

25 *découvertes*

**POUR LES 25 ANS
DE LA FÊTE
DE LA
SCIENCE**



Rédaction : René Cuillierier

Iconographie : Frédéric Mazuy

Design graphique : Marie-Astrid Bailly-Maître

Édition : Catherine Cornu

Relecture : Valérie Poge

Présentation du groupe Sciences pour tous

Depuis 2004, au sein du SNE, les éditeurs de **Sciences pour tous** se sont donné pour mission de mettre en valeur les livres qui répondent aux questions de chacun en matière de culture et de découvertes scientifiques. Notre objectif est d'aider le grand public ainsi que les professionnels du livre – bibliothécaires et libraires – à mieux connaître les ouvrages de sciences ou tout simplement à se familiariser avec le monde des sciences. Sophie Bancquart préside le groupe Sciences pour tous et Christian Counillon en est le vice-président.

Sciences pour tous organise depuis sept ans plus de trente conférences d'auteurs au Salon du livre de Paris. Le groupe s'attache également à développer le site sciencespourtous.org (3 000 titres pour la jeunesse et les adultes). Il a aussi lancé un projet de kiosques en centres et musées de sciences, puis en bibliothèques, créé un catalogue avec 900 titres pour un rayon de base en librairie et travaillé à la nationalisation du prix Sciences pour tous, qui sollicite des collégiens et des lycéens pour attribuer tous les ans un prix au meilleur titre sur un thème donné. Enfin, il lance à l'automne 2016 un label « Sciences pour tous », qui sera accolé à chaque titre choisi pour faire partie du site dans le Fichier exhaustif du livre (FEL).

Présentation du Syndicat national de l'édition (www.sne.fr)

Le Syndicat national de l'édition (SNE) est l'organe professionnel représentatif des éditeurs français. Avec plus de 660 adhérents, il défend la liberté de publier, le droit d'auteur, le prix unique du livre, la diversité culturelle et l'idée que l'action collective permet de construire l'avenir de l'édition. Il contribue à la promotion du livre et de la lecture. Il est présidé par Vincent Montagne et dirigé par Pierre Dutilleul.

Préface

Partager les sciences avec la société constitue l'une des priorités du secrétariat d'État à l'Enseignement supérieur et à la Recherche, car la science est d'une importance capitale pour notre pays et pour ses citoyens. Pour notre pays, car elle contribue à sa notoriété dans le monde : notre recherche se place au sixième rang mondial avec des résultats de premier rang en mathématiques, en biologie, en physique, en médecine. Pour ses citoyens, car toutes les sciences, y compris les sciences humaines et sociales, permettent de comprendre un monde complexe et difficile à cerner.

Aujourd'hui bien informés grâce à leur bon niveau d'éducation et l'utilisation massive des technologies numériques, nos concitoyens sont friands des découvertes scientifiques. Ils peuvent aussi trouver dans la science des méthodes d'analyse et de réflexion pour aborder les problèmes de notre temps avec recul et raisonnement plutôt que d'être soumis à la pression du prêt-à-penser. Que chacun dispose d'une culture scientifique suffisante et des phénomènes obscurs s'éclairent, des événements s'expliquent, des interrogations trouvent leurs réponses : le monde devient plus lisible et les possibilités d'agir s'ouvrent. Encore faut-il que les scientifiques partagent leurs connaissances dans un langage accessible. C'est ce qu'ils font, aidés des médiateurs et des journalistes scientifiques, chaque année, au début d'octobre, dans presque chaque ville ou village de France, à l'occasion de la Fête de la science, lancée par le ministre Hubert Curien il y a tout juste 25 ans. C'est pour célébrer ces 25 ans que le ministère en charge de la Recherche et les éditeurs du groupe Sciences pour tous vous offrent ce petit livre. Vous y trouverez 25 découvertes qui ont jalonné les 25 dernières années et qui contribuent à changer notre vie quotidienne.

Je vous invite donc à le lire. Et, pour vous étonner, vous trouverez un lecteur d'hologrammes en dernière page. Bonne lecture et belles découvertes

Thierry Mandon
Secrétaire d'État à l'Enseignement supérieur et à la Recherche

Préface ---3

Éditorial ---5

25 DÉCOUVERTES

- 1 Le World Wide Web
- 2 La LED bleue
- 3 Text encoding initiative (TEI)
- 4 La première exoplanète
- 5 L'acidification des océans
- 6 Le rôle fonctionnel du microbiote
- 7 Les micro-ARN
- 8 Toumaï
- 9 La conjecture de Poincaré est démontrée
- 10 Le séquençage du génome humain
- 11 Le graphène
- 12 La preuve du théorème des quatre couleurs
- 13 Des cellules souches sur commande
- 14 C'est bien nous qui changeons le climat
- 15 Les architectures de choix
- 16 L'histoire de la vie doit être réécrite
- 17 La restauration d'un tableau
- 18 Couper-coller le texte de la vie
- 19 La couche d'ozone se reconstitue
- 20 Le boson de Higgs
- 21 La mission *Rosetta*
- 22 Neandertal vit parmi nous
- 23 Observation des ondes gravitationnelles
- 24 L'expédition Tara
- 25 La plus ancienne construction du monde

Et pour en savoir plus... ---56

Description d'un hologramme ---65

Notice de montage du lecteur d'hologrammes ---66

Lecteur d'hologrammes ---67

Éditorial

Pour ma famille, mes proches, le métier de chercheur vers lequel je me dirigeais lorsque j'étais jeune étudiant paraissait très mystérieux. Même si ma thèse, dédiée à l'étude de la formation de la grêle, avait un caractère assez concret, il n'est pas simple de répondre aux questions, tout à fait légitimes, que votre entourage se pose sur ce que vous cherchez :

à quoi cela peut-il servir ? qu'est-ce qu'une découverte ?

qu'apportent les recherches à la société ? Édité à l'occasion des 25 ans de la Fête de la Science, cet ouvrage, qui présente 25 découvertes scientifiques marquantes des 25 dernières années, m'offrirait aujourd'hui l'essentiel des réponses.

Quel que soit le domaine concerné, ces découvertes – auxquelles la recherche française a largement contribué – sont avant tout marquées du sceau de la curiosité. C'est, j'en suis convaincu, la première qualité d'un chercheur. Certaines découvertes n'ont, à première vue, que l'intérêt d'élargir notre champ de connaissances. Cela nous est indispensable et, par là même, formidablement utile. D'autres sont clairement à l'origine d'innovations qui, en quelques décennies, ont bouleversé le mode de vie de nos sociétés. Mais avec, pour beaucoup d'entre elles, un point de départ très en amont et une découverte initiale dont personne n'anticipait les applications qui en ont découlé. Ces découvertes sont donc aussi marquées du sceau de la diversité. Mon souhait est que cet ouvrage intéresse tous les curieux et redonne du goût pour les carrières scientifiques aux jeunes qui, peut-être rebutés par la difficulté, ont aujourd'hui tendance à les délaisser, alors que, j'en suis sûr, elles les passionneraient.

Jean Jouzel

Climatologue, directeur émérite de recherche au CEA,
corécepteur de la médaille d'or
du CNRS en 2002 et du prix Vetlesen en 2012



Le World Wide Web

1989-1993

1

Une Toile est née

Le tout premier site Web du monde, créé en 1989 au Centre européen de recherche nucléaire (CERN), était un mode d'emploi dans lequel l'ingénieur en informatique Tim Berners-Lee décrivait sa toute dernière invention... le World Wide Web lui-même!

Il y expliquait comment utiliser le réseau mondial de communications électronique - Internet - pour accéder aux documents mis en ligne par d'autres personnes et comment configurer ses propres machines pour que les autres puissent en faire autant. Le but initial du projet - d'abord baptisé « The Information Mine », « Tim » en abrégé! - était que la communauté des chercheurs en physique des particules répartis dans le monde entier puisse s'échanger des informations instantanément.

En 1993, le CERN a mis le logiciel du World Wide Web dans le domaine public, avec le succès que l'on sait.

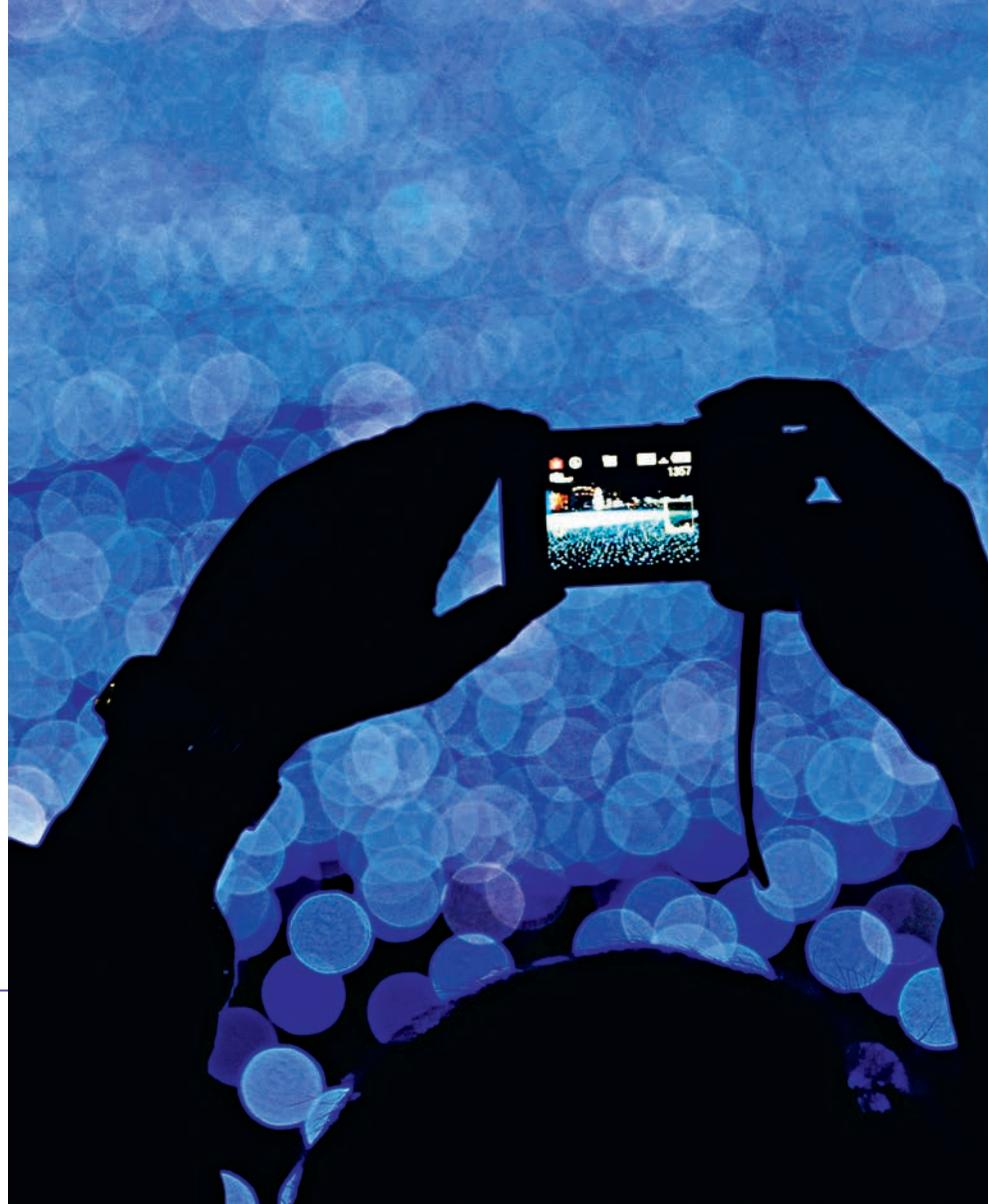
Carte de l'Internet en Europe.
Ce réseau est le support de bien des applications (courriel, messagerie instantanée), le Web étant la plus importante.

La lumière enfin disponible dans toutes les couleurs

Les diodes électroluminescentes ou LED (*light-emitting diode*) utilisent des semi-conducteurs dans lesquels des électrons perdent de l'énergie en émettant de la lumière d'une seule couleur. Alors que, dans une ampoule à incandescence, seuls quelques pourcents de l'énergie électrique consommée servent à éclairer – le reste ne fait que chauffer l'environnement! – les LED convertissent en lumière entre le tiers et la moitié de l'énergie qu'elles reçoivent. Mais, des trois couleurs de base – rouge, vert et bleu – qui, seules ou combinées, constituent l'ensemble des teintes visibles par l'œil, on ne savait produire avec des LED que le rouge (depuis les

années 1960) et le vert (1972). La découverte des LED bleues en 1992 (qui a valu le prix Nobel à Isamu Akasaki, Hiroshi Amano et Shuji Nakamura en 2014) permet désormais de couvrir l'ensemble des couleurs ainsi que le blanc, ce qui permet un éclairage économe en énergie. On estime que, vers 2020, les trois quarts des sources lumineuses seront des LED.

Individu photographiant
des décorations de Noël dans la ville
de Tokyo, réalisées à base
de LED bleues et de LED blanches.



Vers une bibliothèque universelle ?

Imaginez qu'un archiviste découvre un manuscrit, premier jet d'un poème célèbre de la main même de son immortel auteur... Comment le rendre disponible à l'ensemble des chercheurs de la planète ? Taper le texte ne suffit pas, car tout ici a du sens : le papier à en-tête de l'hôtel où séjournait le poète, les ratures qui laissent deviner l'histoire de la conception du texte, les notes dans les marges qui sont manifestement d'une autre main... Scanner les pages produirait des fichiers images bien trop lourds : si tous les archivistes, bibliothécaires et universitaires du monde faisaient de même, il faudrait une mémoire numérique gargantuesque !

La norme TEI - du nom du groupement d'universitaires à l'origine du projet - a commencé à être mise au point en 1987 et les premières versions en ont été publiées en 1994. Elle permet de coder n'importe quel texte accompagné de l'ensemble des informations utiles aux chercheurs, un peu à la manière d'une page Web. Elle a permis la mise en commun d'immenses archives par les universités et stimulé le développement des « humanités numériques ».

Enluminures, couleur des caractères, qualité du papier... : cette bible de Gutenberg contient bien plus d'informations pour le chercheur que le simple texte.



4

La première exoplanète

1995

La pluralité des mondes est désormais un fait

« Il est donc d'innombrables soleils et d'innombrables terres tournant autour de ces soleils, à l'instar des sept que nous voyons tourner autour du Soleil qui nous est proche. » C'est ce qu'affirmait Giordano Bruno en 1584. Il fut brûlé pour cela. Existe-t-il d'autres mondes autour de chacune des étoiles que nous voyons dans le ciel et qui sont autant de soleils ? L'idée hantait l'imaginaire des scientifiques depuis quatre cents ans. À l'Observatoire de Haute-Provence, deux astronomes suisses, Michel Mayor et Didier Queloz, ont pour la première fois apporté une réponse concrète : une planète géante moitié moins massive que notre Jupiter

gravite bel et bien autour d'un autre soleil, l'étoile 51 Pegasi. Leur découverte a stimulé l'émergence d'un nouveau pan de l'astronomie : on connaît désormais près de 4 000 exoplanètes et on en découvre plusieurs dizaines, voire centaines, chaque année ! Un objectif majeur des prochaines décennies est désormais la recherche d'une planète susceptible d'abriter la vie.

Vue d'artiste de la planète gazeuse gravitant près de l'étoile 51 Pegasi et observée depuis une de ses hypothétiques lunes.



5

L'acidification des océans

1998

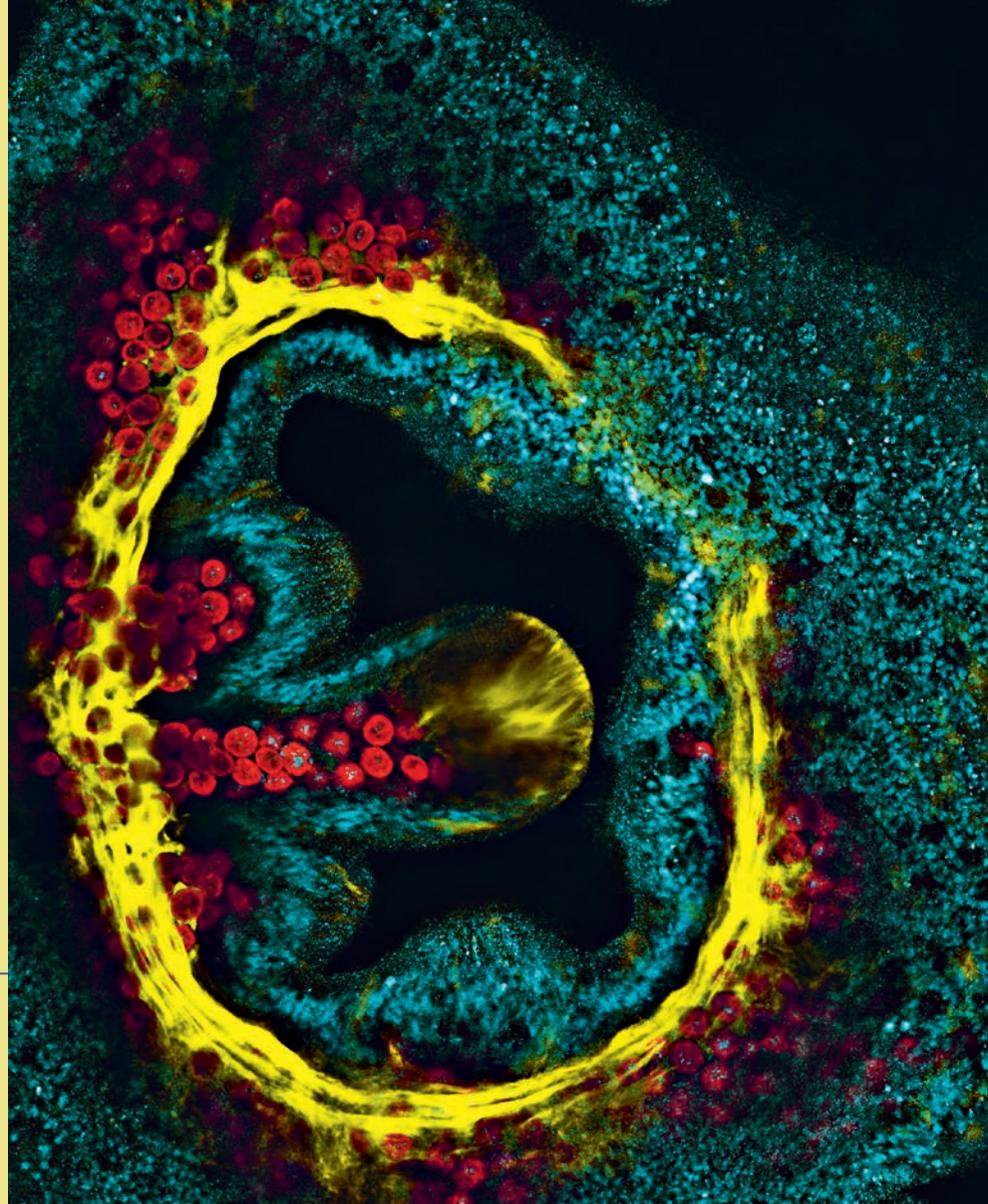
Coraux et coquillages en danger

La dissolution dans l'eau du gaz carbonique atmosphérique – le CO₂ ou dioxyde de carbone, qu'on appelait aussi naguère « acide carbonique » – fait diminuer le pH des océans. Autrement dit, nos émissions de CO₂ ont non seulement pour effet de réchauffer le climat, mais aussi d'acidifier les océans ! Une des conséquences est de rendre plus difficile la formation des coquilles des organismes marins. On le savait depuis 1985 pour certaines algues microscopiques.

En 1998, Jean-Pierre Gattuso et ses collègues ont démontré cet effet chez les coraux tropicaux. On peut désormais dire que, vers 2100, l'acidification des océans sera

telle que la sécrétion de calcaire par les organismes marins sera réduite de 20 à 50 % et que certaines espèces des régions plus froides pourraient même voir leurs coquilles rongées par l'eau dans les prochaines décennies.

Polype de corail *Pocillopora damicornis*.
En rouge, les algues en symbiose avec cet animal fixé. C'est dans le tissu bleu que se trouvent les régions où il sécrète son squelette calcaire (pastilles noires).



6

Le rôle fonctionnel du microbiote

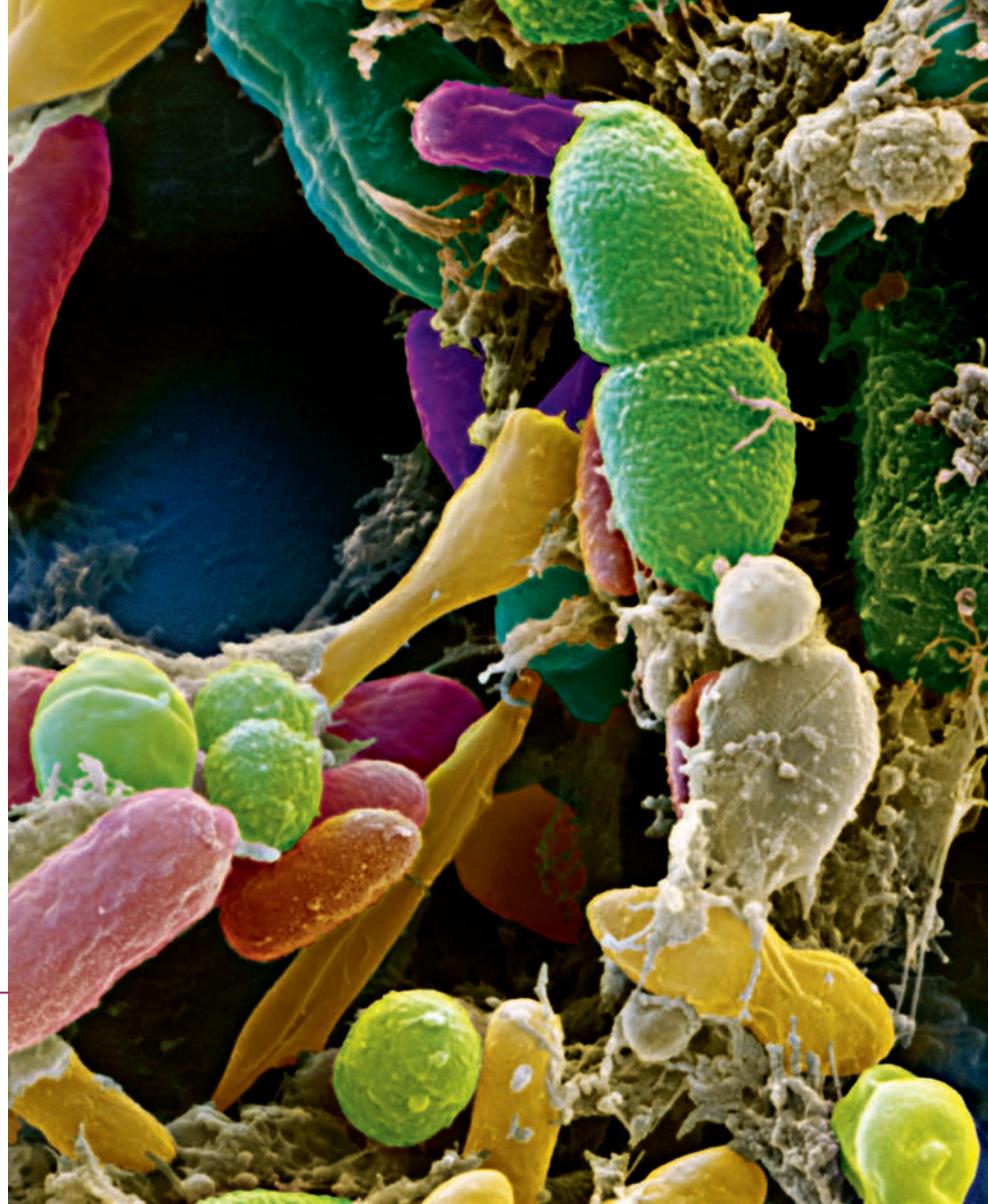
2000

Les bactéries peuvent être nos amies!

Notre corps héberge, notamment dans l'intestin, plus de 100 000 milliards de bactéries (environ dix fois plus que le nombre de cellules constituant un être humain). Mais il ne s'agit pas de parasites ! Ce « microbiote », dont l'étude systématique a commencé dans les années 2000, est considéré désormais comme un organe à part entière. Il sert d'interface entre les aliments et le corps. Son dysfonctionnement est impliqué dans de nombreuses maladies chroniques : allergies, diabète, obésité, etc. Les microbiotes de la peau et du vagin agissent, quant à eux, comme une protection contre les infections pathogènes, tout simplement

en « occupant la place ». On sait aujourd'hui opérer des transferts de microbiote – un peu comme on transpose des organes –, ce qui ouvre des pistes thérapeutiques prometteuses pour certaines maladies inflammatoires chroniques du système digestif, le diabète ou les maladies cardiovasculaires.

Bactéries constituant la flore intestinale, ou microbiote intestinal, et grossies 25 000 fois, grâce au microscope électronique à balayage.





La censure génétique

Une des grandes surprises de la génétique a été de découvrir que les gènes, ces « mots » dans le texte qui définit un organisme, pouvaient avoir une signification différente selon le contexte, voire pas de signification du tout. Un peu comme en français ? Oui, à la différence que « contexte » désigne ici la présence ou non de telle ou telle enzyme ou molécule, et, parmi elles, des micro-ARN. Ces très petits brins d'ARN (une molécule proche de l'ADN) étaient considérés comme des « déchets » de l'activité des cellules jusqu'à ce que l'on comprenne qu'ils avaient un rôle actif : celui de réguler le génome – l'ensemble des gènes – en faisant « taire »

certains gènes lorsque la cellule n'en a pas besoin. Cette découverte a valu le prix Nobel de médecine et de physiologie à Craig Mello et à Andrew Fire en 2006. Les micro-ARN (ou leur dérèglement) pourraient être impliqués dans différents cancers et pourraient servir à diagnostiquer les maladies cardiovasculaires.

À mesure que les cellules de cet embryon de mouche se spécialisent, les micro-ARN s'activent (points orange) pour réguler l'expression de leurs gènes.



La longue marche jusqu'à l'homme

Le 19 juillet 2001, à quelque huit cents kilomètres au nord de Ndjamena, au Tchad, une équipe de paléoanthropologues dirigée par Michel Brunet, de l'université de Poitiers, mettait au jour le crâne presque complet d'un grand singe qui fut surnommé Toumaï (« espoir de vie » en langue gorane). Certains aspects du fossile suggèrent des traits que l'on retrouve chez l'homme et ses ancêtres, et pas chez les autres grands singes d'Afrique, notamment une face relativement plate et la possibilité de marcher debout. D'après l'étude du terrain et des fossiles qui l'accompagnaient, Toumaï vivait il y a sept millions d'années. Comme Orrorin (« l'homme originel ») découvert

au Kenya par Brigitte Senut et Martin Pickford, du Muséum national d'histoire naturelle de Paris, Toumaï est presque deux fois plus ancien que la célèbre australopithèque Lucy. Ces fossiles démontrent que de grands singes marchaient déjà debout en Afrique à une époque où, d'après les études génétiques, la lignée de l'homme venait à peine de se séparer de celle des chimpanzés.

Moulage du crâne du principal fossile de *Sahelanthropus tchadensis*, dit Toumaï.



9

La conjecture de Poincaré est démontrée

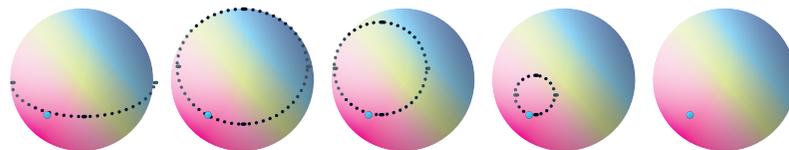
2003

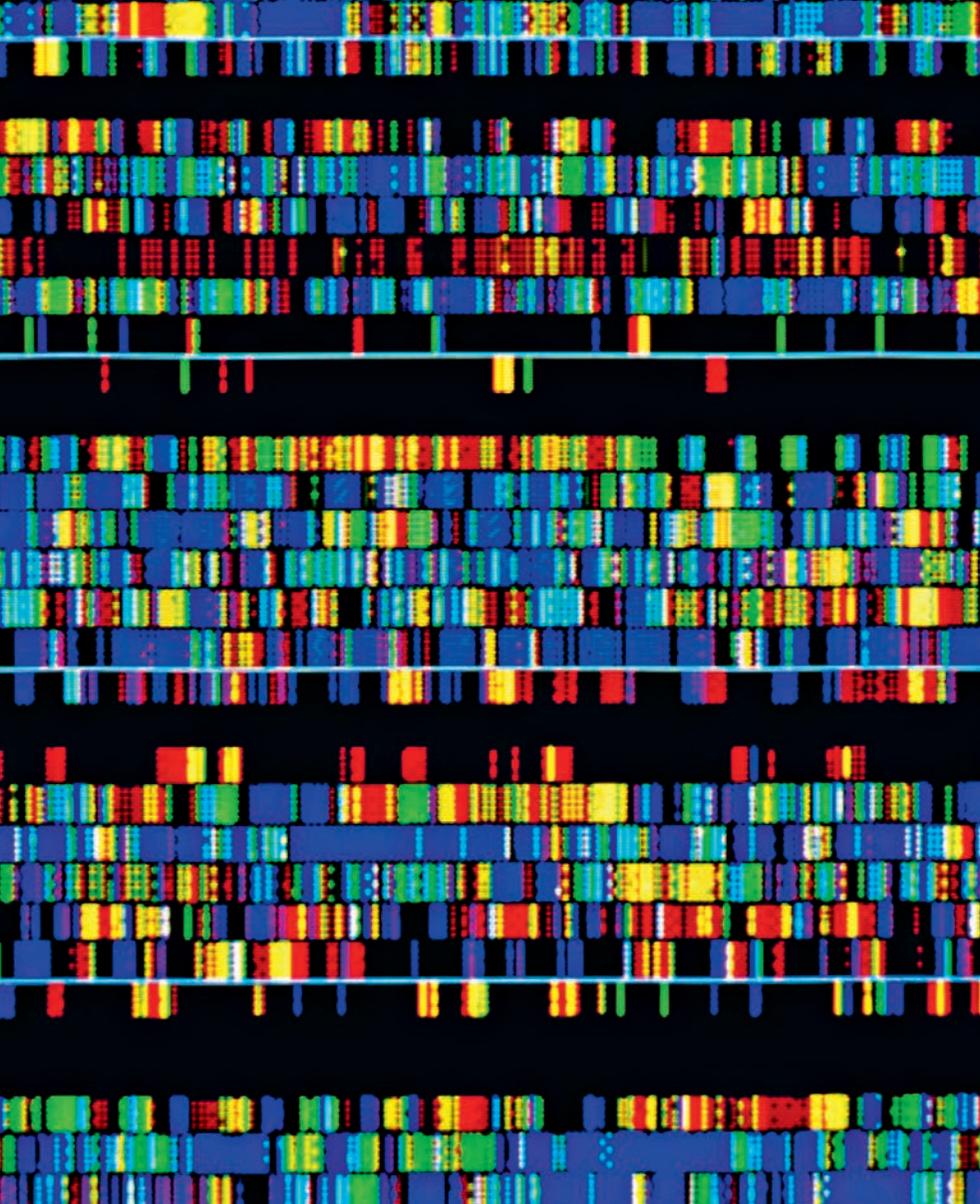
Elle résistait aux plus grands esprits depuis un siècle!

Dans notre espace à trois dimensions, la surface à deux dimensions d'un ballon et celle d'une bouée ont des propriétés différentes : tout cercle dessiné sur le ballon peut être rendu aussi petit que l'on veut si on le fait glisser sur la surface du ballon, ce qui n'est pas le cas avec la bouée (les cercles qui l'enserrent comme une bague autour d'un doigt ne peuvent pas être rétrécis). En topologie mathématique, cela équivaut à dire que l'on ne peut pas obtenir une sphère en déformant une bouée (il faudrait soit la déchirer, soit en boucher le trou). Cette équivalence est-elle vraie si l'on ajoute une dimension au problème ? On compare alors une hypersphère

et une hyperbouée à trois dimensions (impossibles à imaginer) dans un espace à quatre dimensions. Henri Poincaré avait conjecturé que oui en 1904. En 2003, Grigori Perelman l'a démontré et a reçu pour cela la médaille Fields..., qu'il a refusée, arguant qu'il ne faisait que son travail. Cette découverte, et les techniques qui l'accompagnent, ont ouvert un nouveau champ d'études en géométrie.

Un cercle peut être aussi petit qu'on le veut s'il est dessiné sur un ballon... mais pas s'il est dessiné sur une bouée : un cercle entourant la bouée comme les bras de l'enfant ne peut être réduit.





Le séquençage du génome humain

10

2003

La recette de l'homme ?

L'ADN contenu dans le noyau de nos cellules peut être vu comme un texte dont l'alphabet comporte quatre « lettres » – les molécules d'adénosine (A), de guanine (G), de cytosine (C) et de thymine (T) enchaînées les unes à la suite des autres – et dont les gènes seraient les « mots ». L'ensemble de ces gènes, le génome, est une sorte de manuel indiquant

aux cellules comment produire et faire fonctionner un organisme. Initialement difficile à réaliser à cause des quantités microscopiques d'ADN contenues dans une cellule, la lecture du génome a bénéficié des progrès fulgurants de la biochimie depuis 1980. La cartographie complète du génome humain par le Human Genome Project, commencée en 1990, a été achevée en 2003... Et séquencer un génome humain coûte aujourd'hui presque mille fois moins cher qu'à l'époque ! Ces méthodes permettront peut-être de connaître intimement le fonctionnement du corps d'un patient et de produire des traitements personnalisés.

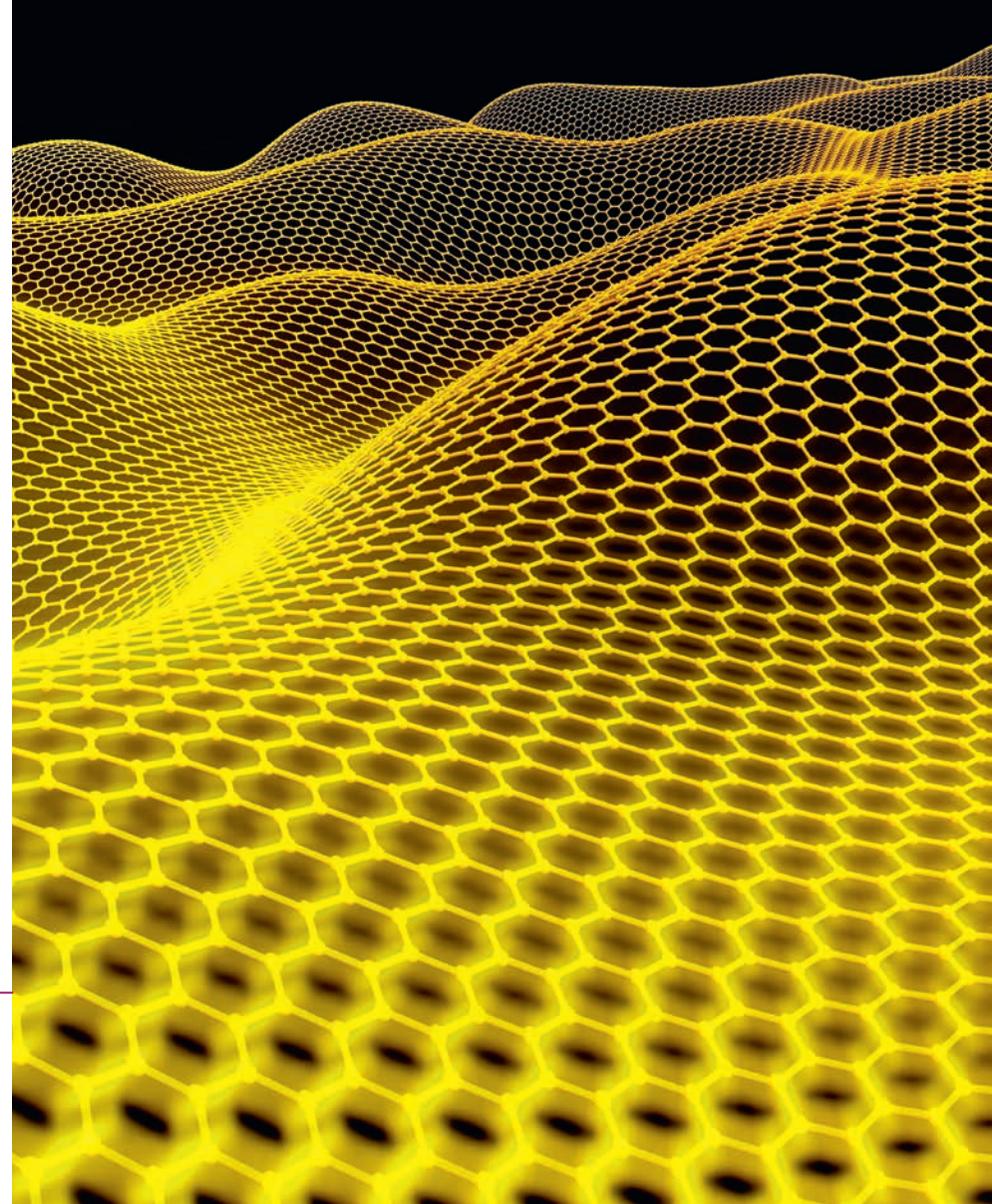
Séquences de l'ADN humain :
chaque couleur correspond à une
des bases – ou « lettres » – A, C, G, T,
qui constituent le génome.

Plus précieux que le diamant

Le graphite des mines de crayons est un millefeuille friable de couches de carbone. Une feuille unique, d'un seul atome d'épaisseur (environ 100 milliardièmes de millimètre!) et dont les atomes sont reliés selon un motif hexagonal est un cristal de graphène. Les électrons de ses liaisons chimiques sont mobiles - on dit qu'ils sont « délocalisés » - sur l'ensemble du réseau, comme dans les métaux ou les semi-conducteurs. Mais, dans le graphène, ils ont une mobilité exceptionnelle, ce qui lui donne ses propriétés remarquables. Leur vitesse moyenne y est cent cinquante fois plus élevée que dans le silicium de nos puces électroniques et il conduit

la chaleur dix fois mieux que le cuivre (et mieux que n'importe quel matériau connu): c'est donc la substance idéale pour faire des composants électroniques très petits, ultrarapides et qui chauffent peu. Ses applications potentielles - écrans souples, blindages contre les ondes électromagnétiques, batteries de nouvelle génération... - sont innombrables. Encore faut-il pouvoir synthétiser le graphène! L'exploit, réalisé pour la première fois en 2004, a valu le prix Nobel 2010 à Andre Geim et Konstantin Novoselov.

Le graphène, un feuillet de graphite d'un atome d'épaisseur, pourrait remplacer le silicium de nos puces électroniques.



12

La preuve du théorème des quatre couleurs

2005

Des mathématiques automatiques

Ce théorème affirme que quatre couleurs seulement suffisent à colorier n'importe quelle carte plane de façon telle que deux pays qui ont une frontière commune ont des couleurs différentes. Les mathématiciens ont établi dans les années 1970 qu'il n'existait que 1 478 cas «litigieux» – des cartes particulières qui, peut-être, nécessiteraient plus de couleurs. Un programme informatique qui arriverait, en tâtonnant très rapidement, à colorier ces 1 478 cartes avec quatre couleurs pouvait donc démontrer le théorème... sans recourir au raisonnement! Mais alors, contestaient d'autres mathématiciens, il faudrait avoir foi dans le fait que

le programme ne comporte pas d'erreur! En 2005, George Gonthier et Benjamin Werner, chercheurs de l'Institut national de recherche en informatique et automatique (Inria), ont écrit un programme capable de vérifier et valider les opérations effectuées. On dispose dès lors d'un raisonnement logique, rigoureux et complet, vérifiable par tous, validant ainsi définitivement le théorème des quatre couleurs.

Pour colorier une carte quelconque – un pavage du plan – de façon telle que deux régions ayant une frontière commune aient des couleurs distinctes, quatre couleurs suffisent.

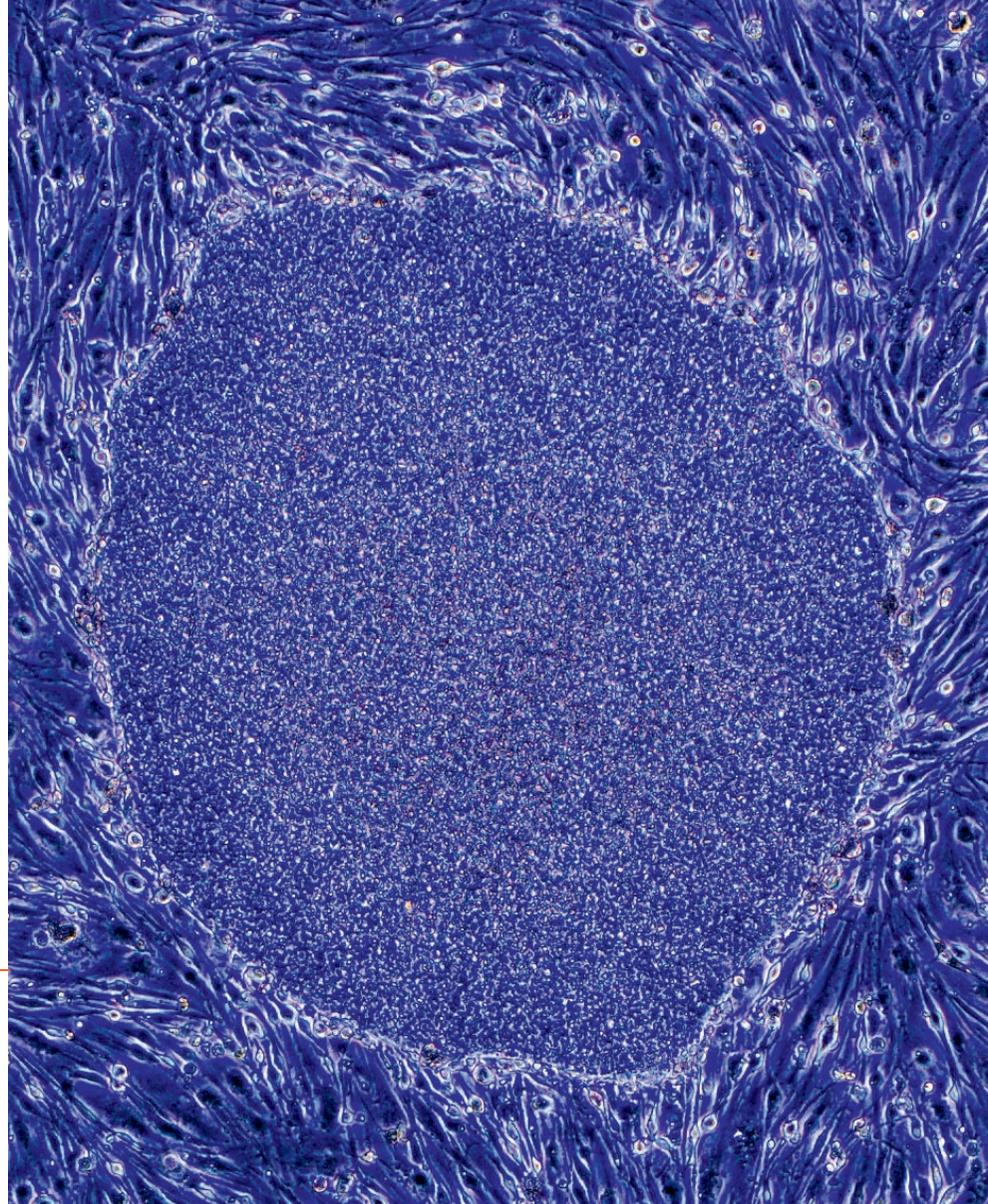


Les factotums de l'organisme

Chaque plante, chaque animal, chaque être humain commence sa vie sous forme d'une cellule unique qui se multiplie pour former des copies d'elle-même – des cellules filles. Ces dernières se spécialisent ensuite pour devenir, par exemple, des globules rouges, des cellules osseuses ou musculaires... Mais certaines restent en réserve, sans spécialisation, ce qui leur permet, en temps voulu, de remplacer leurs congénères : ce sont les cellules souches. On a longtemps pensé que la spécialisation d'une cellule était irréversible, le seul cas connu où une cellule renonçait à son rôle dans l'organisme pour se multiplier de façon anarchique étant le cancer. Or, à partir de

2006, Shinya Yamanaka puis John Gurdon (tous deux Prix Nobel 2012) ont pu, par des méthodes différentes, produire des cellules souches à partir de cellules déjà spécialisées sans qu'elles deviennent cancéreuses. On peut ainsi, par exemple, à partir d'une cellule de peau, induire des cellules souches, puis forcer celles-ci à devenir des neurones. Les perspectives pour la médecine sont vertigineuses.

Des cellules de la peau (formes allongées) ont été rendues pluripotentes (au centre) : elles pourront ensuite devenir des cellules cardiaques ou des neurones.



14

C'est bien nous qui changeons le climat

2008

Le doute n'est plus permis

Au début des années 1980, au cœur de l'Antarctique, des chercheurs français et soviétiques extraient des carottes de glace de plus de un kilomètre de profondeur, qui contiennent de la neige déposée année après année depuis près de 100 000 ans et des bulles d'air indiquant la composition de l'atmosphère à chaque époque. Elles démontrent qu'un gaz carbonique (CO₂) abondant – autour de 300 parties par million (ppm) – s'accompagne toujours d'un climat chaud, tandis que les périodes glaciaires correspondent à des niveaux bas (190 ppm). Or la concentration en CO₂ est passée de 270 ppm en 1850, à l'aube de la civilisation

industrielle, à près de 400 ppm aujourd'hui. En 2008, notamment grâce aux travaux de Jean Jouzel et de Valérie Masson-Delmotte (tous deux membres du GIEC – Groupement d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat –, lauréat du prix Nobel de la Paix en 2007), on sait que ce chiffre n'a jamais été atteint au cours des derniers 650 000 ans ! C'est donc bien notre activité qui accroît la concentration en gaz carbonique de l'atmosphère et provoque le réchauffement climatique.

Un glaciologue manipule une carotte de glace sur la station franco-italienne Concordia, au cœur du continent Antarctique.



15

Les architectures de choix

2008

Le marketing des bonnes décisions

Les gérants de supermarché connaissent depuis longtemps des « trucs » sur la façon de présenter des produits afin d'inciter les consommateurs à s'en saisir. Les sciences cognitives ont fait abondamment progresser nos connaissances sur les mécanismes à l'œuvre. L'imagerie cérébrale a ainsi démontré que certaines de nos décisions sont déterminées par notre cerveau avant que nous ayons conscience de les avoir prises. La théorie des architectures de choix (*nudges*, ou « coups de pouce ») a d'abord été popularisée par Richard Thaler, professeur de sciences comportementales et d'économie à l'université

de Chicago dans un ouvrage paru en 2008. Elle s'est développée depuis une dizaine d'années à la lisière de la psychologie, de l'économie et des sciences politiques, afin d'inciter les individus à opter pour certaines décisions souhaitables (économiser pour sa retraite, manger plus équilibré, arrêter de fumer, etc.) sans recourir à la contrainte des réglementations, des interdictions ou des taxations.

Aujourd'hui, la plupart des machines à café incitent le consommateur à sucrer sa boisson le moins possible, par une signalisation suggestive.



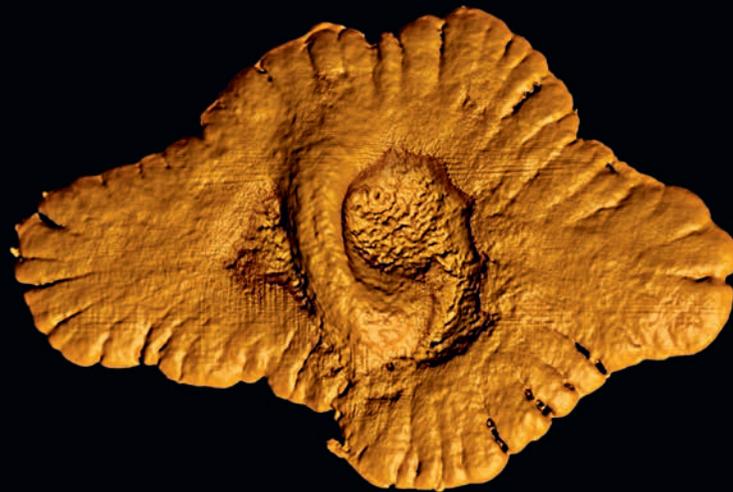
2010

Des organismes complexes trois fois plus anciens qu'on ne le croyait possible

Les biologistes ont longtemps cru que les organismes complexes composés d'une myriade de cellules étaient une innovation relativement récente dans l'histoire du vivant : environ 700 millions d'années (les plus anciens organismes pluricellulaires fossiles que l'on connaissait n'en avaient « que » 635). La vie n'aurait donc compté que des microbes pendant les quatre premiers cinquièmes de son histoire... Mais, en 2010, dans une mine à ciel ouvert de Franceville, au Gabon, Abderrazak el-Albani et son équipe, de l'université de Poitiers et du CNRS, ont découvert des fossiles révélant des êtres manifestement pluricellulaires, qui font

remonter l'origine de la vie complexe trois fois plus loin, il y a 2,1 milliards d'années ! La nouvelle, choquante, a provoqué initialement autant d'émerveillement que de scepticisme. La première bataille a consisté à prouver l'intérêt de ce site pour que les travaux miniers y soient stoppés. Avec la reprise des fouilles, les découvertes se multiplient. Et les manuels d'histoire du vivant n'ont pas fini de digérer l'incroyable nouvelle !

Fossile de la faune de Franceville, au Gabon. Les techniques d'imagerie médicale reconstituent sa forme et son organisation interne.



La restauration d'un tableau

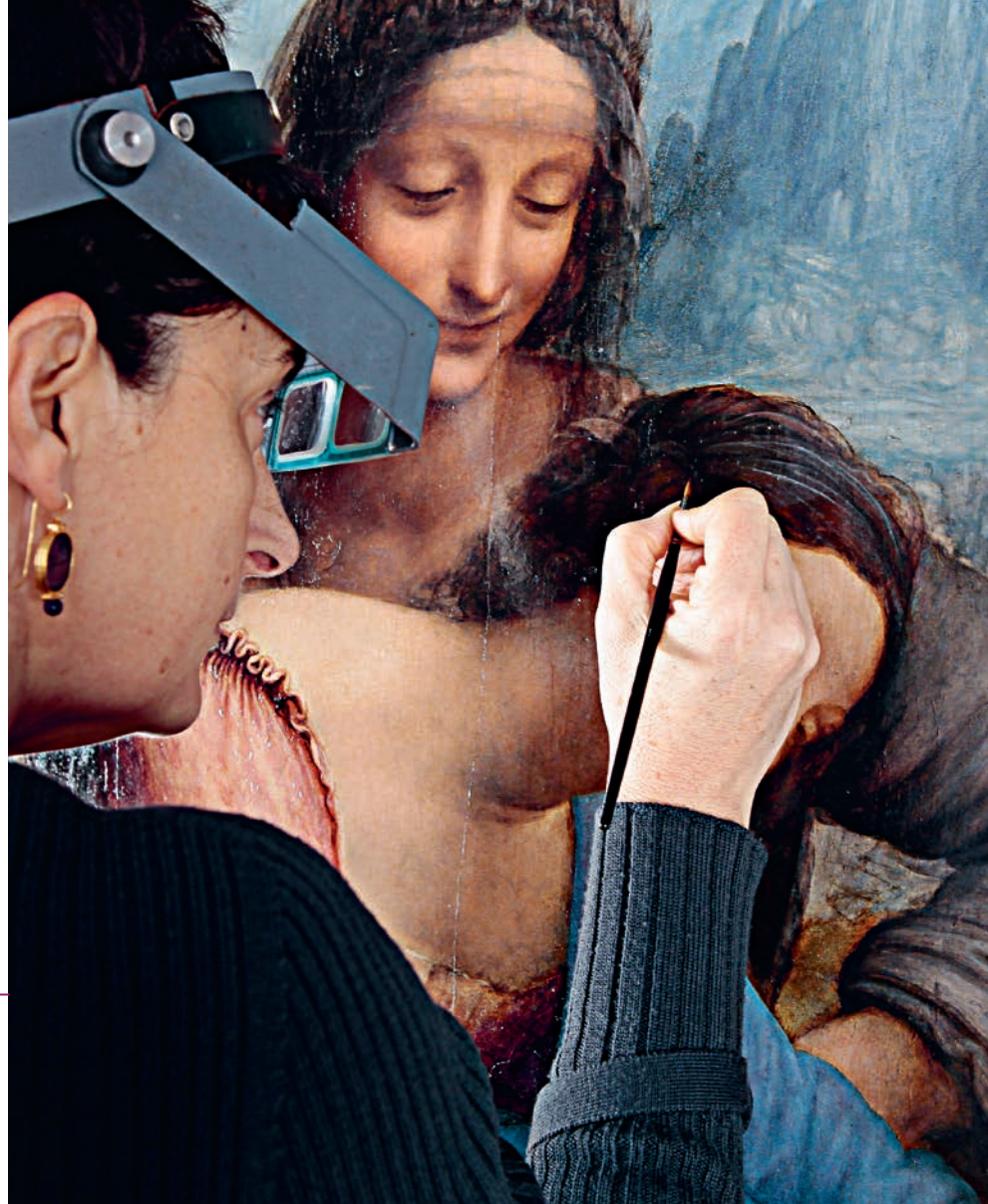
2010

La renaissance de La Vierge à l'Enfant avec sainte Anne de Léonard de Vinci

C'est l'un des plus mystérieux tableaux au monde. Inachevé. Léonard de Vinci y a pourtant travaillé de 1501 jusqu'à sa mort, en 1519. C'était aussi, avant sa restauration, un tableau défiguré par les « réparations » (ajouts de vernis) subies au fil des siècles. Pour le restaurer, il fallait des techniques modernes de radiographie, de microscopie électronique et d'analyse par fluorescence ou diffraction des rayons X afin de retrouver le dessin sous-jacent et d'identifier la nature chimique des pigments utilisés par le peintre. Cette exploration minutieuse a confirmé que l'œuvre est inachevée (certaines parties du paysage semblent moins « finies » que sur d'autres

copies du tableau sorties des ateliers de Léonard de Vinci). Cette opération spectaculaire, démarrée en 2010 et réalisée par le Centre de recherche et de restauration des musées de France, a duré plus d'un an et a bénéficié des conseils d'un comité international de seize spécialistes de l'artiste ou de la restauration. La « Sainte Anne » a ainsi retrouvé son coloris, ses contrastes et ses volumes.

La restauratrice Cinzia Pasquali amincit le verni trop épais du tableau, sans toucher aux peintures originales, et supprime les repeints.



Couper-coller le texte de la vie

18

2012

La révolution de la chirurgie du gène

Certaines bactéries comme les streptocoques possèdent dans leur arsenal de défense immunitaire un système étonnant dit «CRISPR/Cas9», qui agit comme une paire de ciseaux moléculaires capables de couper leur ADN et d'en extraire des gènes étrangers insérés par les virus. En 2012, Emmanuelle Charpentier et Jennifer Doudna ont montré comment attacher

ces «ciseaux» à un «ARN guide», un brin d'ARN qui est une sorte de «négatif» du gène ciblé, sur lequel il va se coller. Le gène peut alors être extrait et remplacé à volonté par un autre. Ce nouvel outil constitue une révolution pour la recherche, l'agronomie ou la médecine. Il permettra d'accélérer l'étude du fonctionnement du génome, de modifier certaines plantes, par exemple pour les rendre résistantes au changement climatique, et devrait faciliter les thérapies géniques. En novembre 2015, à Londres, une approche de ce type a déjà permis de traiter le génome d'une petite fille atteinte de leucémie, qui est aujourd'hui en rémission !

Sur cette reconstitution, la protéine Cas9 (forme oblongue) contient un brin d'ARN (en rouge) qui se fixe sur un gène cible (jaune) de l'ADN (double hélice bleue) avant de l'en extraire.

19

La couche d'ozone se reconstitue

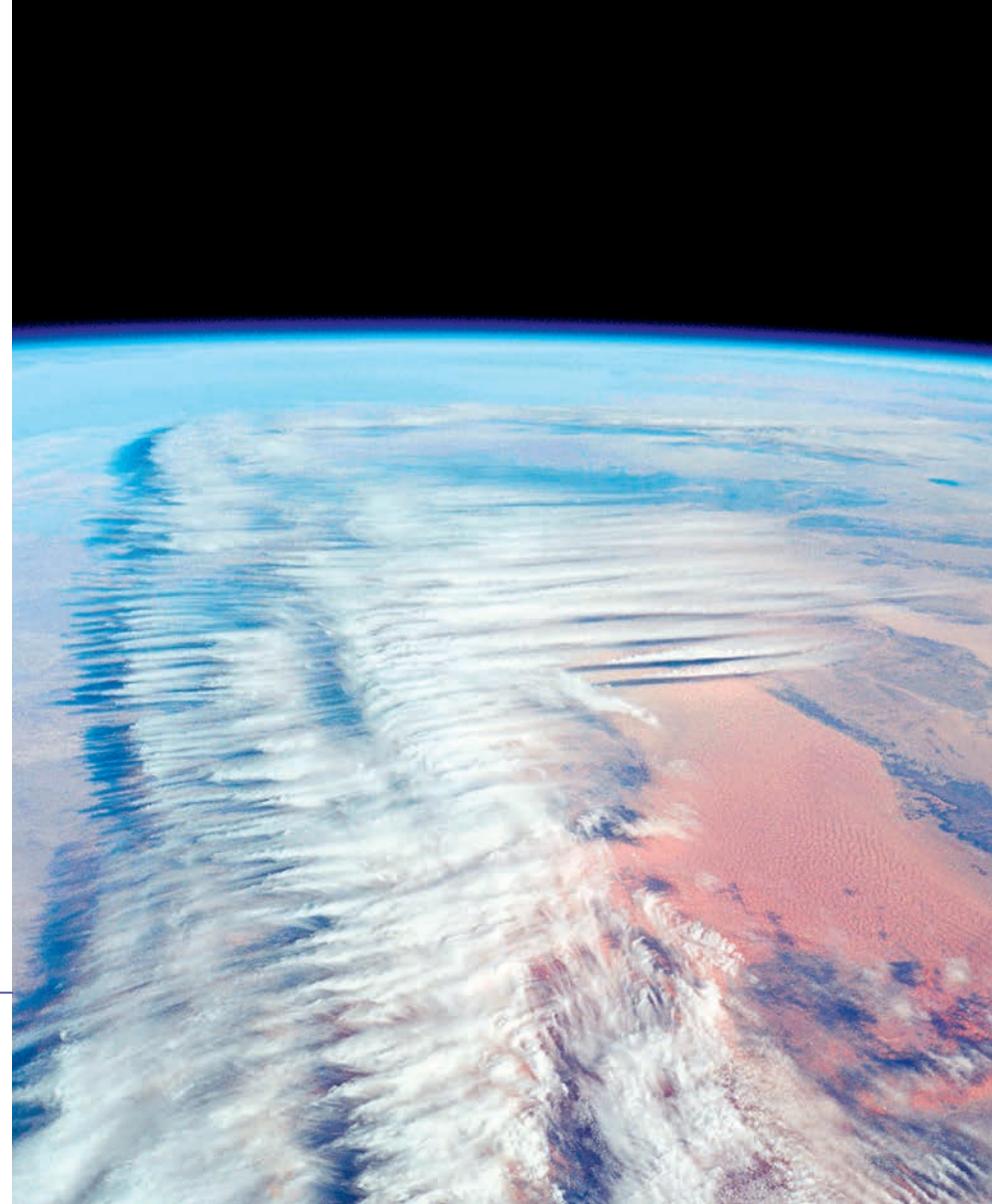
2012

Le protocole de Montréal fonctionne

Dans les années 1980, les scientifiques ont observé que la couche d'ozone – une région de la stratosphère où les molécules de trioxygène (O_3) sont concentrées et bloquent une partie des UV les plus dangereux émis par le Soleil – devenait chaque année plus ténue. Très vite, ils établissent que les chlorofluorocarbures (CFC), utilisés dans les systèmes frigorifiques et d'autres gaz industriels du même type, injectent dans l'atmosphère d'importantes quantités de chlore et de brome qui s'accumulent près des pôles et y détruisent l'ozone. En 1987, à Montréal, la majorité des États du monde s'accordent à bannir ces produits.

En 2012, l'Organisation météorologique mondiale constate que la concentration en chlore et en brome a diminué de plus de 10 % par rapport à ce qu'elle était à la fin des années 1990. Un protocole international peut donc donner des résultats s'il est appliqué scrupuleusement : en l'occurrence, on devrait revenir au niveau d'ozone de 1980 vers 2050.

La couche d'ozone, située dans la stratosphère – le fin liseré bleu qui surligne la Terre – s'est révélée très fragile.

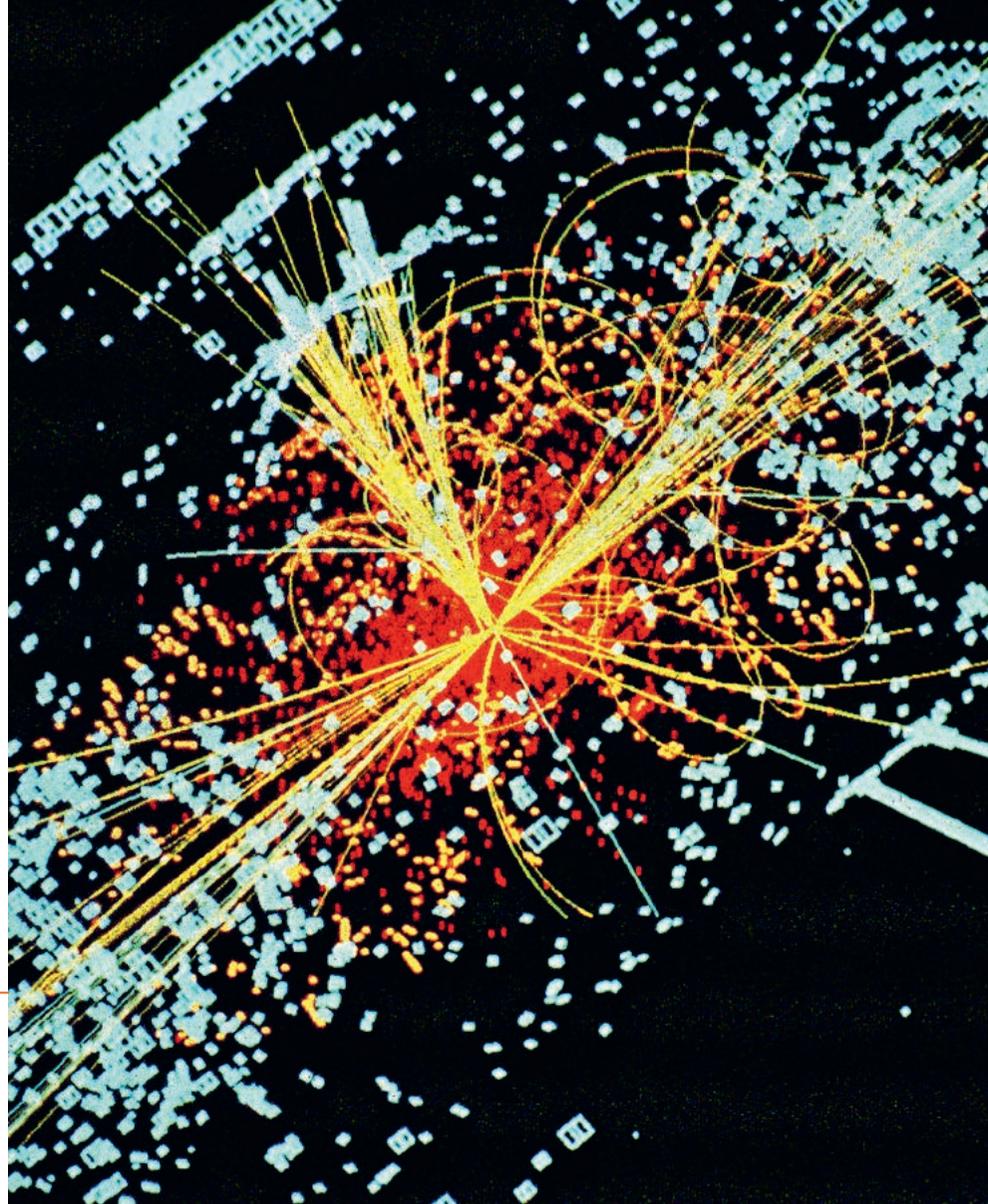


Une pièce manquait au grand puzzle de la nature...

Selon ce que les physiciens appellent « modèle standard », au niveau le plus fondamental, les particules constituant la matière se comportent comme les joueurs de foot ou de rugby : elles s'attirent ou se repoussent en échangeant des « balles » – les bosons – qui véhiculent les forces fondamentales de la nature. Jusqu'en 1964, on ne comprenait pas l'origine de la masse des bosons. Six physiciens – dont Peter Higgs – postulèrent qu'une particule devait encombrer le vide et « gêner » le déplacement des autres, leur conférant ainsi une masse. Appelée « boson de Higgs », elle a été découverte en 2012 grâce au plus gigantesque instrument scientifique jamais

construit : le LHC (Large Hadron Collider), un anneau de vingt-sept kilomètres de circonférence dans lequel des protons sont projetés les uns contre les autres à des énergies phénoménales. Un peu comme on provoquerait de gigantesques éclaboussures dans un lac dans l'espoir de mettre au jour les trésors qui gisent au fond ! La découverte du boson de Higgs complète le modèle standard, mais le puzzle n'est pas terminé.

Deux jets de protons entrent en collision pour produire des bosons de Higgs, dont la désintégration engendre des jets de particules (en jaune).



La mer est-elle tombée du ciel?

En 2004, l'Agence spatiale européenne lançait *Rosetta*, une sonde spatiale de trois tonnes équipée d'un atterrisseur robot, *Philae*. Dix ans plus tard, *Rosetta* s'est placée en orbite autour de la comète Tchourioumov-Guérassimenko, sur laquelle *Philae* est parvenu à se poser. L'analyse *in situ* du noyau de la comète a montré la présence d'importantes quantités d'eau ainsi que du dioxyde de carbone, de l'ammoniac, des molécules organiques simples et des traces de composés soufrés. Parce qu'elle s'est formée près du Soleil, notre Terre est composée essentiellement de roches, elle est enveloppée d'une mince atmosphère gazeuse et partiellement

recouverte d'océans d'eau liquide. Or l'eau est un composé très abondant dans les parties plus excentrées du Système solaire. Les briques moléculaires de la vie (la matière organique) et une partie de l'eau des océans auraient-ils été apportés sur notre monde par les comètes, ces visiteuses venues de la banlieue glacée du Système solaire?

Reconstitution de la descente de *Philae* depuis la sonde *Rosetta* jusqu'à la comète Tchourioumov-Guérassimenko.





Neandertal vit parmi nous

2014

22

Les traces d'une autre humanité

Homo sapiens a longtemps partagé la moitié occidentale de l'Eurasie avec les hommes de Neandertal, vrais indigènes de l'Europe. On a retrouvé des vestiges d'ADN dans les ossements néandertaliens et commencé leur séquençage. On a alors découvert que les Européens et les habitants du Moyen-Orient ou de l'Asie centrale actuels partagent de 2 à 4 % de leurs gènes avec Neandertal, cette proportion étant beaucoup plus faible

ailleurs. On suppose que ces gènes proviennent d'un métissage - il y a plus de 2 000 générations - qui aurait favorisé l'adaptation de nos ancêtres sortis d'Afrique à l'environnement eurasiatique (mais aurait aussi transmis des maladies comme le diabète). Sriram Sankararaman, de l'École médicale de Harvard et de l'Institut d'anthropologie évolutive de Leipzig, a dirigé une étude systématique chez un millier de nos contemporains, qui a confirmé, en 2014, la présence de ces gènes. L'analyse suggère aussi que les hybrides masculins étaient peu fertiles, ce qui renforce l'idée que Sapiens et Neandertal sont bien deux espèces différentes.

Les reconstitutions modernes de l'homme de Neandertal mettent l'accent sur son humanité.

Observation des ondes gravitationnelles

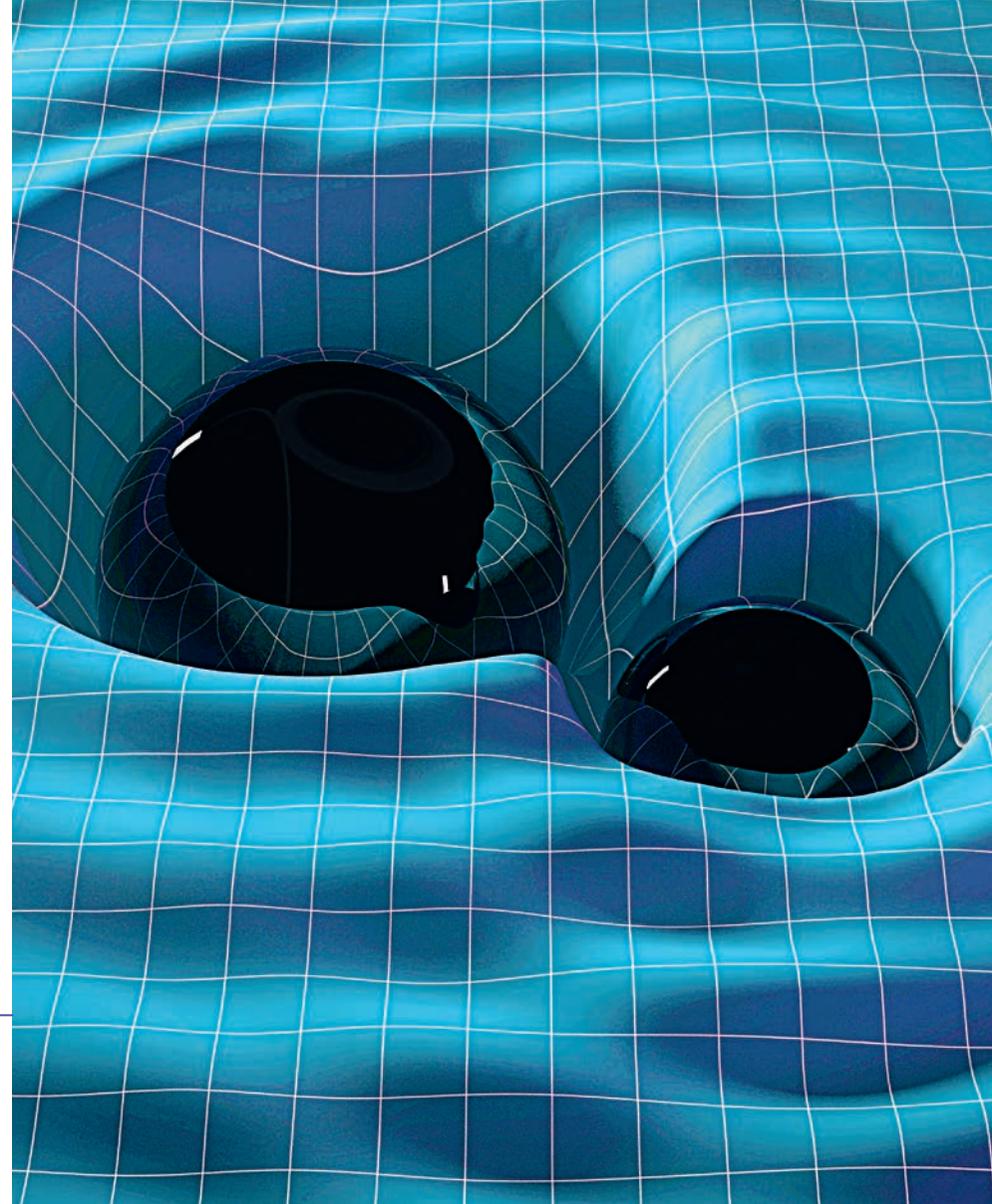
2015

L'espace-temps a tremblé

Il y a plus d'un milliard d'années, deux trous noirs – des astres si massifs que même la lumière ne peut s'en échapper – ont spiralé l'un vers l'autre jusqu'à fusionner en un cataclysme inimaginable. L'événement a déformé la trame de l'espace-temps, expédiant à travers l'univers des ondes gravitationnelles – des vibrations de la toile de fond du cosmos. Le 14 septembre 2015, elles ont atteint la Terre, où deux détecteurs du LIGO (Observatoire d'ondes gravitationnelles par interférométrie laser), l'un en Louisiane, l'autre dans l'État de Washington, ont enregistré en même temps les infimes variations des distances provoquées par leur passage.

Tout comme les trous noirs, les ondes gravitationnelles sont une prédiction de la théorie de la relativité générale qu'Albert Einstein a achevée en 1916. Il pensait qu'elles seraient trop faibles pour qu'on puisse jamais les détecter... Un siècle plus tard, la prouesse est pourtant réalisée et ouvre une nouvelle fenêtre sur l'Univers.

La rencontre de deux trous noirs déforme l'espace-temps et y provoque des vagues.



La biodiversité du plancton révélée

Les océans du monde grouillent de vie. Virus, bactéries et organismes eucaryotes (dont les cellules possèdent un noyau) – amibes, algues, plantes ou minuscules animaux – participent tous à des écosystèmes enchevêtrés à l'échelle du globe. Pendant près de trois ans, l'expédition française Tara Oceans a sillonné toutes les mers du globe: la Méditerranée, l'océan Indien puis l'Atlantique sud, contournant l'Amérique latine pour naviguer huit mois dans le Pacifique avant de revenir dans l'Atlantique nord en passant par le canal de Panama. En 2013, elle a effectué une circumnavigation de l'Arctique. Tara a collecté près de

35 000 échantillons, identifiés et classés des milliers d'espèces. Des chercheurs de nombreuses disciplines ont étudié leurs interactions et leur sensibilité au climat pendant plusieurs années. Le séquençage de leur génome à grande échelle a permis de découvrir que plus des deux tiers des gènes de ces espèces étaient totalement inconnus jusqu'ici. En mai 2015, cette immense somme de connaissances a été publiée par la célèbre revue *Science*.

Cet échantillon de plancton prélevé dans l'océan Indien au large des Maldives par l'expédition Tara donne un aperçu de la grande diversité de ses composants.



Neandertal, toujours plus humain

Découverte dans les années 1990, la grotte de Bruniquel, dans le Tarn-et-Garonne, abrite une construction préhistorique originale: des êtres humains ont récupéré des stalactites et des stalagmites de la grotte pour les arranger sur le sol en une série de «palissades» circulaires concentriques. Les premières datations du site au carbone 14 lui attribuaient un âge de près de 47 000 ans, et les scientifiques s'émerveillaient de ce que, manifestement, l'«homme» fréquentait déjà les grottes 30 000 ans avant de réaliser les peintures de Lascaux... Mais ces dates étaient à la limite de ce que le carbone 14 peut déterminer. En 2016, l'équipe internationale

à laquelle a participé Jacques Jaubert, de l'université de Bordeaux, a utilisé une autre méthode, la datation uranium-thorium, et le verdict donne le vertige: cette construction date de 176 500 ans, une époque où nos ancêtres *Homo sapiens* étaient encore en Afrique! C'est donc l'homme de Neandertal qui a construit les palissades de Bruniquel. Une nouvelle indication qu'il était, dans tous les sens du terme, aussi «humain» que nous...

Mesures réalisées dans la grotte de Bruniquel, dont les structures aménagées sont bien visibles.



Et pour en savoir plus...

En bleu, les titres jeunesse.

1. Le World Wide Web

- Shane Birlley, *Crée ton blog*, Fleurus, 2016
- Philippe Godard, *La Toile et toi*, Gulf Stream, 2014
- Sean McManus, *Code ton jeu vidéo*, Fleurus, 2016
- Linus Torvalds, *Linux c'est gratuit! Mais aidez-moi à l'installer*, L'École des loisirs, 2010
- Françoise Virieux, *Internet: quel drôle de réseau!*, Le Pommier, 2009
- Laurent Alexandre et Jean-Michel Besnier, *Les Robots font-ils l'amour?: le transhumanisme en 12 questions*, Dunod, 2016
- Olivier Bomsel, *Gratuit! Du déploiement de l'économie numérique*, Gallimard, 2007
- Jaron Lanier, *Internet: qui possède notre futur?*, 2014, Le Pommier
- Emmanuel Lazard et Pierre Mounier-Kuhn, *L'Histoire illustrée de l'informatique*, EDP Sciences, 2016

2. La led bleue

- Derek B. Lowe, *Le Beau Livre de la chimie: de la poudre à canon aux nanotubes de carbone*, Dunod, 2016
- Stéphane Sarrade, *La Chimie d'une planète durable*, Le Pommier, 2011
- Bernard Valeur, *La Couleur dans tous ses éclats*, Belin, 2011

3. Text encoding initiative (TEI)

- Lou Burnard, *Qu'est-ce que la Text Encoding Initiative?*, OpenEdition Press, 2015
- Claire Calmet, Mathieu Hirtzig et David Wilgenbus, *1, 2, 3... codez!*, Le Pommier, 2016
- Marin Dacos (dir.), *Read/Write Book: le livre inscriptible*, OpenEdition Press, 2010
- Jean-Paul Delahaye, *Complexités: aux limites des mathématiques et de l'informatique*, Belin-Pour la Science, 2010
- Douglas Hofstadter, *Gödel, Escher, Bach: les brins d'une guirlande éternelle*, Dunod, 2008
- Max Tegmark, *Notre univers mathématique: en quête de la nature ultime du Réel*, Dunod, 2014

4. La première exoplanète

- Emmanuel Beaudoin et Catherine Even-Beaudoin, *Petites Expériences insolites pour découvrir l'univers*, Dunod, 2015
- André Brack, *Découvrir la vie extraterrestre*, Le Pommier, 2007
- Pascale Chadenat, *Les Exotériques*, L'École des loisirs, 2010
- Olivier de Goursac, *La Conquête spatiale racontée aux enfants*, La Martinière Jeunesse, 2013
- Ian Graham, *Atlas de l'espace*, La Martinière Jeunesse, 2014
- Roland Lehoucq, *Les Extraterrestres expliqués à mes enfants*, Le Seuil, 2012

- Olivier Melano, *Tycho Brahé, prince des étoiles*, L'École des loisirs, 2009
- Olivier Sauzereau, *Le Ciel étoilé*, Gulf Stream, 2006
- Carole Scott, *Oh! L'espace*, Gallimard Jeunesse, 2011
- Dominic Walliman, *Professeur Astrocat: aux frontières de l'espace*, Gallimard Jeunesse, 2014
- Alex Alice, *Le Château des étoiles*, t. 1: *La Conquête de l'espace*, Rue de Sèvres, 2014
- Martin Bojowald, *L'Univers en rebond: avant le big bang*, Gallimard, 2013
- Pascal Bordé, *Y a-t-il d'autres planètes habitées dans l'Univers?*, Le Pommier, 2004
- André Brahic, *De feu et de glace*, Odile Jacob, 2010
- Thérèse Encrenaz et James Lequeux, *L'exploration des planètes: de Galilée à nos jours... et au-delà*, Belin, 2014
- Charles Frankel, *Dernières nouvelles des planètes*, Le Seuil, 2009
- Christophe Galfard, *L'Univers à portée de main*, Flammarion, 2015
- Jacques Paul et Jean-Luc Robert-Esil, *Le Beau Livre de l'Univers: du Big Bang au Big Freeze*, Dunod, 2013

5. L'acidification des océans

- Laurent Bopp, *Les Dessous de l'océan*, Le Pommier, 2012
- Édouard Bard (dir.), *L'Océan, le climat et nous*, Le Pommier, 2011
- Patrick De Wever, *Le Beau Livre de la Terre: de la formation du système solaire à nos jours*, Dunod/Muséum national d'histoire naturelle, 2015

- Philippe Gouletquer, Philippe Gros, Gilles Bœuf et Jacques Weber, *Biodiversité en environnement marin*, QUAE, 2012
- Nicolas Haeringer, Maxime Combes, Jeanne Planche et Christophe Bonneuil (dir.), *Crime climatique stop! L'appel de la société civile*, Le Seuil, 2015
- Hubert Reeves (avec Frédéric Lenoir), *Mal de Terre*, Le Seuil, 2003 et 2005

6. Le rôle fonctionnel du microbiote

- Collectif, *Encyclopédie du corps humain*, Gallimard Jeunesse, 2013
- Gérard Dhôtel et Benoît Perroud, *Le Livre des vrai-faux du corps humain*, La Martinière Jeunesse, 2015
- Sophie Séronie-Vivien, *Je mange, je bois, je respire, à quoi ça sert?*, Le Pommier, 2016
- Martin Blaser, *La Santé par les microbes*, Flammarion, 2014
- Marie-Christine Champomier-Vergès et Monique Zagorec, *La Métagénomique: développements et futures applications*, QUAE, 2015
- Laurent Cointot, Éric Connaye et Jean-François Launay, *L'Agromots: 70 notions pour comprendre l'alimentation, l'agriculture et l'environnement*, Le Cherche Midi, 2016
- Gérard Corthier, *Bonnes Bactéries et bonne santé*, QUAE, 2011
- Jean-Pierre Dedet, *La Microbiologie, de ses origines aux maladies émergentes*, Dunod, 2007
- Patrice Debré, *L'Homme microbiotique*, Odile Jacob, 2015

Giulia Enders, *Le Charme discret de l'intestin*, Actes Sud, 2015
Janine Guespin-Michel, *Les Bactéries, leur monde et nous: vers une biologie intégrative et dynamique*, Dunod/La Recherche, 2011
John Herrick, *Les Bactéries, une chance pour l'humanité?*, Le Pommier, 2016
Bernard Swynghedauw, *L'Homme malade de lui-même*, Belin, 2015

7. Les micro-ARN

Pascale Cossart, *La Nouvelle Microbiologie*, Odile Jacob, 2016
François Gros, *De la pénicilline à la génomique*, Odile Jacob, 2016

8. Toumaï

Anna Alter et Brigitte Senut, *Qui sont nos ancêtres?*, Le Pommier, 2015
Jean-Baptiste de Panafieu, *(R)Évolution des mutants*, Gulf Stream, 2011
Pascal Picq, *Darwin et l'évolution expliqués à nos petits-enfants*, Le Seuil, 2009
Pascal Picq, *Les Origines de l'homme expliquées à nos petits-enfants*, Le Seuil, 2010
Marc Azéma et Laurent Brasier, *Le Beau Livre de la préhistoire: de Toumaï à Lascaux*, Dunod, 2016
Antoine Balzeau et Sophie de Beaune, *Notre préhistoire: la grande aventure de la famille humaine*, Belin, 2016
Michel Brunet, *D'Abel à Toumaï*, Odile Jacob, 2006
Jean-Jacques Hublin et Bernard Seytre, *Quand d'autres hommes peuplaient la Terre*, Flammarion, 2011

Pascal Picq, *Le singe est-il le frère de l'homme?*, Le Pommier, 2010
Ian Tattersall, *L'Émergence de l'homme: essai sur l'évolution et l'unicité humaine*, Gallimard, 2003

9. La conjecture de Poincaré est démontrée

Aurélien Alvarez, *Voyages en mathématique: destination systèmes dynamiques avec Poincaré*, Le Pommier, 2013
Collectif, *Les Mathématiciens: de l'Antiquité au XXI^e siècle*, Belin-Pour la Science, 2010
Keith Devlin, *Les Énigmes mathématiques du 3^e millénaire*, Le Pommier, 2013
Donal O'Shea, *Grigori Perelman face à la conjecture de Poincaré: quelle est la forme de l'Univers?*, Dunod, 2007
Henri Poincaré, *La Science selon Henri Poincaré: la science et l'hypothèse – la valeur de la science – science et méthode*, Dunod, 2013
George G. Szpiro, *La Conjecture de Poincaré*, Le Seuil, 2007 et 2009

10. Le séquençage du génome humain

Anna Alter et Axel Kahn, *Les Gènes, ce qu'on ne sait pas encore*, Le Pommier, 2014
Richard Walker, *Le Corps humain*, Gallimard Jeunesse, 2015
Académie des sciences, *Les Origines du vivant*, Gallimard, 2016
Alice Andreoli, *L'Histoire controversée du test ADN: entre crimes, mystères et batailles légales*, Belin, 2010
Pierre Darlu, *Origines: l'ADN a-t-il répondu à tout?*, Le Pommier, 2016

Stuart J. Edelstein, *Des gènes aux génomes*, Odile Jacob, 2002
Michael C. Gerald, *Le Beau Livre de la biologie: de l'origine de la vie à la génomique*, Dunod, 2015
Bertrand Jordan, *Autisme, le gène introuvable: de la science au business*, Le Seuil, 2012
Bertrand Jordan, *Les Imposteurs de la génétique*, Le Seuil, 2000

11. Le graphène

Étienne Guyon, Alice Pedregosa et Béatrice Salviat (dir.), *Matériau et matériaux: de quoi est fait le monde*, Belin, 2010
Michio Kaku, *Une brève histoire du futur*, Flammarion, 2014
Pierre Laszlo, *Drôle de chimie*, Le Pommier, 2015
Joel Levy, *Déguster la chimie en 100 nombres*, Belin, 2015

12. La preuve du théorème des quatre couleurs

Benoît Boulanger, Saïda Guellati-Khélifa, Daniel Hennequin et Marc Stehle, *La Lumière en lumière*, EDP Sciences, 2016
Pierre Cartier, Jean Dombres, Gerhard Heinzmann et Cédric Villani, *Mathématiques en liberté*, La ville brûle, 2012
Gilles Dowek, *Les Métamorphoses du calcul*, Le Pommier, 2011
Christian Huygens, *Traité de la lumière*, Dunod, 2015
Clifford A. Pickover, *Le Beau Livre des maths: de Pythagore à la 57^e dimension*, Dunod, 2010

13. Des cellules souches sur commande

Jean-François Bouvet, *Mutants*, Flammarion, 2014
Laurent Degos, *Qui décide de ma vie et de ma mort?*, Le Pommier, 2015
François Gros, *Les Mondes nouveaux de la biologie*, Odile Jacob, 2012
Mark Henderson, *Juste assez de biologie pour briller en société*, Dunod, 2009
Nicole Le Douarin, *Les Cellules souches, porteuses d'immortalité*, Odile Jacob, 2007
Michel Morange, *Une histoire de la biologie*, Le Seuil, 2016

14. C'est bien nous qui changeons le climat

Anna Alter et Hervé Le Treut, *Sur quelle planète bleue ai-je atterri?*, Le Pommier, 2015
Florence Thinar, *Une seule Terre pour nourrir les hommes*, Gallimard Jeunesse, 2015
Svante Arrhenius et al., *Sur les origines de l'effet de serre et du changement climatique*, La ville brûle, 2010
Sébastien Balibar, *Climat: y voir clair pour agir*, Le Pommier, 2015
Jean-Louis Bobin, *Demain, quelle Terre?*, EDP Sciences, 2015
Christophe Bonneuil et Jean-Baptiste Fressoz, *L'Événement Anthropocène: la Terre, l'histoire et nous*, Le Seuil, 2013
Vincent Boqueho, *Les Civilisations à l'épreuve du climat*, Dunod, 2012
Jérôme Chappellaz, Olivier Godard, Sylvestre Huet et Hervé Le Treut, *Changement climatique: les savoirs et les possibles*, La ville brûle, 2010

Jared Diamond, *Effondrement : comment les sociétés décident de leur disparition ou de leur survie*, Gallimard, 2009

Tim Flannery, *Sauver le climat : tout est encore possible*, Buchet/Chastel, 2015

Hélène Géli et Jean-François Soussana, *Le Changement climatique : ce qui va changer dans mon quotidien*, QUAE, 2015

Jean-Marc Jancovici, *Dormez tranquilles jusqu'en 2100*, Odile Jacob, 2015

Jean Jouzel et Olivier Nouaillas, *Quel climat pour demain ? 15 questions / réponses pour ne pas finir sous l'eau*, Dunod, 2015

Katia Laval et Guy Laval, *Incertitudes sur le climat*, Belin, 2013

Chloé Maréchal et Marie-Antoinette Mélières, *Climats : passé, présent, futur*, Belin, 2015

Gilles Ramstein, *Voyage à travers les climats de la Terre*, Odile Jacob, 2015

Pablo Servigne et Raphaël Stevens, *Comment tout peut s'effondrer : petit manuel de collapsologie à l'usage des générations présentes*, Le Seuil, 2015

Pascal Yiou, *Le temps s'est-il détraqué ? Comprendre les catastrophes climatiques*, Buchet/Chastel, 2015

15. Les architectures de choix

Alain Berthoz, *La Décision*, Odile Jacob, 2003

Olivier Houdé, *Apprendre à résister*, Le Pommier, 2014

Richard H.Thaler et Cass R. Sunstein, *Nudge : la méthode douce pour inspirer la bonne décision*, Pocket, 2012

Richard H.Thaler, *Nudge - La démocratie du coup de pouce ?*, CPCP, 2015

16. L'histoire de la vie doit être réécrite

Archie Blackwell, *Le Monde des dinosaures*, Gallimard Jeunesse, 2014

Martial Caroff, *Les Fossiles ont la vie dure !*, Gulf Stream, 2014

Abderrazak El Albani, Roberto Macchiarelli et Alain R. Meunier, *Aux origines de la vie : une nouvelle histoire de l'évolution*, Dunod, 2016

Éric Buffetaut, *Que nous racontent les fossiles ?*, Le Pommier, 2009

Jean-Claude Fischer, *Guide des fossiles de France et des régions limitrophes*, Dunod, 2016

Patrick Forterre, Louis d'Hendecourt, Christophe Malaterre et Marie-Christine Maurel, *De l'inerte au vivant : une enquête scientifique et philosophique*, La ville brûle, 2013

Alexandre Meinesz, *Comment la vie a commencé*, Belin, 2016

Pascal Tassy, *Le Paléontologue et l'évolution*, Le Pommier, 2016

17. La restauration d'un tableau

Sylvie Dodeller, *Léonard de Vinci : artiste ? Vous rigolez.*, L'École des loisirs, 2016

Pascale Hédelin, *Déjoue les pièges de la Science*, Gulf Stream, 2015

Guillaume Kazerouni et Giulia d'Anna Lupo, *Le Petit Ami du Louvre : 10 chefs d'œuvre du Louvre expliqués aux enfants*, Gulf Stream, 2013

Gérald Stehr, *Les Défis de Léonardo*, L'École des loisirs, 2008

Pierre Laszlo, *Copal, benjoin, colophane... : gemmes*, Le Pommier, 2007

Stéphane Sarrade, *De la Joconde aux tests ADN, jusqu'où ira la chimie ?*, Le Pommier, 2015

Bernard Valeur, *Une belle histoire de la lumière et des couleurs*, Flammarion, 2016

18. Couper-coller le texte de la vie

Jean-Baptiste de Panafieu, *L'Eveil – stade 1*, Gulf Stream, 2016

Lise Barnéoud, *Médecine : tout prédire ?*, Belin, 2015

Catherine Bourgain et Pierre Darlu, *ADN superstar ou superflic ? Les citoyens face à une molécule envahissante*, Le Seuil, 2013

Jean Deutsch, *Le Gène : un concept en évolution*, Le Seuil, 2012

Michael C. Gerald, *Le Beau Livre des remèdes et des médicaments : des plantes médicinales aux thérapies géniques*, Dunod, 2014

Dominique Joly, Denis Faure et Sylvie Salamitou, *Empreinte du vivant : l'ADN de l'environnement*, Le Cherche Midi, 2015

Bertrand Jordan, *Thérapie génique : espoir ou illusion ?*, Odile Jacob, 2007

Clifford A. Pickover, *Le Beau Livre de la médecine : des sorciers guérisseurs à la microchirurgie*, Dunod, 2013

19. La couche d'ozone se reconstitue

Didier Hauglustaine, *Le Baptême de l'air*, Le Pommier, 2008

Didier Hauglustaine, *Le trou dans la couche d'ozone est-il rebouché ?*, Le Pommier, 2007

Jean Jouzel et Anne Debroise, *Le Défi climatique : objectif : + 2 °C !*, Dunod, 2014

20. Le boson de Higgs

Anna Alter et Étienne Klein, *De quels atomes sommes-nous faits ?*, Le Pommier, 2015

Roland Lehoucq, *La Lumière à la loupe*, Le Pommier, 2005

Jon Scieszka et Brian Biggs, *Frank Einstein et le moteur à antimatière*, Le Seuil jeunesse, 2015

Jim Baggott, *La Particule de Dieu : à la découverte du Boson de Higgs*, Dunod, 2013

Francis Bernardeau, Étienne Klein, Sandrine Laplace et Michel Spiro, *La Physique des infinis*, La ville brûle, 2013

Sean Carroll, *Higgs, Le Boson manquant*, Belin, 2013

Gilles Cohen-Tannoudji et Michel Spiro, *Le Boson et le chapeau mexicain : un nouveau grand récit de l'univers*, Gallimard, 2013

Michel Crozon, *L'Univers des particules*, Le Seuil, 1999

Michel Davier, *LHC : le boson de Higgs*, Le Pommier, 2013

Paul Halpern, *Le Dé d'Einstein et le chat de Schrödinger : quand deux génies s'affrontent*, Dunod, 2016

Marco Zito, *Dans le tourbillon des particules*, Belin, 2015

21. La mission Rosetta

Kristen Lippincott, *L'Astronomie*, Gallimard Jeunesse, 2016

Jim Bell, *Le Beau Livre de l'Astronomie: de l'observation à l'exploration spatiale*, Dunod, 2016

André Brahic, *Terres d'ailleurs*, Odile Jacob, 2015

Thérèse Encrenaz et James Lequeux, *À la rencontre des comètes: de Halley à Rosetta*, Belin, 2015

Ben Gilliland, *La Science comme vous ne l'avez jamais vue: de fascinants concepts à la portée de tous*, Dunod/Science & Vie, 2015

Francis Rocard et Florence Chiavassa, *Quelle est la véritable histoire du système solaire ?*, Le Pommier, 2014

22. Neandertal vit parmi nous

Martial Caroff, *Tillô*, t. 1 : *Un torrent de bisons*, Gulf Stream, 2016

Collectif, *Les Premiers Hommes*, Gallimard Jeunesse, 2008

Jean-Baptiste de Panafieu, *Au temps des premiers hommes*, Gallimard Jeunesse, 2014

Jean-Baptiste de Panafieu, *Humanimal, notre zoo intérieur*, Gulf Stream, 2010

Antoine Balzeau et Emmanuel Roudier, *Qui était Néandertal ? : l'enquête illustrée*, Belin, 2016

Michel Brunet, *Nous sommes tous des Africains*, Odile Jacob, 2016

Claudine Cohen, *Un Néandertalien dans le métro*, Le Seuil, 2007

Evelyne Heyer (dir.), *Une belle histoire de l'Homme*, Flammarion, 2015

Bruno Maureille, *Qu'est-il arrivé à l'homme de Neandertal ?*, Le Pommier, 2008

Pascal Picq, *Le Retour de Madame Neandertal*, Odile Jacob, 2015

Pascal Picq, *Premiers Hommes*, Flammarion, 2016

Jean-Luc Piel-Desruisseaux, *Encyclopédie pratique des outils préhistoriques: 150 outils et gestes techniques*, Dunod, 2011

Romain Pigeaud, *Comment reconstituer la Préhistoire ?*, EDP Sciences, 2007

23. Observation des ondes gravitationnelles

Jean-Jacques Greif, *Tout est relatif, comme dit Einstein*, L'École des loisirs, 1999

Aurélien Barrau, *Des univers multiples: à l'aube d'une nouvelle cosmologie*, Dunod, 2014

Aurélien Barrau, Patrick Gyger, Max Kistler et Jean-Philippe Uzan, *Multivers: mondes possibles de l'astrophysique, de la philosophie et de l'imaginaire*, La ville brûle, 2010

Pierre Binétruy, *À la poursuite des ondes gravitationnelles*, Dunod, 2015

Jean-Claude Carrière et Thibault Damour, *Entretiens sur la multitude du monde*, Odile Jacob, 2002

Gilles Cohen-Tannoudji et Michel Spiro, *Relativité et quanta: une nouvelle révolution scientifique...*, Le Pommier, 2016

Nathalie Deruelle, *De Pythagore à Einstein, tout est nombre: la relativité générale, 25 siècles d'histoire*, Belin, 2015

Albert Einstein, *Œuvres choisies*, t. 2: *Relativités I. Relativités restreinte et générale* et t. 3: *Relativités II. Relativité générale, cosmologie et théories unitaires*, Le Seuil, 1993

Brian Greene, *La Magie du cosmos*, Gallimard, 2007

Stephen Hawking, *Dernières Nouvelles des trous noirs*, Flammarion, 2016

Isaac McPhee, *Petit Précis de physique à déguster*, Belin, 2011

Carlo Rovelli, *Par-delà le visible*, Odile Jacob, 2015

Kip Thorne, *Trous noirs et distorsions du temps*, Flammarion, 2009

Jean-Philippe Uzan (dir.), *Variations sur un même ciel*, La ville brûle, 2012

24. L'expédition Tara

Collectif, *Océan*, Gallimard Jeunesse, 2007

Jean-Baptiste de Panafieu, *Les Petites Bêtes sans queue ni tête*, Gulf Stream, 2015

Maud Fontenoy, *Les Océans, un trésor à protéger*, Flammarion jeunesse, 2015

Sophie Nicaud, *Mission Tara Oceans: journal d'une scientifique*, Le Pommier, 2012

Hubert Reeves et Yves Lancelot, *La Mer expliquée à nos petits-enfants*, Le Seuil, 2015

Agnès Vandewiele, *L'Océanographie*, Gulf Stream, 2011

John Woodward, *Encyclopédie de la Terre, notre planète*, Gallimard Jeunesse, 2014

Lise Barnéoud, *La Biodiversité ?*, Belin, 2013

Raphaël Billé, Philippe Cury, Michel Loreau et Virginie Maris, *Biodiversité: vers une sixième extinction de masse*, La ville brûle, 2014

Philippe Cury et Daniel Pauly, *Mange tes méduses !*, Odile Jacob, 2013

Jean d'Elbée, *Mémento de planctonologie marine*, QUAE, 2016

Bruno Fady et Frédéric Médail, *Peut-on préserver la biodiversité ?*, Le Pommier, 2006

Jean Guézennec, *Bactéries marines et biotechnologie*, QUAE, 2014

François Letourneux et Nathalie Fontrel, *Chronique du vivant: les aventures de la biodiversité*, Buchet/Chastel, 2014

Christian Lévêque et Jean-Claude Mounolou, *Biodiversité: dynamique biologique et conservation*, Dunod, 2008

Virginie Maris, *Philosophie de la biodiversité: petite éthique pour une nature en péril*, Buchet/Chastel, 2016

25. La plus ancienne construction du monde

Clara Delpas et Patricia Chairopoulos, *À la découverte des hommes préhistoriques*, Flammarion jeunesse, 2013

Pascale Hédelin, *Déjoue les pièges de l'Histoire*, Gulf Stream éditeur, 2015

Pierre Pelot, *La Préhistoire racontée aux enfants*, La Martinière Jeunesse, 2015

José Braga, Claudine Cohen, Bruno Maureille et Nicolas Teyssandier, *Origines de l'humanité: les nouveaux scénarios*, La ville brûle, 2016

Yves Coppens, *Des pastilles de préhistoire*, Odile Jacob, 2016

Sophie A. de Beaune, *Qu'est-ce que la Préhistoire ?*, Gallimard, 2016

Jean-Luc Piel-Desruisseaux, *Outils préhistoriques: de l'éclat à la flèche*, Dunod, 2016

Roland Schaer, *Les Origines de la culture*, Le Pommier, 2016

Crédits photographiques des 25 découvertes

1. © SPL/Cosmos 2. © Toru Hanai/Reuters 3. © Superstock/Leemage
4. © Detlev Van Ravenswaay/SPL/Cosmos 5. © Aurélie Moya/LOV/UPMC/CNRS
Photothèque 6. © Eye of the Science/Cosmos 7. © Pascal Heitzler/Inserm
8. © Kennis and Kennis/MSF/SPL/Cosmos 9. **haut** © DR **bas** © Eric Audras/Onoky/
Photononstop 10. © James King-Holmes/SPL/Cosmos 11. © Alfred Pasiaka/SPL/
Cosmos 12. © Gunnar Kullenberg/Stock Collection/AGE fotostock 13. © Shinya
Yamanaka/ Kyoto University 14. © British Antarctic Survey/SPL/Cosmos
15. © Gérard Rollando 16. © Abderrazak El Albani/Arnaud Mazurier/CNRS
Photothèque 17. © Valérie Coudin 18. © Alfred Pasiaka/SPL/Cosmos
19. © SPL/Cosmos 20. © Lucas Taylor/1997-2016 CERN 21. © ESA/ATG medialab -
Comet image © ESA/Rosetta/Navcam 22. © AKG-images/Ullstein bild
23. © Mark Garlick/SPL/Cosmos 24. © Christian Sardet/Tara Océans/CNRS
Photothèque 25. © Etienne Fabre - SSAC

Description d'un hologramme

Ce qui vous est présenté ici n'est pas un hologramme, mais une image obtenue grâce aux reflets de quatre images identiques placées sur les parois de la pyramide transparente, qui viennent former une seule image en son cœur, donnant ainsi l'illusion d'une image holographique. En réalité, l'holographie est une technique photographique donnant véritablement une image en trois dimensions (3D). Elle utilise la propriété qu'a la lumière d'être une onde, caractérisée par son amplitude et sa phase. La photographie classique ne restitue que l'amplitude, c'est-à-dire l'intensité lumineuse de l'onde réfléchie par chaque point de l'objet photographié, alors que l'holographie permet en plus de restituer la phase, donc en quelque sorte la distance de chacun des points de cet objet par rapport à l'objectif, d'où l'impression d'une image en relief.

L'holographie nécessite l'utilisation d'une source de lumière cohérente (couleur unique et très pure, avec une phase bien déterminée) fournie par un laser. Pour obtenir un hologramme, on utilise deux faisceaux de lumière provenant du même laser : le premier est envoyé sur un support photosensible (plaque photographique) et l'autre sur l'objet à holographier. Éclairé, celui-ci réfléchit la lumière vers la plaque. En se superposant sur la plaque, les ondes des deux faisceaux produisent des franges d'interférences (zones alternativement éclairées et sombres, autre propriété des ondes). Ce sont elles qui permettent d'enregistrer la phase, et donc de fixer l'image en 3D sur la plaque photographique.

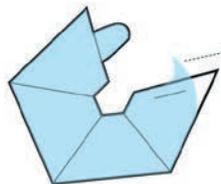
Pour voir l'hologramme (l'image de l'objet en relief), il suffit, après avoir développé la plaque photographique, de l'éclairer avec un laser.

Edmond Amouyal

Le lecteur d'hologrammes

fête de la Science

Pour utiliser ton lecteur d'hologrammes,
c'est simple :

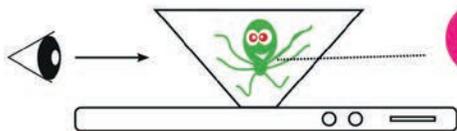
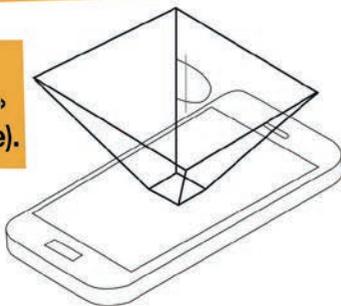


1/ Enlève la protection.

2/ Plie fort et encoche la pyramide
comme sur le schéma.

3/ Charge une vidéo spéciale sur ton
smartphone (en cherchant «hologramme»
et «pyramide» sur dailymotion ou youtube).

4/ Pose la pyramide sur ton smartphone
bien au centre des 4 images
qui s'affichent sur ton écran.



5/ Eteins la lumière
pour profiter pleinement
du spectacle !