richard, J.-M. Sabatié, M. Saemann,
G. Siméon, E. Thierry-Aymé, L. Vanleene

DIRECTION-ÉDITION

DIRECTION PÔLE

Carole Fagot

DIRECTEUR DÉLÉGUÉ

Vincent Cousin

DIFFUSION

Jean-Charles Guérault (directeur diffusion),
Siham Daassa (responsable diffusion marché)

MARKETING

Sandra Boixel (responsable marketing),
Michèle Guillet (chargée de promotion),
Nathalie Carrère (abonnements)

PUBLICITÉ

Valérie Caray (directrice exécutive), Caroline Soret
(directrice de groupe commercial titres Automobile

et Science), Virginie Commun (directrice de publicité
adjointe), Lionel Dufour (directeur de clientèle),
Christine Chesse (assistante), Stéphanie Guillard,
Angélique Consoli, Sabrina Rossi-Djenidi
(planning), Stéphane Durand (trafic), Jean-Jacques
Benezech, Grégory Gounse, Anne-Sophie Chauvière
(opérations spéciales)

Grande-Bretagne : Publieurope LTD (infolodon@publieurope.com - 44 (0)20 7927 9800

Allemagne : Publieurope Munich (infomunich@publieurope.com - 0049 89 2908150);

Suisse : Publieurope Lausanne (infolausanne@publieurope.com - 0041 21 323 3110);

Espagne : Publimedia Madrid (infomadrid@publim-gestion.es - 0034 91 212 8300)

FABRICATION

Gérard Greck, Valérie Brunehaut, Nathalie Lemaure

FINANCE MANAGER

Guillaume Zaneskis

DÉPARTEMENT INTERNATIONAL

Mathilde Janier-Bonnichon, Murielle Luche

ÉDITEUR MONDADORI MAGAZINES FRANCE

Siège social : 8, rue François-Ory

92543 Montrouge Cedex

PRÉSIDENT ET

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION

Ernesto Mauri

ACTIONNAIRE PRINCIPAL

Mondadori France SAS

IMPRIMEUR : Mondadori Printing S.p.A.,

Via Luigi e Pietro Pozzoni, 11

24034 Cisano Bergamasco (Bergamo)

N° ISSN : 0036-8369

N° DE COMMISSION PARITAIRE :

1015 K 79977. Tarif d'abonnement légal :

1 an, 12 numéros : 42,80 €;

1 an, 12 numéros + 4 HS : 52,80 €.

Dépôt légal février 2013

RELATIONS CLIENTÈLE ABONNÉS

Par mail : relations.clients@mondadori.fr

Par téléphone : 01 46 48 48 96.

Par courrier : Science & Vie Abonnements

B341, 60643 Chantilly Cedex.

Par internet : <http://www.kiosquemag.com>

Etats-Unis et Canada : Express Mag, Tél. : 1 800

363-1310 (français) et 1 877 363-1310 (anglais).

Suisse : Edigroup, 022 860 84 50 - mondadori-suisse@edigroup.ch.

Belgique : Edigroup Belgique, 070 233 304 - mondadori-belgique@edigroup.be

Autres pays : nous consulter.

À NOS ABONNÉS

Pour toute correspondance relative à votre abonnement, envoyez-nous l'étiquette collée sur votre dernier envoi. Les noms, prénoms et adresses sont communiqués à nos services internes et organismes liés contractuellement avec S&V sauf opposition motivée. Les informations pourront faire l'objet d'un droit d'accès ou de rectification dans le cadre légal. Les manuscrits envoyés ne sont pas rendus.

À NOS LECTEURS

RENSEIGNEMENTS

Par courrier : 8, rue François-Ory,

92543 Montrouge Cedex.

Par mail : se.lecteurs@mondadori.fr

COMMANDE D'ANCIENS

NUMÉROS, RELIURES ET VPC

tél. : 01 46 48 48 97

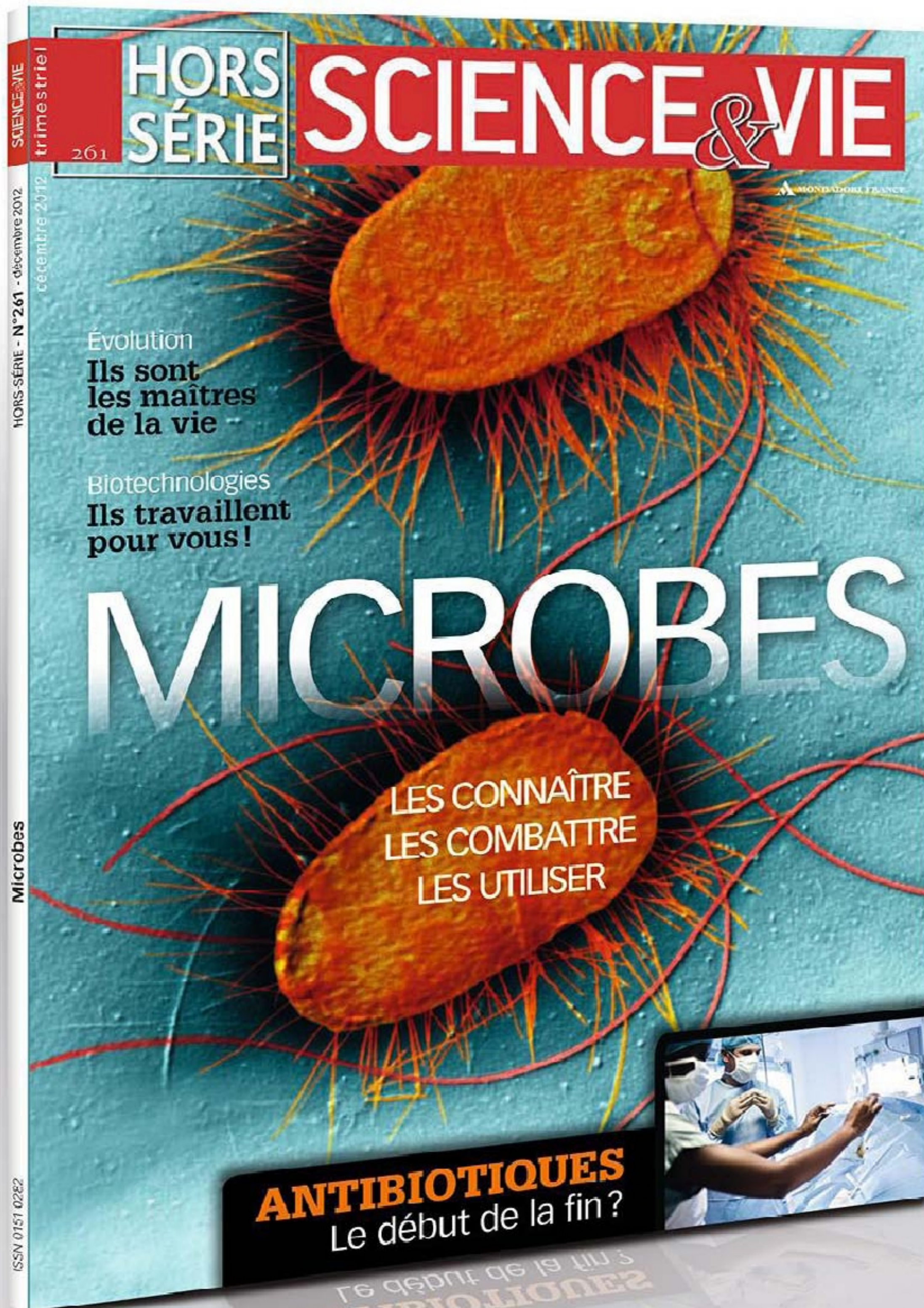
relations.clients@mondadori.fr



EN KIOSQUE CE MOIS-CI



[AMIS OU ENNEMIS ?]



ANTIBIOTIQUES
Le début de la fin ?

Le début de la fin ?
ANTIBIOTIQUES

EN VENTE ACTUELLEMENT



Un design qui a du coffre.

Nouvelle
ŠKODA Rapid
530L de coffre

à partir de

169€ /mois

sous conditions de reprise⁽¹⁾

4 ANS de Garantie⁽²⁾

SANS APPORT



48 loyers de 169 € pour la Rapid Active. **Montant total dû : 13 852 €.** Offre valable du **01/12/2012** au **28/02/2013**. Un crédit vous engage et doit être remboursé. Vérifiez vos capacités de remboursement avant de vous engager.

IL Y A TOUJOURS QUELQU'UN DE BIEN DANS UNE ŠKODA.

(1) Location avec Option d'Achat 48 mois 40 000 km. Ex. : Rapid Active 1.2 MPI 75 ch BVM5 au prix spécial pour ce financement de : 11 990 € TTC, remise de 2 000 € TTC et aide à la reprise de 1 000 € TTC pour un véhicule de plus de 10 ans (conditions générales ArgusTM) déduites du tarif au 05/11/2012. Option d'achat finale : 5 740 € ou reprise du véhicule suivant engagement sous conditions de votre Distributeur. Modèle présenté : Rapid Élégance 1.2 TSI 105 ch avec options peinture métallisée 490 €, jantes alliage 17" Camelot 190 €, au prix spécial de 18 180 €, remise de 2 000 € TTC et aide à la reprise de 1 000 € TTC pour un véhicule de plus de 10 ans (conditions générales ArgusTM) déduites du tarif au 05/11/2012. **48 loyers de 301 €. Montant total dû en cas d'acquisition : 20 600 €.** (2) Garantie additionnelle de deux ans obligatoire : coût mensuel inclus dans les loyers : 10 €. Garantie souscrite auprès d'Opteven Assurances. Société d'assurance et d'assistance au capital de 5 335 715 € - Siège social : 109 bd Stalingrad - 69100 Villeurbanne - RCS Lyon n° 379 954 886 régie par le Code des assurances et soumise au contrôle de l'ACP. Offre réservée aux particuliers chez tous les Distributeurs présentant ce financement, sous réserve d'acceptation du dossier par Volkswagen Bank GmbH - SARL de droit allemand - Capital social : 318 279 200 € - Succursale France : Paris Nord 2 - 22 avenue des Nations 93420 Villepinte - RCS Bobigny 451 618 904 - ORIAS : 08 040 267 (www.orias.fr) et après expiration du délai légal de rétractation. Assurance facultative Décès-Incapacité : à partir de 6 €/mois souscrite auprès de Cardif Assurance Vie SA au capital de 688 507 760 €, N°732 028 154 RCS Paris et Cardif Assurances Risques Divers SA au capital de 14 784 000 €, N°308 896 547 RCS Paris, Siège social : 1 Boulevard Haussmann - 75009 Paris. Ce montant s'ajoute au loyer en cas de souscription. Montants exprimés TTC, hors prestations facultatives. * Voir conditions auprès de votre Distributeur. Simply Clever : Simplement Évident. Volkswagen Group France - Division Škoda - 02600 Villers-Cotterêts - RCS Soissons B 602 025 538.

Škoda recommande **Castrol EDGE Professional**. www.skoda.fr

Consommation mixte de la Rapid 1.2 TSI 105 ch (l/100 km) : 5,4. Émissions de CO₂ (g/km) : 125.
Consommations mixtes de la gamme Rapid (l/100 km) : 3,9 à 6,1. Émissions de CO₂ (g/km) : 104 à 137.

Assistance 24h/24 pendant 7 ans*

200 Points Service Škoda partout en France

Renseignements : 0 969 390 904 (appel non surtaxé)