

■ POUR LA

SCIENCE

Août 2011 - n° 406

www.pourlascience.fr

Edition française de Scientific American

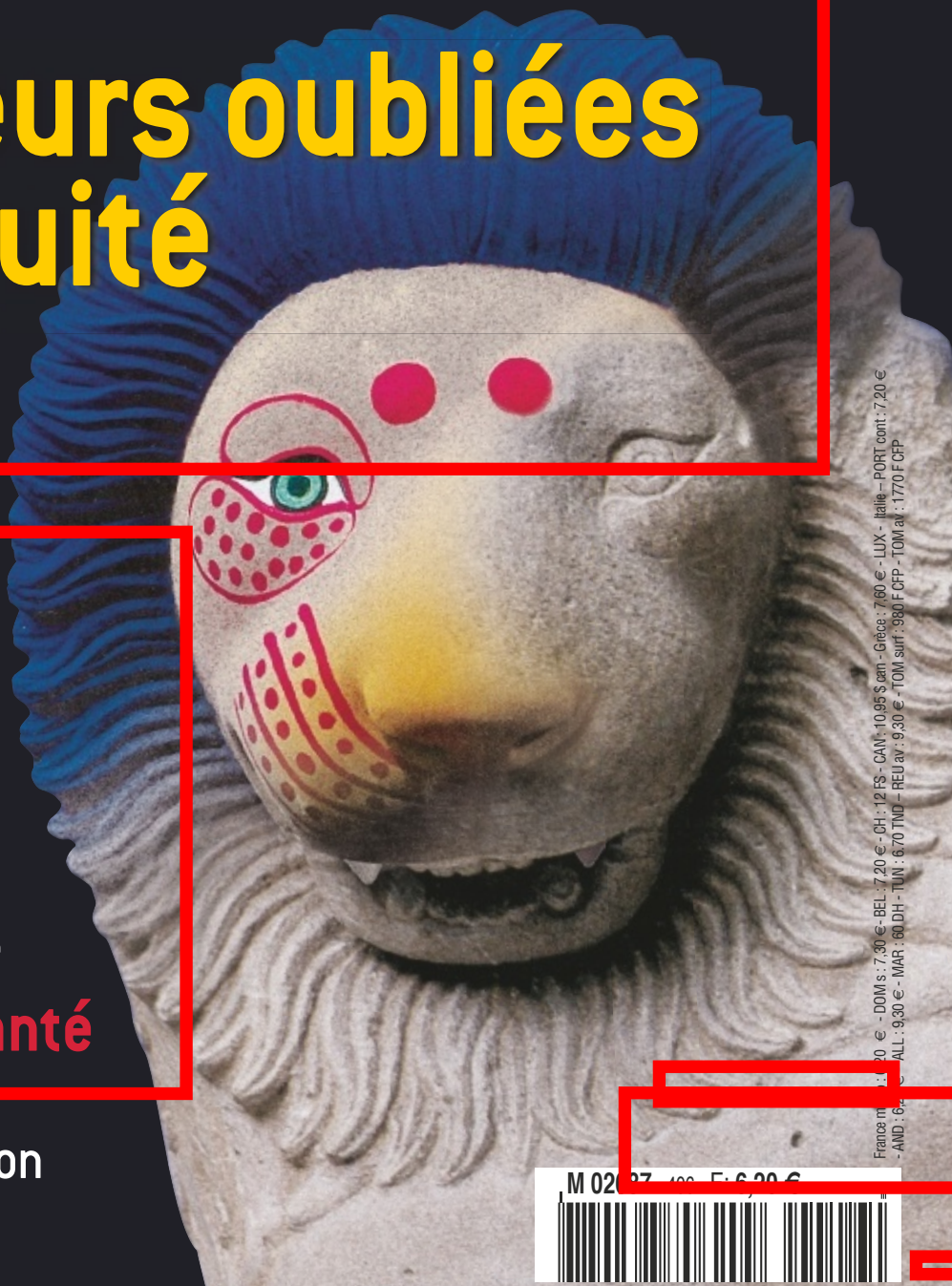
DOSSIER

Les couleurs oubliées
de l'AntiquitéSur les traces
d'une riche
polychromie

Le soleil et l'ADN

Les UV-A aussi dangereux
que les UV-BL'inflation cosmique
Des failles dans la théorie

Les oméga 3 et la santé

Des apports élevés
soulageraient la dépressionFrance m. : 7,20 € - DOM s. : 7,30 € - BEL. : 7,20 € - CH. : 12 FS - CAN. : 10,95 \$ can. - Grèce : 7,60 € - LUX. - PORT. cont. : 7,20 €
- AND. : 6,40 € - ALL. : 9,30 € - MAR. : 60 DH - TUN. : 6,70 TND - REU av. : 9,30 € - TOM surf. : 980 F CFP - TOM av. : 1770 F CFP

M 02 07 100 F 6 20 6



L'ESPCI ParisTech

Inventeurs d'avenirs

Transdisciplinarité physique-chimie-biologie
Comprendre va plus loin que connaître
Allier savoir et savoir-faire
Aller de la découverte à l'invention



Stellios, chargé de recherche au laboratoire de Chimie organique

L'institution

- un campus de 20 000 m² au cœur de Paris
- 17 laboratoires
- 7 Prix Nobel décernés à 6 lauréats en 1903, 1911, 1935, 1991 et 1992
- tous les directeurs successifs ont été élus à l'Académie des sciences
- 3 Chaires de mécénat et de partenariat (Saint-Gobain, Michelin, Total)
- membre fondateur de ParisTech (1991) et de Paris Sciences et Lettres (2010)

Enseignement

- 1^{re} école d'ingénieurs dans le classement de Shanghai (2008, 2009, 2010)
- 8 filières de recrutement dont le concours commun avec l'École polytechnique et les Écoles normales supérieures
- 750 heures de travaux de laboratoire pendant les 2 premières années du cursus
- 80 ingénieurs diplômés par promotion
- 35 % de femmes
- 35 % de boursiers
- 400 000 € investis sur chaque promotion à travers le système de bourses
- 60 % des diplômés font un doctorat
- 85 % des diplômés rejoignent l'industrie

Recherche

- 1 publication scientifique par jour
- 150 doctorants sur le campus
- 250 enseignants-chercheurs et chercheurs permanents
- 1 000 citations par mois dans le monde

Innovation

- 1 brevet par semaine
- 1 start-up de haute technologie créée chaque année, avec création d'emplois très qualifiés et ambition de développement mondial

8 rue Férou, 75278 PARIS CEDEX 06
Standard : Tel. 01 55 42 84 00

Groupe POUR LA SCIENCE

Directrice de la rédaction : Françoise Pétry

Pour la Science

Rédacteur en chef : Maurice Mashaal

Rédacteurs : François Savatier, Marie-Neige Cordonnier,
Philippe Ribeau-Gésippe, Bénédicte Salthun-Lassalle

Dossiers Pour la Science

Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin

Rédacteur : Guillaume Jacquemont

Cerveau & Psycho

L'Essentiel Cerveau & Psycho

Rédactrice en chef : Françoise Pétry

Rédacteur : Sébastien Bohler

Directrice artistique : Céline Lapert

Secrétariat de rédaction/Maquette : Annie Tacquenet,

Sylvie Sobelmann, Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy

Site Internet : Philippe Ribeau-Gésippe assisté de Ifédayo Fadoju

Marketing : Éliane Abib

Direction financière : Anne Gusdorf

Direction du personnel : Marc Laumet

Fabrication : Jérôme Jalabert assisté de Marianne Sigogne

Presse et communication : Susan Mackie

Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé

Conseillers scientifiques : Philippe Boulanger et Hervé This

Ont également participé à ce numéro :

Denis Ardid, Arélien Barrau, Emmanuel Bourinet,
Louis Dubertret, Pierre Fafournoux, François Féron,
François Forgé, Claude Gronfier, Jean-François Julien,
Liliane Léger, Christophe Pichon, Michel Rausch.

PUBLICITÉ France

Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin

(jf.guillotin@pourlascience.fr), assisté de Nada Mellouk-Raja

Tél. : 01 55 42 84 28 ou 01 55 42 84 97 • Fax : 01 43 25 18 29

SERVICE ABONNEMENTS

Ginette Boufflé. Tél. : 01 55 42 84 04

Espace abonnements :

<http://tinyurl.com/abonnements-pourlascience>

Adresse e-mail :

abonnements@pourlascience.fr

Adresse postale :

Service des abonnements - 8 rue Férou - 75278 Paris cedex 06

Commande de livres ou de magazines :

0805 655 259 (numéro vert)

DIFFUSION DE POUR LA SCIENCE

Canada : Edipresse, 1000, Avenue de l'Énergie

Québec, H3N 1V3 Canada.

Suisse : Servidoc, Chemin des châlets, 1979 Chavannes - 2 - Bogis

Belgique : La Crevelle, 303, rue du Pré-aux-oies - 1130 Bruxelles.

Autres pays : Éditions Belin, 8, rue Férou - 75278 Paris Cedex 06.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor in chief : Mariette DiChristina. Editors : Ricky Rusting, Philip Yam, Gary Stix, Davide Castelvecchi, Graham Collins, Mark Fischetti, Steve Marder, Michael Moyer, George Musser, Christine Soares, Kate Wong. President : Steven Inchcoombe. Vice President : Frances Newburg.

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue « Pour la Science », dans la revue « Scientific American », dans les livres édités par « Pour la Science » doivent être adressées par écrit à « Pour la Science S.A.R.L. », 8, rue Férou, 75278 Paris Cedex 06.

© Pour la Science S.A.R.L. Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial « Scientific American » sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à « Pour la Science S.A.R.L. ».

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie (20, rue des Grands-Augustins - 75006 Paris).



de **Françoise Pétry** directrice de la rédaction

Art et culture

*Grèce, O mère des arts, terre d'idolâtrie,
De mes vœux insensés éternelle patrie*

Alfred de Musset, *Les vœux stériles*, 1831

Les statues grecques représentent pour beaucoup l'idéal de la beauté. Celles de la période archaïque (VIII^e-VI^e siècles avant notre ère) sont raides, l'homme est représenté debout, généralement nu, la femme est drapée. Au cours de la seconde moitié du VI^e siècle, les formes se font plus souples, plus élégantes. L'artiste ne représente plus des dieux ou des déesses, mais des hommes et des femmes. Puis le style évolue encore et, durant la période hellénistique, la sobriété des époques antérieures fait place à des œuvres plus réalistes, plus théâtrales, parfois monumentales. Paradoxalement, l'essentiel de nos connaissances sur la sculpture grecque nous vient de copies romaines. En effet, après avoir conquis le monde grec, au II^e siècle avant notre ère, les Romains se sont pris de passion pour les œuvres grecques du passé et en ont réalisé des milliers de copies. Les Romains peignaient-ils les sculptures qu'ils reproduisaient ? Car si l'on en croit les archéologues, les statues grecques étaient peintes. Les couleurs, qui plus est les couleurs vives, auraient été appréciées des Grecs anciens. Et l'on est surpris, voire

Les statues grecques étaient peintes.

choqué... en découvrant, de constater d'après les reconstitutions en couleurs que la statue grecque n'avait pas la blancheur épurée du marbre poli [voir *Les couleurs oubliées de l'Antiquité*, page 21].

L'art est l'une des composantes de la culture. La littérature en est une autre. Et la surprise qu'offre la « culturomique » est à la mesure de celle qui livre la redécouverte des couleurs dans l'Antiquité. Cette nouvelle discipline désigne l'étude linguistique de plus de cinq millions de livres qui ont été numérisés. Cela représente plus de 300 milliards de mots anglais, plus de 40 milliards de mots français et des dizaines de milliards de mots d'autres langues. Leur analyse statistique révèle des lois variées et inattendues : par exemple, *Dimanche* est le plus cité des jours de la semaine, les nombres commençant par le chiffre 1 sont les plus fréquents, etc. [voir *La culturomique*, page 82].

Dans le poème mentionné en ouverture, Alfred de Musset dit également « La langue que parlait le cœur de Phidias / Sera toujours vivante et toujours entendue / Les marbres l'ont apprise, et ne l'oublieront pas ». Les spécialistes de la culturomique feront-ils un jour parler les statues grecques, afin d'appliquer leur méthode à ce nouveau corpus de mots ?

- 1 **ÉDITO**
- 4 **BLOC-NOTES**
Didier Nardon
- Actualités**
- 6 **Des ultrasons pour voir fonctionner le cerveau**
- 7 **Des cendres sechées de nez pour la mémoire**
- 9 **Le quasar le plus lointain**



- 10 **Pourquoi les doigts se fripent dans l'eau**
Il y a bien d'autres sujets.

- 12 **ON EN REPARLE**

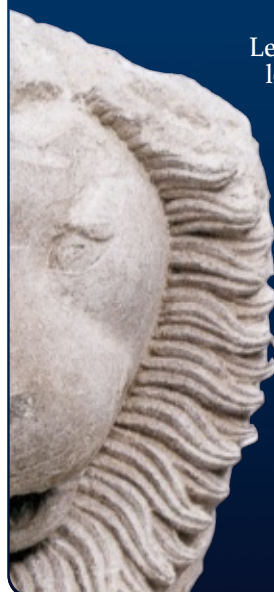
Opinions

- 14 **POINT DE VUE**
Les canines animales : faut-il les réintroduire ?
Jeanne Bougère-Picoux
- 15 **DÉVELOPPEMENT DURABLE**
La gestion énergétique des salles informatiques
Dominique Boutigny
- 18 **VRAI OU FAUX**
Peut-on ne jamais rêver ?
Delphine Oudiette et Isabelle Arnulf

Sur la totalité des numéros :
deux encarts d'abonnement pages 24 et 25.
Encarts commerciaux de livres et abonnement pages 72 et 73.
Pour les abonnés occasionnels, un encart est inséré
posé en 4^e de couverture.
En couverture : Avec l'aimable autorisation
de U. K. Brinkmann et V. Brinkmann
Glyptothek Nu Carlsberg de Copenhagen

DOSSIER ARCHÉOLOGIE

LES COULEURS OUBLIÉES



Les découvertes des archéologues ont rendu les couleurs qui ornèrent les statues et bas-reliefs du monde antique de Persépolis jusqu'à Pompéi. Un univers surprenant s'ouvre à l'œil moderne loin du classicisme.

22 La polychromie dans la Grèce antique

U. Brinkmann et V. Brinkmann

28 Les lieux rouges de Mésopotamie

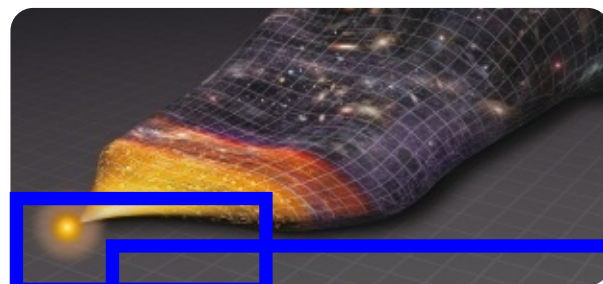
Astrid Nunn et Rupert Gebhard

44 BIOCHIMIE

Comment l'ADN réagit sous le soleil

T. Doukhan, I.-L. Ravanat, D. Markovitsi et É. Sage

Les rayons ultraviolets solaires provoquent des cancers de la peau, en modifiant l'ADN des cellules de ce tissu. Les mécanismes photochimiques en cause se précisent.



52 COSMOLOGIE

L'inflation cosmique en débat

Paul Steinhardt

Selon la théorie de l'inflation, proposée il y a 30 ans, l'Univers aurait connu une brève phase d'expansion vertigineuse juste après le Big Bang. Cependant, cette théorie qui est au cœur de la cosmologie moderne souffre de sérieuses difficultés.

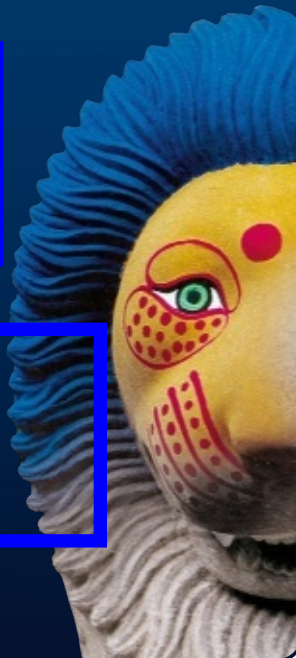
DE L'ANTIQUITÉ

32 Bleu et or : des couleurs de roi

Alexander Nagel

38 Le bleu égyptien, premier pigment artificiel

François Delamare



60 MÉDECINE Les acides gras et la santé

J.-M. Leberf et S. Vancassel

Omniprésents dans l'organisme, les acides gras oméga 3 et oméga 6 sont indispensables. Une alimentation variée et riche en poisson en assure un apport suffisant. Leur éventuel usage thérapeutique, pour lutter notamment contre certaines formes de dépression, est étudié.



70 MATHÉMATIQUES Des octonions pour la théorie des cordes

John Baez et John Huerta

D'après la théorie des cordes, l'Univers serait doté d'un espace-temps de dimension 10 ou 11. Un système de nombres découvert au XIX^e siècle et quelque peu oublié depuis en fournit un langage mathématique simple.

Regards

76 HISTOIRE DES SCIENCES

Du Trésor américain au projet Manhattan

Cameron Reed

En 1943, le Département américain de la Guerre a emprunté 13 000 tonnes d'argent au gouvernement pour mettre au point la première bombe atomique.



82 LOGIQUE & CALCUL

La culture romique

Jean-Paul Delahaye

Un étonnant corpus de textes créé récemment par une équipe internationale de chercheurs dévoile des phénomènes linguistiques insoupçonnés.

88 ART & SCIENCE

Le cerveau caché de Michel-Ange

Loïc Marguin

90 IDÉES DE PHYSIQUE

Les jets à jets de l'homme-fusée

Jean-Michel Courty
et Édouard Kierlik

93 SCIENCE & GASTRONOMIE

Améliorer le piston

Hervé This

94 À LIRE

Rendez-vous sur **SCIENCE**.fr

» Plus d'informations

- L'intégralité de votre magazine en ligne
- Des actualités scientifiques chaque jour
- Plus de contenus
- L'agenda des manifestations scientifiques

» Les services en ligne

- Abonnez-vous et gérez votre abonnement en ligne
- Téléchargez les articles de votre choix
- Réagissez en direct
- Consultez les offres d'emploi

www.pourlascience.fr

→ SANS EFFET

La plupart des gens pensent peu à la catastrophe qui, demain peut-être, bouleversera leur vie – maladie, accident ou autre. Il sera toujours temps de réagir quand elle sera là. Mais certains, plus tracassés, ne peuvent chasser de leur tête l'idée que le malheur est sur le point de fondre sur eux. Comme aucune science objective n'est en mesure de garantir que tel ne sera pas le cas, ils recourent à la superstition pour atténuer leur mal-être. Ils se soumettent à des rites propitiatoires.

Que leurs rites n'aient aucune espèce d'effet sur ce que l'avenir réserve, on peut le penser. Et cela prouve que la solution adoptée par ces gens est bonne. Leurs rites améliorent le présent en allégeant l'anxiété, et ils ne détériorent pas l'avenir, car ils n'y changent rien. Ce sont des remèdes dénués d'effets secondaires. Pour ceux qui ont eu la malchance de naître trop tourmentés, être superstitieux peut être une attitude raisonnable.



→ CHRONIQUE

Un roman de Vladimir Sorokine s'intitule *Roman*. Un roman de Duong Thu Huong a pour titre *Roman sans titre*. Une opérette de Gombrowicz s'appelle *Opérette* ; un film de Samuel Beckett, *Film*. Accuser ces écrivains d'être aussi plats que les anciens des gloires de la politique ou du

spectacle, qui publient leurs mémoires sous le titre de *Mémoires* ou leurs souvenirs sous le titre de *Souvenirs*, serait ne rien comprendre à l'art. Les écrivains atteignent au contraire un sommet. Ils parcourent la boucle complète de toutes les audaces possibles. Appeler *Roman* un roman ou *Film* un film, c'est imaginer que l'imagination peut aussi consister à ne rien imaginer.

Quant aux scientifiques qui, comme Lavoisier, intitulent un traité de chimie *Traité de chimie* ou, comme Laurent Schwartz, un cours d'analyse *Cours d'analyse*, ont-ils autant d'imagination qu'un écrivain, ou aussi peu qu'une ancienne gloire ? Gardons-nous de trancher ! Quoi qu'il en soit, il est dommage que leurs titres ne soient pas plus savoureux. On aurait plaisir à étudier la chimie organique dans un livre intitulé *Les liaisons dangereuses du carbone*. Des titres comme *Et plus dure sera la chute* ou *La grâce de la pesanteur* donneraient du relief à un cours sur la gravitation. Les textes d'analyse mathématique gagneraient à s'appeler *Le zéro contre l'infini* ou *Les tribulations d'Epsilon au pays des fonctions* ou encore *Histoire d'o et d'O*. Enfin, lorsque Descartes a nommé *Dioptrique* ses travaux sur la dioptrique, il a manqué une belle occasion de commettre un plagiat par anticipation. Il aurait dû adopter le titre que Victor Hugo lui soufflait : *Les Rayons et les Ombres*.

→ ÇA L'EXPLIQUE PAS CELA...

L'initiation aux fractions s'est longtemps appuyée sur des partages de tartes. Aujourd'hui, c'est plutôt sur des partages de pizzas. Cette substitution n'est, je suppose, dans la vaste perspective de l'évolution des mœurs et de la diététique. En tout cas, les problèmes de pizzas ne sont pas moins difficiles que ceux de tartes. Dans un article sur l'insupportable thème du mauvais niveau, *Le Monde* (21 mai 2011) nous apprend que les élèves de CM₂ ne saisissent pas les intitulés. C'est tout juste s'ils comprennent la phrase suivante : « Si je découpe une pizza en quatre

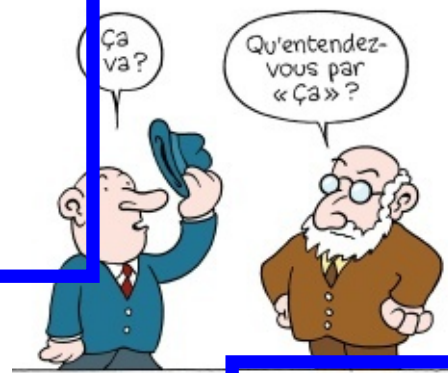
et que j'en prélève le quart, combien cela représente-t-il ? » Malheur : je n'ai pas su ! J'ai hasardé la réponse « un seizième » (on prélève le quart du quart), mais des amis m'ont corrigé : « Mais non, la réponse est un quart, tout simplement. »

Admettons. Reste que la phrase contient un mot (« représenter ») dont le sens est confus, et un (« cela ») dont on ne sait s'il désigne un morceau de pizza ou une opération de découpe. Soit *Le Monde* a reproduit de travers la question posée, soit on entraîne les enfants à comprendre des textes mal rédigés.

J'ai souvenir d'un professeur de mathématiques qui donnait les coups de talon sur l'estrade lorsqu'un élève répondait mal, faisant résonner la salle d'un bruit de tonnerre. Il employait les termes « ce » ou « cela » suscitant l'effet d'éclat. Le professeur criait : « Les démonstratifs ne font pas partie du langage mathématique ! » Il avait tort de crier, mais raison sur le fond. Un démonstratif n'est que du flou, donc déroge à la rigueur mathématique, puisqu'il désigne un objet selon la place par rapport au locuteur. Or le sens d'un texte mathématique ne doit pas être conditionné par la position ou la gestuelle de son auteur, que l'auditeur (et encore moins le lecteur) n'a pas à connaître.

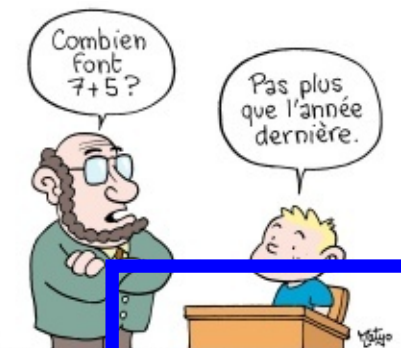
Dans la phrase du *Monde*, on ne comprend à quoi réfère « cela » que si on sait ce que l'auteur a en tête.

Il faudrait même exclure les démonstratifs du langage scientifique en général. Le seul prix à payer, le prix *Bloc Notes*, qui ne répugne pas aux démonstratifs, ne sera donc pas scientifique. Mais *cela*, on s'en foutait un peu...



→ MATHÉMATIQUES ALAMBICQUÉES

Lors d'une conférence prononcée en 1979-1981, et récemment publiées sous le titre *Le fondement philosophique des mathématiques*, Jean Beaufret (1907-1982) a parcouru un cercle vicieux d'une rare perfection. Si j'interprète bien sa prose alambiquée, les mathématiques ont, pour lui, une essence éternelle, découverte par les Grecs. Il les analyse donc à partir de ses seuls souvenirs scolaires, et ne fait pas jouer sur des résultats récents les concepts qu'il élabore. Il ne court ainsi aucun risque de tomber sur une nouveauté mettant à mal lesdits concepts. Ce qui confirme que les mathématiques ont une essence immuable et éternelle. Admirable logique.



Pour accéder à la pensée de Beaufret, le lecteur doit en passer par des phrases comme : « Le nombre est le schème du concept de quantité comme synthèse de l'homogène. » Poincaré, Hilbert, sont nommés, mais jamais leurs travaux mathématiques ne sont pris en compte. Gödel est à peine moins mal traité. Beaufret disserte sur les mathématiques sans prêter attention à l'œuvre des mathématiciens !

Indifférent au fait que les notions ont une histoire, donc évoluent, Beaufret, apparemment, n'a pas entendu dire que, au XX^e siècle, les paradoxes de la théorie des ensembles, les recherches sur l'incomplétude ou sur l'indécidabilité, ont terriblement compliqué la notion de vérité en mathématiques.

Plutôt que d'adopter le postulat d'une essence éternelle des mathématiques, que ne s'est-il penché sur ce qu'elles étaient à son époque ?

composition(s) urbaine(s)

Le congrès des sociétés historiques et scientifiques se tient chaque année dans une grande ville universitaire. Trait d'union entre la recherche universitaire et la recherche bénévole, cette manifestation scientifique – lieu de rencontre privilégié des membres des sociétés savantes – est largement ouverte aux universitaires, aux élèves des grandes écoles, aux membres des centres de recherche. Il permet également aux jeunes chercheurs de faire leurs premières communications sous la direction de personnalités scientifiques de premier plan.

Le congrès de Tours se déroulera du 23 au 28 avril 2012, dans les locaux de l'université de Tours François Rabelais, sur le thème « Composition(s) urbaine(s) ».

Date limite de réception des propositions de communications : 1^{er} novembre 2011.

Inscriptions en ligne sur notre site internet : www.cths.fr.

Pour tout contact

Comité des travaux historiques et scientifiques

137^e congrès

110, rue de Grenelle, 75357

Paris cedex 07

tél. : 33 (0) 1 55 95 89 64

fax : 33 (0) 1 55 95 89 66

congres@cths.fr

www.cths.fr



137^e Congrès
des sociétés historiques
et scientifiques

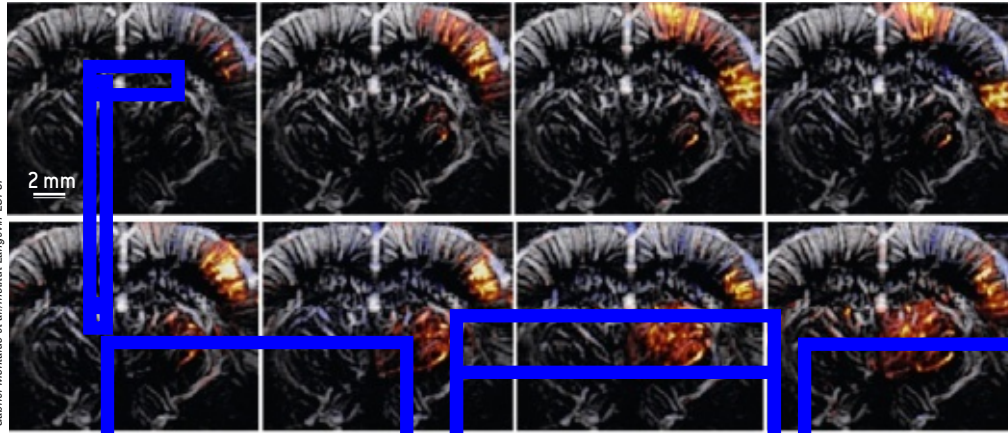
Tours

université de Tours François-Rabelais
site des Tanneurs
23-28 avril 2012

Imagerie

Des ultrasons pour voir fonctionner le cerveau

Une équipe parisienne a mis au point une technique d'imagerie cérébrale fonctionnelle utilisant l'échographie ultrasonore, avec une résolution spatiale et temporelle bien meilleure qu'avec les autres méthodes.



Ces images du cerveau d'un rat sont extraites de deux séquences d'imagerie fonctionnelle par ultrasons, chaque séquence montrant la propagation de l'activité cérébrale lors d'une crise d'épilepsie (déclenchée par l'injection d'un produit dans le cortex cérébral de l'animal). Les images successives sont séparées ici de 15 secondes (rangée du haut) et 10 secondes (rangée du bas).

Sous la direction de Mickaël Tamar et Mathias Fink, une équipe de l'Institut Langevin à l'ESPCI Paris Tech (CNRS, INSEM), en collaboration avec le Centre hospitalier universitaire Pitié-Salpêtrière, a mis au point une technique d'échographie ultrasonore qui permet de visualiser et suivre l'activité cérébrale d'un rat.

Sa résolution spatio-temporelle est inégalée : 0,1 millimètre dans le plan de l'image et 0,2 millimètre dans la profondeur pour la résolution spatiale, 0,2 seconde pour la résolution temporelle. En comparaison, l'imagerie par résonance magnétique (IRM) et la tomographie par émission de positrons ont une résolution spatiale de l'ordre du millimètre et une résolution temporelle de plusieurs secondes.

L'échographie classique est fondée sur un balayage point par point d'ondes ultrasonores focalisées. Elle est trop lente pour obtenir les cadences, de l'ordre du millier d'images par seconde, nécessaires pour visualiser et suivre la microcirculation sanguine, grandeur directement liée à l'activité cérébrale (quand une région du cerveau s'active, il y a afflux de sang dans cette région).

Le dispositif de l'équipe de M. Tamar consiste, lui, à envoyer à très haute cadence des ondes planes ultrasonores (et non pas focalisées) et à traiter par « retournement temporel » les échos pour former l'image. En d'autres termes, les échos sont électriquement inversés et renvoyés comme si l'on voyait un film à l'envers, ce qui permet, en répétant l'opération, de localiser les sources des échos et ainsi de construire une image de résolution élevée.

En pratique, la sonde ultrasonore est une barrette de 128 transducteurs piézo-électriques espacés de 0,1 millimètre, placée au-dessus d'une ouverture pratiquée dans la boîte crânienne des rats. Une cadence de 1 000 images par seconde à très haute résolution est obtenue sur un champ de deux centimètres de côté et de profondeur. Chaque image est construite en combinant celles obtenues avec 17 illuminations différentes (ondes planes d'angles différents). La procédure complète consiste à enregistrer 100 images composites en 10 secondes, de façon à obtenir, par un effet de moyenne, une image des flux sanguins avec une haute résolution spatiale.

L'amplitude du signal recueilli pour chaque pixel de l'image fluctue dans le temps avec une fréquence caractéristique qui dépend du mouvement des globules rouges du sang, ce mouvement entraînant un effet Doppler. De ce signal, on peut extraire une grandeur proportionnelle au volume de sang présent dans la région correspondant au pixel considéré. L'image globale est donc une cartographie, à un instant donné, de la répartition de 0,2 seconde, de la répartition du sang dans la « tranche » de cerveau explorée par la sonde.

L'équipe de l'Institut Langevin a ainsi pu visualiser l'activité cérébrale de rats dont on stimulait les moustaches. Les images montrent même l'activation d'une seule colonne neuronale dans le cortex, quand on stimule un seul poil de moustache. De même, les chercheurs ont visualisé la propagation, dans l'espace, d'une onde d'activité cérébrale associée à une crise d'épilepsie (déclenchée en injectant en un point du cortex cérébral un produit approprié).

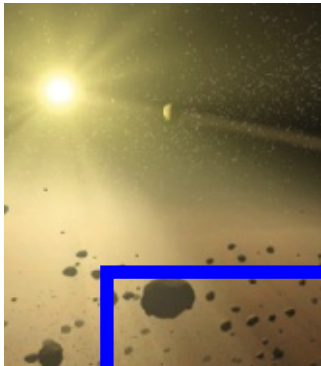
Cette technique d'imagerie fonctionnelle est prometteuse pour l'étude de petits animaux, l'appareillage étant simple, très peu encombrant et bon marché par rapport aux équipements d'IRM ou de TEP. On devrait aussi pouvoir l'adapter pour réaliser de l'imagerie cérébrale sans ouvrir la boîte crânienne si l'épaisseur de cette dernière n'est pas trop importante. De même, on pourrait l'appliquer à l'homme par exemple aux bébés à travers les fontanelles, s'ils ne sont pas ossifiés de leur crâne, ou aux adultes lors d'opérations neurochirurgicales à crâne ouvert.

→ Maurice Mashaal

É. Macé et al., *Nature Methods*, en ligne, 2011

Astronomie

Aller-retour vers Mars... pour Jupiter



En migrant jusque dans le Système solaire interne, Jupiter aurait participé à la formation des planètes telluriques et à celle de la ceinture principale d'astéroïdes.

Jupiter a la place de Mars ? C'est le scénario envisagé par Alessandro Morbidelli, de l'Observatoire de la Côte d'Azur, et ses collègues pour expliquer les caractéristiques du Système solaire interne. Quelques millions d'années après la naissance du Système solaire, Jupiter, encore en formation, aurait migré vers le Soleil depuis une orbite de trois à quatre unités astronomiques de rayon (l'unité astronomique, ou UA, est la distance Terre-Soleil) jusqu'à la position actuelle de Mars (1,5 UA). En éjectant la matière sur son chemin, la planète géante aurait tronqué le disque protoplanétaire, lui-même tronqué à 0,7 UA par le Soleil. La région centrale de l'anneau restant, plus dense, aurait formé Vénus et la Terre ; les bords, moins fournis, auraient engendré Mercure et Mars. Dans un deuxième temps, Saturne, une fois formé, aurait à son tour migré vers le Soleil. Son influence aurait fait revenir Jupiter jusqu'à sa position actuelle (5 UA). Ce scénario, testé par des simulations numériques, apparaît compatible avec la formation des planètes telluriques et explique celle de la ceinture d'astéroïdes, entre 2 et 4 UA.

→ Philippe Ribeau-Gésippe

K. J. Walsh et al., *Nature*, en ligne, 5 juin 2011

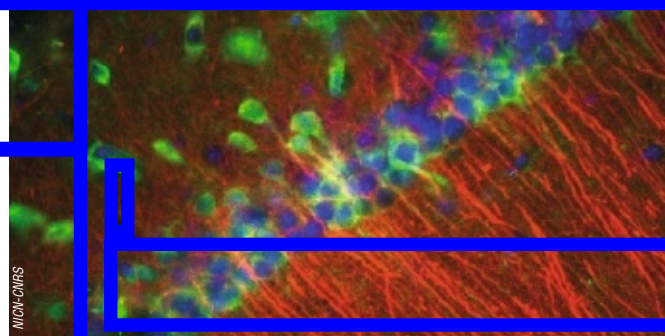
Neurobiologie

Des cellules souches de nez pour la mémoire

Comment limiter les pertes de mémoire, voire restaurer cette capacité ? Dans une nouvelle approche, des chercheurs de Marseille et de Montpellier montrent que des cellules souches prélevées sur les muqueuses nasales recèdent la mémoire à des souris amnésiques.

Les cellules souches sont des cellules indifférenciées pouvant donner naissance à différentes lignées cellulaires de l'organisme. François Roman, à l'Université de Provence, François Féron, à l'Université Aix-Marseille II, et leurs collègues se sont intéressés aux cellules souches de la muqueuse nasale. Au sein de cette muqueuse, les neurones olfactifs se renouvellent fréquemment et, conséquemment, les cellules souches dont ils sont issus sont nombreuses chez l'adulte et, de plus, faciles à prélever.

Une étude sur des rats servant de modèle de la maladie de Parkinson avait montré que des cellules souches de muqueuse nasale humaine, greffées dans la région cérébrale qui dégénère dans cette pathologie, réduisaient les symptômes.



Cellules souches nasales humaines (en vert) après migration dans l'hippocampe lésé de souris (en rouge). Une partie des cellules humaines greffées se sont différenciées en neurones (en jaune vert ; en bleu, le noyau des cellules).

moteurs chez ces animaux. Pour tester l'effet de ces mêmes cellules sur les troubles de la mémoire, les neurobiologistes en ont injecté chez des souris amnésiques dans un centre essentiel de la mémoire, l'hippocampe, qu'ils avaient préalablement lésé.

Des tests comportementaux ont révélé que les souris ont recouvré en quelques semaines leurs capacités d'apprentissage et de mémoire. Les cellules souches nasales greffées s'étaient différenciées en neurones et avaient même

stimulé la différenciation des cellules souches encore présentes dans l'hippocampe endommagé.

Les neurobiologistes vont maintenant réaliser un essai clinique où des cellules souches nasales seront greffées sur des personnes victimes d'amnésie post-traumatique due à des pertes neuronales. Ils étudieront aussi le potentiel thérapeutique de ces cellules souches dans des modèles animaux de la maladie d'Alzheimer.

→ Cécile Fourrage

E. Nivet et al., *The J. of Clinical Invest.*, 2011

LES AVIONS FONT NEIGER

Des physiciens américains ont expliqué pourquoi les avions provoquent dans les nuages un trou ou un canal plus gros que l'appareil et des chutes de neige. Dans une couche nuageuse sur-fondée (où l'eau reste liquide jusqu'à -4°C), le passage de l'avion déclenche une baisse de température. Des cristaux de glace naissent dans le nuage refroidi, grossissent et finissent par tomber. De plus, ils libèrent assez de chaleur pour réchauffer l'air autour d'eux et créer un trou pouvant atteindre des centaines de mètres de longueur.

PUNAISE, QUEL VACARME !

Le nouveau sonore du chant émis par la punaise d'eau *Micronecta pygmaea*, insecte de deux millimètres de long, peut atteindre 55 décibels ! Par rapport à sa taille, cela en fait le plus bruyant du règne animal, dépassant même celui des grands mammifères tels que les éléphants et les baleines. Ce sont les mâles de cette espèce qui produisent ce chant pour attirer les femelles, grâce au frottement de leurs appendices sur une petite surface.

SE MUSCLER AU VIN ROUGE

L'atrophie des muscles guette les cosmonautes en impesanteur, condition qui réduit les efforts mécaniques fournis par l'organisme. Y a-t-il un remède autre que l'exercice physique ? L'équipe de Stéphane Blanc (CNRS, Strasbourg) a montré chez des rats dont les pattes postérieures ont été maintenues inactives qu'un apport quotidien en resvératrol (un antioxydant contenu notamment dans le vin rouge) enrayer la perte de masse musculaire et la baisse de densité osseuse...

Environnement

D'OÙ VIEN LE PALUDISME ?

Des chercheurs français et américains ont découvert *Plasmodium falciparum*, l'agent du paludisme chez le cercopithèque – un petit singe africain d'une lignée différente de celle de l'homme et des grands singes. On savait déjà qu'il pouvait infecter le gorille (un grand singe). Cette découverte suggère que l'origine du parasite serait antérieure aux débuts de la lignée humaine. En étudiant le génome du parasite extrait du cercopithèque, on espère comprendre comment il s'est adapté à l'homme pour mieux le combattre.

L'IMPACT DES PRÉDATEURS

Les populations des grands prédateurs (lions, ours, loups, requins, etc.) déclinent. Selon l'équipe de l'écologue américain James Estes, ces animaux, derniers maillons des chaînes alimentaires, sont aussi essentiels à l'équilibre global des écosystèmes. En étudiant et en comparant de nombreux cas en divers endroits dans le monde, elle a montré que la raréfaction des prédateurs a un fort impact : elle rend les proies plus sensibles aux maladies, diminue la biodiversité, modifie la composition des sols, etc.

Physiologie

Les neurones de l'intestin irritable

Maux de ventre, constipation, diarrhée, ballonnements : voilà quelques symptômes du syndrome de l'intestin irritable ou colopathie fonctionnelle. Les douleurs abdominales qui l'accompagnent sont désagréables, souvent handicapantes. Des chercheurs de l'Institut de génétique fonctionnelle à Montpellier et de l'Unité Pharmacologie fondamentale et clinique de la douleur à Clermont-Ferrand ont découvert la cause de ces douleurs.

Plus de dix pour cent des Français, surtout des femmes, souffriraient de cette maladie. Une modification de la vitesse de transit des aliments dans le côlon – entraînant une constipation ou une diarrhée – et une sensibilité excessive de la paroi intestinale – couplée à des ballonnements sont en cause, d'où les douleurs du côlon.

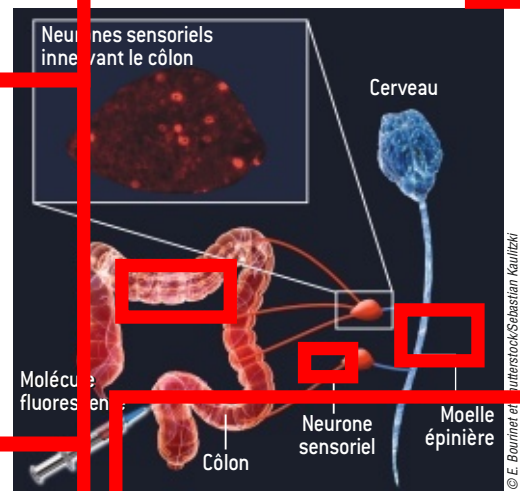
En injectant des molécules fluorescentes dans la paroi intestinale de rats, les physiologistes français ont identifié les neurones sensoriels (impliqués dans la douleur) qui innervent la muqueuse du côlon : les terminaisons nerveuses connectées au côlon captent les molécules fluorescentes, qui remontent jusqu'à la moelle épinière via les axones des neurones sensoriels. L'analyse de ces neurones révèle qu'ils portent davantage de canaux ioniques Cav3.2, comparés à d'autres neurones non impliqués dans ce mécanisme. Ces canaux permettent aux ions calcium de traverser la membrane cellulaire : quand ils s'ouvrent, ils augmentent l'excitabilité des neurones.

En outre, les chercheurs ont confirmé le rôle de ces canaux sur des rats servant de modèles pour l'étude du syndrome de l'intestin irritable. En bloquant l'ouverture des canaux calciques, on empêche

l'augmentation de l'activité de ces canaux. On ignore si ces canaux sont plus nombreux ou suractivés dans la pathologie, mais ces modifications dans les neurones innervant le côlon expliquent les douleurs. Les molécules inhibant l'activité de ces canaux représentent peut-être des médicaments à développer efficaces dans cette maladie invalidante.

→ Bénédicte Salthun-Lassalle

Le Monde, 20 juin 2011, en ligne, 20 juin 2011



En injectant un traceur fluorescent dans la paroi intestinale de rats, les physiologistes ont identifié les neurones sensoriels associés à la douleur dans le côlon. Des coupes (voir le cartouche) des ganglions proches de la moelle épinière chez le rat révèlent ces neurones sensoriels (en rouge vif).

© E. Bourinet et J. Kaulitz

Physique des particules

Neutrinos : de muoniques en électroniques

Les neutrinos, particules qui interagissent très peu avec la matière, existent sous trois espèces : électronique, muonique et tauonique. Si les neutrinos ont des masses non nulles, ils peuvent se transformer spontanément d'une espèce à l'autre – phénomène appelé oscillation (les probabilités correspondantes étant des fonctions périodiques du temps). L'existence des oscillations de neutrinos a été confirmée pour la première fois en 1998. Les résultats de l'expérience internationale T2K, au Japon, sont en

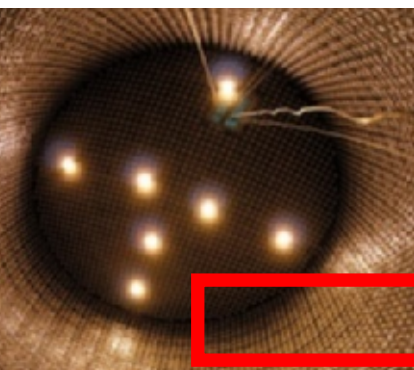
train de porter une des dernières pièces du puzzle des neutrinos.

En 1983, le détecteur Super-Kamiokande avait mesuré, dans les particules produites par le rayonnement cosmique, moins de neutrinos muoniques que prévu, ce que l'on pu interpréter comme une conséquence de la transformation d'une partie des neutrinos muoniques en neutrinos tauoniques. Depuis, diverses expériences ont mis en évidence des disparitions de neutrinos, interprétées comme le résultat d'oscillations.

L'expérience T2K, ou Super-Kamiokande, qui capte un faisceau de neutrinos muoniques produits à 300 kilomètres de distance, est la première qui semble avoir détecté une « apparition » de neutrinos d'une autre espèce (ici électronique). La mesure de telles transformations devrait permettre de compléter le tableau des paramètres décrivant les oscillations de neutrinos. Parmi les projets expérimentaux ayant cet objectif, T2K est le premier à fournir des résultats.

→ M. M.

K. Abe et al., Science, 2011, en ligne, 20 juin 2011



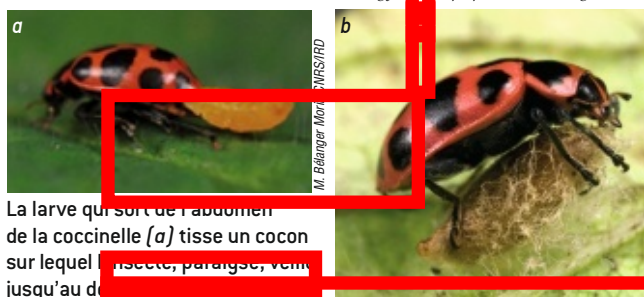
L'intérieur du détecteur de neutrinos Super-Kamiokande, avant sa mise en service.

Biologie animale

La coccinelle garde du corps

P our la plupart des guêpes parasitoïdes, qui pondent leurs œufs dans d'autres insectes, l'hôte est tué par les larves. Plus de la moitié des hyménoptères se reproduisent ainsi. Frédéric Thomas, du Laboratoire MIGEVIC (CNRS/IRD/Université Montpellier 1), et ses collègues révèlent que la guêpe parasitoïde *Dinocampus coccinellae* a plus d'égards : elle laisse en vie l'hôte, une coccinelle et en fait le garde du corps de sa descendance ! Cette guêpe pond un œuf dans l'abdomen de la coccinelle maculée *Coleomegilla maculata*, et la larve se nourrit de la chair de l'insecte infesté. Quand la larve sort de l'abdomen de la coccinelle (a), elle tisse un cocon que la coccinelle, qui ne meurt pas mais reste paralysée, va protéger, jusqu'à l'éclosion de l'adulte (b). Des expériences ont montré que ces cocons, bien gardés, sont moins soumis à la prédation que ceux laissés seuls ou même que ceux nichés sous une coccinelle morte. De surcroît, ce parasitisme étonnant est réversible : lorsque 25 pour cent des cocons d'*Dinocampus* ont été retrouvés avec un comportement normal après l'éclosion de la guêpe adulte !

→ Loïc Mangin

F. Maure et al., *Biology Letters*, prépublication en ligne, 2011

La larve qui sort de l'abdomen de la coccinelle (a) tisse un cocon sur lequel l'insecte, paralysé, veille jusqu'au développement de la guêpe adulte (b).

Environnement

Le Niger perd son sable

L e fleuve Niger est censé s'ensabler. Peut-être en aval, mais une équipe de l'IRD dirigée par Luc Ferry vient de montrer que c'est le contraire en amont. Tant les témoignages des riverains que l'évolution suivie dans la station hydrométrique malienne de Koulikoro attestent d'un abaissement du lit de plusieurs centimètres par an, dû au prélèvement des « pêcheurs de sable ». Ces quelque 15 000 ouvriers extraient pour la plupart le sable à la main, notamment en plongeant en apnée à plusieurs mètres de profondeur pour ensuite déverser leur godet dans une barge. L'explosion des surfaces bâties explique que cette extrainte accrue en un demi-siècle : Bamako, la capitale du Mali, est passée de 130 000 à plus de 1,8 million d'habitants (en 2009). Plus de 60 grands sites d'exploitation sont en activité le long du fleuve.

Or l'agriculture pâtit de l'abaissement du lit d'un fleuve, qui ne recharge plus les nappes phréatiques et ne fertilise plus les terres autant qu'avant ; par ailleurs, l'agitation fréquente du fond perturbe la reproduction des poissons, ce qui rend la pêche moins productive, et la descente du fond fragilise les ouvrages d'art...

→ François Savatier

L. Ferry et al., à paraître

Astrophysique

Le quasar le plus lointain éclaire les débuts de l'Univers

C ertaines galaxies abritent dans leur cœur un trou noir de plusieurs milliards de masses solaires ou plus. Lorsqu'ils englobent le gaz et les étoiles environnantes, les trous noirs supermassifs rayonnent de façon si intense que leurs galaxies hôtes sont visibles depuis les confins de l'Univers et sont alors appelées quasars. Daniel Mortlock, de l'Imperial College de Londres, et ses collègues ont découvert le quasar le plus lointain : sa lumière a été émise quand l'Univers n'avait que de 770 millions d'années, ce qui correspond à un « décalage vers le rouge » $z = 7,085$.

L'extrême luminosité et la distance record de ce quasar – nommé ULAS J1120+0641 – offrent l'occasion d'étudier la période dite de réionisation, durant laquelle le milieu intergalactique, neutre suite à la formation des premières étoiles après le Big Bang, a été progressivement réionisé par le rayonnement des premières étoiles.

Jusqu'ici, les observations de quasars en lumière visible n'avaient pu remonter que jusqu'à 870 millions d'années après le Big Bang ($z = 6,44$), lorsque le milieu intergalactique était presque entièrement réionisé. L'étude de sources plus lointaines est en effet décalée vers l'infrarouge par l'expansion de l'Univers.

L'équipe de D. Mortlock a recherché, dans un grand relevé du ciel en infrarouge réalisé par le Télescope infrarouge du Royaume-Uni (UKIDSS), des objets n'ayant pas de contrepartie en lumière visible et possédant un grand décalage vers le rouge. Ils ont ainsi déniché le quasar ULAS J1120+0641, à un décalage de 7,085.

Dans son spectre sont visibles des motifs d'absorption caractéristiques de l'hydrogène intergalactique neutre, beaucoup plus que pour les quasars plus proches. Les astrophysiciens en déduisent que 770 millions d'années après le Big Bang, l'Univers était encore composé de 50 à 50 pour cent d'hydrogène neutre : la réionisation était loin d'être achevée.

Par ailleurs, les astrophysiciens ont calculé que pour briller avec un tel éclat apparent, ce quasar doit être alimenté par un trou noir d'environ 2 000 milliards de masses solaires. Comment a-t-il pu atteindre une telle masse en si peu de temps ? Peut-être résulte-t-elle de la fusion de plusieurs trous noirs supermassifs lors de collisions galactiques, de périodes d'accrétions anormalement intenses ou d'une combinaison de résoudre ce casse-tête...

→ Ph. R.-G.

D. Mortlock et al., *Nature*, vol. 474, 2011

Vue d'artiste du quasar ULAS J1120+0641, alimenté par un trou noir de 2 000 milliards de masses solaires, et le plus lointain jamais observé.

Environnement

LE WEB, MÉMOIRE EXTERNE

Une étude américaine effectuée sur 46 personnes montre que ces individus pensaient tout de suite à Internet quand ils ignoraient la réponse à une question. Et les sujets retenaient moins bien une information nouvelle s'ils savaient qu'elle restait accessible que s'ils pensaient ne jamais la retrouver. D'ailleurs, ils se souvenaient davantage de l'endroit où la retrouver que de l'information elle-même. L'ordinateur et Google sont ainsi une mémoire externe à laquelle la mémoire humaine s'adapte.

BUTINAGE OPTIMISÉ

Une équipe anglaise a suivi le comportement de bourdons *Bombus terrestris* en présence de cinq fleurs artificielles. Quand les fleurs offraient la même quantité de nectar, les bourdons butinaient en priorité la fleur la plus proche. En revanche, lorsque l'une d'elles en contenait davantage, les bourdons ne s'y rendaient en premier que si le détour augmentait peu la distance à parcourir. Ces insectes évaluent donc le meilleur rapport nectar/distance pour tracer leur route d'une fleur à l'autre.



Ingrid Leroy

Dans l'eau, la peau du bout des doigts se frippe et des « canaux » se créent. Il s'agirait d'une adaptation permettant de mieux saisir des objets dans ce milieu.

Médecine et nutrition

Un diabète d'origine maternelle ?

Est-il si simple de dire que le syndrome métabolique, qui inclut l'obésité, le diabète et l'hypertension, était en partie dû à ce que mange la mère durant la grossesse. Loin d'être saugrenue, cette constatation gagne du terrain depuis une dizaine d'années : des études épidémiologiques ont montré que l'environnement intra-utérin, en particulier l'alimentation maternelle, participe à ce syndrome chez l'adulte. Reste à trouver des preuves biologiques du lien entre ces troubles et l'alimentation maternelle. Des biologistes de l'Université de Nantes-Hennegouy, de l'Institut du cerveau et de la moelle épinière et de l'Institut Cochin à Paris, les ont obtenues chez la souris.

Les chercheurs ont nourri des souris gestantes avec une alimentation contenant soit 22 pour cent de protéines, soit 10 pour cent de protéines (un régime pauvre en protéines). Les petits ont « subi » le régime de leur mère du premier jour de gestation jusqu'au sevrage, puis ont reçu une alimentation normale. L'étude révèle que les souriceaux dont les mères avaient un régime riche en protéines ont un équilibre métabolique paradoxal : à l'âge adulte, ils ont un poids plus faible que les souriceaux « normaux », mais ils mangent davantage.

Ces anomalies métaboliques dues à une carence maternelle en protéines mettent en jeu la leptine, une hormone qui participe à l'équilibre alimentaire en contrôlant le métabolisme énergétique et l'appé-

tit. Les biologistes ont étudié le gène de la leptine des descendants : chez les souriceaux dont les mères étaient soumises à un régime pauvre en protéines, les régions (ou promoteurs) précédant les gènes sont en partie méthylées, c'est-à-dire que certaines ne portent pas de groupes chimiques méthyle. Or le promoteur régule l'expression du gène de la leptine.

Cette modification chimique, dite épigénétique, perturbe l'expression normale du gène codant la leptine et l'équilibre métabolique des souriceaux. Ainsi, une différence de régime alimentaire des mères peut engendrer des modifications de l'expression des gènes des petits, sans que l'enchaînement des éléments constitutifs de l'ADN ne soit modifié. Les conséquences à long terme sont, dans ce cas, néfastes et pourraient se transmettre à la descendance, mais cela reste à vérifier.

→ B. S.-L.

C. Joule et al., The FASEB, en ligne, 13 juin 2011

L'alimentation de la mère durant la grossesse influencerait sur le métabolisme et l'alimentation de l'enfant à naître ; à l'âge adulte, il pourrait souffrir de troubles métaboliques, tels qu'obésité ou diabète.



© Shutterstock / Hanes Eichinger

Evolution

Pourquoi les doigts se fripent dans l'eau

Il suffit de rester cinq minutes dans l'eau pour que la peau du bout des doigts ou des orteils plisse. On croyait simplement que la peau devenait partiellement perméable et que l'eau faisait gonfler les couches sous-cutanées. Mais Mark Changizi et ses collègues, du Laboratoire 2AI à Boise dans l'Idaho aux États-Unis, avancent une nouvelle hypothèse : les plis qui se développent dans l'eau seraient une adaptation au milieu et permettraient d'y agripper efficacement les objets.

On sait depuis le milieu des années 1960 que si l'on bloque le système nerveux dit sympathique (qui adapte entre autres les réactions de l'organisme au

niveau des doigts), on empêche la formation des plis à leur extrémité. Les neurobiologistes ont donc supposé que ces plis seraient une adaptation efficace au milieu humide. En étudiant des échelles de 28 extrémités de doigts plissées par l'eau, ils ont constaté que toutes présentent la même organisation en « canaux » formés par les parties concaves. Chaque canal est long, ininterrompu et séparé de son voisin et toutes les parties hautes sont toutes connectées en un point situé au sommet du doigt.

Quand on presse le doigt sur une surface sèche, les empreintes digitales permettent d'augmenter l'adhérence. Mais si la surface est

humide, un film d'eau reste piégé entre l'objet et le doigt. Or les ridules des empreintes digitales, trop fines, ne peuvent pas évacuer cette eau, et l'adhérence est mauvaise. En revanche, les plis des doigts qui apparaissent en quelques minutes permettent d'éliminer l'eau rapidement en formant un système de drainage efficace.

Reste à prouver que l'on saisit mieux les objets dans l'eau grâce à ces plis. En attendant, les chercheurs ont déjà montré que même des macaques japonais ont la peau des doigts plissée dans l'eau.

→ B. S.-L.

M. Changizi et al., Brain, Behavior and Emotion, en ligne, 13 juin 2011

Astrophysique

Soleil : rapports d'isotopes

La composition chimique du Soleil est bien connue grâce à son spectre lumineux, mais qu'en est-il de sa composition isotopique ? Les rapports isotopiques de l'azote ($^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$) et de l'oxygène solaires ($^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$ et $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) viennent d'être analysés pour la première fois, grâce aux particules de vent solaire collectées trois ans durant par la mission *Genesis* de la NASA (elle s'est écrasée à son retour sur Terre en 2004, mais des échantillons ont pu être décontaminés). Bernard Marty, du Centre de recherches pétrographiques et géochimiques, à Nancy, et ses collègues ont établi que le rapport $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ du Soleil est 40 pour cent inférieur à celui de la Terre. Et l'équipe de Kevin McKeegan, de l'Université de Californie à Los Angeles, a montré que l'oxygène du Soleil est très pauvre en isotopes lourds (^{17}O et ^{18}O) par rapport à celui de la Terre. Ces résultats renforcent l'idée que les planètes telluriques ont été fortement enrichies en isotopes lourds par rapport à la composition solaire, dont la composition est supposée se refléter dans celle du Soleil.

Science, vol. 332, pp. 1528-1532 et pp. 1533-1536, 2011

Biophysique

Le sang magnétofluidifié

Rongtao Rao, de l'Université Temple, aux États-Unis, et Ke Huang, de l'Université de Chicago, ont montré qu'une impulsion de champ magnétique intense est capable de diminuer notablement la viscosité du sang pendant quelques heures. En appliquant durant environ une minute un champ magnétique parallèle à la direction de l'écoulement sanguin et d'intensité égale à 1,3 tesla, on diminue la viscosité sanguine de 20 à 30 pour cent. La viscosité remonte ensuite lentement et retrouve sa valeur initiale au bout de deux ou trois heures. Grâce au fer contenu dans les globules rouges, l'application d'un champ magnétique intense a pour effet d'accrocher par leurs bords les globules rouges en petites chaînes de quelques unités. Ce regroupement augmente la taille moyenne des particules en suspension et élargit la gamme de leur taille (de quelques centaines à deux, trois, etc., globules). De plus, les chaînes de globules s'alignent dans la direction de l'écoulement. La baisse de viscosité résulte de ces trois effets. Une piste pour réguler la viscosité sanguine ?

→ M. M.

DERNIÈRE minute ...

LE CARBONE DE TOUTES LES FORÊTS

Yude Pan et ses collègues, une équipe internationale de 18 chercheurs, ont estimé les quantités de carbone stockées ou relâchées dans l'atmosphère par l'ensemble de toutes les forêts du monde. Leurs calculs, fondés sur des données d'inventaires et des observations de terrain sur de longues durées, indiquent qu'entre 1990 et 2007, les forêts ont capté (bilan net)

$1,1 \pm 0,3$ milliard de tonnes de carbone par an. Les forêts jouent ainsi un rôle positif et important dans le bilan du carbone.

DES CATALYSEURS PLUS EFFICACES

Les zéolites, matériaux poreux d'aluminosilicate, sont des catalyseurs solides très utilisés dans l'industrie. Mais leur efficacité est limitée par la petite taille des pores, inaccessibles aux molé-

cules de plus d'un nanomètre. En guidant leur croissance, les chercheurs ont fabriqué une structure de nanotubes de zéolites dont les parois sont si minces que des molécules de 10 nanomètres ont accès aux pores.



Retrouvez plus d'actualités et toutes les références sur www.pourlascience.fr

Biologie animale

Chauves-souris : un vol au poil

Est-ce que les chauves-souris n'utilisent pas que l'écholocation par ultrasons pour se diriger en vol ? Selon Susanne Sterling-I Angelo et ses collègues de l'Université du Maryland et de l'Université de l'Ohio, aux États-Unis, les chiroptères contrôlent aussi leur vol grâce à des informations sur les flux d'air captées par l'intermédiaire de... leurs poils. Les ailes des chauves-souris sont recouvertes de minuscules poils (100 à 600 micromètres de longueur, 2 à 0,9 micromètre de diamètre) dont on ignorait la fonction. Les biologistes ont réalisé des expériences sur des chauves-souris insectivores *Eptesicus fuscus*, en leur implantant des électrodes. Il est montré que, stimulés par un flux d'air, les récepteurs tactiles associés aux poils, en particulier ceux situés sur le bord de fuite de l'aile, activent des neurones du cortex somatosensoriel primaire, zone du cerveau qui code les informations liées au toucher. Après épi-

lation, les neurones du cortex somatosensoriel primaire n'étaient plus actifs.

Les chauves-souris se comportaient différemment en vol, avant ou après épilation. Les chiroptères accélèrent et prennent des virages plus grands après épilation. Ces expériences similaires avec de petites chauves-souris frugivores, *Carollia perspicillata*, ont donné le même résultat.

Selon les auteurs de l'étude, les poils normeraient les chauves-souris sur leur vitesse de vol, ce qui est très utile à basse vitesse : comme les avions, les chauves-souris risquent de s'écraser au-dessous d'une certaine vitesse. Lorsque leur vitesse est trop faible – ou lorsqu'elles sont épilées –, les chauves-souris ne reçoivent plus d'information sensorielle de leurs poils et, en réponse, augmentent leur vitesse pour prévenir un éventuel décrochage.

→ Marie-Neige Cordonnier

PNAS, prépublication en ligne, 20 juin 2011



Une chauve-souris frugivore *Carollia perspicillata* en vol. Les minuscules poils dont les ailes sont recouvertes sont sensibles aux flux d'air et jouent un rôle dans le contrôle du vol.

Retour sur des sujets déjà traités dans nos colonnes

→ VITAMINE D CONTRE PSORIASIS

La vitamine D, connue au symbolisme par la peau sous l'effet des rayons ultraviolets B du Soleil, ne participe pas seulement à la fixation du calcium dans l'os. Elle intervient aussi dans les défenses cellulaires et produit des molécules anti-inflammatoires (voir *La vitamine du Soleil*, *Pour la Science*, mars 2008, <http://bit.ly/plsoer368>). En effet, elle favorise l'expression de nombreux gènes, dont certains codent de petites protéines antimicrobiennes, telle la cathélicidine. Aujourd'hui, des biologistes allemands de l'Université de Munich montrent que la vitamine D pourrait limiter les symptômes du psoriasis, une maladie chronique de la peau liée à une suractivation anormale du système immunitaire (*Science Translational Medicine*, mai 2011). Chez les patients atteints, les signaux de danger captés par les cellules cutanées activent de façon excessive un complexe protéique nommé inflammasome ; ce dernier provoque une réaction inflammatoire forte, via l'activation de l'interleukine 1 bêta, ce qui engendre des lésions de la peau caractéristiques du psoriasis. Mais on ignorait comment était activée l'interleukine 1 bêta.

En prélevant de la peau de patients et de personnes saines, les chercheurs ont trouvé de l'ADN libre (en dehors du noyau) dans les cellules de peau des patients et une surexpression du gène codant le récepteur AIM2. Or l'ADN libre stimule la production de ce récepteur, lequel participe à la formation de l'inflammasome. Mais la cathélicidine peut bloquer l'assemblage de ce complexe : elle se fixe sur l'ADN libre et limite ainsi l'activation du récepteur AIM2, donc la production de l'inflammasome et



Le psoriasis est une inflammation chronique qui se caractérise par des lésions de la peau.

→ POURQUOI LES FEMMES SONT DES LÈVE-TÔT

Nous ne sommes pas égaux face au sommeil ; les besoins de sommeil et l'heure d'endormissement dépendent de plusieurs facteurs, en particulier des gènes dits de l'horloge qui commandent l'horloge biologique interne. Cette dernière contrôle le rythme circadien qui régule entre autres l'alternance de la veille et du sommeil (voir *Sommeil : nous égaux face au sommeil ?*, *Pour la Science*, septembre 2010, <http://bit.ly/plsoer395>). Quelle est la durée de ce rythme circadien ? Selon des biologistes suisses, américains et français, elle différerait entre les hommes et les femmes, l'horloge de ces dernières étant plus rapide (*PNAS*, mai 2011). Les femmes ont tendance à se lever et à se coucher plus tôt en moyenne que les hommes. Pour comprendre ce phénomène, les chercheurs ont mesuré le cycle de l'horloge circadienne de 52 femmes et de 105 hommes, observés pendant deux à six semaines dans un environnement contrôlé où aucune information temporelle n'était disponible. Cette expérience a confirmé que la durée moyenne du cycle circadien de l'être humain est supérieure à 24 heures, indépendamment de l'âge et du sexe. Mais elle a aussi révélé que l'horloge des femmes est plus rapide que celle des hommes, leur cycle étant en moyenne plus court de six minutes. Les femmes ont 2,5 fois plus de chances que les hommes d'avoir un cycle circadien inférieur à 24 heures. Ce décalage suppose une remise à jour quotidienne de l'horloge circadienne par la lumière. Mais ce réajustement ne serait pas toujours efficace : l'horloge prend de l'avance chaque jour et les femmes ont alors envie de se coucher et de se lever plus tôt que la veille.

de l'interleukine 1 bêta. Comme la vitamine D favorise la synthèse de la cathélicidine et sa fixation sur l'ADN, elle pourrait avoir un rôle thérapeutique.

→ UNE EXOPLANÈTE HABITABLE ?

Depuis la découverte en 1995 de la première planète tournant autour d'une étoile semblable au Soleil – une exoplanète –, les astrophysiciens ont trouvé des planètes ressemblant à la Terre (voir le Dossier *Exoplanètes, nouvelles Terres en vue*, *Pour la Science*, septembre 2006, <http://bit.ly/plsoer347>). Mais aucune exoplanète ne serait capable d'abriter de l'eau liquide, nécessaire à la vie telle qu'on la connaît. Depuis quelques années, les regards se tournent vers le système planétaire de l'étoile naine Gliese 581, une des plus proches voisines du Soleil. Robin Wordsworth et François Forget, de l'Institut Pierre-Simon Laplace à Paris, et leurs collègues annoncent qu'une planète de ce système, Gliese 581d, pourrait être la première planète potentiellement habitable

découverte (*The Astrophysical Journal Letters*, mai 2011). On sait que cette planète est probablement formée de roches, comme la Terre, et qu'elle est environ deux fois plus volumineuse et sept fois plus massive. Toutefois, elle reçoit trois fois moins l'énergie de son étoile et sa rotation serait calée sur l'étoile ; une face de la planète serait donc toujours dans l'obscurité. On craint que l'atmosphère et l'eau se condenseraient totalement, interdisant la présence d'eau liquide... Mais les scientifiques ont développé un modèle numérique pour simuler les climats possibles des exoplanètes, en incluant n'importe quel mélange de gaz, nuages et aérosols dans l'atmosphère de la planète. Ils ont ainsi découvert qu'avec une atmosphère riche en dioxyde de carbone (ce qui serait probable pour Gliese 581d), la planète pourrait non seulement éviter la condensation de son atmosphère, mais son climat serait aussi suffisamment chaud pour permettre la formation d'océans, de nuages et de pluie. De là à débusquer une autre forme de vie, il n'y a qu'un pas que l'imagination franchit aisément...

→ Béné

■ POUR LA SCIENCE

VOTRE ABONNEMENT 100 % NUMÉRIQUE

1 an au prix de 48 €

soit **4 € seulement par numéro** au lieu de 5,20 €

Pour consulter et télécharger
en toute liberté sur www.pourlascience.fr
les 12 prochains numéros
dès leur parution.



Oui, je m'abonne
à *Pour la Science* 100 % numérique
1 an (12 numéros) pour 48 €

Je préfère découvrir toutes
les offres d'abonnement disponibles
en cliquant ici.

POINT DE VUE

Farines animales : faut-il les réintroduire ?

Oui, car celles de 2011 n'ont rien à voir avec celles de 1996, à l'origine de la crise du prion.

Jeanne BRUGÈRE-PICOUX

Il y a un an, en juillet 2010, la Commission européenne proposait de réintroduire les protéines d'origine animale dans l'alimentation des poissons, des volailles et des porcs. Depuis, le Conseil national d'alimentation et les agences de sécurité sanitaire française et européenne étudient la question, et déposeront dès l'automne prochain des rapports sur la possibilité de réintroduire ces protéines dans les filières d'élevage. En juin dernier, le conseil national d'alimentation a déjà émis son avis favorable, soulevant l'indignation de nombreux consommateurs. Pourtant, les protéines animales transformées, comme on les nomme aujourd'hui, ne sont pas les « farines animales » de 1996, mises en cause par la crise de l'encéphalopathie spongiforme bovine (ESB). Pour le comprendre, revenons quelques années plus tôt.

L'utilisation des farines de viande et d'os dans l'alimentation du bétail est ancienne et a surtout pris son essor à partir de 1945 avec l'industrie des aliments pour animaux domestiques. L'erreur fut de considérer que la chaleur détruisait tous les agents pathogènes potentiels. On ne se limitait pas au « cinquième quartier », c'est-à-dire aux restes d'une carcasse découpée à l'abattoir pour les consommateurs ; on incluait aussi des animaux trouvés morts (en particulier des ruminants) ou des saisies sanitaires. Le tout (excepté la majeure partie des os) était chauffé, déshydraté et dégraissé pour donner une farine destinée à l'alimentation animale. Le procédé s'est révélé insuffisant pour inactiver les prions. Dans les années 1990, la maladie rare qu'ils déclenchaient, l'ESB, devint une véritable pandémie. Le Royaume-Uni a causé, sans doute, d'une vache atteinte

intégrée dans le circuit peu avant 1980. Par le biais des exportations, le prion contaminait tous les cheptels en Europe et dans le reste du monde.

En mai 1990, on s'aperçut que les prions franchissent la barrière des espèces : le cas d'un chat anglais atteint du prion bovin fut confirmé, suivi de plus de 100 cas d'encéphalopathie spongiforme féline. Et en mars 1991, l'annonce de dix cas humains suspectés d'être atteints d'une variante de la maladie de Creutzfeldt-Jakob au Royaume-Uni déclencha la crise dite de la vache folle. Trois mois plus tard, alors que les farines étaient interdites aux ruminants depuis 1994, le gouvernement français a envisagé d'étendre cette interdiction à tous les animaux d'élevage.

Les scientifiques consultés, dont je fis partie, étaient très divisés, mais se rangerent

SI UNE CARCASSE EST DÉCLARÉE

propre à la consommation humaine, ses restes sont également bons pour les animaux domestiques.

à l'argument que je défendais selon lequel si une carcasse est déclarée propre à la consommation humaine, ses restes sont également bons pour les animaux domestiques (d'élevage et de compagnie) – hormis les matières à risque spécifié. Ces matières, constituées des déchets des organes contaminés dans les maladies à prions (la cervelle et la moelle épinière, les yeux, les amygdales, les intestins...) sont prélevées systématiquement à l'abattoir et détruites depuis la crise de l'ESB.

Restait à adopter une mesure de précaution supplémentaire : éviter tout croise-

ment dans les circuits de préparation et de distribution des aliments, afin que les ruminants ne puissent ingérer de farines, au cas où un défaut de détection de l'ESB se produirait. Avec la seconde crise de l'ESB, à l'automne 2000, plus grave que celle de 1996 dans ses répercussions économiques et médiatiques, la décision française d'interdire les farines animales à tous les animaux d'élevage, inscrite au plan sanitaire, fut purement politique. L'Europe suivit la France.

Les ruminants ne consommant plus de farines animales, l'ESB est redevenue une maladie rare, comme en témoignent la surveillance épidémiologique des bovins et le dépistage systématique à l'abattoir et à l'équarissage. Au 1^{er} juillet 2011, seuls deux cas ont été déclarés cette année (un cas de bovins

trouvés morts), ce qui porte à 1 019 le nombre de cas d'ESB déclarés en France depuis 1991 (sur 20 millions de bovins par an).

La crise de l'ESB a conduit à une amélioration de la sécurité alimentaire dans la filière bovine en introduisant la traçabilité de la viande de la ferme à la table (bien que la viande hachée mériterait encore quelques progrès, du fait qu'un lot de steaks hachés peut résulter du mélange de viandes d'origines trop nombreuses). Les centres d'équarissage ont aussi dû se plier aux exigences des comités scientifiques français et européens. Depuis 2002, en France comme en Europe, les déchets sont classés en trois catégories. Les deux premières sont destinées aux centres d'équarissage. Elles rassemblent les déchets dits à risque (matières à risque spécifié, animaux trouvés morts ou malades, saisies sanitaires...) qui ne peuvent entrer dans la chaîne alimentaire des animaux. Parmi ces déchets à risque, les protéines extraites d'animaux non ruminants

nants sont réutilisées sous forme d'engrais après stérilisation, notamment... par l'agriculture biologique.

La troisième catégorie comporte les déchets de découpe en abattoirs d'animaux sains destinés à la consommation humaine (ruminants – hors matières à risque spécifique –, porcs, volailles). De même qualité sanitaire (ils sont écartés seulement pour des raisons commerciales), ils sont traités par espèces dans des centres de valorisation distincts des centres d'équarrissage : les protéines animales transformées récupérées après déshydratation et séparation des graisses constituent une farine destinée à l'alimentation des animaux de compagnie.

Dès 2004, du fait de la disparition progressive de l'ESB, les Académies vétérinaire et d'agriculture de France ont envisagé une utilisation de ces protéines dans l'alimen-

tation de poissons et crustacés, des volailles et des porcs (la question ne se pose évidemment plus pour les ruminants). Par précaution, elles devraient être réservées à la seule alimentation de ces espèces, où aucune entérophathie transmissible n'a été signalée, et en aucun cas introduites dans la nourriture de l'espèce dont elles proviennent. En outre, un contrôle rigoureux de la fabrication de ces produits devrait être exercé en France, que sur les échanges internationaux, notamment en imposant une séparation stricte des filières par espèce de provenance.

La levée de l'interdiction restituerait une liberté économique aux différents acteurs des filières. Les éleveurs, en particulier, pri-

vés d'une source de protéines locale, la remplacent par des denrées végétales d'importation, notamment du soja (parfois trans-

génique), et sont donc tributaires des cours du marché. En fin 2010, une tonne de tourteau de soja coûtait 340 euros, alors que le prix de revient d'une tonne de protéines animales transformées serait de 35 euros. En outre, on arrêterait un gaspillage insensé de protéines d'excellente qualité.

Grâce à ces mesures, les protéines animales transformées seront différentes des farines animales d'avant 1996. Leur contrôle sera celui réalisé pour les parties destinées à la consommation humaine.

Jeanne RUBERGÉ-PILOUX est professeur à l'École nationale vétérinaire de Toulouse et membre de l'Académie française.

Réagissez en direct à cet article sur www.pourlascience.fr

DÉVELOPPEMENT DURABLE

La gestion énergétique des salles informatiques

La climatisation des centres informatiques nécessite beaucoup d'électricité.

Pour réduire la consommation et augmenter l'efficacité, plusieurs solutions ont vu le jour.

Dominique BOUTIGNY

L'explosion des technologies de l'information a entraîné un développement considérable des centres de traitement des données. De même, le calcul intensif pour les sciences et la technologie met en œuvre des supercalculateurs de plus en plus nombreux et puissants, hébergés dans des salles informatiques adaptées.

À cet accroissement du nombre et de la puissance des centres informatiques est associée une augmentation de la consommation électrique, en particulier pour maintenir le matériel à une température assez basse pour son bon fonctionnement.

La consommation mondiale d'électricité était en 2008 de l'ordre de 17 000 térawat-

heures et on estime la consommation pour l'informatique en cette même année à quelque 900 térawattheures. La part de l'informatique ne représente donc qu'environ cinq pour cent du total. Cependant, à l'échelle de chaque centre informatique, l'accroissement de la consommation est devenu un casse-tête non seulement pour maîtriser les coûts, mais aussi pour concevoir les techniques de refroidissement appropriées.

L'approche retenue il y a une dizaine d'années pour augmenter la puissance de calcul des serveurs reposait sur l'augmentation de la fréquence de fonctionnement des processeurs. Or il s'ensuit une augmentation considérable de la consommation électrique de ceux-ci et, du même coup,

l'apparition d'une problématique de plus en plus complexe au niveau des infrastructures des salles informatiques. Il y a dix ans, une salle informatique ordinaire hébergeait des armoires-serveurs qui dégageaient un ou deux kilowatts de chaleur par mètre carré et le refroidissement était assuré par de l'air froid soufflé à travers un faux plancher, qui servait également de gaine technique pour le passage des câbles. Ce type de refroidissement impliquait donc une climatisation de l'ensemble de la salle des machines puisque l'air chaud des serveurs était rejeté directement dans la pièce.

Désormais, avec l'augmentation de la fréquence de fonctionnement et la puissance des serveurs, la chaleur dégagée peut



LA TECHNIQUE « IN ROW » A NOTABLEMENT AMÉLIORÉ LA GESTION ÉNERGÉTIQUE DES salles informatiques. Dans cette approche, les unités de climatisation sont insérées entre les armoires-serveurs, au sein d'une même rangée. Par ailleurs, l'air chaud dégagé est confiné dans un couloir formé entre deux rangées, ce qui évite de le mélanger à l'air ambiant de la salle.

atteindre 10 à 15 kilowatts par mètre carré pour une armoire de serveurs pleine. Il devient alors presque impossible de souffler efficacement l'air par le faux plancher pour refroidir tous les serveurs.

Parallèlement à ces problèmes de refroidissement, la consommation électrique globale augmente et il est fréquent de voir des salles de quelques centaines de mètres carrés dépasser le mégawatt de puissance électrique quand les systèmes d'alimentation et de distribution le permettent.

L'efficacité de l'utilisation de l'énergie électrique est mesurée par le rapport entre la puissance électrique totale fournie (qui comprend l'énergie nécessaire au refroidissement) et la puissance de traitement informatique. Pour les grandes salles de machines ce rapport, nommé PUE (pour *Power Usage Effectiveness*), atteint 1,7 à 1,8, voire plus.

Ces cinq dernières années, une double prise de conscience a eu lieu, d'une part du côté des fabricants, d'autre part du côté des concepteurs de salles informatiques. Les premiers se sont efforcés de réduire la consommation électrique des serveurs tout en améliorant leur efficacité énergétique, pour optimiser les flux d'air. Les seconds

ont commencé à proposer des solutions de refroidissement plus efficaces.

Les fabricants ont limité la fréquence des processeurs et diminué leur tension de fonctionnement, ce qui a réduit de 30 pour cent par an la consommation électrique, à puissance informatique constante. Par ailleurs, l'augmentation de la capacité des disques durs (de 5 à 15 000 gigaoctets il y a cinq ans à deux téraoctets aujourd'hui pour des serveurs de stockage) a abaissé notablement le coût d'implantation électrique et de climatisation du téraoctet de stockage.

Confiner l'air chaud entre les rangées d'armoires refroidies

Du côté des salles informatiques, l'amélioration décisive est venue des systèmes d'armoires refroidies et de confinement des allées chaudes (technique « in row », en rangée). Dans cette approche, les serveurs sont montés dans des rangées d'armoires et rejettent l'air chaud dans un couloir confiné entre deux rangées. Cet air chaud est traité au plus près de sa production par des unités

de climatisation insérées entre deux armoires de serveurs. Il suffit alors d'une climatisation légère pour maintenir la température ambiante de la salle informatique.

La technique du confinement des allées chaudes, associée aux dernières générations de groupes froids, a permis de ramener le PUE des salles informatiques ainsi équipées à des valeurs proches de 1,3. Les faux planchers soufflants deviennent alors superflus, d'où des salles moins coûteuses, capables de supporter des poids d'armoires de serveurs plus importants et, surtout, de disposer d'un câblage et d'une tuyauterie propres et accessibles. Les services (courants forts, courants faibles, eau glacée) étant installés au niveau du plancher de la salle.

Pour aller plus loin, deux approches sont possibles. Celle qui a été mise en œuvre au Centre de calcul du CNRS/IN2P3 est de récupérer la chaleur des serveurs informatiques pour la mettre à la disposition des bâtiments voisins de l'Université Lyon 1. Cette démarche est particulièrement pertinente dans le contexte du *Plan campus* qui prévoit la construction de nouveaux bâtiments. Ici, le système de chauffage peut être adapté à des températures d'eau chaude dans la gamme 50-55 °C.

L'autre approche est le « free cooling », qui consiste à utiliser au maximum l'air extérieur pour refroidir les serveurs. Ces derniers doivent alors fonctionner à des températures plus élevées et moins stables, mais qui restent dans un domaine acceptable. Cette technologie a été mise en œuvre avec succès au Laboratoire de physique subatomique et cosmologie du CNRS/IN2P3, à Grenoble, pour une salle informatique de taille moyenne. Pour les très grands centres de calcul, le tout « free cooling » est possible avec des systèmes de captation de l'air extérieur de grandes dimensions, permettant un renouvellement d'air très important dans les salles informatiques. C'est aujourd'hui le cas du Centre de calcul du CNRS/IN2P3, où le PUE est inférieur à 1,1.

Dominique BOUTIGNY est directeur du Centre de calcul de l'Institut national de physique nucléaire et de physique des particules (IN2P3) à Villeurbanne.

À découvrir en kiosque et sur www.pourlascience.fr



Mayas, Aztèques, Incas... Mais aussi Olmèques, Inuits, Cheyennes... l'être humain a conquis l'Amérique du cercle arctique à la Terre de Feu et y a fondé de nombreuses civilisations et cultures. La plupart font encore rêver aujourd'hui. Comment ont-elles disparu ? Comment fonctionnaient-elles ? Ont-elles vraiment disparu ? Ce Dossier retrace l'histoire, entre grandeur et décadence, des peuples d'Amérique.

→ Feuilletez les premières pages sur pourlascience.fr

VRAI OU FAUX

Peut-on ne jamais rêver ?

Les non-rêveurs n'existeraient pas. Mais plusieurs facteurs expliquent l'absence de souvenirs oniriques.

Delphine OUDINETTE et Isabelle ARNULE

Quand on a entre 20 et 30 ans, on se souvient de 1,1 rêve par nuit (selon les enquêtes) des personnes interrogées sur la fréquence de leurs rêves disent ne jamais rêver. Cette proportion chute à 0,28 pourcent quand les sujets dorment dans un laboratoire et sont réveillés plusieurs fois par nuit pour qu'ils racontent leur activité mentale.

Des lésions de certaines régions du cerveau peuvent effectivement supprimer les rêves. En 2004, des médecins suisses ont décrit le cas d'une femme de 73 ans qui ne rêvait plus après un accident vasculaire cérébral occipital (où se situent les aires visuelles). Outre la perte totale de l'activité onirique, la patiente souffrait de troubles visuels. Ces symptômes forment le syndrome de Charcot-Wilbrand, une pathologie rare décrite pour la première fois dans les années 1880. L'organisation de son sommeil semblait pourtant normale, avec une alternance des phases de sommeil lent et paradoxal. Mais, même réveillée en sommeil paradoxal, le stade associé à une activité onirique intense, la patiente ne se souvenait d'aucun rêve.

Toutefois, les lésions provoquant la perte des rêves sont rares. Alors pourquoi certaines personnes n'ayant eu aucun accident vasculaire cérébral disent-elles ne jamais rêver ? En fait, il est fort probable que tout le monde rêve, mais sans forcément s'en souvenir au réveil. En effet, de nombreux facteurs sont susceptibles d'influer sur le rappel des rêves. Par exemple, les femmes se rappellent souvent mieux que les hommes leur activité onirique (peut-être parce qu'elles s'y intéressent davantage). Les rappels de rêves sont moins nombreux chez les enfants (âgés de moins de 10 ans), puis augmentent

avec l'âge. Plus on avance, on se souvient moins de ses rêves, avec une stabilisation vers la cinquantaine.

Plusieurs études ont souligné le rôle fondamental de la motivation sur le rappel des rêves : les personnes qui accordent de l'importance à leurs rêves, celles qui s'exercent à se souvenir ou celles qui participent à une étude sur leurs rêves ont plus de chances d'avoir un rappel onirique que celles qui ne s'y intéressent pas. En effet, la motivation à l'égard des rêves activerait des mécanismes de l'attention, facilitant leur encodage et leur consolidation en mémoire.

Vouloir s'en souvenir

La méthode d'éveil peut aussi influencer sur le rappel de rêve. Si l'on est distrait ou si l'on fait autre chose entre le réveil matinal et le moment du rappel, on a moitié moins de chances de se souvenir de ses rêves. Et bien sûr, le contenu du rêve a son importance. Les rêves marquants, bizarres ou intenses émotionnellement, par exemple les cauchemars, laissent une trace plus forte au réveil.

Ainsi, les scientifiques cherchent une « signature objective » des rêves, qui permettrait de les quantifier indépendamment des souvenirs du participant. Certaines études ont montré que les réveils en sommeil paradoxal s'accompagnaient plus souvent d'un récit de rêves que les réveils en sommeil lent. Le stade de sommeil précédant le réveil intervient donc dans la propension à se souvenir ou non d'un rêve. Mais l'absence de souvenirs ne signifie pas qu'il n'y a pas de rêves. D'autres chercheurs tentent de lier la fréquence des récits oniriques avec des



Shutterstock / Carlos Castano

mesures physiologiques durant le sommeil, telles les variations du rythme respiratoire ou le nombre de mouvements oculaires rapides. Mais aucun résultat n'est probant.

Toutefois, en 2011, des chercheurs suisses et brésiliens ont montré, chez 17 jeunes sujets, que certaines caractéristiques de l'activité cérébrale durant le sommeil (évaluées par électroencéphalographie) prédisaient si les rêves pourraient être rappelés en sommeil paradoxal ou en sommeil lent. Les rêves reposeraient à la fois sur une inhibition des aires frontales du cerveau et sur une activation des aires occipitales. Mais ce résultat nécessite d'être confirmé.

Il est difficile de savoir s'il existe de véritables non-rêveurs, car nous n'avons pas accès à l'expérience mentale du dormeur. Dans notre Unité des pathologies du sommeil, nous enregistrons le sommeil de patients souffrant de troubles comportemental en sommeil paradoxal, une maladie qui engendre une extériorisation des rêves (le patient rêvant d'un agresseur se bat « réellement » contre un ennemi invisible). Certains de ces patients nous ont affirmé n'avoir jamais rêvé. Pourtant, ils s'agitent la nuit, donnent des coups et crient. Difficile de croire qu'ils n'avaient aucune image dans la tête à ce moment-là. Ils ne se souviennent simplement pas.

Même s'il est pour l'heure impossible de le confirmer, il est fort probable que tout le monde rêve. Et que la fréquence des souvenirs du monde onirique varie d'un individu à l'autre.

Delphine OUDINETTE est postdoctorante dans l'Unité des pathologies du sommeil de l'Hôpital de la Pitié-Salpêtrière, à Paris, unité que dirige Isabelle Arnault.

Pour un été riche en explorations scientifiques, abonnez-vous !

■ POUR LA
SCIENCE
1 an ■ 56 €
ou 14 €/trimestre



+ le Dossier Pour la Science n°61 offert
en choisissant le prélèvement trimestriel
120 pages entièrement consacrées à nos ancêtres gaulois
à travers les découvertes et la relecture de textes anciens

BULLETIN D'ABONNEMENT

■ POUR LA
SCIENCE

à retourner accompagné de votre règlement dans une enveloppe non affranchie à : Groupe Pour la Science • Service abonnements • Libre réponse 90382 • 75281 Paris cedex 06

☐ Oui, je m'abonne 1 an et reçois 12 numéros de Pour la Science au prix de 56 €* (au lieu de 74,70 €, prix de vente au numéro). Je bénéficie également des versions numériques sur www.pourlascience.fr.

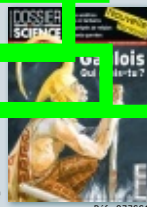
* Offre valable en France métropolitaine. Participation aux frais de port à ajouter au prix de l'abonnement : France d'outre-mer et Europe 12 € - autres pays 25 €.

☐ Je préfère m'abonner à Pour la Science au prix de 14 € par trimestre. Je reçois 12 numéros par an et bénéficie aussi des versions numériques sur www.pourlascience.fr.

En cadeau, je reçois le Dossier Pour la Science n°61 « Gaulois, qui étais-tu ? ».

** Abonnement valable uniquement en France métropolitaine, renouvelable à chaque parution reconduite et dénoncée sans engagement avec un préavis de 3 mois.

Ce numéro offert
avec
l'abonnement
14 €/trimestre



J'indique mes coordonnées :

Nom : _____ Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal : _____ Ville : _____ Pays : _____ Tél. (facultatif) : _____

☐ Je souhaite recevoir la revue Pour la Science à l'adresse ci-dessus.

Je choisis mon mode de règlement :

☐ Je règle mon abonnement en une seule fois 56 € (+ frais de port en sus pour l'étranger)

☐ par chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ par carte bancaire

Expire fin : _____

Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB) : _____

Signature obligatoire : _____

☐ Je préfère le règlement en douceur 14 €/trimestre + en cadeau le Dossier Pour la Science n°61 « Gaulois, qui étais-tu ? ».

Je remplis la grille d'autorisation de prélèvement ci-dessous en joignant impérativement _____.

Autorisation de prélèvement

présentés par Pour la Science. Je vous demande de faire apparaître mes prélèvements sur mes relevés de compte habituels. Je m'adresserai directement à Pour la Science pour tout ce qui concerne le fonctionnement de mon abonnement.

Titulaire du compte

Nom, Prénom : _____

N° : _____

Code postal : _____ Ville : _____

Établissement : _____ à débiter

Établissement : _____

Rue : _____

Code postal : _____ Ville : _____

Compte à débiter

Établissement

Code guichet

N° de compte

Clé RIB

Pour la Science
8 rue Férou - 75006 Paris
N° national d'émetteur : 426900

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

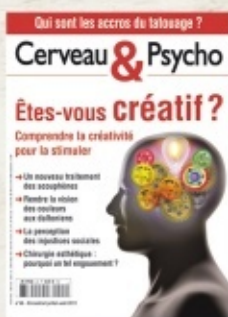
PLS406 - Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 31.08.2011

Cet été,
■ POUR LA
SCIENCE
est disponible sur l'application iPad
Le Kiosque



Disponible sur
App Store

Retrouvez tous les magazines **SCIENCE** sur votre ipad !



Téléchargez gratuitement l'application Le Kiosque sur l'App Store.

lekiosque.fr

Votre kiosque à portée de main

Les couleurs oubliées de l'Antiquité

Nous ne sommes pas si nobles sous des vêtements élégants mais austères, tels étaient nos Anciens, nos modèles. Depuis le XVIII^e siècle, la copie des modèles antiques constitue un idéal de perfection. Et si l'Antiquité avait été multicolore, avec des teintes vives, voire criardes ?

Des études récentes indiquent qu'en effet, les Mésopotamiens, les Égyptiens, les Perses, les Grecs de l'Antiquité aimaient parer leurs statues de couleurs vives : rouge, noir, jaune, or, bleu et vert, blanc... Ulrike et Vinzenz Brinkmann, de l'Université de Munich, nous le démontrent dans le cas des statues des sanctuaires de la Grèce classique, et y identifient une influence orientale (voir page 22). L'archéologue Alexander Nagel montre que, dans les palais de la Perse, grande puissance qui impressionnait tant les Grecs, statues et bas-reliefs utilisaient de couleurs vives (voir page 32). Cette Perse a été elle-même influencée par la Mésopotamie, civilisation qui, expliquent Astid Nunn et Rupert Gebhard, employa très tôt le rouge et le noir (voir page 28).

Quant aux pigments utilisés, le bleu égyptien, premier pigment artificiel de l'humanité, est un cas emblématique, que nous décrit l'archéochimiste François Delamare (voir page 33). Sa fabrication et son commerce ont fait l'objet d'un monopole durant 2500 ans, jusqu'à ce que les Romains se mettent à en produire.

Orné de vifs coloris, l'art antique ainsi revisité surprend notre œil. Était-il de mauvais goût ? On ne discute pas des goûts et des couleurs, encore moins avec les Anciens.

François Savatier

LE LION DE LOUTRAKI GARDAIT UNE TOMBE près du golfe de Corinthe depuis le VI^e siècle avant notre ère. Ses couleurs ont été restituées par les archéologues d'après des traces de pigments qu'ils ont retrouvées sur le pelage, la crinière et les yeux. Peu réalistes, elles véhiculaient une charge symbolique : le bleu, par exemple, soulignait la force.

La polychromie dans la Grèce antique



Vinzenz Brinkmann

Dans notre vision de la Grèce antique, d'austères drapés soulignaient la noble simplicité des Grecs. En fait, les Athéniens s'habillaient souvent de vêtements multicolores, luxueux et recherchés.

Ulrike Brinkmann
et Vinzenz Brinkmann

Parfois, on se demande comment les Grecs ont pu donner à l'image que les Anciens nous ont laissée des idéaux de leur temps. Pour rendre la beauté pure du corps, quoi de mieux que le blanc du marbre, matériau noble par excellence ? L'Antiquité fut-elle vraiment noble et austère, à l'image de ses marbres ?

C'est ce que nous croyons volontiers, sous l'influence persistante du classicisme, (né au XVIII^e siècle) et du néoclassicisme, des courants artistiques qui prônent le retour aux modèles antiques. Or l'étude de certains de ces modèles révèle que les artistes de l'Antiquité recouvraient souvent le marbre de couleurs, utilisant une polychromie riche, voire criarde, pour faire ressortir les vêtements aussi raffinés que colorés, et fort peu austères, de leurs personnages. Voyons ce...

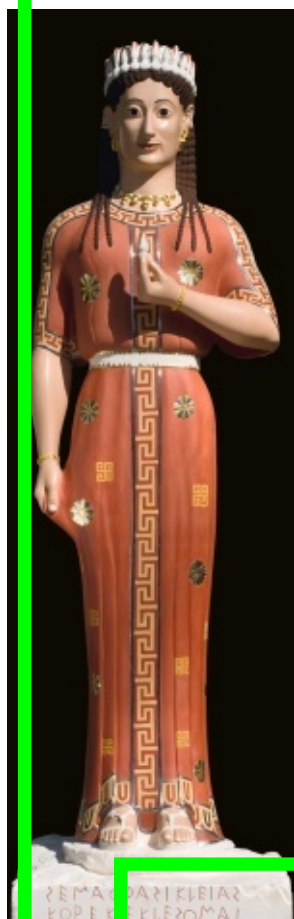
L'archéologue et historien d'art allemand Johann Joachim Winckelmann (1717-1768) a parfaitement résumé l'idée que ses contemporains se faisaient de l'esprit antique : « Noble simplicité et tranquille grandeur. » Cette formule... lapidaire atteste de l'exagération qui caractérisait le retour aux modèles antiques. Pourtant, cette admiration n'a pas aveuglé Winckelmann qui – des découvertes récentes l'attestent – fut le premier archéologue à découvrir des restes de couleur sur des statues grecques...

L'hypothèse d'une recherche systématique de simplicité perdue dans notre vision des statues antiques. L'idéal de nudité et de blancheur exclut *a priori* l'usage de vêtements. Cette impression est renforcée par le fait que nous n'avons quasiment pas retrouvé de textiles. Les vêtements des anciens Grecs ne sont donc connus que par des sculptures, de rares représentations ou par les textes. Que peut-on en déduire ? Tout d'abord que les femmes (et les hommes) portaient des péplos ou des chitons.

Long et entièrement drapé tombant des épaules, le péplos était tissé d'une laine trop rigide pour créer beaucoup de plis. Cette longue tunique n'était maintenue que par une ceinture, de sorte qu'une longue fente latérale découvrait la peau. Quant au chiton, il était cousu ; il créait une autre apparence, puisqu'on le réalisait dans un tissu fin, afin de produire nombre de plis, ressentis comme autant d'ornements. Il était cousu sur le côté et l'on assemblait la partie avant et la partie arrière sur les épaules à l'aide de boutons. On le complétait parfois d'un petit manteau.

Le péplos comme le chiton étaient réalisés à partir de draps blancs, plutôt grossiers. Du moins est-ce ainsi qu'on les présente pendant les leçons magistrales, sur l'Internet et dans les films historiques. Simplicité ? Nous le pensons. Les sources antiques auraient dû nous incliner à nuancer cette conception, mais sous l'influence de idées reçues, elles furent mal interprétées. L'étude des dieux et des héros sculptés, heureusement, nous livre une nouvelle perspective.

1. LA BELLE PHRASIKLEIA est morte jeune. Éplorée, sa famille fit réaliser une sculpture grandeur nature de la jeune fille, et en orna sa tombe. Les rosaces d'or et d'argent qui parent sa robe ainsi que les boutons de lotus ouverts (quadrèms) ou fermés (dans sa main) sont une allusion au ciel et au cycle de la vie et de la mort (ci-dessus, la reconstruction en couleurs).



L'ESSENTIEL

- ✓ Un cliché veut que les Grecs de la période classique étaient toujours vêtus sobriement de blanc.
- ✓ La restitution des peintures ornant les statues de cette période montre, au contraire, que nombre de leurs vêtements étaient multicolores et luxueux.
- ✓ Par ailleurs, les vêtements représentés sur les scènes, au fronton des temples, étaient aussi très colorés.
- ✓ Tout cela traduit le goût grec pour des vêtements multicolores que l'on trouvait aussi dans le monde oriental, par exemple chez les Perses ou les nomades des steppes.

Depuis bientôt 30 ans, nous observons des surfaces de marbre au microscope, en lumière naturelle ou ultraviolette, en éclairage direct ou oblique, à la recherche de traces de couleurs. Comme nous en avons trouvé beaucoup, nous utilisons depuis quatre ans un appareillage de spectroscopie ultraviolets-visible et de spectrométrie à fluorescence X, avec lesquels nous étudions la composition chimique de restes de couleur et ce de façon non destructive (voir l'encadré page 26). Tous ces moyens techniques sont coordonnés par Heinrich Piening, du Département de restauration de l'Administration des châteaux, lacs et jardins de l'État de Bavière.

Restauration 3D de troisième génération

À tout cela s'ajoutent les données traitées à l'aide de logiciels performants, qui fournissent des images numériques ultraprécises ou même des reconstructions en trois dimensions. Tous ces outils et techniques, qu'avec l'aide et la coopération de notre collègue Olivier Primavesi, de l'Université de Munich, nous avons progressivement appris à mettre en œuvre, permettent de pratiquer ce que nous nommons la restauration de troisième génération. Nous sommes aujourd'hui plusieurs à employer ces méthodes.

Au cours des dernières années, elles ont permis d'ébranler la vision surannée d'un passé tout en marbre blanc. Pourtant, des dessins du XVIII^e et du XIX^e siècles montraient déjà que des savants avaient noté la présence de couleurs sur les statues antiques. Aujourd'hui, les nouvelles méthodes nous permettent de révéler les pigments invisibles à l'œil nu ; il est même possible de restituer de façon indirecte toute une mise en couleur.

Que nous livre cette nouvelle lecture ? Que ceux qui passent pour les fondateurs de la culture européenne avaient tendance à abuser des couleurs. Ils recouraient sans retenue le marbre, qui leur offrait un support idéal pour représenter les cheveux, la peau et les habits.

Prenons le cas de l'Athènes du début du V^e siècle avant notre ère. En ce temps, ce que l'on appelle l'âge classique de la ville attique n'avait pas commencé. Toutefois, les citoyens de la polis (à partir de 490) ont introduit le système démocratique. La ville

LES AUTEURS



Ulrike BRINKMANN, archéologue, travaille à l'Université de Munich et à la fondation *Archeologie* à Munich. *Vinzenz BRINKMANN*, archéologue, est professeur à l'Université de la Ruhr à Bochum et conservateur de la collection d'antiquités de la Maison Liebieg à Francfort.

venait de battre la superpuissance perse au cours de la bataille de Marathon. Tout cela poussait les Athéniens à donner un lustre particulier aux panathénées, des fêtes religieuses et des jeux qui se tenaient tous les ans à Athènes en l'honneur d'Athéna, la déesse de la ville.

L'un des temps forts de ces fêtes était la grande procession des corés. Ces très belles jeunes filles étaient choisies parmi les meilleures familles de la ville et défilaient parées de leurs plus beaux atours. Leurs pères, aussi fiers qu'ils étaient aigres, faisaient souvent graver le tableau dans la pierre et offraient leurs statues pour qu'elles soient érigées sur l'Acropole.

Cet aspect de la vie athénienne serait de peu d'importance pour notre enquête, si, une dizaine d'années après la bataille de Marathon, les Perses n'étaient revenus. Cette fois, leurs armées occupèrent l'Attique et sacagèrent Athènes, qui réussit cependant une nouvelle fois à les vaincre à la bataille de Salamine. Ces dévastations et ce succès entraînèrent la construction de nouveaux bâtiments de sorte que l'on enterma les statues peintes brisées par l'ennemi. Une chance pour la recherche puisque cela limita à quelques années seulement l'exposition des œuvres aux éléments ! Lorsque les corés sculptées furent remises au jour à la fin du XIX^e siècle, de nombreux restes de couleur les ornaient encore, ainsi qu'en témoignent la coré 675 réalisée par le peintre suisse Émile Gilliéron en 1906.

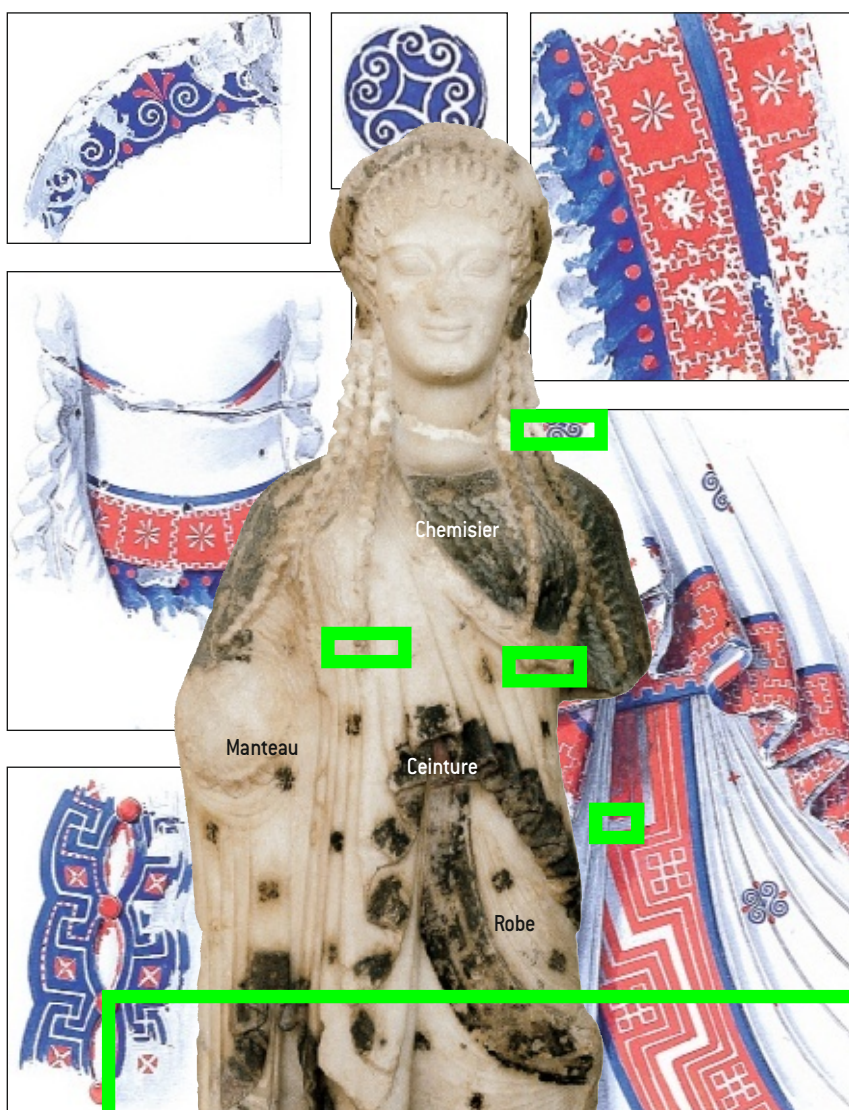
La coré 675

Les images de Gilliéron montrent que les bordures du vêtement de la coré 675 étaient enrichies de méandres, de spirales ou de fleurs. Le chiton de cette coré s'est révélé être composé d'un chemisier bleu, d'une jupe ornée et d'un manteau drapé en biais, asymétrique et boutonné. Une large bande d'ornement suggère que la jeune femme était vêtue d'une jupe portefeuille, ce que confirme le fait qu'elle portait une ceinture visible entre les plis du manteau.

Quelles sont les couleurs conservées sur cette sculpture ? Le vert et le rouge sombres visibles aujourd'hui correspondent respectivement à des restes d'azurite (un minéral bleu composé de carbonate de cuivre) et de vermillon (poudre de cinabre, c'est-à-dire de sulfure de mercure). Le microscope révèle quelques endroits où il reste des pigments.

L'analyse en spectroscopie ultraviolets-visible réalisée en 2010 révèle en outre d'autres couleurs : sur le manteau de tout petits restes d'ocre jaune (une argile contenant de l'hydroxyde de fer), ainsi que des traces de malachite (un carbonate minéral anhydre de couleur verte) en plus du vermillon et de l'azurite trouvés dans les ornements. Les cheveux étaient rendus en brun-orange et le peau en abricot. Une restitution de la coré 675 est actuellement en cours de réalisation pour la galerie municipale de Francfort, la Maison Liebieg.

Ainsi, le cas de la coré 675 montre que l'adage « l'habit fait l'homme » avait déjà cours pendant l'Antiquité.



2. CETTE SCULPTURE FÉMININE DRAPÉE, la coré 675, est conservée au musée de l'Acropole d'Athènes. Quand elle fut mise au jour en 1896, elle était encore couverte de couleurs vives, que, par chance pour la restitution de la polychromie dans la Grèce antique, le peintre suisse Émile Gilliéron a fixées sur des aquarelles. Plus de 115 ans plus tard, le vermillon originel a noirci au contact de l'air, et l'azurite s'est décolorée. Cette statue fut enterrée assez vite après sa réalisation ; c'est pourquoi ses couleurs ont été conservées durant des siècles.

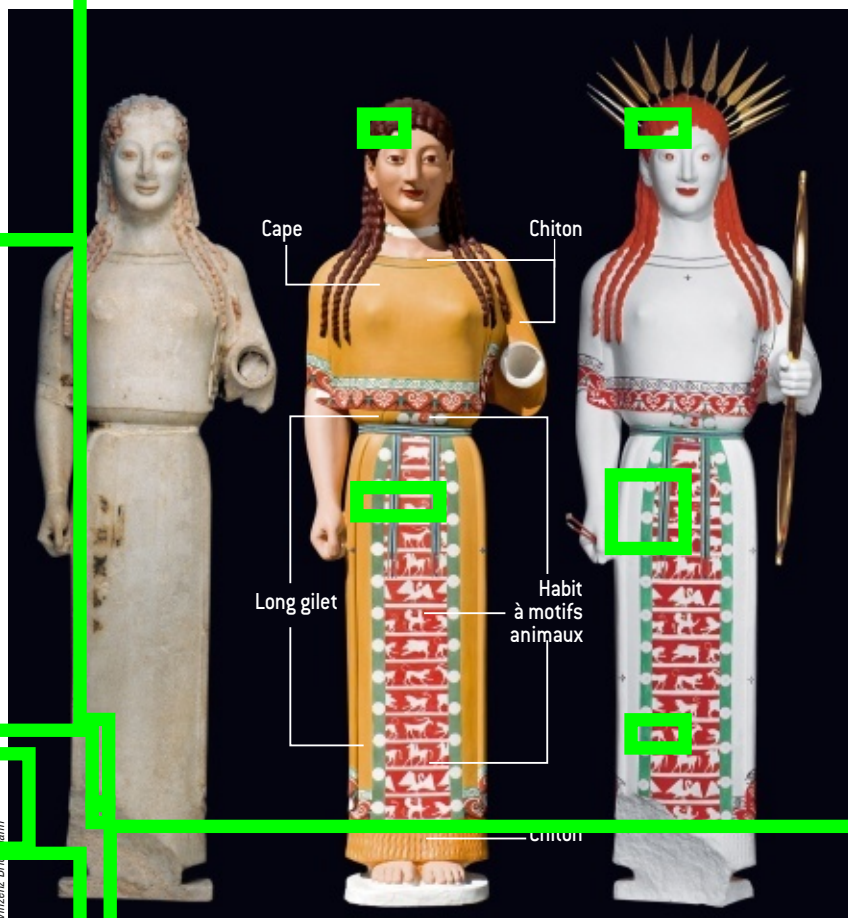
nes. La beauté et la richesse s'affichaient, et se gravèrent dans le marbre avec art. Un phénomène social que la sculpture de la jeune Phrasikleia illustre parfaitement. Une inscription nous apprend qu'elle est morte de façon tragique avant le mariage. Sa famille fit réaliser une sculpture grandeur nature pour décorer sa tombe, dont nous avons restitué les couleurs à l'issue d'une étude datant de 2010, obtenant là l'un de nos plus importants résultats.

Il s'avère que Phrasikleia fut représentée portant un habit rouge clair couvert de rosaces dorées ou argentées, et ourlé de motifs jaunes en U rehaussés de bords argentés (voir la figure 1). Elle portait sur la tête une couronne de fleurs et de bourgeons de lotus, tenant un tel bourgeon dans sa main. Des boucles d'oreilles, un collier et des brachlets complétaient cette luxueuse tenue. Pour peindre la statue de Phrasikleia, les artistes employèrent des feuilles d'or et imitèrent l'argent au moyen d'un alliage de plomb et de zinc. Des métaux que l'artiste à l'époque de Mycènes utilisait jusqu'à obtenir les feuilles, qu'il a ensuite collées sur le marbre.

Symbole de vie, symbole de mort

La riche vesture de la statue de Phrasikleia n'était pas uniquement destinée à mettre en valeur la beauté de la disparue. Ainsi, les rosettes qu'elle portait symbolisaient le ciel. Or, on voit, sur le devant, des roues solaires et, dans le dos, des étoiles d'or, dont la disposition reproduisait sans doute une constellation. Même si nous ne lisons plus ces symboles, nous devinons que l'habit de Phrasikleia racontait une histoire relative au cycle de la vie et de la mort. C'est du moins ce que suggère la présence de bourgeons de lotus ouverts et fermés, puisque dans l'Égypte antique, ils symbolisaient la vie et la mort.

L'étude scientifique des traces de couleurs conduit aussi à corriger des erreurs, comme dans le cas de la célèbre coré au péplos de l'Acropole d'Athènes (voir la figure 3). Cette statue semble être celle d'une jeune fille de bonne famille. Elle est toutefois habillée de façon bien plus simple que les autres corés, ne portant qu'un unique péplos. En 1982, son examen poussé sous éclairage oblique et ultravioleta révéla des détails de l'ornementation de ce péplos, qui ne correspondaient guère au style d'un vêtement simple, mais de celui d'une jeune fille



3. LA CORÉ AU PÉPLOS date d'environ 530 avant notre ère. Lors de sa découverte, cette représentation d'une jeune femme semblait n'être couverte que d'un habit modeste (à gauche), mais la restitution de sa mise en couleur allait révéler tout autre chose. L'examen de cette œuvre sous éclairage oblique révéla des motifs complexes ainsi que le fait que plusieurs vêtements avaient été représentés (au centre). Les trous présents sur sa tête et dans son poing suggérèrent la présence passée d'accessoires métalliques, de sorte que les auteurs en ont déduit que la coré au péplos était autre que la déesse Artémis (à droite) !

Il s'agit, d'une part, de représentations d'animaux et, d'autre part, de limites semblant séparer l'habit en plusieurs pièces, et qui n'apparaissent qu'en certains endroits. Ainsi, la jeune fille représentée porte un habit composé de représentations d'animaux au-dessus d'un chiton, qui n'a été représenté qu'au niveau des coudes et des chevilles ; par-dessus, elle portait un long gilet allant jusqu'aux chevilles et une pèlerine dont le dessin était coordonné. Un coup d'œil aux peintures réalisées sur des vases de cette époque explique cette façon si compliquée de se vêtir : le personnage représenté est une déesse et non une mortelle ! Cette conclusion éclaire la présence de trous sur le cou et la main gauche, où une flèche de bronze et une couronne de plumes de bronze avaient probablement été fixées. Dans la main droite qui n'a malheureusement pas été conservée se trouvait proba-

blement un arc, ce qui complétait cette représentation d'Artémis, la déesse de la chasse. Une étude réalisée en 2008 a révélé en plus des couleurs bleue, verte et rouge, des traces de jaune sur le gilet ainsi qu'un teint de visage ruivâtre. En outre, le rouge était composé de plusieurs pigments afin de rendre l'habit vivant et de mettre en valeur les larges bordures décorées du gilet et de la cape.

L'étude poussée de la coré au péplos nous a réservée une autre surprise : les décorations à base d'animaux de la partie supérieure de l'habit sont une allusion aux cultures voisines des Grecs en Orient, sans doute les Mèdes ou les Perses. Certes, les Anciens nous ont pas laissé de descriptions détaillées des motifs vestimentaires, mais l'expression générale qui prévaut est que si les ornements grecs étaient modestes, celles des habitants de l'Orient étaient extrêmement riches.

✓ BIBLIOGRAPHIE

V. Brinkmann et U. Koch-Brinkmann, *Der sog. « Paris » und der « Perserreiter » von der Athener Akropolis, « orientalische » Gewänder in der griechischen Skulptur zur Zeit der Perserkriege*, D. Graenicher (sous la direction de), *Bunte Götter, Ausstellung und Schauwerkstatt, Eine Einführung*, Universität Göttingen, 2011.

V. Brinkmann et A. Scholl, *Bunte Götter – Die Farbigkeit antiker Skulptur*, Catalogue de l'exposition Hirmer, Munich, 2010.
<http://www.hirmervverlag.de/controller.php?cmd=detail&titelnummer=2781>

V. Brinkmann, O. Primavesi, M. Hollein (sous la direction de), *The Polychromy of Antique and Medieval Sculpture*, Actes du colloque de la Maison Liebieg, Hirmer Verlag, München, 2010.

F. Perego, *Dictionnaire des matériaux du peintre*, Belin, 2009.

John Boardman, *La sculpture grecque archaïque*, Thames & Hudson, 1994.

Cet amour pour les étoffes orientales colorées et décorées est manifeste dans les représentations d'archers. Pour représenter les Amazones, les artistes grecs habillaient leurs personnages de pierre d'habits qu'ils connaissaient au moins depuis les guerres perses. Ces vêtements comprenaient des pantalons de toutes les couleurs que l'on nommait anaxyrides, des vestes à manches longues et des bonnets phrygiens. Un regard dans la chambre au trésor du musée de l'Ermitage à Saint-Petersbourg montre que les artistes grecs s'inspiraient de modèles vivants sans faire de distinctions bien nettes entre les ethnies.

À la fin des années 1940 et récemment, des archéologues russes et allemands ont découvert dans les montagnes de l'Altai (Russie-Chine-Mongolie) des courganes, c'est-à-dire des tombes sous tumulus de princes scythes. Or des Scythes vivaient aussi sur l'Immer Noire, donc au contact des Grecs anciens, et très loin de leurs cousins de l'Altai. Les très basses températures qui règnent sur les hauteurs montagneuses de l'Altai ont assuré une bonne conservation de la matière organique dans les tombes scythiques, et l'on a retrouvé plusieurs fragments de textiles. Ces précieux échantillons de tissus scythes portent des motifs à cinq couleurs, voire davantage, enrichis d'ornements à motifs géométriques (voir la figure 4), lesquels correspondent aux motifs que nous restituons sur certaines statues grecques.

Ainsi depuis le grand affrontement avec les Perses, les sculpteurs grecs se servaient de modèles orientaux pour représenter les personnages de *La guerre de Troie*,

fondateur de leur identité. Même si dans l'*Iliade* Homère décrit les Achéens et les Troyens sous des traits culturels similaires, les Grecs identifiaient à Achille et à ses compagnons, tandis qu'ils reliaient le royaume de Priam à leur ennemi héréditaire oriental. D'où la représentation d'un archer à genoux en habit de cavalier scythe sur le fronton du temple du sanctuaire de la déesse Aphaïa sur l'île d'Égine (où elle était vénérée). En le voyant, le visiteur identifiait immédiatement un Troyen. Dans les années 1980, à la Glyptothèque de Munich, les ornements de ses pantalons et de sa veste ont été observés, et le motif coloré de la tunique fut reconstitué.

L'Orient, vieux modèle

Une autre œuvre, l'archer monté de l'Acropole d'Athènes (voir la figure 4) nous a, depuis, donné l'occasion de restituer complètement un habit oriental antique. Cette représentation montre un cavalier (ou une cavalière) à cheval, qui n'est malheureusement conservé que jusqu'à la taille. Après notre étude, les pantalons ont été décorés avec des losanges bleus, rouges, verts, jaunes et bruns; la veste est ornée de feuilles allongées et cernée à sa base d'un galon fait de motifs verts imbriqués.

Le motif coloré de ce cavalier est si bien conservé qu'en réalisant 300 mesures au spectroscope ultraviolets-visible, nous avons pu en retrouver tous les détails. Il en ressort que la statue était très colorée, mais aussi que les couleurs variaient beaucoup dans une même pièce de vêtement. Ainsi, les jambes droite et gauche portent des combinaisons de couleurs différen-

ANALYSE CHIMIQUE DES COULEURS

Toute peinture laisse des traces, parce qu'elle protège le marbre de l'érosion par la pluie ou le vent. Comme certaines couleurs tiennent bien plus longtemps que d'autres, la disparition progressive des peintures crée une patine qui est dû à l'érosion. L'éclairage sous lumière oblique et ultraviolette permet de la rendre visible.

Par ailleurs, alors qu'il était nécessaire de prélever des échantillons de pigment pour déterminer la composition chimique d'une

peinture, l'analyse en fluorescence X et la spectroscopie ultraviolets-visible permettent sans prélèvement de matière. La première méthode consiste à identifier les rayonnements de fluorescence déformés par des rayons X et qui sont spécifiques des éléments chimiques. Elle est particulièrement adaptée à la mise en évidence d'éléments métal-

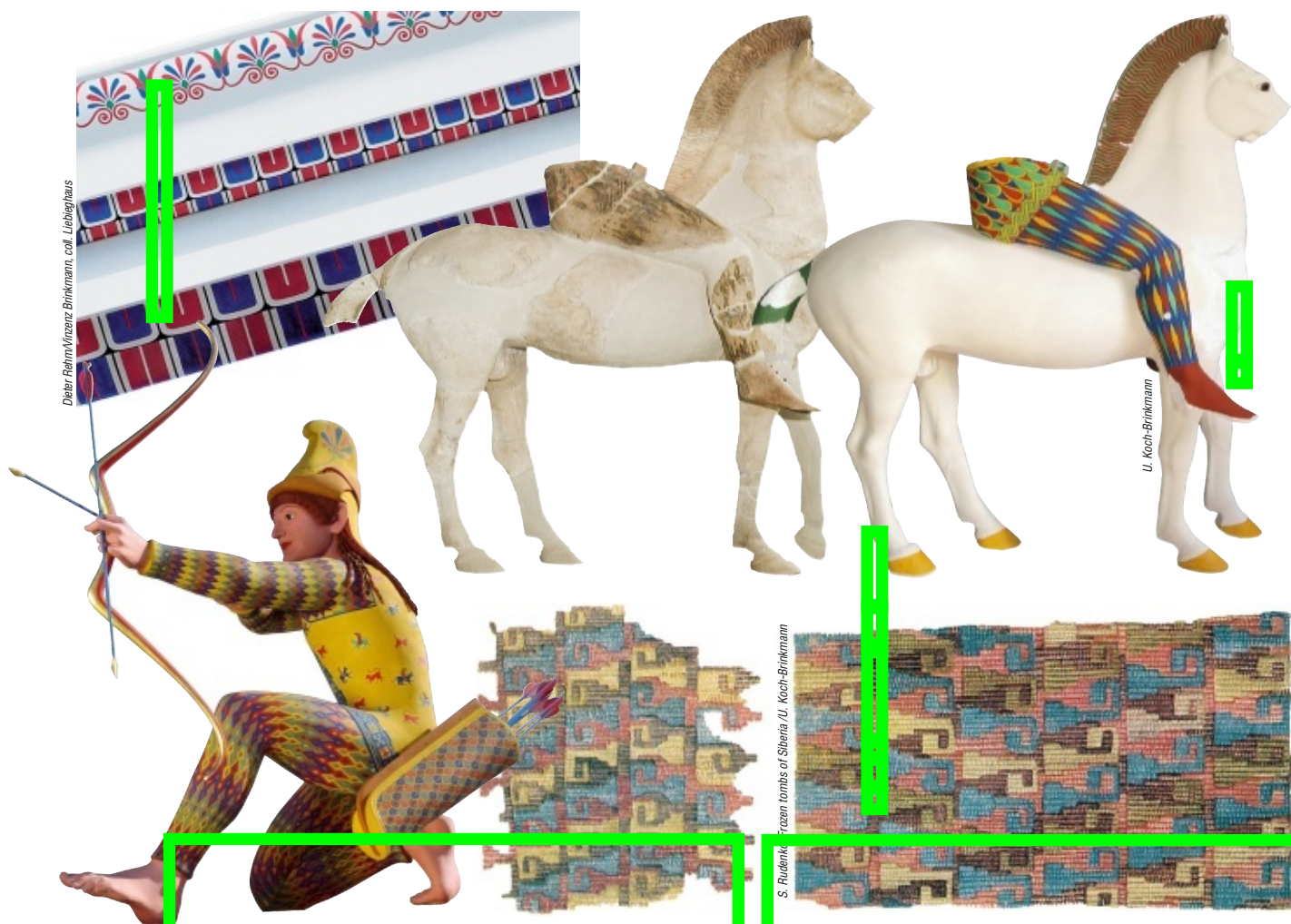
qui peuvent être facilement reconnus grâce à la proportion de matière qu'il contient.

Pour sa part, la spectroscopie ultraviolets-visible associe des pics d'absorption aux éléments chimiques. Elle est particulièrement adaptée à la reconnaissance des pigments minéraux et organiques. L'emploi de fibres optiques rend cette méthode facile à mettre en œuvre, sans le moindre contact avec l'œuvre analysée. Les appareillages néces-

types de mesures peuvent facilement être mis en œuvre dans les musées.



Vincent Brinkmann



Dieter Rehm/Vincent Brinkmann, coll. Liebieghaus

U. Koch-Brinkmann

Trojan tombs of Siberia / U. Koch-Brinkmann
S. Rudnik

4. L'ARCHER MONTÉ SCYTHE du fronton du temple de la déesse Aphaïa, sur l'île d'Égine, a manifestement porté des habits extrêmement colorés et ornés de motifs compliqués (à gauche). Les cavaliers scythes de l'armée perse qui envahit la Grèce servirent de modèle à l'artiste. En effet, des échantillons de tissus scythes réalisés exactement dans

le même style ont été retrouvés dans des tombes gelées, dans l'Altai sibérien (en bas à droite). Comme le montre aussi le cas de l'archer scythe de l'Acropole d'Athènes, le style des habits avait marqué les artistes grecs, qui les prirent pour modèle dans leurs représentations de la guerre de Troie.

tes. Pour renforcer l'effet, l'artiste a par exemple utilisé un ocre mêlé de pigment jaune (un minéral à base d'arsenic et de soufre) ou un ocre rouge d'une très intense garance. Et même le cheval était en couleurs : la croupe en rouge et vert, la queue en vert et la robe on jaune clair. Pour le cheval, les peintres grecs se sont toutefois contentés de couleurs plus pâles que celles utilisées pour les habits.

retrouvés sur l'Acropole révèle par exemple en manière oblique les paires de feuilles emboîtées pour orner l'habit sur les épaules et les hanches. Comme, d'après les modèles décorant les vases attiques, son équipement est par ailleurs parfaitement grec, nous estimons que l'ornementation de son chitoniskos correspondait aux pièces produites dans les ateliers textiles grecs.

Que conclure de tout cela ? Après plus de 10 ans de recherche sur la polychromie des statues antiques, nous avons pu tirer quelques conclusions récurrentes : chaque nouvelle étude apporte des résultats qui complètent les résultats déjà acquis. Les méthodes perfectionnées qui nous permettent aujourd'hui de révéler des couleurs bouleversent parfois notre compréhension des œuvres, même de celles qui semblaient « évidentes » ; enfin, il

est périlleux de tirer des règles générales des œuvres analysées, à moins de le faire avec la plus extrême prudence.

Pour autant, si nos résultats ont mis en évidence une riche polychromie dans la Grèce antique, il ne faut pas non plus passer d'un extrême à l'autre. N'oublions pas que des habits simples et (plus ou moins) blancs existaient aussi. Ainsi, on lit dans certains textes du sanctuaire d'Artémis sur l'Acropole que l'on consacrait à la déesse des habits colorés, mais aussi des habits blancs. En 2010, nous l'avons confirmé : sur le fronton ouest du Parthénon (aujourd'hui au musée de l'Acropole), le chiton de Pandrose, l'une des trois filles de Cécrops, roi d'Athènes, avait été peint avec du kaolin (un calcaire fin et très blanc). Toutefois, l'un des peintres souligna les contours de la robe avec des traits de couleur noire...

L'âge classique fut-il multicolore ?

Dans l'Antiquité grecque, les Perses (ou les Troyens) n'étaient pas les seuls à avoir des habits colorés. Le sous-vêtement coloré (chitoniskos) que portaient les guerriers grecs sous l'armure était souvent décoré de motifs.

Les dieux rouges de Mésopotamie

En Mésopotamie, les statues votives en terre cuite et en pierre étaient, semble-t-il, peintes au moment de leur réalisation. Le rouge, le noir et le blanc auraient dominé.

Astrid Munn et Rupert Gebhard

Ex Oriente lux ! La lumière vient d'Orient. Bien avant que les princes mycéniens ne descendent de leurs forteresses pour conquérir la Grèce, l'art et la ville se développaient déjà le long du Nil, de l'Euphrate et du Tigre. Les marchands et les diplomates firent connaître les avancées dans tout l'Orient méditerranéen, et le monde grec en fut influencé jusqu'à l'époque classique. S'il est aujourd'hui indiscutable que les Grecs anciens possédaient leurs statues de cou-

leurs vives, eurent-ils des précurseurs, voire des modèles orientaux ? C'est précisément cette question que nous aborderons ici. Aucun spécialiste de l'Orient ancien ne doute que les Sumériens, les Babyloniens et les Assyriens enrichissaient de couleurs leurs représentations des dieux. Du reste, même un examen superficiel suffit à révéler des traces de couleurs sur de nombreuses œuvres. Le rouge et le noir, en particulier, sont très fréquents. Déjà au VII^e millénaire avant notre ère, des lignes dans ces couleurs étaient tracées pour sou-

igner les traits du visage, seins, vulve, bijoux, parfois sur des figurines, féminines dans la plupart des cas. Et au plus tard à partir du VI^e millénaire, les représentations de femmes (le plus souvent) sont dotées d'yeux réalisés à partir de pierres noires ou de coquillages blancs.

À l'avènement des premiers rois, vers 2800 avant notre ère, les raisons de réaliser des statues se multiplient. Les hommes et les femmes de l'élite entourant le roi ont désormais le droit de donner en offrande à la divinité une statue d'eux-mêmes. C'est pourquoi la période des dynasties archaïques – soit plus de



1. CETTE STATUE D'UN DIEU BABYLONIEN en argile crue fut probablement une offrande votive réalisée et peinte de la façon la plus réaliste possible, afin de favoriser les bienfaits de la divinité représentée.

500 ans – nous a laissé plus de 600 de ces statues votives, qui, presque toutes, sont en pierre. S’y ajoutent de nombreuses terres cuites issues du domaine privé. Aux époques suivantes, les princes reprirent à leur noblesse le privilège d’offrir des statues votives pour se le réserver, de sorte qu’à partir de 2100 avant notre ère, il n’y a plus guère de statuettes de personnes.

Dans le Sud de la Mésopotamie, la pierre était plus rare que la glaise et plus coûteuse. C’est là une circonstance avantageuse pour la recherche sur la polychromie mésopotamienne, car la couleur subsiste très mal sur la pierre, mais plutôt bien sur la terre cuite. Les raisons à cela sont diverses : les couleurs adhèrent bien sur la surface poreuse de l’argile cuite, et les statues en terre cuite étaient utilisées moins longtemps, et donc plus vite enterrées à l’abri de l’humidité et de ce qui pouvait les endommager.

Plus de couleurs, plus de valeur

Un remarquable exemple de bonne conservation de la couleur sur terre cuite se trouve aujourd’hui au *British Museum* de Londres : *Le Dieu d’Our* (voir la figure 1). Cette statue en terre cuite date d’environ 1800 avant notre ère. Apparue dans la seconde moitié du III^e millénaire avant notre ère, la ville d’Our appartenait au royaume constitué par la première dynastie de Babylone. La statue, qui représente un dieu non identifié du panthéon akkadien, fut réalisée de la façon la plus réaliste possible : tandis que la peau et les lèvres furent peintes en rouge, les cheveux, la barbe et les yeux étaient noirs, ainsi que le dossier de la chaise. Le personnage représenté portait en outre une couronne en cornes de bœufs peintes en jaune et un collier de perles jaunes et rouges.

Il existe peu d’œuvres aussi bien conservées, mais pour les spécialistes du Proche-Orient ancien, *Le Dieu d’Our* est représentatif de la façon dont on peignait les statuettes votives. En effet, le surcoût et les efforts réalisés pour peindre une figure votive augmentaient sa valeur, et par là les bonnes dispositions de la divinité représentée. L’enjeu était d’autant plus important s’il s’agissait d’une figure représentant le roi.

Pour autant, comment s’y prenait-on avec les statues de pierre ? La roche a une beauté propre. Pourqu’elles, dès lors, l’ont-elles perdue ? En Mésopotamie ancienne, la diorite et les gabbros, deux roches d’origine magmatique, jouaient le rôle du marbre chez les Grecs de l’âge classique. Les Mésopotamiens les désignaient sous le terme technique de « pierre noire ». Il semble que vers 2350 avant notre ère, le roi de Lagash en Mésopotamie du Sud fut le premier à employer. Il fondait ainsi une tradition qui dura jusque vers 1400 avant notre ère. La pierre noire n’existait pas dans le pays de Sumer, il fallait l’importer. C’est ainsi que vers 2050, le roi Gudea de Lagash mentionne non sans fierté en important de Magan, l’île actuelle d’Oman. Parce qu’elle est extrêmement dure à travailler et à polir, la pierre noire exige des savoir-faire particuliers.

Notre équipe de l’Université de Würzburg et des Collections archéologiques de Munich vient de lancer l’étude des couleurs sur les statues du Proche-Orient ancien par les méthodes actuelles. L’idée de retrouver de peinture une pierre merveilleusement polie paraît étrange, mais le travail de Ulrike et Vinzenz Brinkmann (voir page 22) montre, dans le cas des Grecs, que l’esthétique des Anciens était différente de la nôtre. Ainsi, s’ils appréciaient le marbre, peut-être était-ce parce qu’ils pouvaient le peindre sans préparation particulière. Le calcaire ordinaire est plus rugueux que le marbre poli, de sorte que pour le peindre, il faut l’apprêter en y déposant une couche lisse à base de chaux ou de plâtre. On ne sait pas si les statues étaient aussi bien que le polissage rendaient la peinture brillante.

Des statues trop bien nettoyées

Dès lors, peut-on savoir si les statues de Gudea étaient peintes ? À l’œil nu, aucun reste de peinture n’y est visible, mais cela résulte peut-être de la façon dont on a traité les statues après leur découverte. Quand, à la fin du XIX^e siècle, ces objets furent mis au jour, on appréciait la pierre nue. On ne peut donc exclure que certaines pièces aient été « nettoyées » avant leur transport vers l’Europe. Si tel est le cas, les traces de couleur ont disparu.

Toutefois, l’examen des statues à la loupe binoculaire en lumière directe ou ultraviolette livre des indices sur l’éventuelle utilisation de peintures et sur la préparation de la surface. Il apparaît ainsi que, même quand les couches de couleurs ont

LES AUTEURS



Astrid NOLL, archéologue, est professeur d’archéologie du Proche-Orient ancien à l’Université de Würzburg en Allemagne. Rupert GEBHARD dirige les Collections archéologiques de l’État de Bavière.

L’ESSENTIEL

✓ Des restes de couleurs se sont très bien conservés sur les statues votives en terre cuite du Proche-Orient ancien.

✓ Il semble que la « pierre noire » que l’on importait en Mésopotamie pour réaliser des statues était peinte aussi.

✓ Les couleurs découvertes sur les statues sont difficiles à relier aux termes qui désignent les couleurs dans les textes, ce qui suggère que les Anciens avaient une perception des couleurs différente de la nôtre.

disparu, leur présence a modifié l'érosion de la surface. L'examen au microscope aide aussi à distinguer les restes de colle, les patines anciennes, les restes de couleur et les artefacts liés à la restauration.

Les objets que nous avons ainsi étudiés se situent entre 2300 et 800 avant notre ère et proviennent des collections du Musée du Proche-Orient ancien de Berlin. En les étudiant, nous avons par exemple découvert que le foulard sculpté sur une petite tête féminine provenant de la ville d'Assur fut peint en noir. Dans une autre œuvre, la représentation de la barbe révélait encore des taches noires visi-

bles à l'œil nu (voir la figure 2); il s'agit probablement de bitume, c'est-à-dire de goudron naturel.

Comme cette tache se trouvait en partie sous la couche minérale formée dans la terre au cours des millénaires, elle est très probablement d'origine. On en déduit que le commanditaire de la statue portait très certainement une barbe.

Barbe et bitume

Là s'arrêtent nos premières constatations. Même s'il ne s'agit à ce stade que d'une hypothèse de travail, l'idée que la polychromie grecque fut précédée et annoncée par une polychromie orientale, sans doute éphémère, n'est pas contredite par les premiers faits que nous avons rassemblés. Les textes cunéiformes peuvent-ils nous en dire plus ?

Non, car les tablettes d'argile ne nous renseignent que de façon ambiguë sur la façon dont les Mésopotamiens pensaient la couleur. Ainsi, quand nous essayons d'associer des objets (noirs, blancs, rouges, bleus et verts) au vocabulaire correspondant, nous sommes confrontés à des contradictions. *Uqnu*, par exemple, est le mot sumérien désignant le lapis-lazuli, c'est-à-dire une roche bleu profond. Quand le mot est employé comme une couleur, nous sommes tentés de le rendre par « bleu foncé ». Toutefois, céder à cette tentation pourrait se révéler trompeur, puisque *uqnu* désignait aussi un type de tissu ou encore un champ. Diverses sortes de plantes étaient désignées par le terme de *wuru*,

UN CAS AVÉRÉ DE POLYCHROMIE ÉGYPTIENNE

En 1801, au cours d'un voyage en Italie, le futur Louis I^{er} de Bavière tombe amoureux de l'Antiquité. Pendant les années qui suivent, il achète de nombreuses œuvres, notamment au sein de la collection Barberini. Ces statues comptent aujourd'hui parmi les trésors des musées de Munich. Parmi elles, l'*Osiris* de Munich est représentée pratiquement en grandeur nature d'un dieu à tête de faucon (voir ci-contre).

Probablement importée à Rome dans l'Antiquité, cette statue y fut mise au jour en 1636, là où se trouvait l'Iséum Campense, le sanctuaire de la déesse égyptienne Isis. Les érudits du XVIII^e siècle pensèrent qu'il s'agissait là d'une représentation du conjoint d'Isis, le maître du royaume des morts, Osiris.

Cependant, aucune représentation d'Osiris avec une tête d'oiseau n'est connue dans tout l'art égyptien; la statue de Munich ne peut donc pas représenter une autre divinité. Le style et le langage corporel du dieu à tête de faucon prouvent que la statue date du règne du roi Aménophis III (XVIII^e dynastie, 1388-1350), le père d'Akhénaton. Le même Aménophis a été représenté sur certains reliefs, sous la forme du dieu Harendotès. La statue munichoise peut donc être identifiée à celle du roi assimilé à Harendotès.

Or, en 2000 et 2001, nous avons découvert avec surprise que le socle et les pieds ne faisaient pas partie de la statue. L'origine : les Romains les avaient probablement ajoutés avant de placer la statue à l'Iséum Campense. Mais le plus surprenant fut qu'il y avait des traces de la peinture d'origine se trouvant encore sur la statue. Nous ne nous y attendions pas, car la surface lisse de la diorite ne se prête pas à la mise en couleur. En outre, une différence se manifestait entre la surface ultra-polie du corps et les parties plus rugueuses des yeux, de la coiffe, du col et du pagne; la surface des bracelets était aussi lisse.

Ocre rouge

Dans les microcreux de cette surface grossièrement polie se trouvaient des traces d'un gris blanchâtre, probablement un reste du premier maillage de couleur de la statue. La comparaison avec d'autres statues égyptiennes nous fit conclure que la polychromie des ornements et les bijoux avaient été recouverts d'une couche de peinture.

Avec un microscope électronique à balayage, Andreas Burmescher et moi-même avons pu constater que les bijoux et les ornements étaient recouverts d'une couche de peinture d'ocre rouge.

face en appliquant le processus dit de l'analyse dispersive en énergie, et ont ainsi décelé la présence de calcédoine. Toutefois, la cristallisation limitée de ce minéral fit penser qu'il s'était formé dans la terre après l'enfouissement de la statue.

L'étude d'échantillons provenant de microcreux du pilier dorsal et des pieds du pagne atteste par ailleurs de la présence de restes de brun et d'ocre rouge. Ces couleurs sont très rares pour rendre possible une détermination complète de la polychromie.

Les résultats de l'étude de la coiffe sont en revanche plus fiables : la présence d'ocre rouge en grande quantité est avérée; sans doute recouverte du bord inférieur de la coiffe. Il est peu vraisemblable que toute la statue, ou même la peau, ait été peinte dans l'Antiquité, mais cela ne peut être complètement exclu. Pour que l'on puisse mieux s'imaginer à quoi ressemblait peut-être la statue, nous avons réalisé deux reconstructions différentes à l'échelle de la statue, dont la polychromie est inspirée des couleurs murales courantes à l'époque d'Aménophis III. La coiffe, par exemple, était bleue, puisque telle était la couleur privilégiée pour rendre les « cheveux » des dieux.

Alfred Grimm,
Musée d'art égyptien
de Munich



vert, mais servait aussi à nommer la laine, l'or, les étoiles, les nuages, l'eau d'un canal, la peau, la chair et même des parties du foie... Les termes sumériens et akkadiens de couleur désignent ainsi manifestement plutôt des catégories abstraites que les couleurs telles que nous les comprenons. Même le célèbre bleu des carreaux de la Porte d'Ishtar n'a pu être relié à aucun des termes trouvés sur les tablettes cunéiformes. Manifestement les Babyloniens ne faisaient pas de différence entre le bleu et le vert, mais plutôt entre le bleu foncé et le bleu clair.

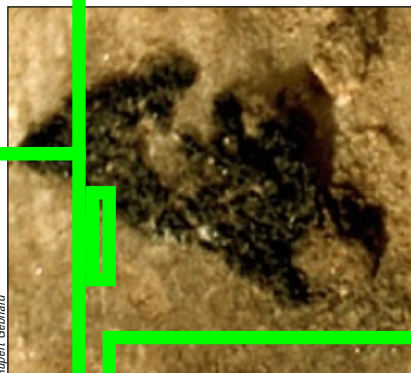
Il ne s'agit pas là d'une difficulté propre aux spécialistes du Proche-Orient ancien : les traducteurs de grec ou de latin anciens ont les mêmes difficultés. Les notions de rouge, de noir et de blanc dominent en effet dans les textes anciens – les textes mésopotamiens ne faisant pas exception. À tel point que les spécialistes de la traduction se sont même demandé un moment si les Anciens étaient à même de percevoir le bleu ou bien s'ils n'avaient tout simplement pas de mots pour le nommer. Pareille interrogation peut étonner, mais nous savons aujourd'hui que la perception rétinienne et le traitement neuronal associé ne sont pas les seuls phénomènes qui déterminent la perception des couleurs. Celle-ci est aussi un processus social.

La symbolique des couleurs

Pendant des siècles, le noir (l'absence de couleurs) et le blanc (le mélange de toutes les couleurs) ont par exemple été considérés comme des couleurs à part entière, mais ne le sont plus aujourd'hui après qu'en 1666 qu'Isaac Newton a décomposé la lumière blanche en la somme de toutes les couleurs de l'arc-en-ciel. Percevoir signifie catégoriser et nommer, deux processus qui se pratiquaient autrement dans l'Antiquité. C'est ainsi que notre bleu et notre vert ne se suivent que dans le cadre d'une règle fixée dans la langue. Ce que nous voyons aujourd'hui comme du bleu était plutôt dans l'Antiquité un état intermédiaire que comme une couleur à part entière.

Le rouge, le blanc et le noir peuvent être considérés comme des couleurs de référence de l'humanité. De fait, elles apparaissent déjà dans cet ordre dans les peintures pariétales. Le rouge était aux époques préhistoriques une couleur essentielle.

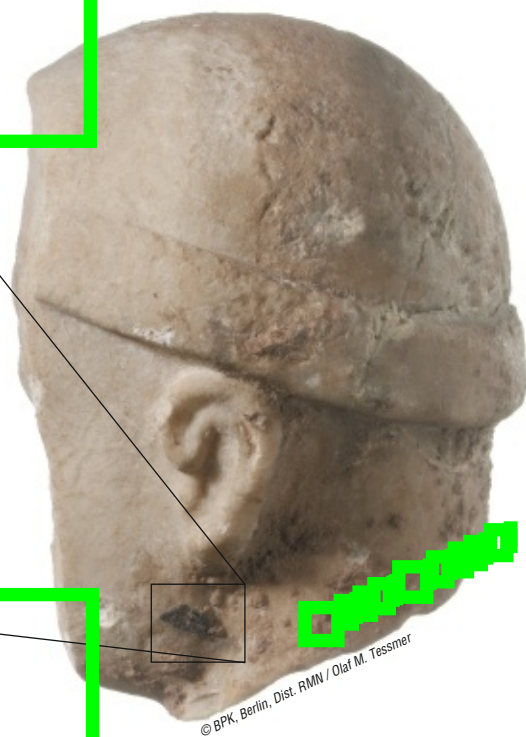
2. LA TACHE DE BITUME visible sous l'oreille gauche de cette tête de statue (2100 avant notre ère) provenant de la ville d'Assur est ce qui reste d'une couche de goudron employée pour teindre en noir foncé la représentation de la barbe.



quand il s'agissait de mort ou de vie, et à cet égard le Proche-Orient n'a pas fait exception. Certes, ces couleurs étaient aussi plus faciles à obtenir, mais il est vraisemblable qu'elles portaient une plus grande charge symbolique. Et puis, un dieu ou un roi pouvait fort bien être représenté de façon très vivante dans l'argile ou la pierre à partir de ces trois couleurs.

Une inscription vers 1000 avant notre ère illustre quel point la symbolique des couleurs jouait un rôle important au Proche-Orient ancien : il décrit le rituel du culte entourant la statue du dieu babylonien Mardouk. Quand les prêtres lui demandaient une prophétie, le dieu répondait en changeant la couleur du visage de la statue. Si elle lui tournait au rouge, c'était bon signe et promesse de richesse. Un visage qui noircissait annonçait une éclipse ou un présage des plus terribles. Les autres couleurs étaient aussi annonciatrices de malheur : le blanc annonçait la famine et le vert une défaite militaire.

Que le noir ait symbolisé l'obscurité et par là une éclipse, et que le rouge, qui peut être associé aux couleurs d'un visage en pleine santé ait eu un sens positif, n'est pas étonnant. De même pour le vert, négatif, qui aurait été associé à la couleur du visage d'un malade. Toutefois, le fait que le blanc ait aujourd'hui symbole de paix, soit le présage d'une famine reste énigmatique. Mais il nous est difficile aujourd'hui de ne pas considérer le Proche-Orient ancien à travers nos lunettes modernes. Beaucoup des conceptions de ce monde passé furent autres, d'une façon que nous ne savons pas restituer aujourd'hui.



© BPK, Berlin, Dist. RMN / Olaf M. Tessmer

✓ BIBLIOGRAPHIE

A. Nunn, *Farben und Farbbildung auf mesopotamischen Statuetten*, in *Kultur und Gesellschaft Syrien*, p. 427, Ugarit Verlag, Münster, 2010.

M. Pastourneau, *Couleurs, images, symboles. Études d'histoire et d'anthropologie*, Le Léopard d'or, p. 292, Paris, 1989.

P. Amiet, *Éléments émaillés du décor architectural néo-élamite*, *Syria*, vol. 44, pp. 27-46, 1967.

Bleu et or : des couleurs de roi

Les premiers visiteurs européens de Persépolis en rapportèrent le souvenir de ruines austères, d'importantes statues et de bas-reliefs sculptés dans la pierre nue. Or ces œuvres étaient en fait couvertes d'or, de bleu égyptien et de couleurs vives, voire criardes...

Alexander Nave

L'ESSENTIEL

- ✓ Les premiers Occidentaux s'étant rendus à Persépolis, il y a quelque 400 ans, avaient témoigné de la présence de traces de bleu dans les ruines du palais.
- ✓ Les fouilles révélèrent ensuite des bas-reliefs peints, des stucs et des briques émaillées de couleurs vives.
- ✓ Les recherches menées depuis 2006 ont mis en évidence de nombreux éléments produisant des teintes bleue, rouge, verte, jaune et...

Que l'impression étrange leur produisait », s'exclame Ernst Herzfeld. Nous sommes en 1931, et l'archéologue allemand vient de mettre au jour un bas-relief multicolore à Persépolis. Il est rehaussé de couleurs vives, qui surprennent Herzfeld. Persépolis – Parsa en vieux perse – est le nom grec d'un imposant quartier palatial achéménide à quelque 70 kilomètres au Nord-Est de la ville de Shiraz, dans la province de Fars en Iran. Entre 520 et 330 avant notre ère, la dynastie des Achéménides l'utilisa ainsi que d'autres résidences royales à Pasargades, Suse, Ecbatane ou encore Babylone. Partant des découvertes de Herzfeld pour en arriver aux nôtres, nous allons montrer que les cités royales perses étaient hautes en couleurs !

Enseignant à l'Université de Berlin, Herzfeld fut le premier professeur jamais nommé pour enseigner l'archéologie du Proche et du Moyen-Orient. Il fut aussi le premier archéologue à fouiller systématiquement Persépolis. Voici comment, dans une lettre de 1932, il témoignait de la façon dont il s'était rendu compte de la polychromie des statues et des bas-reliefs de

Parsa. « J'aurais presque oublié qu'hier la partie inférieure du bas-relief du Grand Roi sous son parasol est apparue au jour dans ses splendides couleurs d'origine. La couleur la plus intense est le rouge clair et brillant constituant le fond de l'habit et des chaussures ; l'effet produit n'est pas celui du cinabre, mais tire quelque peu vers l'orange. Je m'imagine qu'un tel pourpre existait dans l'Antiquité – il est proche du rouge des robes des cardinaux. D'après les restes de couleur qui se trouvent sur les sculptures enterrées, je croyais que les bas-reliefs avaient pour l'essentiel la couleur naturelle de la pierre polie, c'est-à-dire, rose, et que seulement quelques parties des bijoux, les ailes, les lèvres, les yeux, avaient été soulignées avec du rouge, du bleu clair, du vert et du jaune. Maintenant, selon toutes les apparences, ils auraient été en fait entièrement peints, de couleurs brillantes et contrastées. »

Herzfeld était alors en train d'étudier non seulement des ruines de Persépolis, mais aussi la nécropole des rois achéménides, située non loin de Parsa sur le lieu-dit de Naqsh-e Rostam. Si les couleurs vives des bas-reliefs d'Échmatar, dans



© Universität Bibliothek Heidelberg aus: Charles Texier, Description de l'Arménie, la Perse et la Mésopotamie, Paris 1852



1. LE GRAND ROI SOUS LE PARASOL

(ci-contre) est un célèbre bas-relief ornant l'une des portes de Persépolis. Il représente Darius I signalé par le symbole divin le surmontant. Il marche suivi d'un porte-ombrelle et d'un préposé aux mouchoirs et à la sueur royale. Dès 1852, l'archéologue français Charles Texier en proposa une restitution en couleurs *(ci-dessus)*, qui atteste de la richesse chromatique des habits et des objets perses.

L'AUTEUR



Alexander NAGEL, archéologue, est le conservateur des collections proche-orientales et égyptiennes de la Galerie d'art Freer et Sacker du Musée Smithsonian de Washington.

doute était-ce parce qu'il gardait de sa première visite du complexe palatial, en 1905, l'impression sombre créée par le calcaire gris-brun des bas-reliefs montrant comment le roi recevait le tribut des pays soumis et où les portes étaient gardées par de colossaux taureaux ailés. L'action des éléments – ainsi que l'usure due aux mou-
lages répétés pour produire des plâtres à partir des œuvres ont effacé depuis bien longtemps les couleurs des peintures.

Dans les ruines de Pasargades (la capitale de Cyrus II), Suse (autre capitale des Achéménides) et Persépolis, les restes de grandes salles à colonnades des palais attestent du caractère monumental des résidences royales perses. Le complexe palatial de Persépolis, par exemple, fut érigé sur une terrasse de 450 mètres de large et 300 mètres de long et surélevée d'une douzaine de mètres. On accédait à la cité royale par un double escalier.

Tous les palais reflètent toujours la splendeur de l'empire que Cyrus II, le premier des Achéménides, constitua vers 550 avant notre ère à partir des royaumes d'Asie Mineure. Sous Darius I, qui régna entre 522 et 486, la puissance perse s'étendait de la Thrace et l'Égypte jusqu'aux portes de l'Inde et du golfe Persique jusqu'au Kazakhstan actuel. Les quelque 30 000 tablettes d'argile inscrites en cunéiforme et l'épigraphie montrent que l'Empire perse était fondé sur une infrastructure soigneusement pensée, notamment un réseau routier fort développé, qui facilitait communications et commerce au long cours jusqu'aux provinces les plus éloignées.

Au centre de l'empire se trouvaient le Grand Roi et sa suite – une cour multiculturelle, qui voyageait en permanence d'un palais à l'autre. Pour exister auprès de tous les peuples constituant l'empire, la cour voyageait entre les résidences de Suse, Pasargades, Écbatane, Babylone et Persépolis. Ces villes furent l'empire qui l'employait de parure et brutalement. 220 ans après la chute de l'empire sous les coups des hoplites et autres troupes d'Alexandre le Grand.

Les satrapes aussi

Des résidences royales achéménides, il nous reste beaucoup de ruines, dont certaines sont proprement perses (le territoire iranien). Les auteurs anciens qui ont écrit sur les Perses – le premier fut Hérodote au V^e siècle avant notre ère – rapportent que les satrapes (les gouverneurs provinciaux) faisaient construire leurs résidences dans le style pompeux des résidences royales. Toutefois, ni eux ni les sources perses ne décrivent précisément les palais achéménides. Divers érudits européens, dont les premiers atteignirent l'Iran il y a 400 ans, donnent des renseignements éloquentes sur les couleurs des palais et sur leur état lorsqu'ils les découvrirent.

Parmi eux, des Français et des Allemands disent avoir observé des restes de couleurs dans les creux des inscriptions murales en cunéiforme. Engelbert Kaempfer, un néo-locin allemand qui visita Persépolis en 1685, rapporte ainsi à propos de la grande inscription de Darius I, le fondateur de Persépolis. : « Certaines parties de

2. CES COLONNES DE 20 MÈTRES DE HAUT portaient le toit de l'Apadana, la grande salle des audiences de Darius I. Son palais était aussi doté d'imposantes portes, dont la Porte de toutes les nations, gardées par des taureaux géants. Le chapiteau était orné de deux griffons (ci-contre) ; l'un d'eux est situé sur un chapiteau à colonnes dans l'allée des processions.



Alexander Nagel

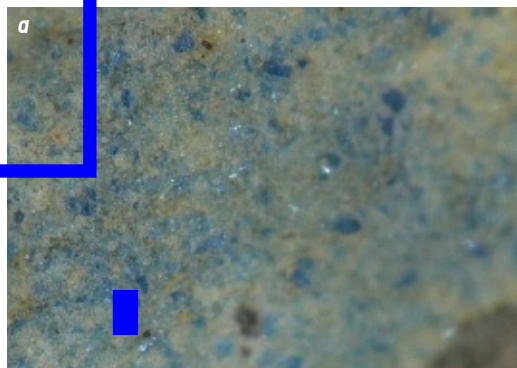
ces inscriptions sont comme colorées, comme si du métal s'y trouvait. » Une information sans aucun doute fiable puisque dans les années 1670, les Français André Daulier-Delalande et Jean Chardin signalaient aussi des restes de l'or apposé en son temps sur les reliefs de la pierre par apposition de feuilles du précieux métal.

Outre de l'or en feuille, les artisans perses employaient souvent un bleu profond lorsqu'ils réalisaient des peintures murales ou des statues. En 1829, l'Anglais James Buckingham fut le premier à noter que les « [...] statues de Persépolis étaient aussi peintes, tout particulièrement en un bleu, tel que celui qui est connu en Égypte ». C'est pourquoi, quand il se rendit à Persépolis en 1840, l'archéologue français Charles Texier se concentra sur les couleurs de l'architecture perse, se livrant, pour les préciser, même à des analyses chimiques.

Il avait ainsi noté la présence sur certains bas-reliefs d'une couche noirâtre oxydée, dont il préleva des échantillons, afin de les dissoudre avec de l'acide chlorhydrique. Après ajout d'ammoniaque (une base), il obtint une solution claire et bleue, dont il conclut qu'elle contenait des ions cuivriques (Cu^{2+}). Le pigment à l'origine de la couche noirâtre observée par Texier était donc riche en cuivre : elle semblait correspondre à du bleu égyptien, un silicate double de calcium et de cuivre, qui fut le premier pigment synthétique. De ces observations découlait que le fond de la sculpture

3. LE GRAND TAUREAU AILÉ (c)

est également peint. À l'aide d'un microscope, l'auteur recherche les traces de couleurs sur cette sculpture colossale de Persépolis. De fait, des traces de pigment bleu (a) se trouvaient sur certaines parties de la tête, et des traces d'un pigment rouge dans les narines (b).



Alexander Nagel



Du bleu égyptien

Texier a appliqué ses résultats à la restitution en couleur du bas-relief montrant le Grand Roi sous le parasol (voir la figure 1). Pour intéressante que soit cette interprétation, il ne faut pas perdre de vue qu'elle fut réalisée dans le style de ce qui se faisait alors dans les palais royaux assyriens de Ninive et Kalkhu, à Nimrod. Texier convenait que le bas-relief n'avait peut-être pas été totalement peint. Il ne lui avait pas échappé cependant que des restes d'ornements en métaux nobles se trouvaient encore dans des trous sur les sculptures. Les bas-reliefs ne resplendissaient donc pas seulement de leurs couleurs brillantes, mais aussi des couronnes et bracelets de métal qui accentuaient le caractère vivant que devaient avoir les représentations royales.



4. CES RESTES DE POTS DE PEINTURE ont été retrouvés enterrés au pied d'un bâtiment de Persépolis. Ils l'ont été probablement dans le cadre d'un rituel. Manifestement, le pot à l'origine de ces fragments contenait du bleu égyptien.

Plus de 40 ans plus tard, à Naqsh-e Rostam, le botaniste français Frédéric Houssay trouva une inscription cunéiforme portant des traces de couleurs sur la façade de la tombe de Darius I. Il expliqua : « Les inscriptions étaient cachées sous une couche de calcaire, que j'ai enlevée. Elles apparaissent alors : elles étaient d'un bleu intense. Je pense que c'est la première fois que des traces de couleurs dans des inscriptions cunéiformes gravées sont mises en évidence. »

Malgré ces évidences, les idées des érudits européens sur un empire achéménide sans couleurs n'avaient pas changé. Le tour du monde produit avec le travail de Marcel et de Jane Dieulafoy, qui exploraient le Proche-Orient avec Houssay. Dans les années 1890, ils conduisirent des fouilles à Suse et découvrirent des bas-reliefs en brique émaillée colorées (voir la figure 6). Dès 1899, ils présentèrent à l'Exposition universelle de Paris des reproductions de cette faïence multicolore, qui déclenchèrent une grande fascination du public pour ce monde perse tout à coup multicolore et brillant. Le couple Dieulafoy étudia en détail les couleurs des palais achéménides et souigna qu'elles constituaient un élément central de la culture perse. Les briques de céramiques colorées étaient l'une des traditions de l'artisanat babylonien. Ainsi, la célèbre porte d'Ishtar, l'une des portes de Babylone, fut construite avec les mêmes briques émaillées bleues durant deux générations, avant la fondation de l'Empire achéménide.

Au début du XX^e siècle, nombre de bas-reliefs perses parvinrent dans divers musées du monde entier, et leurs moulages dans les collections privées. Tout cela renforça une fois de plus la représentation que l'on se faisait de résidences royales perses sans couleurs. Ce n'est que dans les années 1920 que Herzfeld attira l'attention sur la polychromie des palais royaux achéménides, qu'il avait redécouverte. Il signalait dans ses notes les plus petits des restes de couleur. « Traces d'ocre sur l'ourlet de l'habit », notait-il par exemple au dos de la photographie d'un bas-relief représentant un manteau royal. Dans son journal, figure aussi la restitution en couleurs de l'homme ailé représentant probablement une divinité importante des Achéménides, qui apparaît sur beaucoup des bas-reliefs de Persépolis (voir la figure 1).

Lorsqu'il mit au jour le palais de Pasargades, Herzfeld découvrit aussi des restes de moulures comportant des peintures ornementales. Elles ornaient les colonnes et les murs de brique d'argile du palais dont seules les fondations de pierre sont encore visibles aujourd'hui. Les restes de pigments et de dorures, les trous d'ancrage d'ornements de métal, ainsi que les fragments de briques émaillées et de peintures murales suggèrent que les palais achéménides étaient couverts de couleurs, qui nous paraissent aujourd'hui bien trop vives.

Après Herzfeld, l'historienne de l'art Judith Lerner, de l'Université Harvard,



5. SUR LA TOMBE DE DARIUS I à Naqsh-e Rostam, la nécropole royale associée à Persépolis, tant la bouche et la barbe de la sculpture du Grand Roi que les creux des inscriptions cunéiformes ont conservé jusqu'à aujourd'hui des traces de bleu égyptien.

et le couple de chercheurs italiens Giuseppe et Ann Britt Tilia, de l'Institut italien pour le Moyen- et le Proche-Orient à Rome, s'occupèrent aussi de la restauration des monuments, assurant la conservation des traces de peinture résiduelles.

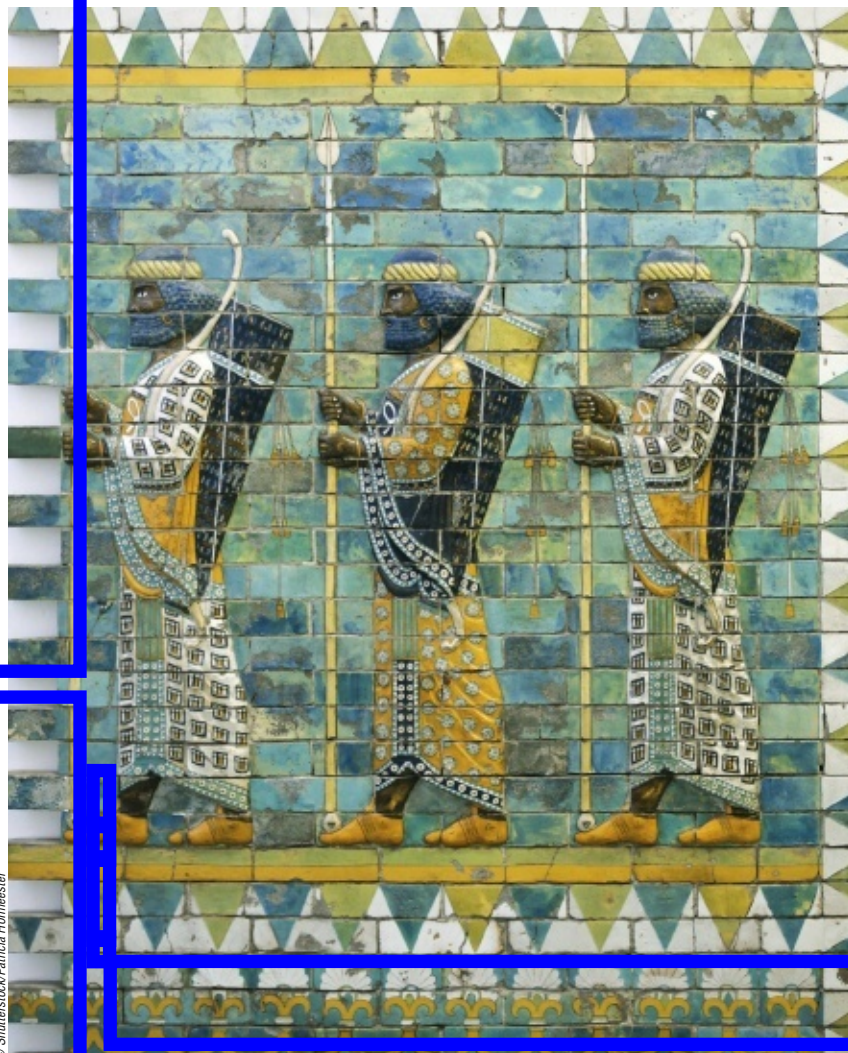
Depuis 2006, les restes pigmentaires de Persépolis sont systématiquement répertoriés et analysés à l'aide d'un microscope numérique de haute précision, capable de livrer une image de la surface de la pierre grossie 1 000 fois. Les traces de couleurs sont retrouvées aux endroits qui ont été protégés des éléments. C'est ainsi que la façade de la tombe de Darius I à Naqsh-e Rostam a livré de nombreuses traces de couleurs : du noir sur la ligne des sourcils du roi, du rouge sur les lèvres et sur le globe oculaire, du bleu sur la barbe et les cheveux (voir la figure 5). Sur les bas-reliefs de Persépolis, on remarque certaines surfaces que les sculpteurs ont polies et lissées pour que les couleurs déposées par les peintres y adhèrent bien.

Couleurs exportées

Contrairement aux sculptures restées sur place, celles qui sont parvenues dans les musées européens et américains ne présentent pratiquement plus aucune trace de couleurs. Une monumentale tête de taureau restée à Persépolis en porte en plusieurs endroits, alors que son vis-à-vis mis au jour à la même époque et livré en 1935 à l'Institut d'Orient de Chicago n'en a plus. Le sculpteur italien Donato Banti fut en effet chargé d'un nettoyage de la surface, qui fit disparaître tous les restes de couleurs.

Des résidus de ces restes furent cependant conservés en un lieu inattendu : sur les calques épigraphiques que l'on préleva alors sur les œuvres. Ces feuilles de papier que l'on mouille et presse à la brosse sur une œuvre à relever en conservant la forme en négatif une fois sèches. Au XIX^e siècle, de nombreux visiteurs prenaient des calques des inscriptions, qui de retour en Europe servaient au déchiffrement des textes perses. La plus grande collection de tels calques se trouve aujourd'hui dans les archives Herzfeld de l'Institut Smithsonian à Washington. L'examen au microscope révèle la présence de particules de pigment bleu collées aux calques.

L'analyse microscopique de ces pigments qu'on trouve dans les calques a permis



6. CE BAS-RELIEF EN TUILES ÉMAILLÉES provenant du palais de Suse montre sans doute deux gardes du corps du grand roi. Puisque leurs couleurs sont intactes, elles nous offrent probablement une impression véridique de l'ambiance haute en couleurs qui caractérisait l'art achéménide.

tut Smithsonian montre qu'il s'agit de bleu d'Égypte, point que Texier avait déjà établi au XIX^e siècle à la faveur de ses expériences. Les recherches récentes nous ont appris que dès le III^e millénaire avant notre ère, on synthétisait du bleu égyptien au Proche-Orient à partir de cuivre, de silice, de soude et de calcaire. En outre, nous parvenons pour la première fois à nous imaginer comment les peintres de Persépolis opéraient. En effet, depuis une centaine d'années, les archéologues ont découvert de nombreux pots de peinture en terre cuite enterrés au pied des bâtiments tout juste terminés, sans doute dans le cadre d'un rituel (voir la figure 6). Les couleurs du bâtiment étaient manifestement un aspect assez important pour qu'on demande pour elles la protection divine...

✓ BIBLIOGRAPHIE

B. Valeur, *Le bleu dans tous ses éclats*, Belin, coll. Bibliothèque scientifique, à paraître.

Alexander Nagel, *Achromatic Environments in the Ancient Near East, New Research on the Colors of Achaemenid Persopolis*, communication au 110^e colloque de l'Institut archéologique d'Amérique, 2009.

Pierre Briant, *Histoire de l'Empire perse, de Cyrus à Alexandre*, Fayard, 1986.

Archives des articles de Ernst Herzfeld à la Galerie d'art Freer et Sacker à Washington : http://www.asia.si.edu/archives/finding_aids/herzfeld.html

Le bleu égyptien, premier pigment artificiel

François Delamare

Le « bleu égyptien » est le premier pigment créé par l'homme. Apparu il y a cinq millénaires en Égypte et en Mésopotamie, il a longtemps fait l'objet d'un monopole et d'un commerce prospère dans le bassin méditerranéen.

Pendant des millénaires, les peintres ont disposé d'une palette pauvre en nuances, mais comportant presque toutes les couleurs : rouge, jaune, vert, marron, noir et blanc. Seul manquait le bleu. Pour une raison simple : il n'existait que très peu de minéraux bleus, et rarissimes sont ceux qui, réduits en poudre, conservent un pouvoir colorant.

Ainsi, le broyage du lapis-lazuli, pierre d'un beau bleu profond, ne fournit qu'une poudre bleu-gris pâle, inutilisable comme pigment. Certes, il existe une technique permettant d'extraire le minéral bleu (la lazurite) de cette poudre pour obtenir un pigment utilisable, l'outremer. Mais il semble qu'elle n'ait été mise au point que vers le II^e siècle avant notre ère, au Turkménistan. Elle n'atteindra l'aire méditerranéenne que vers le VIII^e siècle.

Les artistes du bassin méditerranéen ont pourtant pu utiliser un pigment bleu bien avant ces époques. Il s'agit du « bleu égyptien », nom donné en 1830 par Jean-François Lebon. Mérimée, le père de l'écrivain Prosper Mérimée, dans un traité sur la peinture à l'huile. Il consiste en le bleu égyptien ? Quand et comment est

ce premier pigment synthétique a-t-il commencé à être fabriqué ? Où son emploi s'est-il diffusé ? Autant de questions auxquelles on donnera ici quelques éléments de réponse, dont certains ont été obtenus grâce à des fouilles et travaux archéologiques récents.

Un pigment fabriqué au Proche-Orient...

Qu'est-ce que le bleu égyptien ? Cette matière artificielle est une pâte de verre, c'est-à-dire une matrice vitreuse au sein de laquelle est dispersé un matériau cristallin ayant un indice de réfraction différent de celui de la matrice. Dans le cas du bleu égyptien, la matrice de verre est colorée en bleu clair par du cuivre, et la phase cristalline dispersée est constituée par un silicate double de calcium et de cuivre ($\text{CaCu}_2\text{Si}_2\text{O}_{10}$), d'un beau bleu foncé. Ce silicate est identique à la cuprorivaïte, un minéral très rare.

À la vue de sa composition, il n'est pas étonnant que le bleu égyptien soit apparu en même temps que le verre, vers 3000 avant notre ère. Il aurait deux

berceaux : la Mésopotamie, où on l'appelait *akro merku* (lapis-lazuli moulé), et l'Égypte, où il avait pour nom *hsbd iryt* (lapis-lazuli fabriqué).

En raison de sa composition et du climat beaucoup plus humide, le verre élaboré en Mésopotamie s'est moins bien conservé que celui fabriqué en Égypte. La plupart des témoins matériels proviennent donc d'Égypte, et c'est pour quoi on a pris l'habitude de parler de bleu « égyptien » et d'occulter la source mésopotamienne.

Il convient aussi de préciser que le bleu égyptien n'était pas le seul matériau synthétique bleu apparu en Égypte et en Mésopotamie à cette époque. Deux autres familles de tels matériaux étaient les verres teintés par l'oxyde de cobalt, d'un bleu sombre, et les verres teintés au cuivre, d'un bleu clair. Mais ces matériaux n'ont pas eu le même succès que le bleu égyptien, dont la couleur est plus saturée.

Le bleu égyptien était, comme le verre, fabriqué en petites quantités. Il remplaçait le lapis-lazuli afghan en joaillerie et pour la réalisation de petits objets. C'était une matière onéreuse, donc de luxe. Il a fallu

L'ESSENTIEL

- ✓ Le bleu égyptien est une pâte de verre contenant un silicate de calcium et de cuivre d'un bleu intense.
- ✓ C'était un matériau synthétique de luxe, dont les Égyptiens ont produit une poudre bleue utilisable sur divers supports dès 2500 avant notre ère.
- ✓ L'Égypte a conservé le monopole de sa fabrication et de son commerce jusqu'au I^{er} siècle avant notre ère.
- ✓ Vers -70 est née la première fabrique de bleu égyptien sur le sol italien, pigment que les Romains nommaient *cæruleum*.

quelques siècles pour que l'on se rende compte que la poudre obtenue en la broyant constituait un excellent pigment bleu, utilisable sur les supports divers. Ce fut chose faite vers 2500 avant notre ère en Égypte, date à partir de laquelle on constate son emploi sur des décors muraux.

...puis largement exporté

La production du bleu égyptien a suivi étroitement le développement de la production du verre. En particulier, cette production s'est très fortement accrue aux alentours de -1450, sous le règne de Thoutmosis III, époque où les décors bleus peints se sont banalisés (voir les figures 1 et 2). Depuis, la production égyptienne n'a cessé d'augmenter, stimulée notamment par les exportations.

La mise au point en Mésopotamie et en Égypte de la fabrication de pigments bleus synthétiques, teintés par le cobalt ou par le cuivre, fut donc un événement d'importance. Pour ce bleu de cuivre qu'est le bleu égyptien, elle fut le point de départ d'un commerce fructueux, fondé



1. LE BLEU ÉGYPTIEN était d'un usage répandu dans les fresques et l'art statuaire de l'Égypte ancienne, comme en témoigne ce buste de la reine Nefertiti (vers -1350) conservé au Musée égyptien de Berlin.

L'AUTEUR



François D'AMARE
a été directeur de recherches
au Centre de mise en forme
des matériaux à l'École
des mines de Paris.

sur un monopole de fabrication, qui allait durer 2500 ans.

L'étude des décors muraux peints retrouvés par les fouilles archéologiques dans l'ensemble du monde méditerranéen met en évidence l'élargissement progressif de l'aire d'utilisation du bleu égyptien.

En -2500, le *hsbd iryt* apparaît dans les décors peints de Cnossos, en Crète minoenne et dans l'île de Kéros, dans les petites Cyclades. Ces exportations sont donc contemporaines des premiers emplois du pigment notés en Égypte. Vers la Crète, elles dureront au moins jusque vers -1400. Appelé *kuwano* par les Minoens, le bleu égyptien sera successivement adopté par les Mycéniens (de -1400 à -1100) sous le nom de *kuanos*, puis du VI^e au I^{er} siècle avant notre ère par les Grecs, sous le nom de *kuanos préparé*. Ces derniers le diffuseront en Ita-

lie préromaine, en particulier en Campanie et en Etrurie.

Comment Rome, qui soumettait ces peuples Italiques, n'aurait-elle pas adopté l'usage de ce pigment sans rival sur le marché ? Effectivement, à partir du III^e siècle avant notre ère, Rome importe du bleu égyptien, qu'elle nomme *cæruleum*. Fabriqué dans la banlieue d'Alexandrie, ville réputée pour le talent de ses verriers, le bleu égyptien arrive à Pouzzoles, alors unique port de Rome. Sur ces importations de la République romaine, nous sommes très mal renseignés, faute de témoins archéologiques. Le seul vestige que nous ayons a été mis au jour à Pompéi en 2003 par Marie Truffaut-More, archéologue au CNRS (voir la figure 3). Il s'agit d'un élément de décor polychrome, qui témoigne tant de l'existence de décors colorés autres que des peintures murales, que de l'importation de *cæruleum* dans la Pompéi des II^e et, probablement, I^{er} siècles avant notre ère.

Une première fabrique sur le sol italien 70 ans avant notre ère

Ces importations ont duré jusqu'au règne d'Auguste, au tout début de notre ère. C'était une période où la puissance financière de Rome s'est exprimée par une frénésie de constructions de luxe, en particulier dans les villes campaniennes – Pompéi, Herculaneum et Stabies. Devant l'ampleur des marchés qui s'ouvraient, les appétits sont aiguisés. Et c'est Vitruve, rédacteur vers -30 d'un célèbre traité sur l'architecture, qui nous le raconte.

Selon Vitruve, vers -70, un homme d'affaires avisé, Vestorius, fonda la première fabrique de *cæruleum* sur le sol italien, dans la banlieue de Pouzzoles. L'existence de cette fabrique est confirmée par des fouilles archéologiques réalisées au XIX^e siècle dans l'un des quartiers occidentaux de Pouzzoles. Idéalement placée en Campanie, cette fabrique coïncide avec la multiplication des décors contenant du bleu trouvés dans les riches villas qui se sont construites à cette époque.

Les difficultés techniques de la fabrication du *cæruleum* (voir l'encadré page 42) ont été manifestement surmontées dans la manufacture de Vestorius. Nous en avons deux témoignages. À partir de cette date, dans les villes campaniennes, foisonnent les décors muraux réalisés avec du



2. UNE JARRE ÉGYPTIENNE avec décor peint de *hsbd iryt*
(nom égyptien du bleu égyptien) provenant de Tell el Amarna, vers -1360.

Kunsthistorisches Museum, Vienne

cæruleum, les décors de fontaines utilisant des boulettes cassées en deux comme tesselles (voir la figure 4), ou les peintures d'éléments bleus. Simultanément, les exportations du *cæruleum* de Pouzzoles se multiplient, en particulier vers la Gaule Narbonnaise, comme en témoignent les pavés de caboteurs romains (Planier 3 et la madrague de Giens).

Nous n'avons aucune trace de l'existence d'autres fabriques de ce genre sur le sol italien au I^{er} siècle avant notre ère. Le fructueux monopole de la production et de la vente du *cæruleum* était passé des mains alexandriennes aux mains italiennes.

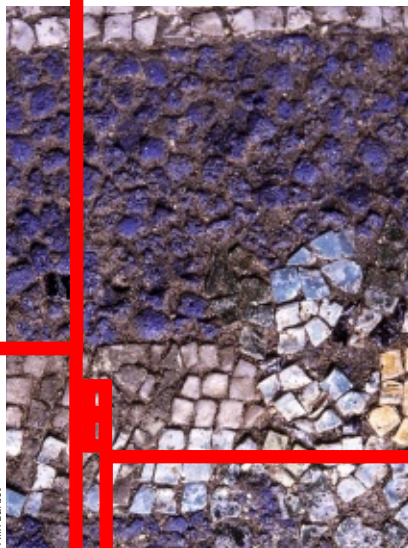
Différentes quantités de *cæruleum*

Des fouilles réalisées il y a quelques années par Laetitia Cavassa avec le Centre Jean Bérard à Naples (CNRS et École française de Rome) ont montré que plusieurs fabriques de *cæruleum* avaient fonctionné au siècle suivant à Cumes et à Litterne, villes voisines de Pouzzoles. La découverte de leurs importants dépotoirs, constitués des creusets cassés pour en extraire le *cæruleum*, suggère une production importante; elle a aussi permis de reconstituer les différents types de creusets utilisés par les artisans. Ce sont ces fabriques qui fournissaient les marchands de couleurs et les peintres en 79 de notre ère, lorsque Pompéi et Herculaneum furent englouties sous les cendres du Vésuve.

Que trouvait-on dans la gamme des bleus vendus chez les marchands de couleurs? Y avait-il diverses qualités correspondant aux multiples emplois possibles (peinture murale *à fresco* – c'est-à-dire sur enduit frais – ou *à secco*, peinture de chevalet, peinture de meubles, cosmétique...)? Plinius l'Ancien cite six qualités de *cæruleum*, dont les prix allaient du simple au double. L'Édit du maximum promulgué par Dioclétien en 301, confirme l'existence de plusieurs qualités, ainsi que la fourchette de prix. Qu'en était-il en réalité?

Il fallait trouver une collection de pigments bleus de provenance sûre, bien datée et suffisamment abondante pour que l'on puisse espérer y identifier ces différentes qualités marchandes. Il n'y avait pas meilleur choix que Pompéi et Herculaneum, villes où l'on a retrouvé des officines de marchand de couleurs riches en coupes

3. CET ÉLÉMENT DE DÉCOR polychrome en terre cuite a été découvert en 2003 dans un remblai à Pompéi, dans la « maison du peintre ». Il s'agit d'une tuile qui a été réutilisée, ce réemploi étant daté vers 140 avant notre ère. Le bleu utilisé pour peindre le fond avait donc été importé d'Égypte. C'est le plus ancien témoin de l'usage du bleu égyptien ou *cæruleum* en Italie.



4. DÉTAIL D'UNE MOSAÏQUE réalisée avec des boulettes de *cæruleum* cassées en deux et utilisées comme tesselles [Pompéi, maison du bracelet d'or. Triclinium, fontaine du nymphée, an 40 de notre ère].

les contenant des pigments non encore employés (voir l'encadré page 42).

Ces pigments ont fait l'objet de nombreux travaux. Les plus célèbres d'entre eux sont ceux du chimiste français Jean-Antoine Chaptal (1809) et du Britannique Humphry Davy (1815), qui sont parmi les premiers travaux d'archéométrie jamais publiés. Plus près de nous, l'œuvre monumentale de l'Italien Selim Augusti (1967) englobe l'ensemble des pigments alors exhumés, mais date d'une époque où les techniques d'analyse étaient moins répandues et élaborées qu'aujourd'hui.

En 2014, j'ai eu la chance de pouvoir étudier l'ensemble des pigments bleus bruts actuellement conservés sur le site de Pompéi et dans les réserves du Musée archéologique de Naples. De cette étude ressortent trois faits remarquables.

Le premier résultat des analyses effectuées sur les 46 pigments bleus, 44 sont de vrais *cæruleum*. Les deux autres sont de simples verres colorés au cuivre, dénués de toute cuprorivaite. La découverte de l'emploi de verre pilé comme pigment bleu est une première. Elle montre que de simples verriers avaient réussi à prendre une part au marché des *cæruleum*, tout en évitant les difficultés techniques inhérentes à cette fabrication.

A Pompéi, on préférait les bleus clairs

La deuxième, fruit des mesures colorimétriques effectuées, est que les bleus clairs ont une prédominance écrasante sur les bleus foncés. On pourrait penser que cela est dû à un coût excessif des bleus foncés qui, plus riches en cuprorivaite, nécessitent une durée de chauffage plus longue. Mais une explication d'ordre esthétique est plus probable: les bleus clairs devaient être plus appréciés que les bleus foncés, point qu'il serait intéressant d'approfondir.

Le troisième fait remarquable est la variété de procédés employés pour obtenir ces teintes claires. Quatre procédés ont été observés. D'abord l'usage d'un simple verre au cuivre, procédé fort économique. Puis le raccourcissement de la durée du maintien à haute température, autre procédé économique. Beaucoup plus fréquemment, on observe le mélange d'un bleu moyen avec une argile blanche. Vient enfin le mélange avec du blanc de plomb, le plus coûteux des pigments bleus. La finalité de ce mélange onéreux pose problème:

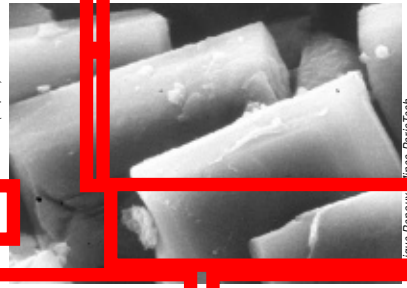
COMMENT FABRIQUAIT-ON LE BLEU ÉGYPTIEN ?



Une coupe en terre cuite, trouvée à Pompéi.



Un fragment de creuset ayant servi à fabriquer du cæruleum, à Cumae.



Dans du cæruleum provenant de l'épave dite Planier 3, la microscopie électronique a révélé des cristaux de cuprosilicate non broyés.

Fabriquer du bleu égyptien est loin d'être facile, et demande des compétences de verrier. Comment faisaient les Égyptiens ? On l'ignore. Aucun des papyrus qui nous sont parvenus ne donne la recette de fabrication du *hsbd'iryt*. L'inscription de la stèle funéraire du peintre Irtysen (vers -2030) en donne probablement la raison, à savoir un secret jalousement gardé :

« [...] Je sais faire des pigments et des produits qui fondent sans que le feu les brûle et, de plus, insolubles à l'eau. Je ne révélerai cela à personne, excepté moi-même et mon fils aîné, le dieu ayant ordonné qu'il s'exerce en initiation, car j'ai remarqué sa compétence à la tête des travaux dans toutes les matières précieuses, depuis l'argent et l'or jusqu'à l'ivoire et l'ébène. » Les arché-

logues ont eu plus de chance avec la Mésopotamie. En effet, des tablettes babyloniennes trouvées à Tell Umar, datées du XVII^e siècle avant notre ère, donnent des recettes (difficiles à traduire) de verres et, en particulier, de verres teintés en bleu. On fabrique un petit nombre de mélanges-maîtres bleus que l'on modifie par addition.

Un autre lot de tablettes, assyriennes celles-ci provenant de la bibliothèque de Sarrukin et datées de -640, relate des recettes de verres bleus au cuivre. Le principe reste le même : on réalise des mélanges-maîtres comme le *tersitu* (un verre bleu) et le *sirsu* (un verre sous-caténaire incolore), que l'on modifie. L'*uknû merku* s'obtient ainsi :

« Tu ajouteras à un *mana* de bon *tersitu* un tiers de *mana* de verre incolore, un tiers de *mana* de sable, cinq *kisal* de craie, et tu brâteras encore. Tu le recueilleras dans un moule, en le fermant avec un moule en argile. Tu le placeras dans les ouvreaux du mur et tu brâteras encore. Tu le mettras en œuvre. » C'est une remarquable recette opérationnelle, où seules les durées ne sont pas indiquées.

Il n'est pas de même avec la recette que rapporte Vitruve, censée être celle employée à la manufacture de Vestorius : elle n'est ni opérationnelle (les quantités et les températures ne sont pas indiquées) ni complète. Elle montre en revanche que chez Vestorius, on ne parlait pas de verre, mais on réalisait une synthèse à partir de différents oxydes. D'où vient cette recette ? Est-ce la recette alexandrine ? Quand serait-on parvenu à l'Égypte d'une recette à l'usage des verriers ?

Autant de questions sans réponses. La fabrication du cæruleum par le procédé indiqué par Vitruve, simple en son principe, est en fait assez délicate. On prend un mélange de sable siliceux, de calcaire, de cuivre oxydé et de fondant (substance qui facilite la fusion) réduits en poudre vers 900 °C durant une trentaine d'heures. Le fondant attaque la silice et forme un verre qui dissout les autres composants. Si l'on arrive à maintenir la température dans la fourchette 900-950 °C, naissent et se développent à l'intérieur de cette matrice les cristaux de cuprosilicate. Dans la pratique, trois conditions doivent être impérativement remplies : la bonne proportion calcium/cuivre, le maintien d'une haute température assez précise sur de longues durées et une atmosphère oxydante.

à cause du blanc de plomb, on ne peut l'employer pour peindre *a fresco* (l'enduit étant basique, le blanc de plomb devient gris). On pourrait penser à une peinture sur bois ou pierre, ou bien à un usage cosmétique.

Des recettes oubliées à partir du XIII^e siècle

À partir du XII^e siècle de notre ère, les fabrications de cæruleum se développent dans tout l'empire et bien au-delà. On en constate l'emploi aussi bien à Londres qu'en Lybie, en Ouzbékistan ou en Norvège. Le déclin et la chute de l'Empire d'Occident, aux IV^e et V^e siècles de notre ère, ont entraîné une situation de crise, où la construction d'édifices ornés de décors muraux n'était pas du tout une priorité. Aussi, la plupart des fabrications de cæruleum ont disparu.

Mais à chaque retour d'un ordre politique, correspond un renouveau de l'emploi de cæruleum. Il en a été ainsi sous la

Renaissance carolingienne et, dans certaines abbayes, jusqu'au XIII^e siècle. Puis ce sera l'oubli, et le remplacement par l'indigo, le lazurite et, plus tard, le smalt, des pigments moins stables.

Le cæruleum sera redécouvert sur décors romains lors des fouilles de Pompéi, au IV^e siècle, et sur décors égyptiens pendant l'expédition d'Égypte (1798-1801). Il suscita un engouement exceptionnel de la part des chimistes. Au XIX^e siècle, nombreux seront ceux qui essaieront de lui donner une deuxième chance en organisant sa production industrielle. Et au XX^e siècle, des chimistes soviétiques proposeront son emploi pour assurer la pérennité des vastes décors muraux peints comme les aimait le régime alors en vigueur... Ces tentatives n'ont pas eu de suite, en particulier en raison de l'arrivée sur le marché, à partir des années 1830, de pigments plus performants tels que l'outremer artificiel (le bleu de Prusse).

✓ BIBLIOGRAPHIE

L. Cavassa, F. Delamare et M. Repoux, La fabrication du bleu égyptien dans les Champs Phlégréens (Campania, Italie) durant le I^{er} siècle de notre ère, *Revue Archéologique de l'Est*, 28^e supplément, pp. 235-249, 2010.

F. Delamare, Bleus en poudres. De l'art à l'industrie, 5000 ans d'innovations. Les Presses de l'École des Mines de Paris, 2008.

✓ SUR LE WEB

Centre d'étude des peintures murales romaines : <http://www.cappa-cepmr.fr/>

■ POUR LA

La librairie SCIENCE

Le savoir scientifique au fil des pages...

NOUVELLE
ÉDITION
ENRICHIE



Les mathématiciens ■ Collectif

« Nul ne peut être mathématicien s'il n'a une âme de poète », disait Sophie Kowalevskaia. D'Archimède à Jacques Hadamard, cet ouvrage dresse les portraits d'une vingtaine de mathématiciens, autant artistes que scientifiques.

280 pages • 24 euros • ISBN 978-2-8424-5109-2



À contre-idées ■ Didier Nordon

Trouver du comique dans une idée sérieuse (et inversement), du local dans une idée générale (et inversement), de l'absurde dans une idée sensée (et inversement)... Au fil de ses billets d'humeur, Didier Nordon s'ingénie à bousculer les idées reçues.

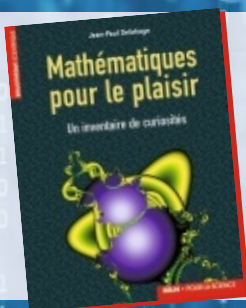
224 pages • 19 euros • ISBN 978-2-8424-5110-3



Au nom de l'infini ■ Jean-Michel Kantor, Loren Graham

Les auteurs retracent un épisode fascinant et dramatique de la création mathématique. Sur les traces de chercheurs russes et français du XX^e siècle, ils nous éclairent sur les liens étroits entre science, religion et politique.

288 pages • 24 euros • ISBN 978-2-8424-5102-3



Mathématiques pour le plaisir ■ Jean-Paul Delahaye

Les mathématiques ne se réduisent pas – heureusement – à ce qu'on nous en apprend à l'école. Partout présentes, elles sont une source de joie et d'épanouissement pour celui qui sait consacrer un peu d'attention et d'esprit ludique. Dans cet ouvrage, découvrez pourquoi les mathématiques sont faciles et comment s'y adonner est un plaisir.

208 pages • 25 euros • ISBN 978-2-8424-5104-3



La physique buissonnière ■ Jean-Michel Courty, Édouard Kierlik

Une plante plus rapide qu'une mouche, un tuyau qui parle, une cape qui rend invisible, etc. La nature est pleine de surprises pour qui veut bien s'aventurer hors des sentiers battus. Passionnés de physique, les auteurs vous invitent à une promenade sur des chemins de traverse pour comprendre cette physique du quotidien.

160 pages • 22 euros • ISBN 978-2-8424-5105-9

Des livres à découvrir en librairie et sur www.pourlascience.fr

Comment l'ADN réagit sous le soleil

Thierry Douki, Jean-Luc Ravanat, Dimitra Markovitsi et Évellyne Sage

Les rayons ultraviolets solaires provoquent des cancers de la peau, en modifiant l'ADN des cellules de ce tissu.

Les mécanismes photochimiques en cours se précisent.

L'ESSENTIEL

✓ Les ultraviolets solaires provoquent des lésions de l'ADN qui peuvent conduire à des mutations.

✓ Jusqu'à présent, on pensait que les ultraviolets B étaient les plus dangereux, car ils déclenchent des réactions chimiques entre les bases de l'ADN.

✓ Toutefois, bien qu'ils soient moins absorbés par l'ADN, les ultraviolets A produisent des lésions semblables.

✓ L'identification de ces dommages ou « photoproduits » dans l'ADN permet aux scientifiques de mieux comprendre l'apparition des mutations et des cancers de la peau.

L'exposition au soleil pour avoir une peau hâlée – le bronzage – est une pratique datant du début du XX^e siècle en Europe. Jusqu'au XIX^e siècle, le teint pâle était une preuve d'appartenance à l'aristocratie, alors que la classe ouvrière et paysanne, exerçant son activité en plein air, avait le teint hâlé. Puis la révolution industrielle cantonna les ouvriers dans les usines, loin du soleil, tandis que les classes sociales aisées redécouvraient le tourisme balnéaire. En 1936, avec l'apparition des congés payés, la peau hâlée devint un phénomène de mode.

On découvrit ainsi les méfaits du soleil lors d'une exposition prolongée et les dangers des coups de soleil. Car les rayons ultraviolets du soleil provoquent des cancers de la peau. On changea la formulation des crèmes solaires – dont les premières apparurent dans les années 1920 – pour qu'elles deviennent des filtres anti-ultraviolets B efficaces, car on pensait que seule cette partie du spectre solaire était délétère pour la peau. Mais par quels mécanismes ?

Dès les années 1960, les chimistes ont étudié les effets des rayons ultraviolets sur l'ADN, support de l'information génétique, des cellules de peau ; ils ont découvert que les ultraviolets B créent des liaisons entre

certaines bases de la molécule ADN, alors que les ultraviolets A agissent indirectement en altérant divers constituants des cellules de peau. L'effet des ultraviolets A était surtout associé au vieillissement cutané. Les ultraviolets B, bien que moins importants dans le rayonnement solaire qui atteint la peau (nous y reviendrons), semblaient donc plus dangereux.

Toutefois, depuis la fin des années 1990, on sait qu'on ne peut plus négliger l'impact des ultraviolets A : non seulement ils représentent une grande partie du spectre solaire atteignant la peau, mais ils peuvent provoquer des tumeurs chez les animaux de laboratoire.

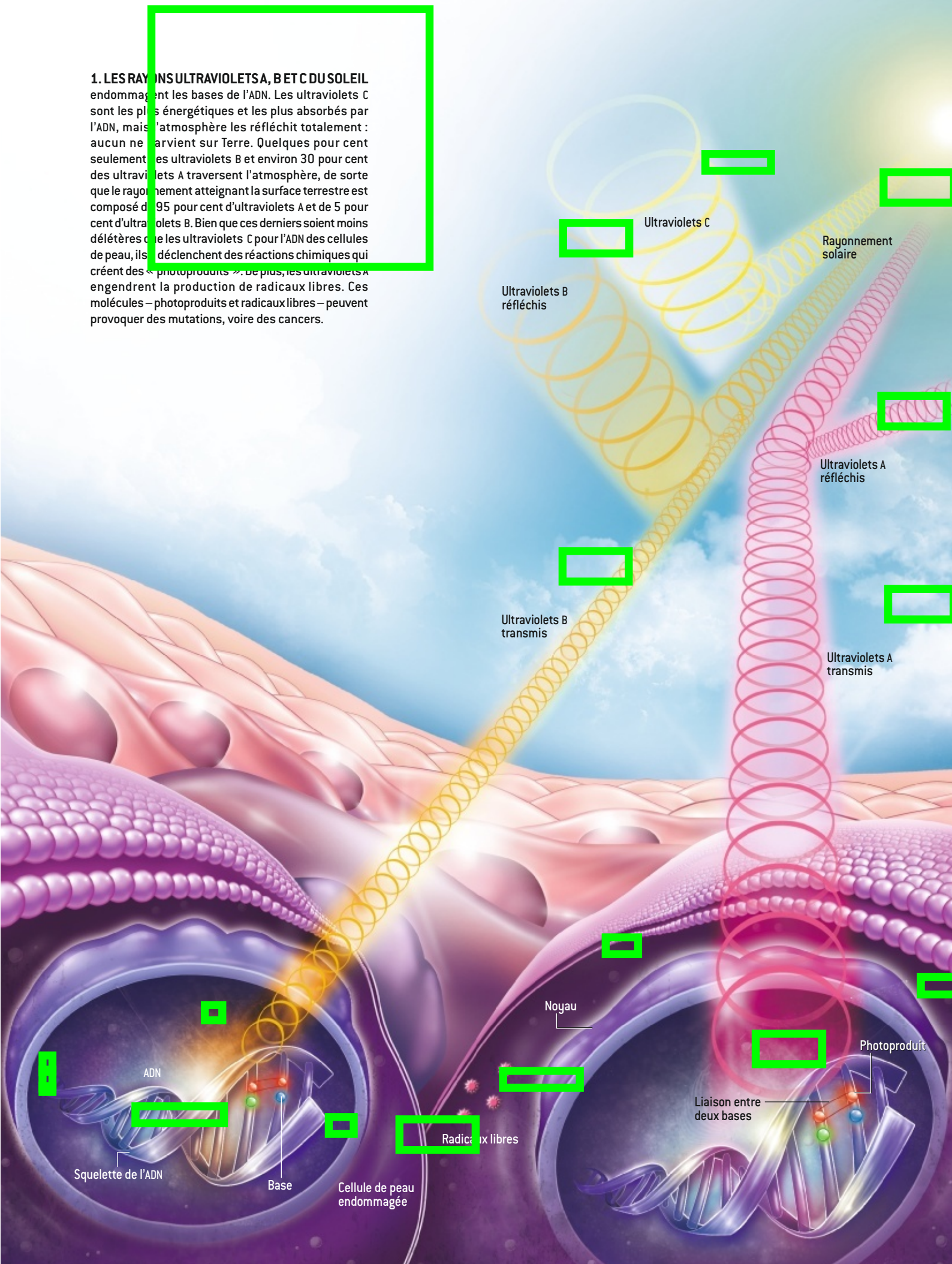
Nous avons aussi montré récemment qu'ils créent des liaisons chimiques dans l'ADN, comme le font les ultraviolets B. Or ces modifications de la structure chimique de l'ADN peuvent provoquer des mutations génétiques, voire des cancers.

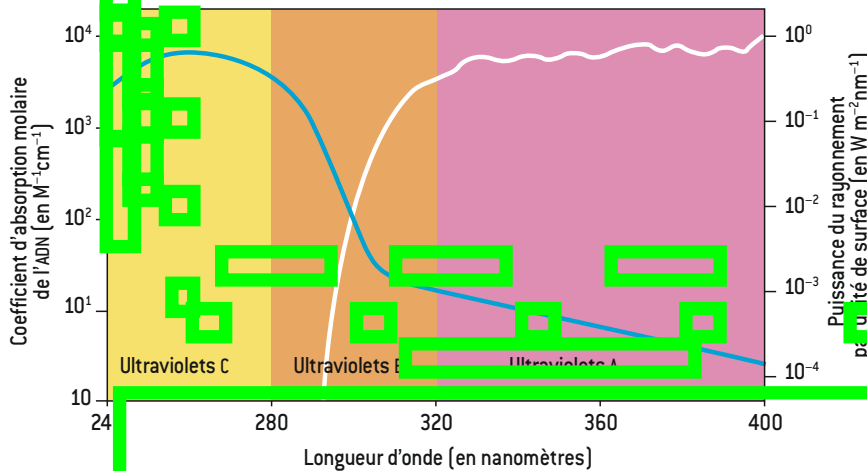
Les Français et le soleil

En 2001, une étude sociologique de la Sécurité sociale et de l'Inserm montrait que si la majorité des Français déclarent être conscients des risques liés à une exposition au soleil, leur comportement sur les plages ne traduit pas cette apparente conviction : au moins d'un tiers se protègent et la plupart s'exposent aux heures les plus ensoleillées de la journée. Il n'est donc pas surprenant de constater que le nombre

1. LES RAYONS ULTRAVIOLETS A, B ET C DU SOLEIL

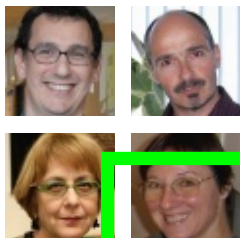
endommagent les bases de l'ADN. Les ultraviolets C sont les plus énergétiques et les plus absorbés par l'ADN, mais l'atmosphère les réfléchit totalement : aucun ne parvient sur Terre. Quelques pour cent seulement des ultraviolets B et environ 30 pour cent des ultraviolets A traversent l'atmosphère, de sorte que le rayonnement atteignant la surface terrestre est composé de 95 pour cent d'ultraviolets A et de 5 pour cent d'ultraviolets B. Bien que ces derniers soient moins délétères que les ultraviolets C pour l'ADN des cellules de peau, ils déclenchent des réactions chimiques qui créent des « photoproduits ». De plus, les ultraviolets A engendrent la production de radicaux libres. Ces molécules – photoproduits et radicaux libres – peuvent provoquer des mutations, voire des cancers.





2. L'ADN DOUBLE BRIN ABSORBE surtout les ultraviolets C. Cette absorption (*courbe bleue*) diminue pour les ultraviolets B et devient très faible pour les ultraviolets A. Toutefois, la lumière solaire à la surface de la Terre, dépourvue d'ultraviolets C, contient 5 pour cent d'ultraviolets B et 95 pour cent d'ultraviolets A (*courbe blanche*). Ainsi, bien que ces derniers soient moins absorbés par l'ADN, ils y déclenchent des réactions chimiques.

LES AUTEURS



Thierry DOLY est biochimiste au CEA et dirige le Laboratoire Lésions des acides nucléiques, à Grenoble où Jean-Luc RAVANAT est biochimiste du CEA. Dimitra MARKOVITSI est photochimiste du CNRS, et dirige le Laboratoire Francis Perrin au CEA Saclay. Évelyne SAGE est biologiste du CNRS au Laboratoire de biologie des radiations, à l'Institut Curie d'Orsay.

de cancer de la peau augmente de cinq à sept pour cent par an en Europe, et que 90 000 nouveaux cas sont diagnostiqués chaque année en France ; 1 300 personnes en meurent. Comment les ultraviolets provoquent-ils ces cancers ?

L'ADN a une structure chimique complexe qui lui permet d'être recopié fidèlement et traduit en protéines. Il est formé de « bases » azotées (ou bases nucléiques nommées adénine, cytosine, guanine et thymine) liées à un « squelette » de sucres et de phosphates. Et il est constitué de deux « brins » enroulés en double hélice. Cependant, de nombreux agents chimiques ou physiques peuvent endommager les bases ou le squelette. Il en résulte parfois des mutations, c'est-à-dire une modification de l'information génétique. Les cellules concernées peuvent se multiplier de façon incontrôlée, première étape des mécanismes de cancérisation.

Ainsi, le rayonnement ultraviolet est capable de modifier l'ADN. C'est surtout du fait de leur présence dans la lumière solaire que les ultraviolets représentent un problème de santé publique. En effet, ils sont responsables de la majorité des cancers de la peau, les carcinomes cutanés et les mélanomes. Ce second type de tumeurs, le moins répandu (moins de dix pour cent des cancers de la peau), est inquiétant à deux titres : d'une part, les cellules tumorales d'un mélanome se répandent facilement en formant des métastases, des cellules cancéreuses mobiles qui colonisent d'autres tissus, et d'autre part, aucun

traitement efficace n'est aujourd'hui disponible (voir l'encadré page 50).

C'est donc depuis longtemps que les dommages de l'ADN causés par les ultraviolets, les premiers travaux datant de la fin des années 1950. Ainsi, nous verrons plus tard l'effet des ultraviolets, les bases de l'ADN réagissent pour donner des « photoproduits », bien que nous n'ayons pas encore identifié toutes les étapes de leur formation.

Le rayonnement ultraviolet solaire est formé de photons dont la gamme d'énergies est vaste. Les ultraviolets C, dont les longueurs d'onde sont les plus petites (de 200 à 280 nanomètres), sont les plus énergétiques et les plus efficacement absorbés par l'ADN. Les ultraviolets B (de 280 à 320 nanomètres) et les ultraviolets A (de 320 à 400 nanomètres) ont des énergies plus faibles que celles des ultraviolets C. Mais la couche d'ozone dans l'atmosphère bloque les ultraviolets C émis par le Soleil, la majorité des ultraviolets B, et deux tiers des ultraviolets A (voir la figure 1). Ainsi, on retrouve dans la lumière solaire au niveau du sol plus de 95 pour cent d'ultraviolets A et moins de cinq pour cent d'ultraviolets B, cette proportion variant selon l'heure de la journée, la latitude et l'altitude.

Les photons endommagent l'ADN

La longueur d'onde du rayonnement incident détermine la nature des dommages de l'ADN, et donc les conséquences biologiques. En effet, les modifications de l'ADN ne sont pas toutes délétères et ne sont pas éliminées avec la même efficacité par les systèmes cellulaires de réparation du génome.

Qu'en est-il, l'ADN présente un maximum d'absorption dans l'ultraviolet C (à 257 nanomètres), absorption qui diminue ensuite pour les ultraviolets B et devient très faible pour les ultraviolets A. Ainsi, les ultraviolets C sont les plus absorbés, mais – nous l'avons évoqué – ils sont réfléchis par l'atmosphère dans l'espace. À l'inverse, les ultraviolets A sont les moins absorbés, mais ils sont les mieux transmis par l'atmosphère et, par conséquent, les plus abondants. Or, étant absorbés par l'ADN, les ultraviolets B solaires engendrent des réactions photochimiques entre ses bases. Les ultraviolets A, quant à eux, provoquent l'oxydation de l'ADN via des mécanismes indirects.

En 2003, nos équipes du CEA à Grenoble et de l'Institut Curie ont montré qu'en plus de ces mécanismes d'oxydation qui leur sont spécifiques, les ultraviolets A endommagent l'ADN comme le font les ultraviolets B. Nous avons obtenu ces résultats dans des cellules en culture et, en 2004, en collaboration avec l'Institut de recherche Pierre Fabre, nous les avons confirmés dans la peau humaine. Examinons ce qu'il en est.

Pour comprendre pourquoi les ultraviolets créent des mutations, les photochimistes étudient comment l'absorption d'un photon endommage l'ADN. Les bases (et non le squelette sucre-phosphate) absorbent les photons ultraviolets, ce qui modifie la structure électronique des atomes (la configuration des électrons autour des noyaux) : l'ADN se retrouve dans un état dit « excité », c'est-à-dire que son énergie est supérieure à celle de son état habituel. Ses constituants peuvent alors réagir les uns avec les autres.

Si les premiers travaux réalisés dès les années 1960 ont été consacrés aux bases isolées de l'ADN, nous étudions aujourd'hui les états excités de l'ADN double-brin. Ces progrès ont été rendus possibles grâce, d'une part, à la puissance des ordinateurs permettant des calculs complexes, et d'autre part, à la spectroscopie résolue en temps, une technique qui fournit la durée de vie des espèces chimiques intermédiaires avant l'apparition d'un photoproduit (voir l'encadré ci-contre).

Nous avons d'abord étudié comment une double-hélice d'ADN absorbe les ultraviolets A. Nous avons fabriqué en laboratoire un modèle d'ADN constitué de 20 paires de bases adénine-thymine : cet ADN présente une absorption faible, mais réelle, des ultraviolets A (voir la figure 2). Au contraire, un mélange de ces bases isolées n'absorbe pas ces longueurs d'onde. Ces résultats montrent que, à l'inverse de ce que l'on a longtemps cru, les réactions photochimiques de l'ADN sont possibles non seulement avec les ultraviolets C et B, mais aussi avec les ultraviolets A.

Ensuite, grâce à la spectrométrie résolue en temps, nous avons montré que les états excités responsables de l'absorption des ultraviolets A diffèrent de ceux qui donnent lieu à l'absorption des ultraviolets B et C : ce sont des états dits à transfert de charge. En d'autres termes, dans la configuration électronique corres-

pondante, certaines bases sont chargées positivement et d'autres négativement, de sorte qu'elles peuvent réagir les unes avec les autres.

Quid devient l'énergie du rayonnement ultraviolet absorbée par l'ADN ? Une part importante est dissipée sous forme de chaleur dans l'environnement de l'ADN. Une autre se répartit entre les bases, qui passent d'un état excité à un autre. Au laboratoire, nous avons montré qu'un tel transfert d'énergie commence moins de 100 femtosecondes (100×10^{-15} seconde) après l'absorption. Une toute petite fraction de l'ADN excité émet alors un rayonnement de fluorescence. Une autre, encore plus petite, subit des réactions chimiques.

La fusion des bases par les ultraviolets B

Visualiser en temps réel l'apparition d'un photoproduit dans une double hélice d'ADN reste pour le moment un défi. En effet, la probabilité de réaction de l'ADN est très faible. Pourtant, les photochimistes progressent en étudiant un simple brin formé uniquement de thymines, ce brin étant bien plus réactif qu'un double brin. Nous avons ainsi appris que le temps qui

sépare l'absorption d'un photon ultraviolet C et la formation d'un photoproduit dépend beaucoup de la structure chimique de ce dernier. Par exemple, les dimères de thymine – des photoproduits formés de deux thymine liées – de la classe des cyclobutanes apparaissent en moins d'une microseconde (10^{-12} seconde), alors que quelques millisecondes sont nécessaires à la formation de ceux de la classe des photoproduits (6,4) (leur nom provient de la position des atomes qui réagissent dans la molécule), car la réaction met en jeu un composé intermédiaire.

Entre 1960 et 1990, les chimistes ont étudié la structure des photoproduits découlant de ces états excités. Ils ont effectué la plupart des expériences sur de courts fragments d'ADN, faciles à obtenir en grande quantité, en les exposant à de fortes doses de rayons ultraviolets B. Ils ont ainsi montré que seulement deux des quatre bases de l'ADN sont concernées : la thymine et la cytosine, qui appartiennent à la famille des pyrimidines. Quand ces bases sont côte à côte sur un brin d'ADN, de nouvelles liaisons covalentes – des liaisons chimiques fortes – se créent entre elles, ce qui engendre des photoproduits dimériques.

L'ADN excité et ses photoproduits

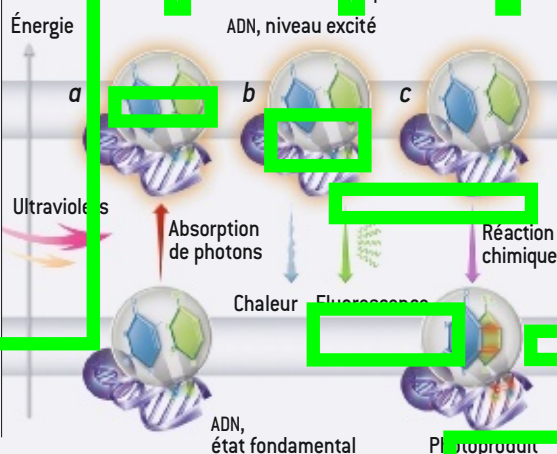
L'absorption des ultraviolets par l'ADN déclenche une série de mécanismes qui précèdent l'apparition des dommages ou photoproduits. Pour caractériser ces étapes intermédiaires, qui permettent de comprendre la formation des lésions, les photochimistes utilisent la spectroscopie résolue en temps.

L'ADN est excité par un laser ultraviolet pendant un instant très court (a). Une partie de l'énergie absorbée par l'ADN est dissipée sous forme de chaleur dans l'environnement (b). Une autre est transférée aux bases, qui passent d'un état excité à un autre. Une petite fraction de cet ADN excité émet de la fluorescence (b), tandis qu'une plus petite, subit des réactions chimiques avec formation de photoproduits (c).

Ainsi, on détecte pendant des durées très brèves, allant de la centaine de femtosecondes à quelques nanosecondes, des signaux dont les propriétés dépendent des espèces engendrées par les rayons ultraviolets. La détection de fluorescence renseigne sur l'énergie des différents états excités et

sur leur durée de vie. On peut même identifier les espèces intermédiaires qui n'émettent pas de photons.

On a ainsi déterminé que le temps qui sépare l'absorption d'un photon et l'apparition d'un photoproduit dépend de la structure chimique de ce dernier.



Pourquoi les pyrimidines sont-elles les seules à réagir quand elles sont excitées ? Elles présentent dans leur structure chimique une double liaison entre deux atomes de carbone. En 1958, l'équipe néer-

landaise de R. Beukers et de W. Berends a identifié le premier produit résultant du réarrangement des doubles liaisons de deux thymidines. Une telle structure contenant un cycle à quatre atomes est un dimère de type cyclobutane. Depuis cette découverte, on a identifié d'autres photoproduits et on a mis en évidence le même type de réactions entre deux cytosines, ou une thymine et une cytosine.

LES ULTRAVIOLETS A REPRÉSENTENT UNE GRANDE PARTIE du spectre solaire atteignant la peau et ils créent des liaisons chimiques dans l'ADN, comme le font les ultraviolets B.

On retrouve donc un grand nombre de photoproduits dans l'ADN. Pour les détecter, on a développé des méthodes qui combinent des approches biochimiques, avec la production chez le lapin d'anticorps reconnaissant les photoproduits, et de chimie analytique, par exemple avec une séparation chromatographique des photoproduits de l'ADN (voir l'encadré page 51). On peut alors quantifier la formation des différents photoproduits.

Ainsi, les séquences thymine-thymine et thymine-cytosine réagissent davantage sous l'effet des ultraviolets que les couples cytosine-thymine et cytosine-cytosine. Outre son influence sur l'efficacité de la réaction, la séquence modifie le rapport entre dimères cyclobutanes et photoproduits (6-4). Cette répartition des différents photoproduits est la même dans l'ADN pur en solution et dans les cellules et la peau : une fois le photon absorbé, l'environnement modifie peu la photochimie de l'ADN. En revanche, le rendement des réactions diminue quand on passe des cellules isolées à la peau, du fait de sa pigmentation. En effet, le mélanine, un biopolymère absorbant les ultraviolets, protège la peau, les peaux foncées, plus riches en mélanine, résistant mieux aux rayons du Soleil.

En plus de ces informations sur l'efficacité de formation des photoproduits, on a aussi déterminé certaines propriétés des dommages causés à l'ADN. Tout d'abord, on sait que les photoproduits de la cytosine sont relativement instables : ils sont

convertis, en réagissant avec une molécule d'eau, en dérivés de l'uracile, une base de l'ARN, l'autre acide nucléique rencontré dans les cellules. Ensuite, des hétérogénéités apparaissent dans la localisation des photoproduits le long d'un gène : certaines régions réagissent plus que d'autres et sont donc plus riches en photoproduits. Des effets structuraux sont sans doute en cause dans ces variations. Et d'autres facteurs modifient la réactivité locale, par exemple la présence de protéines liées sur l'ADN.

Que se passe-t-il quand l'ADN est endommagé ? Les dommages causés par les ultraviolets à l'ADN sont de deux types : des dimères de bases, comme le dimère thymine-thymine, et des photoproduits de bases, comme le dimère thymine-cytosine.

ments, étudiée depuis des systèmes simples jusqu'à la peau humaine, a permis aux scientifiques d'expliquer l'effet biologique des ultraviolets et de nombreuses caractéristiques des cancers de la peau. Dans la cellule, la présence d'un ADN lésé peut avoir trois conséquences (voir l'encadré ci-dessous).

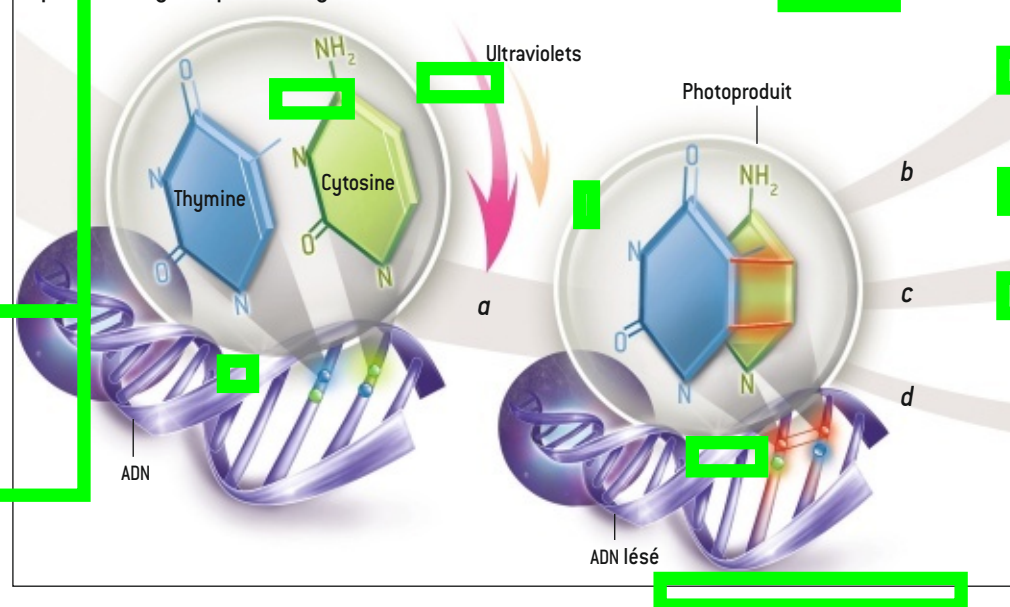
On a d'abord prouvé que les photoproduits peuvent engendrer l'apoptose des cellules, une mort programmée, un suicide cellulaire capable d'éviter la division de cellules dont le génome est endommagé.

Le dommage à la mutation

Par ailleurs, dès les années 1970, des études sur des cellules en culture ont montré que les mutations de l'ADN provoquées par les ultraviolets impliquaient des dimères de bases. Les mutations de l'ADN provoquées par les ultraviolets impliquaient des dimères de bases.

QUE DEVIENT L'ADN ENDOMMAGÉ ?

Sous l'effet des ultraviolets, les bases de l'ADN subissent des réactions chimiques. Par exemple, une base thymine forme deux liaisons avec une base cytosine pour donner un photoproduit de type cyclobutane (a). Dans une cellule, l'ADN ainsi lésé peut suivre trois voies. Souvent, le photoproduit déclenche la mort de la cellule et est, par conséquent, lui-même éliminé avec la cellule (b). Parfois, mais beaucoup plus rarement, il provoque une mutation (c) : il réagit avec une molécule d'eau, de sorte que le cycle de la cytosine dans le photoproduit devient un dérivé de l'uracile, une base de structure semblable à la thymine. Si la cellule se divise, cet ADN est recopié par des enzymes qui ne reconnaissent pas la cytosine (transformée en uracile) et la prennent pour une thymine : elles synthétisent donc un bon brin où une thymine remplace la cytosine initiale. Toutefois, des systèmes de réparation existent dans les cellules (d). Une enzyme reconnaît le photoproduit et d'autres ouvrent les deux brins de l'ADN ; la région lésée est éliminée, de sorte que les enzymes peuvent synthétiser un nouveau brin intact.



Brash, de l'École de médecine Yale, et ses collègues ont découvert ces mêmes mutations dans le gène de la protéine p53, ce qui a renforcé l'intérêt pour cette « signature ultraviolette », car ces mutations existent dans la majorité des cancers de la peau.

Les chimistes ont alors expliqué pourquoi des mutations peuvent apparaître quand l'ADN est lésé. En synthétisant des fragments d'ADN contenant des dommages connus, ils ont montré que les polymérases, les enzymes recopiant – ou dupliquant – l'ADN, sont induites en erreur lors de la lecture de l'information génétique là où se trouvent des photoproduits. Examinons comment.

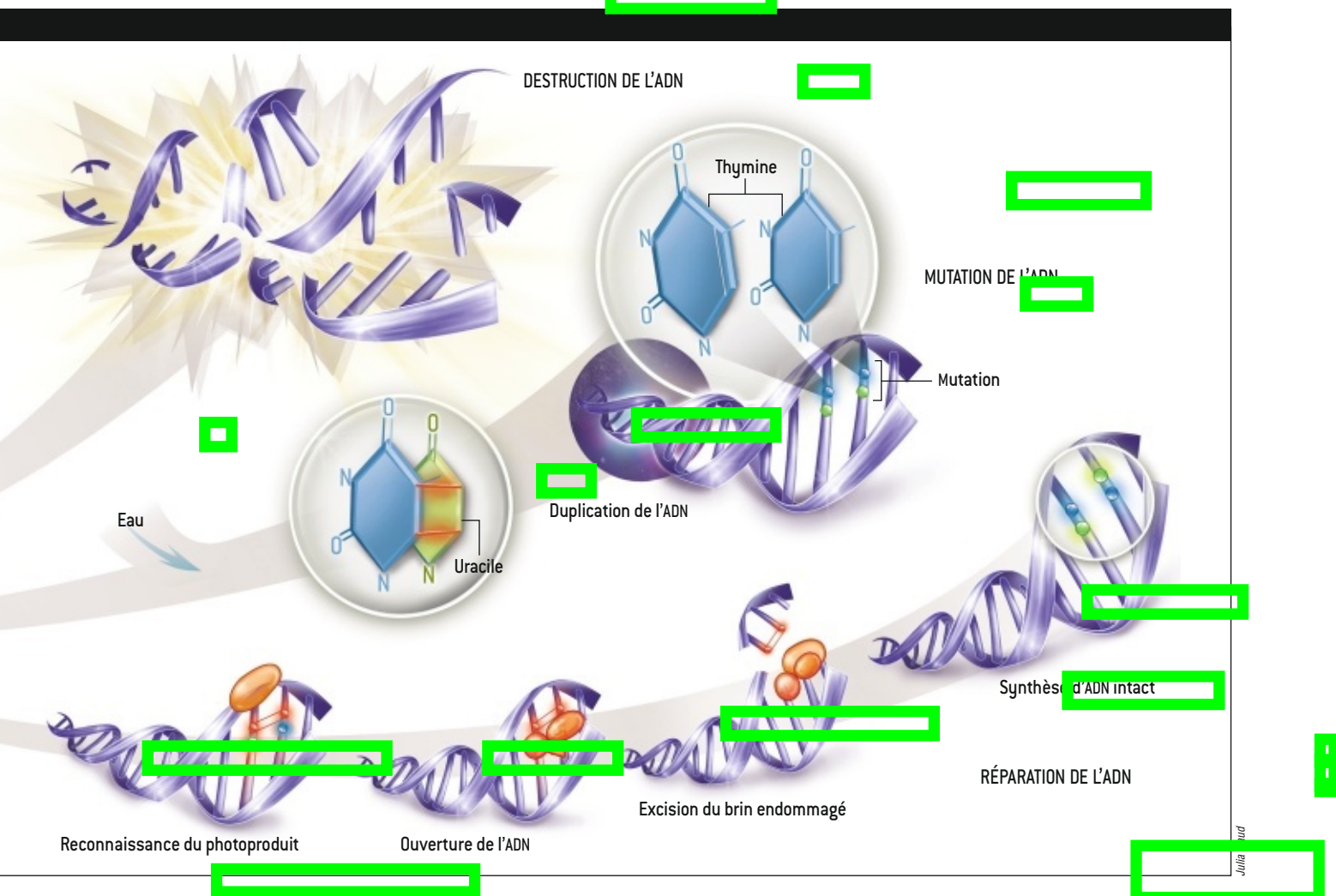
Chaque fois qu'une cellule se divise, son ADN est recopié. Les enzymes de duplication copient normalement un brin d'ADN en associant à chaque base du brin modèle une base « complémentaire » sur le second : une thymine est associée à une adénine et une cytosine à une guanine (et inver-

sement). Or les polymérases peuvent être leurrées par les cytosines converties en uracile dans les photoproduits. En effet, l'uracile ressemble beaucoup à la thymine (et non la cytosine), de sorte que les enzymes incorporent une adénine sur le brin complémentaire en cours de synthèse au lieu d'une guanine.

On observe par conséquent les mutations suivantes : des changements de séquence thymine-cytosine en thymine-thymine, et cytosine-cytosine en thymine-thymine. On trouve rarement de mutations aux séquences thymine-thymine, car les deux thymines d'un dimère sont quand même associées à deux adénines, même si elles sont liées. Puis, en construisant des cellules, et des souris génétiquement modifiées pouvant éliminer l'une ou l'autre classe de photoproduits, les biologistes ont montré que ce sont surtout les dimères cyclobutanes, plutôt que les photoproduits (6-4), qui sont responsables de ces mutations.

Mort cellulaire, mutations : les rayons ultraviolets B – puisque la plupart des études ont eu lieu avec des ultraviolets B jusqu'à là – sont donc délétères pour les cellules. Toutefois, des systèmes de réparation de l'ADN existent dans tous les organismes vivants : ils éliminent les photoproduits en restaurant la séquence d'ADN initiale.

Chez l'homme, une série de protéines réalisent les dimères en plusieurs étapes. D'abord, le photoproduit est localisé grâce à la déformation qu'il provoque dans l'ADN. Puis, d'autres protéines coupent le brin d'ADN endommagé de part et d'autre du photoproduit, en y laissant une brèche. Enfin, des protéines reconstituent correctement le brin, en recopiant la portion d'ADN qui lui fait face. Des déficiences génétiques inactivant des protéines de ce mécanisme de réparation sont la cause de la sensibilité au cancer de la peau 1000 fois plus grande des « enfants de la lune », atteints du syndrome *Xeroderma*



pigmentos m. Ces enfants ne peuvent s'exposer au soleil sans risque de développer un cancer. Voilà une preuve supplémentaire du rôle des photoproduits dimériques dans les cancers de la peau.

Bien que les ultraviolets A soient moins absorbés par l'ADN que les ultraviolets B, ils peuvent causer des dommages à l'ADN, voire des mutations. Il y a une trentaine d'années, on a découvert un mécanisme qui implique des mécanismes indirects, dits de photosensibilisation.

Les ultraviolets A oxydent l'ADN...

Dans ce cas, ce n'est pas l'ADN qui absorbe les photons, mais d'autres constituants de la cellule, tels des vitamines ou des facteurs enzymatiques. En interagissant avec un photon, la molécule « photosensibilisatrice » passe dans un état excité; elle peut réagir avec les molécules environnantes et déclencher des réactions d'oxydation, un phénomène nommé stress oxydant. Les réactions d'oxydation font intervenir des dérivés délétères de l'oxygène. En général, le photosensibilisateur excité transfère son énergie à l'oxygène moléculaire (O_2), qui passe à son tour

dans un état excité nommé oxygène singulet. Cette molécule réagit facilement avec des composés riches en électrons. Des chimistes ont montré que la cible de l'oxygène singulet dans l'ADN est la base guanine. Et en 2004, nous avons montré que la réaction de l'oxygène singulet avec l'ADN entraîne la formation de 8-oxo-2'-deoxy-8-dihydroguanine (8-oxoGua).

Un deuxième mécanisme de photosensibilisation implique les « radicaux libres », en particulier le radical hydrogène, qui peuvent oxyder les quatre bases et casser la chaîne d'ADN en y dégradant les sucres. Une dernière voie, moins fréquente, est l'oxydation directe de l'ADN, quand le photosensibilisateur y arrache un électron, la guanine étant encore la cible principale.

À nouveau, les outils chromatographiques et biochimiques permettent aux scientifiques de voir les dommages de l'ADN dans les cellules exposées aux ultraviolets A. L'oxydation de la guanine en 8-oxoGua est l'événement le plus fréquent. On observe aussi des cassures de chaîne, mais avec une probabilité deux à trois fois

inférieure. Les trois autres bases sont moins endommagées que la guanine. On estime ainsi que la formation transi-

toire de l'oxygène singulet et la production de 8-oxoGua correspondent à 80 pour cent du stress oxydant dû à une irradiation par des ultraviolets A.

La présence de 8-oxoGua dans l'ADN conduit à la mutation d'une paire de bases guanine-cytosine en thymine-adénine. Toutefois, la réparation de la 8-oxoGua est efficace. L'arsenal enzymatique qui évite l'accumulation de 8-oxoGua est différent de celui qui répare les dimères. L'enzyme clé est une ADN-glycosylase, enzyme qui coupe la liaison dite N-glycosidique reliant un sucre et une base. Elle élimine ainsi la base modifiée de l'ADN, et d'autres enzymes facilitent la réparation de l'ADN en incorporant une guanine intacte.

...et créent des photoproduits

L'effet des ultraviolets A se limite-t-il, comme on l'a longtemps cru, au stress oxydant? Non, et une des classes de photoproduits dimériques rencontrés avec les ultraviolets B, les dimères cyclobutanes, contribue aux dommages de l'ADN provoqués par les ultraviolets A. Une seule expérience sur des bactéries et quelques

Les cancers de la peau

Avec 90 000 nouveaux cas chaque année en France, les cancers de la peau sont les cancers les plus fréquents. Ils représentent environ un tiers des cas, deux fois plus que les cancers du sein. L'exposition au soleil serait responsable de la majorité des cancers de la peau. On a d'abord mis en évidence ce lien par la localisation des tumeurs sur les régions du corps les plus exposées au soleil. Par ailleurs, les données épidémiologiques montrent une augmentation de la fréquence des cancers cutanés avec l'exposition des individus, notamment ceux qui travaillent en extérieur. Tendence inquiétante : depuis 30 ans, on observe une augmentation constante du nombre de cancers de la peau chez les personnes industrialisées. C'est l'augmentation de l'exposition au soleil qui en est la cause.

En fait, plusieurs pathologies se cachent derrière ces données. Le

cancers de la peau sont issus des cellules de la couche supérieure de la peau, l'épiderme, qui sont les plus exposées aux rayons solaires. Les kératinocytes, qui produisent 80 pour cent des cellules de cette couche superficielle, synthétisent la kératine, une protéine fibreuse et inso-



Carcinome spinocellulaire

luble dans l'eau, qui protège et imperméabilise la peau. Ils sont impliqués dans la plupart des tumeurs, tels les carcinomes basocel-

laires de la peau les plus fréquents (plus de 60 pour cent des cas). Ils sont facilement traités par chirurgie, et ne produisent pas de métastases.

Moins fréquents, les carcinomes spinocellulaires (se dévelop-



Mélanome

pant dans les kératinocytes de la couche dermique, située au-dessus de la couche basale de l'épiderme) sont plus graves, car ils

à eux à l'origine d'un cancer plus rare, mais plus grave : le mélanome.

Ces tumeurs sont souvent traitées par chirurgie, et ne produisent pas de métastases dans l'organisme aux premiers stades de leur développement.

Qui plus est, il n'existe aujourd'hui aucun traitement efficace contre les mélanomes, et la mortalité est élevée. Toutefois, en juin 2011, une équipe de Corinne Bertolotto, du INSERM à Nice, a montré pour la première fois que les mélanomes sont souvent résistants aux traitements

chimiothérapeutiques et a identifié de nouveaux médicaments potentiels. Ces molécules ciblent certaines formes mutées des protéines responsables de la croissance incontrôlée des cellules dans les mélanomes. Ils ne seraient efficaces que pour les patients portant ces

mutations. Dans environ la moitié des cas, une diminution importante et rapide du nombre des cellules tumorales.

données éparpillées l'avaient suggéré; c'est en montrant que la fréquence des dimères était supérieure à celle des produits d'oxydation qu'au milieu des années 2000, nos équipes ont remis en lumière cet aspect de la photochimie des ultraviolets A.

En outre, les travaux d'autres groupes ont confirmé que des dimères de pyrimidines participent à l'apparition de mutations dans les cellules humaines exposées aux ultraviolets A. Nous avons par ailleurs montré que la proportion des différents photoproduits dimériques était différente de celle obtenue avec les ultraviolets B: nous ne trouvons pas de photoproduits (6-4), très peu de dimères de cytosines, et une majorité de dimères de thymines. Les dimères thymine-cytosine ne représentent qu'environ dix pour cent du total. Cette proportion se retrouve dans tous les types cellulaires. De plus, à l'inverse des ultraviolets B, le peau protège peu contre la formation des dimères par les ultraviolets A (car la mélanine absorbe moins ces rayons).

Nous avons donc affaire à une photochimie de l'ADN particulière dans les cellules exposées aux ultraviolets A: l'absorption de ces photons par l'ADN, bien que faible, est assez efficace pour créer des photoproduits. C'est la différence des états excités initiaux de l'ADN qui expliquerait la différence de nature des dommages entre ultraviolets A et ultraviolets B.

Des crèmes anti-ultraviolets A

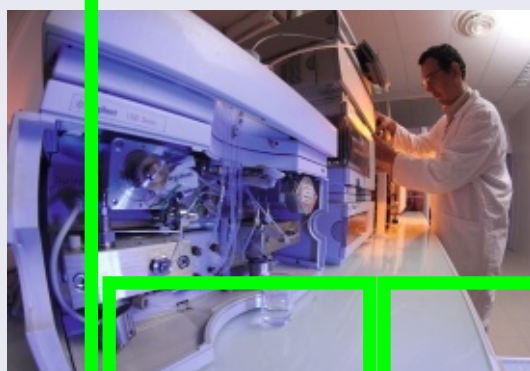
Les conséquences de ces résultats récents sont importantes. Bien que la formation des dimères avec les ultraviolets A soit moins efficace qu'avec les ultraviolets B, la prédominance des ultraviolets A dans la lumière à laquelle nous sommes exposés suggère qu'une fraction non négligeable des photoproduits mutagènes proviennent de cette partie du spectre. Ces données soulignent aussi les propriétés génotoxiques des ultraviolets A, c'est-à-dire qu'ils peuvent engendrer des mutations voire des cancers.

Ce risque cancérigène, ajouté au rôle prédominant des ultraviolets A dans le vieillissement cutané, a conduit les législateurs à imposer aux écrans solaires du commerce une photoprotection efficace dans cette partie du spectre solaire. La réévaluation du pouvoir cancérigène des ultraviolets A a entraîné un autre changement: le Centre de recherche internatio-

Voir les lésions de l'ADN

Quand l'ADN absorbe les ultraviolets, il peut être cassé ou oxydé et subir des dommages, c'est-à-dire que ses bases fusionnent pour former des photoproduits. Plusieurs approches ont été développées pour « observer » ces lésions.

La plus fréquente repose sur l'utilisation d'anticorps – des molécules du système immunitaire – reconnaissant les photoproduits; on injecte de l'ADN irradié – donc lésé – à des lapins de sorte que leur système immunitaire produit des anticorps dirigés contre les lésions de l'ADN qu'il ne reconnaît pas. Puis on récupère les anticorps dans le sang des animaux et on les utilise comme des marqueurs qui se fixent sur l'ADN des cellules plus ou moins bien protégées par rapport aux photoproduits. On visualise ainsi les dommages dans des coupes de peau.



Patrick Avavan

D'autres techniques permettent aux scientifiques de quantifier les cassures des brins d'ADN, ainsi que certaines bases modifiées ou des dimères. On « traite » d'abord l'ADN pour qu'il soit coupé aux endroits des lésions, puis on visualise les fragments en les séparant dans un gel selon une technique dite

grand nombre de fois. On peut même déterminer la position des photoproduits dans un gène.

La dernière technique permet de compter et de caractériser les dommages après les avoir « détachés » de l'ADN. Pour ce faire, on couple un appareil de chromatographie liquide avec un

plant cette approche avec la technique de PCR (*polymerase chain reaction*), qui recopie un

photo), qui peut quantifier en une seule fois tous les dimères et une dizaine de produits d'oxydation

tional sur le cancer a classé les équipements de bronzage artificiel riches en ultraviolets A parmi les agents cancérigènes pour l'homme. L'Institut national du cancer a repris cette classification et a publié un rapport sur le sujet en 2010.

Depuis une trentaine d'années, on conçoit mieux le rôle des dommages de l'ADN dans l'apparition des cancers de la peau. Ces informations ont permis aux scientifiques de mieux comprendre la réaction de cellules aux ultraviolets et d'améliorer les stratégies de protection contre cet agent mutagène que sont les rayonnements ultraviolets du Soleil.

Toutefois, de nombreuses questions liées à la formation de ces dommages restent ouvertes. Ainsi, les photoproduits jouent-ils un rôle de « détecteurs » pour déclencher le bronzage et protéger davantage la peau (mais on ignore comment). Leur présence serait aussi liée à la modulation des défenses immunitaires et à l'apparition des coups de soleil. Depuis la première description du dimère de thymine, y a-t-il un demi-siècle, les dommages engendrés par les ultraviolets dans l'ADN méritent encore l'attention des scientifiques de toutes disciplines.

BIBLIOGRAPHIE

- A. Banyasz et al., Base pairing enhances fluorescence and favors cyclobutane dimer formation induced upon absorption of UVA radiation by DNA, *Journal of the American Chemical Society*, vol. 133, pp. 5163-5165, 2011.
- S. Mouret et al., UVA-induced cyclobutane pyrimidine dimers in DNA: a direct photochemical mechanism?, *Organic & Biomolecular Chemistry*, vol. 8, pp. 1706-1711, 2010.
- S. Mouret et al., Cyclobutane pyrimidine dimers are predominant DNA lesions in whole human skin exposed to UVA radiation, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 103, pp. 13765-13770, 2006.
- J.-L. Ravan et al., Singlet oxygen-mediated damage to cellular DNA determined by the comet assay associated with DNA repair enzymes, *Biological Chemistry*, vol. 385, pp. 17-20, 2004.

L'inflation cosmique

Paul Steinhardt

Selon la théorie de l'inflation, proposée il y a 30 ans, l'Univers aurait connu une brève phase d'expansion vertigineuse juste après le Big Bang. Cependant,

cette théorie qui est au cœur de la cosmologie moderne souffre de sérieuses difficultés.

Il y a 30 ans, en 1981, Alan Guth, alors postdoctorant au Centre de l'accélérateur linéaire de Stanford, a donné une série de séminaires qui ont introduit l'«inflation» dans le lexique de la cosmologie. Ce terme désigne une brève phase d'expansion monstrueusement accélérée, qui aurait eu lieu juste après le Big Bang. L'un de ces séminaires se tenait à l'Université Harvard, où j'étais moi-même postdoctorant. J'ai été immédiatement enthousiasmé par l'idée et j'y ai souvent réfléchi depuis. Nombre de mes collègues en astrophysique, en physique gravitationnelle et en physique des particules ont aussi été séduits. Aujourd'hui encore, le développement de la théorie de l'inflation et ses tests forment un domaine de recherche très dynamique.

La raison d'être de la théorie de l'inflation est de combler une lacune dans la théorie du Big Bang. Selon cette dernière, l'Univers se dilate en se refroidissant lentement depuis ses débuts il y a quelque 13,7 milliards d'années. L'expansion et ce refroidissement expliquent précisément de nombreuses caractéristiques de l'Univers actuel et passé. Mais il y a un problème. Dans la théorie du Big Bang, les conditions initiales de l'Univers sont

précisément fixées : il était initialement très homogène, ne présentant que d'infimes variations de la distribution d'énergie, et il était plat, c'est-à-dire que les rayons lumineux et les objets en mouvement libre se propageaient en ligne droite, comme dans l'espace euclidien usuel.

Une théorie présentée comme un fait établi

En vertu de quoi l'Univers primordial aurait-il été homogène et plat ? *A priori*, ces conditions initiales semblent improbables. C'est là que l'inflation intervient. Selon A. Guth, même si l'Univers avait fait une entrée en scène en désordre, avec une distribution d'énergie très hétérogène et une courbure compliquée, une expansion brève et brutale aurait dilué l'énergie jusqu'à ce qu'elle soit uniformément répartie et aurait aplani toute courbure de l'espace. Après cette brève période d'inflation, l'Univers aurait continué à se dilater, mais au rythme modéré de la théorie du Big Bang, à partir des conditions initiales adéquates pour que son contenu évolue vers les étoiles et les galaxies que nous voyons aujourd'hui.

L'inflation est une idée tellement séduisante que les cosmologistes, moi compris, la présentent souvent aux étudiants et au grand public comme un fait établi. Et pourtant, si les arguments en sa faveur n'ont cessé de se renforcer depuis qu'A. Guth en a proposé l'idée, il en est de même des arguments qui vont à son encontre !

Les deux argumentaires n'ont pas eu le même écho. Les éléments en faveur de l'inflation sont connus d'un grand nombre de physiciens, astrophysiciens et amateurs. Mais peu de gens s'intéressent aux arguments en défaveur de l'inflation, hormis quelques physiciens qui essaient de répondre aux questions gênantes. La plupart des cosmologistes ont mené leurs travaux en utilisant ou en testant les prédictions de la théorie de l'inflation sans se soucier des questions de fond, en espérant qu'elles finiraient par être résolues. Malheureusement, les problèmes ont résisté à tous nos efforts jusqu'à présent.

Ayant contribué à la fois à la théorie de l'inflation et aux théories concurrentes, je me sens partagé et j'ai le sentiment que de nombreux collègues ne savent pas trop quoi penser non plus des arguments contre l'inflation. Pour mettre en évidence cela,

en débat



Pour cette représentation

de l'expansion de l'univers au fil du temps, l'inflation est la période de dilatation brutale qui succède immédiatement au Big Bang (point lumineux).

tion inconfortable, je vais instruire le procès de la cosmologie de l'inflation en présentant les deux points de vue extrêmes. Je vais d'abord jouer le rôle de la défense, en présentant les points forts de la théorie, puis, avec tout autant de conviction, je me glisserai dans le rôle de l'accusation, en présentant les problèmes non résolus les plus préoccupants.

Des arguments en faveur de l'inflation

L'inflation est une théorie aujourd'hui si populaire que son exposé peut être bref. Quelques détails supplémentaires sont nécessaires pour apprécier pleinement ses avantages. L'inflation repose sur un ingrédient nommé énergie inflationnaire qui, combiné à la gravité, entraîne une expansion fulgurante de l'Univers en un bref instant. L'énergie inflationnaire doit être extraordinairement dense, et cette densité doit rester presque constante au cours de toute la période d'inflation. Sa propriété la plus étonnante est qu'elle exerce une force répulsive qui s'oppose à la gravité. C'est cette répulsion qui est à l'origine de l'expansion explosive.

Si l'idée de A. Guth a séduit les théoriciens, c'est parce qu'ils avaient déjà identifié plusieurs sources possibles pour cette énergie. Le principal candidat est un « champ scalaire », une grandeur qui associe à chaque point de l'espace et à tout instant un nombre (un champ électrique est un champ vectoriel, puisqu'il associe à chaque point un vecteur). Dans le cas particulier de l'inflation, ce champ scalaire porte le nom d'inflaton. Le célèbre boson de Higgs, recherché actuellement au LHC (Grand collisionneur de hadrons) du CERN, à Genève, est la particule associée à un autre champ scalaire.

Comme tout champ, l'inflaton a une certaine intensité en chaque point, qui détermine la force qu'il exerce sur lui-même et sur les autres champs. Pendant la phase d'inflation, son intensité est restée presque constante partout. Un champ est donc une certaine quantité d'énergie dite potentielle, qui dépend de son intensité. La relation entre l'intensité et l'énergie peut être représentée par une courbe. Pour l'inflaton, la courbe supposée ressemble à la coupe verticale d'un plateau en pente douce qui plonge dans une vallée encaissée (voir l'encadré page 55).

L'ESSENTIEL

✓ L'inflation cosmique est une théorie largement admise. Selon elle, la géométrie et l'uniformité actuelles du cosmos résultent d'une expansion fulgurante juste après le Big Bang.

✓ À mesure que la théorie de l'inflation se développait, des failles sont apparues dans ses fondements.

✓ De très improbables conditions initiales auraient été nécessaires pour enclencher l'inflation. Pire, celle-ci serait éternelle et la théorie n'aurait alors pas de pouvoir prédictif. Les théoriciens s'efforcent de lever les difficultés ou de forger d'autres théories.

Le champ est initialement sur le plateau, dans un état de haute énergie et d'intensité élevée et va perdre progressivement à la fois de l'intensité et de l'énergie pour évoluer vers l'état d'énergie minimale, en glissant le long de la pente vers le fond de la vallée. En fait, les équations qui décrivent son évolution sont assez comparables à celles d'une bille qui dévalerait une pente de la même forme que la courbe de l'énergie potentielle.

L'énergie potentielle de l'inflaton peut entraîner l'expansion de l'Univers à un rythme accéléré. Ce processus peut lisser et aplanir l'Univers à condition que le

Les arguments en faveur de l'inflation peuvent être résumés en trois points. Premièrement, l'inflation est inévitable. Les développements de la physique théorique depuis la proposition de A. Guth n'ont fait que renforcer l'idée que l'Univers contenait à sa naissance des champs susceptibles d'entraîner l'inflation. Ils apparaissent par centaines dans les théories d'unification de la physique, telles que la théorie des cordes. Dans l'Univers primitif, il est presque certain qu'il existait une région de l'espace où l'un de ces champs remplissait les conditions pour qu'il y ait inflation.

celles du modèle inflationnaire tel que nous le comprenons aujourd'hui ? Il y a de bonnes raisons de penser que la réponse à ces deux questions est non.

Revenons le premier point : l'inflation est-elle vraiment inévitable ? Peut-être, mais si c'est le cas, il y a un corollaire embarrassant : une « mauvaise » inflation est plus probable que la « bonne ». Par mauvaise inflation, on entend une période d'expansion accélérée dont le résultat est en contradiction avec les observations, par exemple qui engendre des fluctuations de température trop grandes. La différence entre la bonne et la mauvaise inflation dépend de la forme précise de la courbe de l'énergie potentielle, qui est contrôlée par un paramètre numérique susceptible en principe de prendre n'importe quelle valeur entre zéro et un. Mais seul un intervalle très étroit de valeurs conduit aux variations de température observées. Dans un modèle inflationnaire typique, cette valeur doit être proche de 10^{-15} . Une valeur un peu moins proche de zéro, par exemple 10^{-10} ou 10^{-10} , engendrerait une mauvaise inflation, ayant un même facteur d'accélération de l'expansion, mais accompagnée de fortes variations des températures.

Nous pourrions être tentés d'ignorer simplement la mauvaise inflation si elle était incompatible avec la vie. Dans ce cas, même si de fortes variations de température survenaient, personne ne serait là pour les observer. Ce type de raisonnement relève du « principe anthropique ». Mais il ne s'applique pas ici. Des hétérogénéités primordiales plus importantes conduiraient à un nombre plus élevé d'étoiles et de galaxies, et l'Univers serait sans doute plus habitable qu'il ne l'est aujourd'hui.

Non seulement la mauvaise inflation est plus probable que la bonne, mais il est encore plus vraisemblable qu'il n'y ait pas d'inflation du tout ! Le théoricien britannique Roger Penrose a soulevé ce point dès les années 1980. Il a appliqué des principes thermodynamiques, semblables à ceux qui servent à décrire les configurations des molécules dans un gaz, pour dénombrer les configurations initiales possibles de l'inflaton et du champ gravitationnel. Certaines de ces configurations conduisent à de l'inflation et donc à une distribution homogène de la matière et à une courbure nulle. D'autres configurations aboutissent directement à un univers homogène et plat, mais sans inflation. Les deux jeux de configurations sont

L'INFLATION A DILATÉ L'UNIVERS D'UN FACTEUR 10^{25}

en moins de 10^{-30} seconde, de quoi l'a rendu homogène et aplanir toute courbure.

Le champ reste sur le plateau suffisamment longtemps (environ 10^{-30} seconde) pour dilater l'Univers d'un facteur 10^{25} ou plus.

L'inflation s'achève quand le champ atteint la fin du plateau et se précipite vers le fond de la vallée. À ce stade, l'énergie potentielle se convertit en formes d'énergie plus familières, à savoir la matière ordinaire, le rayonnement et la matière noire, qui emplissent l'Univers actuel. L'Univers entre alors dans une période d'expansion modérée qui ralentit doucement, au cours de laquelle la matière s'aggrave pour former les structures cosmiques.

L'inflation lisse l'Univers, mais, de la même façon que l'étirement d'un morceau de caoutchouc laisse de petites irrégularités, ce lissage n'est pas parfait. De petites irrégularités subsistent à cause d'effets quantiques. Les lois de la physique quantique imposent que l'intensité d'un champ ne peut avoir exactement la même valeur partout dans l'espace : elle subit des fluctuations aléatoires. En raison de ces fluctuations quantiques, l'inflation prend fin à des instants légèrement différents selon les régions de l'espace, qui se retrouvent donc à des énergies légèrement différentes. Ces variations spatiales sont les germes qui donneront à terme les étoiles et les galaxies. L'une des prédictions de la théorie de l'inflation est que ces fluctuations de température sont pratiquement invariantes d'échelle, c'est-à-dire que leur amplitude ne dépend pas de la taille de la région considérée, il est comparable à toutes les échelles.

Deuxièmement, l'inflation explique pourquoi l'Univers est si homogène et plat aujourd'hui. Personne ne sait dans quelle mesure c'était le cas au moment du Big Bang, mais avec l'inflation, on n'a pas besoin de le savoir, car la période d'expansion accélérée l'a étiré, lui conférant son homogénéité et sa courbure nulle.

Troisièmement, et ce point est certainement le plus convaincant, la théorie de l'inflation a une grande portée prédictive. De nombreuses observations du rayonnement de fond diffus cosmologique (le fossile de la première lumière émise après le Big Bang) ou de la distribution des galaxies ont ainsi confirmé que les fluctuations de la distribution d'énergie dans l'Univers primitif étaient presque invariantes d'échelle.

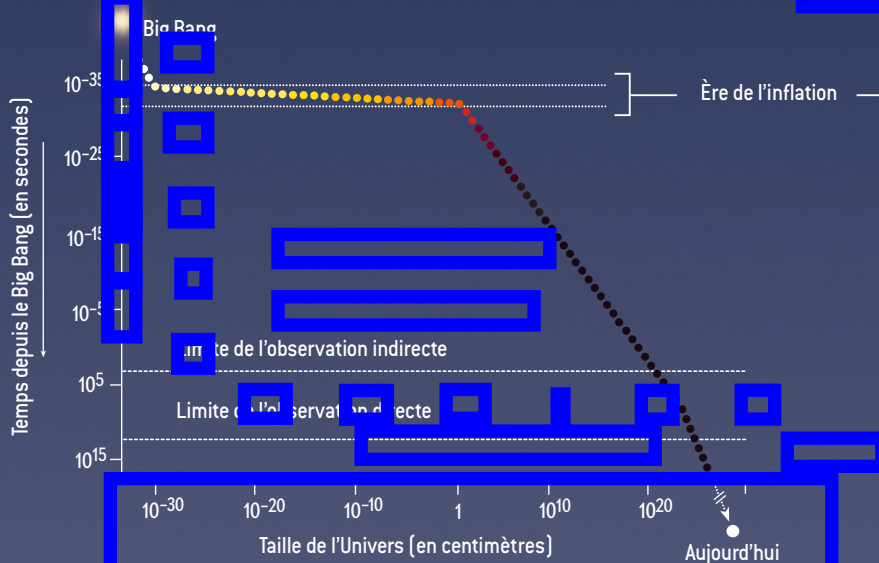
Des arguments à charge

Passons maintenant en revue les arguments en défaveur de la théorie de l'inflation. Les premiers signes qu'une théorie est vouée à l'échec sont en général de petits désaccords entre les observations et les prédictions. Ce n'est pas le cas ici : les données observationnelles concordent parfaitement avec les prédictions de la théorie de l'inflation formulées au début des années 1980. Les arguments contre l'inflation relèvent plutôt en cause les fondements mêmes de la théorie. Cette dernière fonctionne-t-elle vraiment aussi bien qu'on l'a présentée ? Les prédictions faites au début des années 1980 sont-elles encore

UNE POUSSEE DE CROISSANCE HORS DU COMMUN

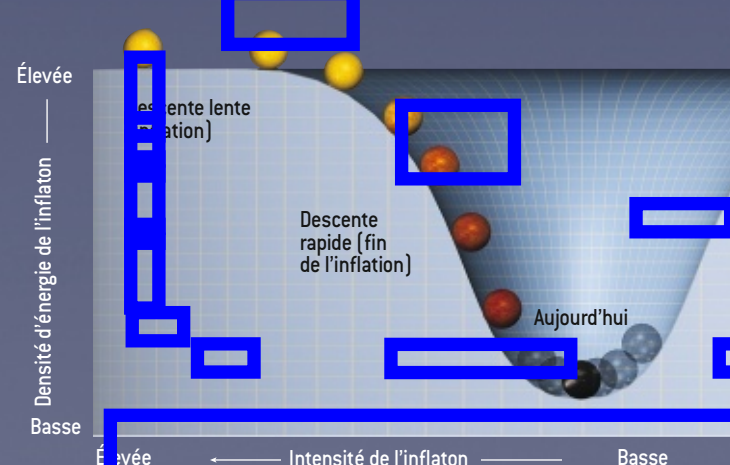
D'après les observations, l'Univers est en expansion depuis 13,7 milliards d'années. Mais que s'est-il passé au tout début, quand il était encore trop tôt pour que nous puissions le voir directement ? L'idée dominante est celle de l'inflation. Elle suppose que l'Univers embryonnaire s'est brièvement, mais énormément dilaté. Une telle poussée de croissance aurait effacé toute courbure de l'espace, ce qui expliquerait la géométrie plane de l'Univers actuel. Elle aurait par ailleurs dilué son contenu, ce qui expliquerait son homogénéité à grande échelle. Enfin, l'inflation aurait semé les graines des futures galaxies.

CE QUE L'INFLATION FAIT



Le taux de croissance durant l'inflation était impressionnant, même à l'échelle cosmique. En 10^{-30} seconde, l'Univers s'est dilaté d'un facteur 10^{25} au moins. Les régions de l'Univers ont été étirées les unes des autres à une vitesse supérieure à celle de la lumière.

CE QUI A CAUSÉ L'INFLATION



Un champ scalaire nommé inflaton engendre une force répulsive qui entraîne la dilatation de l'espace. Initialement, ce champ a une énergie potentielle élevée ; il en perd progressivement jusqu'à atteindre un état d'énergie minimale, qui marque l'arrêt de l'inflation. Le comportement de ce champ est mathématiquement analogue à celui d'une bille qui roule sur la pente douce d'un plateau et dévale ensuite la pente vers le fond d'une vallée.

Le volume d'espace que nous observons aujourd'hui était initialement un million de milliards de fois plus petit qu'un atome d'hydrogène. Après l'inflation, il a atteint la taille d'une pièce de dix centimètres. Durant les 13,7 milliards d'années écoulés depuis, l'espace a continué de se dilater, mais à un rythme moins effréné, ce qui a permis à des structures complexes telles que les galaxies de se former.

Martin Godwin, Jan Visschers

et il est donc peu probable de déboucher sur un univers plat. Mais la conclusion est assez troublante, de R. Penrose est qu'il est $10^{10^{100}}$ fois plus probable d'obtenir un univers plat sans inflation qu'avec inflation !

Les tourments d'une inflation éternelle

Une autre approche qui conduit à la même conclusion est d'extrapoler l'histoire de l'Univers primitif à partir des conditions actuelles en remontant le temps à l'aide des lois physiques. Une telle extrapolation n'est pas univoque : étant donné les conditions moyennes actuelles, homogènes et de courbure nulle, de nombreux événements différents auraient pu avoir lieu dans le passé. Mais en 2008, Gary Gibbons, de l'Université de Cambridge, et Neil Turok, de l'Institut Perimeter de physique théorique dans l'Ontario, ont montré qu'un nombre écrasant d'extrapolations font intervenir une inflation insignifiante.

Cette conclusion est en accord avec celle de R. Penrose. Un univers plat et homogène est improbable, et l'inflation est un mécanisme puissant pour obtenir ces propriétés, mais cet atout est contrebalancé par le fait que les conditions requises pour amorcer la bonne dose d'inflation sont encore plus improbables ! Tous facteurs pris en compte, l'Univers a plus de chances d'être arrivé à son état actuel sans l'aide de l'inflation qu'avec.

De nombreux physiciens et cosmologistes trouvent ces arguments théoriques peu convaincants comparés à l'accord entre les prédictions formulées au début des années 1990 et les observations cosmologiques de précision disponibles aujourd'hui. Après tout, une expérience concluante l'emporte sur n'importe quelle spéculation théorique. Mais il y a un piège : les prédictions du début des années 1980 s'appuyaient sur une interprétation naïve du mécanisme de l'inflation, représentation qui s'est révélée en grande partie fautive.

Ce changement de point de vue a commencé lorsqu'on s'est rendu compte que l'inflation est éternelle : une fois entamée, elle ne s'arrête jamais. Cela résulte de la combinaison de la physique quantique avec l'expansion accélérée. Nous avons vu que les fluctuations quantiques peuvent légèrement modifier le taux de l'inflation et prendre fin. Les petites fluctua-

tions ont de petits effets. Cependant, les fluctuations étant aléatoires, elles seront grandes dans certaines régions de l'espace, et conduisent à des retards importants.

Ces régions en retard sont extrêmement rares, et on pourrait penser qu'elles sont négligeables. Mais elles sont en inflation ! Elles continuent ainsi à se dilater vertigineusement et, en quelques instants, éclipsent les régions où l'inflation s'est déjà terminée. Le résultat est un océan d'espace en inflation entourant de petites îles emplies

de matière et de rayonnement. Qui plus est, l'inflation fluctue aussi dans les régions qui croissent de façon sauvage, et engendrent à leur tour de nouvelles régions en inflation et de nouvelles îles de matière, chacune constituant un univers en soi. Ce processus se poursuit à l'infini, créant un nombre illimité de régions où l'inflation est terminée, entourées par une quantité sans cesse grandissante d'espace qui se dilate. Si cette idée ne vous déroute pas, ne soyez pas inquiet : le problème reste à venir.

PROBLÈME N° 1 : LA MAUVAISE INFLATION

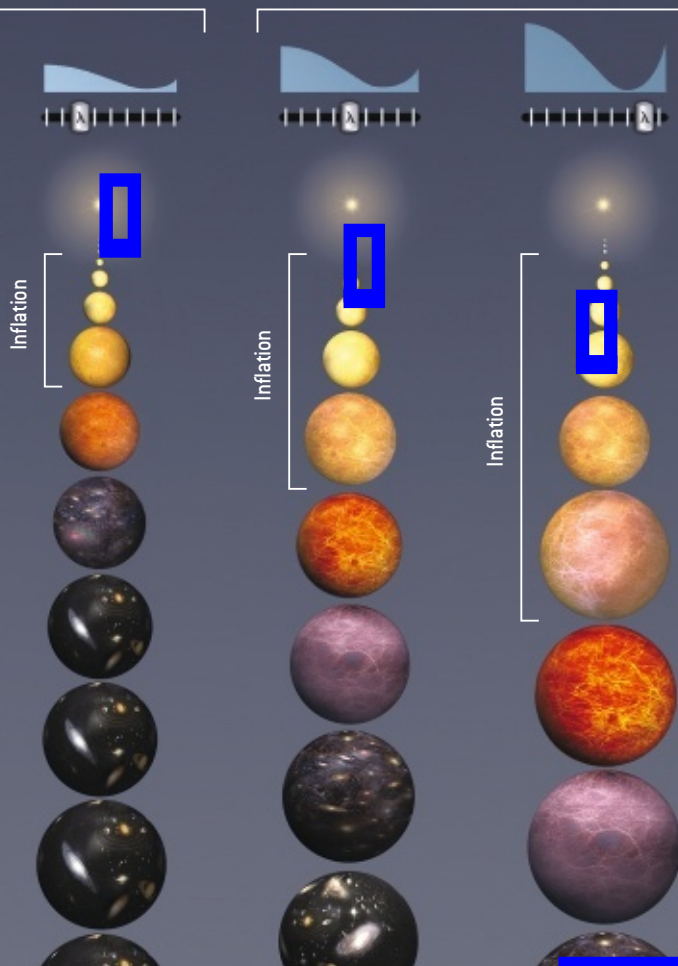
L'inflation est censée engendrer naturellement un grand volume d'espace homogène et plat reproduisant les structures à grande échelle observées. Malheureusement, cela se produit seulement lorsque la courbe de potentiel de l'inflaton a un profil très particulier, obtenu par un ajustement fin des paramètres (designés collectivement ci-dessous par λ). Pour tous les autres profils d'énergie potentielle, le résultat est en contradiction avec les observations ; on considère alors que l'inflation est « mauvaise ».

« Bonne » inflation

Pour la bonne courbe de l'énergie potentielle, l'inflation produit la densité de galaxies observée.

« Mauvaise » inflation

En général, l'inflation dure trop longtemps et produit trop de galaxies.



Ces régions ne sont pas toutes semblables. La nature aléatoire des lois quantiques garantit que certaines sont très hétérogènes, ou de courbure très élevée. Cela ressemble au problème de l'inflation mal ajustée décrit précédemment, mais la cause en est différente. La mauvaise inflation est probable parce que les paramètres contrôlant la forme du potentiel de l'inflaton ont de fortes chances d'être trop grands. Mais dans le cas présent, l'hétérogénéité résulte de l'inflation sans fin et

des fluctuations quantiques aléatoires, quelles que soient les valeurs des paramètres initiaux.

Pour être exact, les régions en inflation retardée sont en fait en nombre infini. Et un nombre infini d'îles où l'inflation est achevée auront des propriétés semblables à celles que nous observons, tandis qu'un nombre également infini auront des propriétés différentes. A. Guth a résumé ainsi la vraie nature de l'inflation : « Dans un univers en inflation éternelle, tout ce

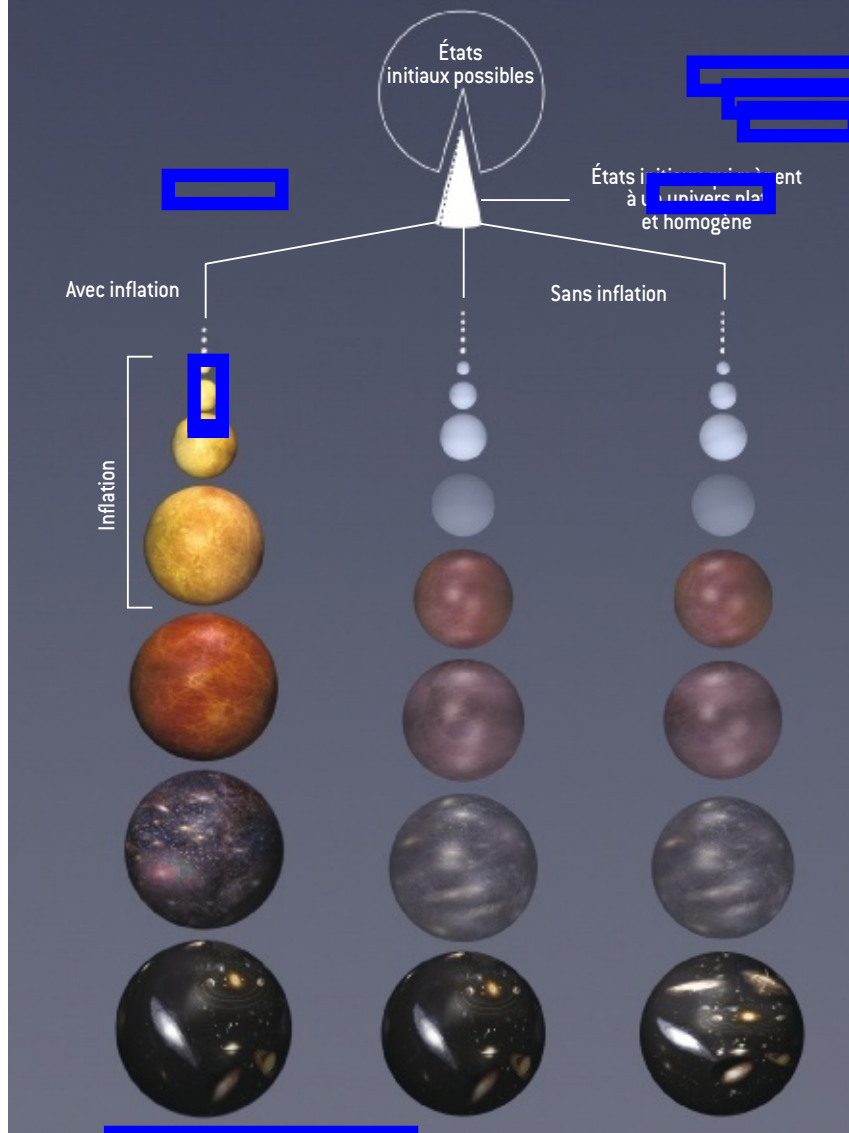
qui peut arriver arrive ; en fait, cela arrive un nombre infini de fois. »

Alors, notre Univers est-il l'exception ou la règle ? Dans un ensemble infini d'îles-univers, c'est difficile à dire. Imaginez que l'on trie les univers par catégories pour essayer d'évaluer leurs probabilités. La difficulté est qu'il y a un nombre infini de façons de trier un ensemble infini, qui produisent un nombre infini de probabilités. Il n'y a donc aucune façon de juger quel type de région-univers est le plus probable dans un univers en inflation éternelle.

Nous avons maintenant un problème. Que signifie l'affirmation que l'inflation est prédictive (par exemple « L'univers est homogène »), si tout ce qui peut arriver arrive un nombre infini de fois ? Et si la théorie ne fait pas de prédictions testables, comment prétendre que la théorie est en accord avec les observations ?

PROBLÈME N° 2 : LES CONDITIONS INITIALES

L'inflation est censée se produire quelles que soient les conditions initiales de l'Univers. Une analyse plus poussée montre cependant qu'elle requiert des conditions de départ précises. De tous les états initiaux possibles, seule une petite fraction conduit à des univers homogènes et plats semblables à celui que l'on observe. Parmi ceux-ci, la plupart ne passent même pas par une période d'inflation, tandis que seule une part infinitésimale subit l'inflation.



Des rustines sur la théorie

Les théoriciens sont conscients du problème, mais, en dépit du fait qu'ils se débattent avec depuis 25 ans, ils espèrent parvenir à le résoudre et à rétablir le tableau inflationnaire naïf du début des années 1980, qui les avait convaincus d'adopter cette théorie.

Certains suggèrent d'essayer de construire des théories où l'inflation n'est pas éternelle, pour étouffer dans l'œuf cette épineuse infinité d'univers. Mais le caractère éternel est une conséquence naturelle de l'inflation couplée à la physique quantique. Pour l'éviter, l'Univers devrait être au départ dans un état très particulier et rempli d'une forme spéciale d'énergie inflationnaire, de sorte que l'inflation se termine en toute région de l'espace avant que les fluctuations quantiques aient une chance de la faire redémarrer. Mais dans ce scénario, le résultat final est très sensible à l'état initial. Cela va à l'encontre du but recherché : expliquer l'univers observé, quelles qu'aient été les conditions qui prévalaient lors de l'inflation.

Une stratégie alternative suppose que les régions telles que notre Univers observable sont le résultat le plus probable de l'inflation. Les partisans de cette approche imaginent une « mesure », une règle spécifique pour attribuer une probabilité à un type de région. Mais cette notion *ad hoc* de mesure est un aveu implicite que la théorie de l'inflation à elle-même ne prédit rien.

Pire encore, les théoriciens ont proposé de nombreuses mesures aussi raisonnables les unes que les autres qui conduisent à des conclusions différentes. Par exemple, la mesure du volume suggère que les régions soient pondérées par leur taille. Au premier abord, ce choix paraît sensé. L'idée qui sous-tend l'inflation est qu'elle explique l'homogénéité et la platitude que nous observons en créant de grands volumes d'espace. Malheureusement, la mesure du volume

se sont produites après la nôtre, après davantage d'inflation, vont occuper un volume total considérablement plus important. Par conséquent, les régions plus jeunes que la nôtre sont beaucoup plus répandues. Avec cette mesure, notre existence même paraît plus qu'improbable.

Les partisans des mesures ont adopté une approche par tâtonnements : ils inventent et testent des mesures jusqu'à trouver celle qui produira la réponse souhaitée, à savoir que notre Univers est hautement probable. Supposons qu'ils y parviennent. Ils auront alors besoin d'un autre principe justifiant l'utilisation de cette mesure plutôt que d'une autre, et d'un principe pour choisir ce principe, et ainsi de suite.

Une autre approche encore consiste à invoquer le principe anthropique. Alors quel concept de mesure suppose que nous vivons dans une région typique, le principe anthropique suppose que nous vivons dans une région très particulière, dotée des conditions *a minima* nécessaires pour abriter la vie. L'idée est que les conditions régnant dans les régions les plus typiques sont incompatibles avec la formation de galaxies ou d'étoiles, ou toute autre condition préalable à la vie telle que nous la connaissons. Même si les régions typiques occupent plus d'espace que la nôtre, on peut les ignorer parce que seules les régions habitables comptent.

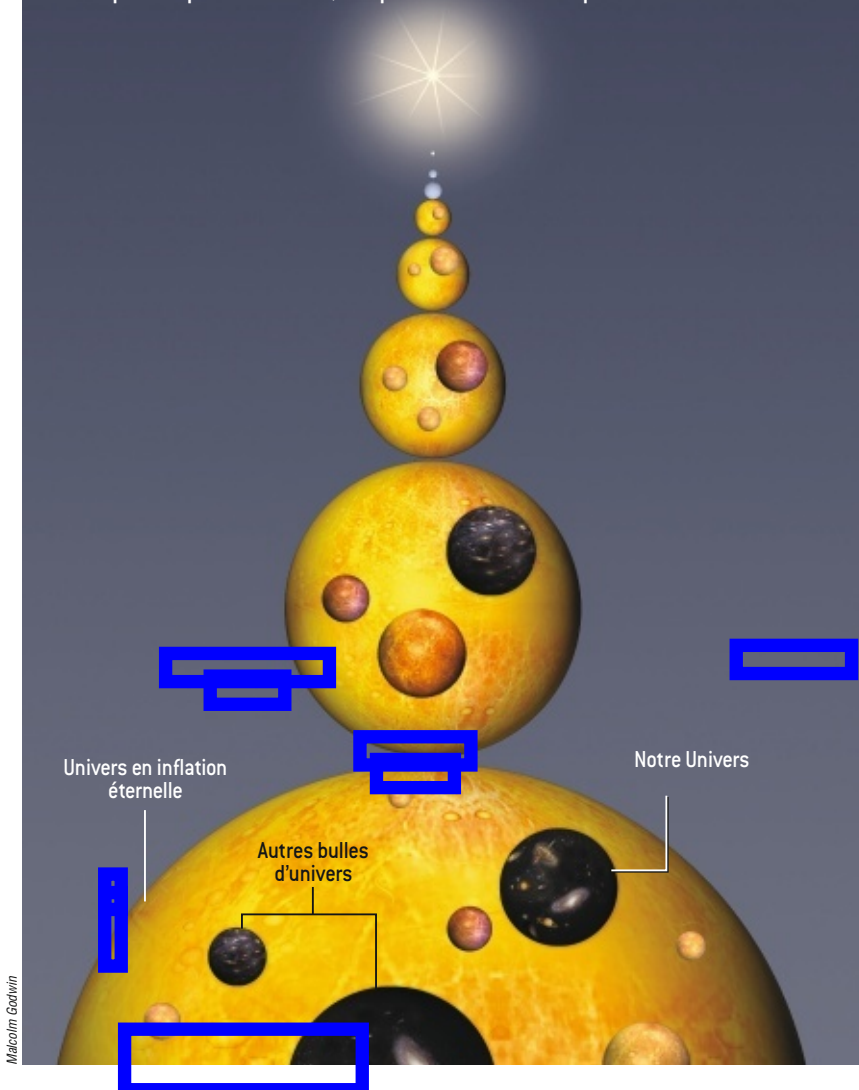
Malheureusement pour cette idée, les conditions de notre Univers ne sont pas le minimum requis pour la vie : l'Univers est plus plat, plus homogène et plus invariant d'échelle qu'il n'aurait besoin de l'être pour héberger la vie. Les régions plus typiques, par exemple plus jeunes que la nôtre, sont *a priori* tout aussi habitables et beaucoup plus nombreuses.

Un Univers cyclique

À la lumière de ces arguments, le *credo* selon lequel les observations cosmologiques ont vérifié les prédictions principales de la cosmologie inflationnaire est trompeur. On peut juste dire que les données ont confirmé les prédictions de la théorie de l'inflation naïve telle qu'elle était comprise avant 1983. Mais cette théorie n'est pas la cosmologie inflationnaire d'aujourd'hui. La première théorie suppose que l'inflation conduit à un résultat prévisible régi par les lois de la physique classique. En réalité, c'est la physique quantique

PROBLÈME N° 3 : UNE INFLATION ÉTERNELLE

Les prédictions de l'inflation sont censées avoir été vérifiées par les observations. Mais est-ce vraiment le cas ? En raison des fluctuations quantiques qui font varier son énergie potentielle, l'inflation continue indéfiniment dans l'ensemble de l'espace. Mais là où elle s'achève localement, une bulle d'univers voit le jour et grandit à un régime normal. Nous vivons dans une telle région, mais il en existe un nombre infini ayant une variété infinie de propriétés. Tout ce qui peut arriver se produit dans une certaine bulle d'univers. En d'autres termes, l'inflation prédit que tout arrive, ce qui revient à ne rien prédire.



tique qui gouverne l'inflation, et tout ce qui peut arriver arrive. Et si la théorie de l'inflation ne fait pas de prédictions fermes, à quoi sert-elle ?

Le problème sous-jacent est que les comportements atypiques ne sont pas pénalisés, et même au contraire. Les régions où la fin de l'inflation est en retard continuent à croître à un rythme accéléré et prennent donc immensément le dessus. Dans une situation idéale, toute région qui ne suit pas le rythme général se dilaterait plus lentement ou, mieux encore, rétrécirait. L'essentiel de l'Univers serait alors constitué de régions au comportement « sage », où le lissage prend fin en temps et en heure, et l'univers observé aurait alors le confort de la normalité.

Une théorie alternative à la cosmologie inflationnaire que mes collègues et moi-même avons proposée jouit précisément de cette propriété. Selon cette « théorie cyclique », comme on la nomme, le Big Bang n'est pas le commencement de l'espace et du temps, mais plutôt un « rebond » à partir d'une phase précédente de contraction vers une nouvelle phase d'expansion, accompagnée par la création de matière et de rayonnement. Cette théorie est cyclique parce que, au bout de 1 000 milliards d'années, l'expansion dégénère en contraction, jusqu'à un nouveau rebond et ainsi de suite. Le point clef est que le lissage de l'Univers se produit avant le Big Bang, au cours de la période de contraction (de façon moins intuitive que la dilatation, une contraction suffisante rend aussi un matériau homogène). Toute région en retard continue à se contracter pendant que les régions normales rebondissent en temps et en heure et commencent à se dilater, si bien que les régions retardées restent comparativement petites et négligeables.

Le lissage pendant la contraction a une conséquence observable. Durant toute phase de lissage, que ce soit dans la théorie de l'inflation ou la théorie cyclique, les fluctuations quantiques engendrent de petites distorsions de l'espace-temps qui se propagent, nommées ondes gravitationnelles, et qui laissent une empreinte caractéristique sur le rayonnement de fond diffus. Leur amplitude est proportionnelle à la densité d'énergie. Dans la théorie classique, l'inflation se produit à un stade où l'Univers est très dense, alors que le processus équivalent dans la théorie cyclique se produit quand l'Univers est primordial.

ment, et, si bien que l'empreinte des ondes gravitationnelles serait radicalement différente. Bien sûr, la théorie cyclique est relativement jeune et pourrait rencontrer ses propres problèmes, mais elle illustre l'existence d'alternatives qui ne seraient pas soumises à une inflation éternelle et incontrôlable. Nos travaux préliminaires suggèrent que le modèle cyclique n'est pas affecté par les autres problèmes décrits précédemment.

Bien sûr, je viens de présenter des arguments pour et contre l'inflation comme deux positions radicales, sans laisser la place à un contre-interrogatoire et sans y mettre de nuances. Lors d'une réunion sur ces sujets organisée en janvier 2011 au Centre de physique théorique de Princeton, de nombreux physiciens éminents ont plaidé que les problèmes de l'inflation n'étaient que des « douleurs de croissance » et ne devraient pas ébranler notre confiance dans l'idée de base de la théorie. D'autres, dont je suis, pensaient au contraire que les problèmes affectent le cœur de la théorie, et qu'elle doit être sérieusement corrigée ou remplacée.

Le test des ondes gravitationnelles

Au bout du compte, ce sont les données observationnelles qui trancheront. Les prochaines observations du fond diffus cosmologique par le satellite *Planck* et d'autres missions du sol ou embarquées en ballon seront déterminantes. Des expériences pour rechercher l'empreinte des ondes gravitationnelles sont déjà en cours, et les résultats devraient émerger d'ici deux à trois ans. La détection d'une empreinte d'onde gravitationnelle étayerait la théorie de l'inflation; l'absence de détection serait tout le contraire. Pour que l'inflation ait un sens en dépit d'un résultat nul, les cosmologistes devraient supposer que l'inflation avait un potentiel très particulier avec juste la forme adéquate pour étouffer les ondes gravitationnelles, ce qui semble assez peu probable. De nombreux chercheurs se tourneraient alors vers des théories alternatives, comme celle de l'univers cyclique, qui prédit naturellement un signal d'ondes gravitationnelles si faible qu'il ne serait pas observable. Ce résultat sera un moment critique dans notre quête pour déterminer pourquoi l'Univers est tel qu'il est, et ce que l'avenir lui réserve.

L'AUTEUR



Paul STEINHARDT est directeur du Centre de physique théorique de l'Université de Princeton, aux États-Unis.

BIBLIOGRAPHIE

- M. Bojowald, *Univers rebondissant*, *Pour la Science*, n° 375, janvier 2009.
http://bit.ly/sols375_rebond
- G. Gibbons et N. Turok, *The measure problem in cosmology*, *Physical Review D*, vol. 72, 161301, 16 mars 2008. Prépublication : <http://arxiv.org/abs/hep-th/0602095>
- P. Steinhardt et N. Turok, *Endless Universe: Beyond the Big Bang*, Doubleday, 2007.
- G. Veneziano, *Univers avant le Big Bang*, *Pour la Science*, n° 320, juin 2004.
http://bit.ly/sols320_bigbang
- A. Linde, *Quantum cosmology, inflation, and the anthropic principle*, dans *Science and Ultimate Reality: Quantum Theory, Cosmology and Complexity*, Cambridge University Press, 2004.
- A. Guth, *The Inflationary Universe*, Basic Books, 1998.

Les acides gras et la santé

Jean-Michel Lecerf et Sylvie Vaneecloo

Omniprésents dans l'organisme, les acides gras oméga 3 et oméga 6 sont indispensables. Une alimentation variée et riche en poisson en assure un apport suffisant.

Leur éventuel usage thérapeutique, pour lutter notamment contre certaines formes de dépression, est étudié.

Les acides gras oméga 3 et 6 sont présents dans tout l'organisme et assurent de nombreuses fonctions physiologiques : ce sont des constituants importants des membranes cellulaires de tous les tissus. De ce fait, ils jouent un rôle essentiel – tant structurel que fonctionnel – dans le système nerveux, cardiovasculaire, hormonal, immunitaire, etc. Ce sont également des substances qui stockent de l'énergie (dans le tissu adipeux) et en fournissent à l'organisme, lors d'un effort musculaire par exemple.

Les acides gras sont des composés organiques constitués d'une chaîne hydrocarbonée formée d'atomes d'hydrogène et de carbone) plus ou moins longue. Leur nomenclature dérive du nombre d'atomes de carbone et de liaisons doubles (ou insaturées) qu'ils contiennent (voir l'encadré page 63). La place de la première double liaison à partir du groupement méthyle (CH_3) terminal définit une famille : les acides gras contenant plusieurs liaisons insaturées – les polyinsaturés – dont la première double liaison est située

entre le cinquième atome de carbone de la chaîne appartient à la famille des oméga 6, et ceux dont la première double liaison est sur le troisième atome de carbone appartiennent à la famille des oméga 3. Il n'existe que deux familles d'acides gras polyinsaturés : les oméga 6 et les oméga 3. Les chefs de file de ces deux familles, respectivement l'acide linoléique et l'acide alpha linolénique, ne sont synthétisés ni par l'homme ni par les animaux, mais le sont par les végétaux : ils sont donc essentiels. Il existe également des acides gras saturés, apportés par l'alimentation, mais aussi synthétisés à partir des glucides ou de l'alcool, et des acides gras mono-insaturés (ne contenant qu'une seule liaison double) issus des acides gras saturés et de l'alimentation.

On a découvert l'importance de l'acide linoléique chez le rat en 1929 et chez l'homme en 1958. Et c'est en 1982 que l'on a mis en évidence que l'acide alpha linolénique est un acide gras essentiel de par ses fonctions, et que l'organisme ne le synthétise pas : il doit absolument être

L'ESSENTIEL

✓ L'acide alpha linolénique, chef de file des oméga 3 et l'acide linoléique, chef de file des oméga 6 sont indispensables.

✓ L'organisme ne les synthétise pas, de sorte qu'ils doivent être apportés par les aliments, les huiles végétales et le poisson.

✓ L'EPA et le DHA sont indispensables au bon fonctionnement du cerveau.

✓ Quand l'alimentation est variée on ne constate pas de carence.

✓ Des apports élevés en oméga 3 soulageraient certaines personnes dépressives.

apporté par l'alimentation. Les carences en acides gras essentiels conduisent à des anomalies cutanées, neurologiques, de croissance et de reproduction... En réalité, chez l'homme elles sont rarissimes, car les apports sont suffisants pour assurer ces fonctions sont extrêmement faibles, et, par conséquent, couverts par l'alimentation. Toutefois, même en l'absence de carence, des apports trop faibles ou des proportions inadéquates des différents types d'acides gras risquent d'entraîner des déséquilibres et d'avoir des répercussions sur la santé.

Nous examinerons quelles sont les sources des acides gras, comment ils sont métabolisés, quels sont leurs rôles notamment sur le cerveau, l'organe le plus riche en lipides après le tissu adipeux. En effet, le cerveau est constitué de quelque 60 pour cent de lipides, notamment de l'acide arachidonique – AA – et l'acide docosahexaénoïque – DHA –, lesquels

représentent à eux deux près de 30 pour cent des lipides du cerveau.

Les acides gras ne sont pas ingérés tels quels, mais sous forme de triglycérides, des assemblages de trois acides gras et de glycérine, un alcool. Émulsifiés avec les sels biliaires dans le duodénum, les triglycérides à chaîne longue (contenant plus de dix atomes de carbone) sont incorporés dans des micelles où ils subissent l'action d'enzymes (des lipases) pancréatiques. Ces dernières les hydrolysent, c'est-à-dire permettent la libération des acides gras dans les cellules intestinales, les entérocytes, où ils sont réassemblés en triglycérides assimilables par l'organisme grâce à une autre enzyme, l'ACAT, « empaquetés » avec l'apoprotéine B48 et du cholestérol.

L'ensemble forme de grosses particules de lipoprotéines (nommées chylomicrons) véhiculant les lipides alimentaires dans le sang jusqu'aux tissus qui en ont

besoin. Les muscles qui produisent de l'énergie, le tissu adipeux qui les stocke, et le foie qui les métabolise (voir la figure 2). Dans le foie, d'autres transporteurs de lipides, les lipoprotéines de très basse densité – VLDL –, fournissent à tout moment les acides gras et le cholestérol aux tissus qui les utilisent.

Les familles des oméga 3 et des oméga 6 sont indépendantes, mais pas totalement. Ainsi, certaines enzymes (les désaturases qui créent des liaisons doubles entre atomes de carbone) sont communes aux deux familles, de sorte qu'il y a compétition métabolique entre les deux familles selon la quantité de précurseurs d'oméga 3 et d'oméga 6 disponibles et l'affinité de cette enzyme pour le substrat à transformer, les molécules de l'une ou l'autre famille seront métabolisées en priorité. Au terme de toute la chaîne des modifications biochimiques que subissent les acides gras ingérés, l'acide linoléique est transformé en acide arachidonique, tandis que l'acide alpha linoléique conduit à l'acide eicosapentaénoïque ou EPA et enfin à l'acide docosahexaénoïque, DHA. Ce sont les acides gras polyinsaturés à

À quoi servent-ils ?

Tous les acides gras (saturés, mono-insaturés et polyinsaturés) fournissent de l'énergie. Ils jouent tous un rôle important dans la structure des membranes cellulaires, notamment dans le cerveau. Ils y interviennent surtout dans la neurotransmission (nous y reviendrons). En ce qui concerne les acides gras polyinsaturés oméga 6 et oméga 3, ils sont particulièrement concentrés dans les phospholipides des membranes cellulaires de tous les tissus, où ils peuvent être libérés par une enzyme membranaire, la phospholipase A2. Ils conduisent alors à la formation de divers médiateurs chimiques ayant d'importantes propriétés physiologiques. Ainsi, l'acide arachidonique (oméga 6) et l'EPA (oméga 3) libèrent des prostaglandines, des thromboxanes et des leucotriènes. Ces molécules interviennent dans

1. UNE ALIMENTATION VARIÉE garantit un apport suffisant en acides gras essentiels, indispensables au bon fonctionnement de l'organisme, mais que ce dernier ne peut synthétiser. Le poisson gras est particulièrement riche en acides gras polyinsaturés oméga 3.



© H. CREATION/Mananimages/Corbis

les réactions d'agrégation des plaquettes sanguines dans les phénomènes inflammatoires et dans la vasoconstriction des vaisseaux sanguins. De plus, le DHA aboutit à la production de rétrovires et de neuroprotectines, autres médiateurs chimiques impliqués dans l'immunité et l'inflammation. Toutefois, notons que, selon qu'ils

sont issus de la famille des oméga 3 ou de celle des oméga 6, ces médiateurs chimiques ont souvent des actions antagonistes. Comme toujours dans les réactions où interviennent les acides gras polyinsaturés, les molécules obtenues et les réactions qu'elles contrôlent dépendent de leurs proportions respectives (voir la figure 3).

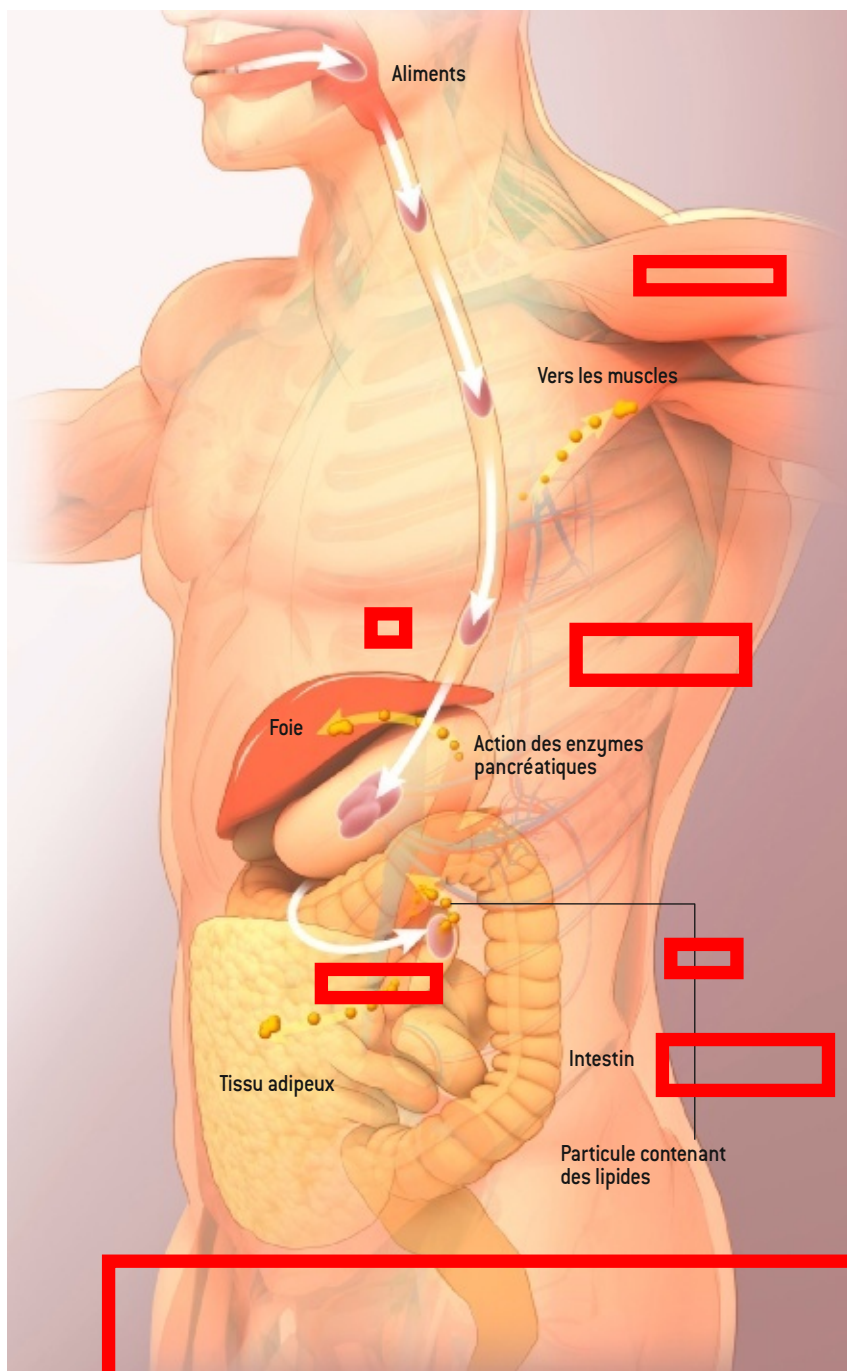
L'équilibre des oméga 6 et des oméga 3 est déterminé dès les premières étapes de la biotransformation de l'acide linoléique et de l'acide alpha linoléique qui, nous l'avons évoqué, sont en compétition pour les enzymes qui les transforment. La première étape de cette biotransformation est assurée par l'enzyme delta 6 désaturase. Or cette enzyme a une plus grande affinité pour l'acide alpha linoléique que pour l'acide linoléique. Mais en plus de l'affinité de l'enzyme pour son substrat, il faut prendre en compte la quantité de substrat à transformer. Or les apports en acide linoléique dans l'alimentation actuelle sont nettement supérieurs. Ainsi, le produit le moins concentré est aussi celui sur lequel l'enzyme agit préférentiellement et inversement, ce qui assure l'équilibre entre les deux.

La chaîne de biosynthèse des oméga 3 et des oméga 6, ainsi que de tous leurs sous-produits dérivés, implique tant de maillons que les circonstances physiologiques où il peut exister un déséquilibre sont multiples. Chez le nouveau-né, en raison d'une immaturité du système enzymatique, la production d'EPA et surtout de DHA est faible; heureusement, le lait maternel compense le déficit. Au contraire, chez les femmes, et surtout chez les femmes enceintes, l'activité de l'enzyme delta 6 désaturase responsable de la synthèse du DHA est accrue, de sorte que l'apport de DHA au fœtus et au nouveau-né allaité est suffisant.

Acides gras essentiels ou indispensables ?

Récemment encore, on considérait que seuls l'acide linoléique et l'acide alpha linoléique étaient indispensables : ils ne sont pas du tout synthétisés par l'organisme et sont à la source de nombreux dérivés. En réalité, sauf chez la femme enceinte, la bioconversion de l'acide alpha linoléique en EPA et surtout en DHA est beaucoup plus faible qu'on ne le pensait, d'autant qu'elle est atténuée en cas d'un excès d'oméga, un déficit en insuline, la dénutrition ou l'âge. Étant donné les nombreuses fonctions assurées par le DHA et la découverte du fait que sa synthèse naturelle est souvent insuffisante, les autorités sanitaires l'ont déclaré indispensable au même titre que les deux chefs de file des oméga.

Précisons ici la différence entre les acides gras indispensables et acides gras essentiels. On devra parler d'acides



2. LES LIPIDES CONTENUS DANS LES ALIMENTS subissent l'action de diverses enzymes, notamment dans le duodénum et le pancréas, ce qui libère les acides gras. Dans les cellules intestinales, des triglycérides sont resynthétisés. Ils se présentent sous forme de particules lipidiques qui sont véhiculées par le sang vers les muscles, où elles fournissent de l'énergie, au tissu adipeux, où elles sont stockées, et au foie, où elles sont transformées.

gras indispensables pour désigner ceux que l'organisme ne peut pas synthétiser du tout (acide linoléique et acide alpha linoléique) ou pas synthétiser efficacement, tel le DHA (le risque de déficit en EPA est inférieur, car une partie du DHA est reconvertis en EPA). Le terme essentiel signifie que les acides gras jouent des rôles essentiels mais l'organisme en assure la synthèse. Toutefois, l'usage veut que l'on parle souvent d'acides gras essentiels pour désigner les acides gras indispensables. Les besoins nutritionnels au sens strict ne concernent que les acides gras indispensables: l'acide linoléique, l'acide alpha linoléique et le DHA.

Les sources des oméga

Un grand nombre d'aliments d'origine animale ou végétale en contiennent. L'acide alpha linoléique est présent dans les plantes: on en trouve ainsi dans les graines de lin, le germe de blé, le chanvre, les noix, le soja, le colza et donc les huiles correspondantes. Les margarines qui contiennent ces huiles renferment de l'acide alpha linoléique (trois pour cent de la phase grasse). Le chocolat contient de l'acide alpha linoléique. Les produits laitiers ont une faible teneur, mais représentent par leur quantité la première source d'acide alpha linoléique. Les œufs ont une faible teneur en acide alpha linoléique, mais cette concentration peut être accrue si on modifie l'alimentation des poules avec des végétaux, tels que du lin ou des microalgues.

En effet, les microalgues du phytoplancton sont riches en acides gras oméga 3, acide alpha linoléique, mais surtout EPA et DHA, ce qui peut accroître l'accumulation de DHA dans les œufs des poules nourries avec des microalgues. Toutefois, dans l'alimentation humaine, les produits marins restent la source principale d'oméga 3 à longue chaîne. Les poissons ont des teneurs variables en lipides selon les espèces: entre 20 et 30 pour cent d'acides gras oméga 3 sur l'ensemble des acides gras avec des proportions variables d'EPA et de DHA. Le poisson d'élevage contient plus d'acides gras oméga 3 et beaucoup plus d'acides gras oméga 6 que le poisson sauvage (voir l'encadré page 65).

Les poissons et surtout les poissons gras, y compris les poissons d'élevage sont la meilleure source d'acides gras poly-

La nomenclature des acides gras		
Les acides gras sont des composés organiques constitués d'une chaîne hydrocarbonée plus ou moins longue, dont le nombre d'atomes de carbone est le premier élément de nomenclature. Le nombre de doubles liaisons détermine leur degré d'insaturation. Chaque double liaison introduit un	angle dans la chaîne moléculaire pour les configurations cis (où les deux substitués de part et d'autre d'une double liaison sont du même côté de cette liaison). La position de la première	mille à laquelle ils appartiennent. Au sein des acides gras, ceux dont la première double liaison est située sur le dixième atome de carbone appartiennent à la famille des oméga 6, et ceux
groupe méthyle (CH ₃ -) terminal pour les acides gras insaturés, permet de définir la fa-		est située sur le troisième atome de carbone appartiennent à la famille des oméga 3.
Oméga 3 Acide alpha linoléique : 18:3n-3 CH ₃ -CH ₂ -[CH=CH-CH ₂] ₃ -[CH ₂] ₆ -COOH	Oméga 6 Acide linoléique : 18:2n-6 CH ₃ -[CH ₂] ₄ -[CH=CH-CH ₂] ₂ -[CH ₂] ₆ -COOH	
Acide éicosapentaénoïque ou EPA : 20:5n-3 CH ₃ -CH ₂ -[CH=CH-CH ₂] ₅ -[CH ₂] ₄ -COOH	Acide arachidonique : 20:4n-6 CH ₃ -[CH ₂] ₄ -[CH=CH-CH ₂] ₄ -[CH ₂] ₂ -COOH	
Acide docosahexaénoïque ou DHA : 22:6n-3 CH ₃ -CH ₂ -[CH=CH-CH ₂] ₆ -[CH ₂] ₄ -COOH		
18:3n-3 signifie qu'il y a 18 atomes de carbone, trois liaisons doubles et que la première est portée par le troisième atome de carbone de la chaîne à partir du groupe CH ₃ .		

saturés oméga 3. Leur concentration varie mais les sardines, pilchards, anchois, maquereaux, harengs, saumon, flétan, thon rouge sont parmi les plus riches.

Nous avons indiqué, il existe divers facteurs qui influent sur la quantité d'acides gras dans l'organisme, que ce soit l'âge du sujet, son état physiologique, les aliments consommés. S'y ajoute un autre élément important, la biodisponibilité, la quantité réellement efficace rapportée à la quantité ingérée. Ainsi, l'apport d'oméga 3 sous forme de triglycérides [(-CH-O-CO-R)₃] est plus efficace que sous forme d'esters éthyliques R-COO', tels qu'on les trouve pourtant dans certaines gélules d'oméga 3. La biodisponibilité est encore meilleure pour les phospholipides – des lipides portant un groupe phosphate. La position de l'acide gras sur le glycérol est déterminante pour l'absorption, la meilleure étant la position centrale.

En effet, l'hydrolyse par les lipases pancréatiques conduit à une libération d'acides gras (en positions 1 et 3) qui, sous forme de micelles dans l'intestin, en présence de calcium, peuvent conduire à des savons insolubles qui précipitent et sont éliminés dans les selles. Dans l'œuf, les acides linoléique et alpha linoléique occupent préférentiellement la position 2. Dans l'huile de soja et de colza, qui ont à peu près la même teneur en acide alpha lino-

linéique, les proportions d'acide alpha linoléique en position 2 sont respectivement de 23 pour cent et de 67 pour cent, ce qui rend l'huile de colza plus intéressante.

Après avoir évoqué les sources d'acides gras oméga 3 et oméga 6 et leur biodisponibilité, se pose une question: la population française, dans son ensemble, consomme-t-elle assez de ces acides gras essentiels? Les apports en acides gras dans la population française sont connus grâce à plusieurs études dont SU.VI.MAX et AQUATINE. Cette dernière, réalisée sur des femmes jeunes, montre que l'apport en acide alpha linoléique représente 0,3 pour cent de l'apport énergétique total (au lieu de 1 pour cent recommandé), soit 0,7 gramme au lieu de 2 grammes.

L'étude SU.VI.MAX confirme ces résultats. Ainsi, globalement, les apports en acide alpha linoléique surtout, mais aussi en EPA et DHA, sont en moyenne déficitaires alors que les apports en acide linoléique sont conformes aux apports nutritionnels conseillés. Toutefois, il existe de grandes disparités et une étude a même montré que les apports sont très élevés dans les villes des côtes bretonnes. Le statut nutritionnel des végétaliens (ne consommant aucun produit d'origine animale) en acide alpha linoléique est satisfaisant, mais il est très déficitaire en EPA et surtout en DHA.

Besoins et apports conseillés

Les besoins physiologiques minimaux sont établis pour l'acide linoléique à deux pour cent de l'apport énergétique total, soit environ 4,5 grammes par jour, ce qui est extrêmement faible, et pour l'acide alpha linoléique à 0,8 pour cent, soit environ 2 grammes par jour. Quant au DHA, son besoin a été estimé à 250 milligrammes par jour, et autant pour l'EPA (qui n'est pas un acide gras strictement indispensable). Les apports nutritionnels conseillés, qui visent non seulement à assurer les besoins minimaux, mais à prévenir les carences, mais permettre	aussi d'assurer une nutrition globalement suffisante et équilibrée. Ils tiennent compte de la variabilité interindividuelle et ont pour objectif que 97,5 pour cent des individus soient au-dessus du seuil minimal; ils visent également à éviter les déséquilibres par excès. Ils recommandent pour l'acide alpha linoléique et de quatre pour cent pour l'acide linoléique. Par extrapolation de ces diverses données, le rapport de l'ANSES recommande un apport en acide alpha linoléique recommandé d'environ quatre pour cent de l'apport énergétique total, et de quatre pour cent pour l'acide linoléique. Par extrapolation de ces diverses données, le rapport de l'ANSES recommande un apport en acide alpha linoléique recommandé d'environ quatre pour cent de l'apport énergétique total, et de quatre pour cent pour l'acide linoléique.	a revu récemment les apports nutritionnels conseillés en acides gras et considéré que ce rapport ne faisait pas partie des recommandations dès lors que les valeurs absolues en acides gras oméga 3 étaient adéquates: ce n'est lorsqu'elles sont trop faibles ou qu'un apport trop élevé est constaté que les recommandations sont ajustées. Il n'y a pas d'apport nutritionnel recommandé pour les acides gras oméga 6, car il n'est pas limitant tant que les apports en acide linoléique sont suffisants.
---	---	--

Glossaire

- ✓ **Acides gras essentiels :**
Ils jouent un rôle vital – essentiel –, et l'organisme en assure la synthèse.
- ✓ **Acides gras indispensables :**
L'organisme est incapable de les synthétiser.
- ✓ **Acides gras mono-insaturés :**
Constitués d'une chaîne hydrocarbonée contenant une liaison double.
- ✓ **Acides gras polyinsaturés :**
Constitués d'une chaîne hydrocarbonée contenant plusieurs liaisons doubles.
- ✓ **Oméga 3 :**
Famille d'acides gras polyinsaturés où la première liaison double est située sur le troisième atome de carbone de la chaîne.
- ✓ **Oméga 6 :**
Famille d'acides gras polyinsaturés où la première liaison double est située sur le sixième atome de carbone de la chaîne.
- ✓ **Phospholipides :**
Assemblage de deux acides gras, de glycérol et de groupes phosphates.
- ✓ **EPA et DHA :**
Acides gras polyinsaturés de la famille des oméga 3. Ils sont des acides gras indispensables.

Le lait maternel, les phospholipides des globules rouges, et les triglycérides du tissu adipeux gardent l'empreinte de la composition des acides gras polyinsaturés ingérés par les populations. Ainsi, la composition du lait maternel représente une façon indirecte d'analyser les apports et leur évolution. Entre 1940 et 2000, la teneur en acide alpha linoléique du lait maternel des femmes américaines est restée stable, mais celle de l'acide linoléique a considérablement augmenté (de 5 à près de 20 pour cent), ce qui conduit à une augmentation notable du rapport des oméga 6 sur les oméga 3. En 2007, dans huit régions de France, la concentration en acide alpha linoléique a augmenté (de 0,72 à 0,95 pour cent), mais celle en DHA est restée stable. Ces études montrent qu'en moyenne les besoins physiologiques en acides gras oméga 3 ne sont pas couverts en France tant pour l'acide alpha linoléique que pour le DHA, mais on ne constate pas de signes de carence, lesquels n'apparaissent que pour des niveaux très inférieurs. Heureusement, la tendance est à l'amélioration grâce aux campagnes de sensibilisation, à l'augmentation de la consommation d'huile de colza et à l'enrichissement de certains aliments. Des progrès restent à faire pour accroître l'apport en EPA et en DHA, molécules particulièrement importantes dans le cerveau.

Nous avons mentionné à plusieurs reprises, les acides gras ont de multiples fonctions dans l'organisme, notamment dans le système cardio-vasculaire (voir l'en-

cadre page 67), mais nous allons surtout développer leur rôle clé dans le cerveau. C'est l'organe le plus riche en lipides après le tissu adipeux: nous l'avons indiqué, il est constitué de près de 60 pour cent de lipides, surtout sous forme de phospholipides qui constituent les membranes cellulaires. Ces acides gras polyinsaturés à longues chaînes s'accumulent dans les structures cérébrales au cours de la période périnatale, lors de la maturation du système nerveux. Ainsi, près de la moitié du DHA total acquis par l'organisme au cours des six premiers mois de la vie est incorporé dans le cerveau.

Le DHA synthétisé par la future mère est orienté vers le placenta afin de subvenir aux besoins du cerveau du fœtus en développement. Une étude publiée en 2007 met en évidence l'importance d'une alimentation maternelle riche en poisson dans le développement cérébral du fœtus: les enfants âgés de huit ans, dont les mères ont mangé peu de poisson pendant la grossesse avaient plus de risques d'avoir un quotient intellectuel inférieur à la moyenne.

Les oméga du cerveau

L'insuffisance des apports alimentaires, telle qu'elle existe chez certaines populations occidentales, peut entraîner une baisse importante du DHA dans les structures cérébrales des enfants; la concentration de DHA diminue parfois de 50 pour cent chez des bébés de six mois nourris avec des laits maternels dépourvus de DHA, par rapport aux bébés nourris au sein.

Or, il est nécessaire d'assurer un apport régulier de DHA, car cet acide gras polyinsaturé (et d'autres) est sans cesse renouvelé. Stanley Rapoport et ses collègues, de l'Institut américain de la santé, NIH, à Bethesda, ont étudié les échanges de traceurs radioactifs entre le cerveau et le plasma, et ont évalué le renouvellement quotidien du DHA à 5 pour cent chez le rat adulte et 0,3 pour cent chez l'homme. À partir de ces travaux et de la durée nécessaire pour établir des concentrations normales de DHA cérébral après une carence, on estime que la demi-vie du DHA cérébral chez l'adulte est de l'ordre d'une quinzaine de jours. Le sang devrait apporter chaque jour entre quatre et cinq milligrammes de DHA au cerveau pour que sa concentration soit maintenue. Les cellules endothéliales formant la barrière hémato-encéphalique qui protège le cerveau des

astrocytes (un type de cellules nerveuses), les différences des neurones, et la finité entre les lipides conduisent à la formation de microdomaines spécifiques, riches en cholestérol, en sphingomyéline et pauvres en DHA, des radeaux lipidiques. Ces derniers, associés aux protéines du cytosquelette, forment des structures rigides dans la membrane et constituent des zones privilégiées pour l'activité de certaines protéines qui y sont intégrées. Ainsi, les protéines du complexe SNARE, indispensables à la fusion des membranes dans l'exocytose – le processus qui permet à une cellule de rejeter dans le milieu extracellulaire une partie de son contenu –, sont associées au cholestérol. Elles seraient localisées préférentiellement dans ces radeaux moléculaires, formant ainsi des sites privilégiés pour la libération des neurotrans-

metteurs, les messagers chimiques assurant la transmission de l'influx nerveux.

Les oméga 3, et plus particulièrement le DHA, modulent l'activité d'un grand nombre d'enzymes, de transporteurs, de récepteurs et de canaux membranaires impliqués dans la signalisation inter- et intracellulaire. Le DHA ayant une concentration particulièrement élevée dans le cerveau, nous allons examiner plus précisément ses différentes actions.

Le DHA est un régulateur de l'expression des gènes. Dans le foie, les acides gras polyinsaturés régulent l'expression de gènes impliqués dans leur propre métabolisme, c'est-à-dire qu'ils rétroagissent sur leur propre activité. En revanche, on sait peu de chose sur la régulation génique exercée par les acides gras polyinsaturés dans

Que fait le DHA ?

Comment agissent les acides gras polyinsaturés dans le cerveau ? Ce sont, d'une part, les constituants essentiels des phospholipides membranaires des cellules nerveuses et, d'autre part, des molécules actives interagissant directement avec d'autres lipides ou des protéines.

Abordons d'abord leur rôle structural. La membrane plasmique s'organise en bicouche lipidique asymétrique et hétérogène, et la répartition des phospholipides diffère entre les feuillettes internes et

externes. Par ailleurs, les différences d'affinité entre les lipides conduisent à la formation de microdomaines spécifiques, riches en cholestérol, en sphingomyéline et pauvres en DHA, des radeaux lipidiques. Ces derniers, associés aux protéines du cytosquelette, forment des structures rigides dans la membrane et constituent des zones privilégiées pour l'activité de certaines protéines qui y sont intégrées. Ainsi, les protéines du complexe SNARE, indispensables à la fusion des membranes dans l'exocytose – le processus qui permet à une cellule de rejeter dans le milieu extracellulaire une partie de son contenu –, sont associées au cholestérol. Elles seraient localisées préférentiellement dans ces radeaux moléculaires, formant ainsi des sites privilégiés pour la libération des neurotrans-

LES SOURCES D'OMÉGA

Végétaux et animaux terrestres

L'acide alpha linoléique est d'abord présent dans les plantes, car seuls les végétaux ont une delta 15 désaturase permettant de passer de l'acide linoléique à l'acide alpha linoléique. On en trouve ainsi dans les graines de lin, le germe de blé, le chanvre, les noix, le soja, le colza et donc les huiles de lin (près de 50 pour cent des acides gras qu'il contient), de colza (43 pour cent), de colza (8 pour cent), de soja (7 pour cent), de germe de blé (5 pour cent), de chanvre (19 pour cent).

Bien sûr, les margarines qui contiennent ces huiles renferment de l'acide alpha linoléique, environ trois pour cent des acides gras qu'il contient. Dans le chocolat, deux pour cent des acides gras sont sous forme d'acide alpha linoléique. Parmi les végétaux, on trouve aussi des plantes telles que la luzerne, les épinards, la mâche, le pourpier. De sorte que la chair des animaux qui s'en nourrissent en contient : c'est le cas du lapin, la viande naturellement la plus riche en acide alpha linoléique (2,4 pour cent des acides gras) avec le chevreuil, le sanglier, le consommé du pourpier, et des poules qui consomment du pourpier !).

Le gibier sauvage est aussi plus riche en acide alpha linoléique que

la viande d'élevage. Les produits laitiers ont une faible teneur, mais représentent en raison de la quantité consommée la première source d'acide alpha linoléique ; le beurre en contient un peu moins de 1 pour cent (mais 5 pour cent lorsqu'il provient des alpages d'altitude) et le lait un rapport d'oméga 6 sur les oméga 3 de 2,5.

La graisse du porc (et donc la charcuterie) contient naturellement d'acide alpha linoléique. L'alimentation animale peut être modulée afin d'enrichir la chair (maigre et grasse) en oméga 3 : l'introduction de 10 pour cent de graines de lin dans l'alimentation des porcs et de la volaille augmente la concentration en acide alpha linoléique dans la viande. Une alimentation enrichie en luzerne, chanvre, enrichit aussi, mais dans une moindre mesure, la chair et le lait des ruminants.

Le jaune des œufs a une faible teneur en acide alpha linoléique, mais on peut l'augmenter en modifiant l'alimentation des volailles : des végétaux tels que le lin. On peut aussi enrichir l'alimentation de la poule en maïs, sorgho, luzerne.

Le topolancton sont riches en acides gras oméga 3, non seulement en acide alpha linoléique, mais aussi

et surtout en EPA et DHA. Dans l'alimentation humaine, les produits marins restent la principale source d'oméga 3. Les poissons ont des teneurs variables : le maquereau, le saumon, le thon ont le plus, allant de 0,1 pour cent à 20 pour cent.

Les sources marines

Les poissons contiennent selon les espèces 20 à 30 pour cent d'acides gras oméga 3 sur l'ensemble des acides gras. Les proportions variables d'EPA et de DHA (en moyenne deux fois plus d'EPA que de DHA). Le poisson d'élevage contient plus d'oméga 6 que le poisson sauvage, mais le rapport des oméga 6 sur les oméga 3 des deux reste extrêmement faible (par exemple de 0,25 pour le saumon d'élevage contre 0,1 pour le saumon sauvage).

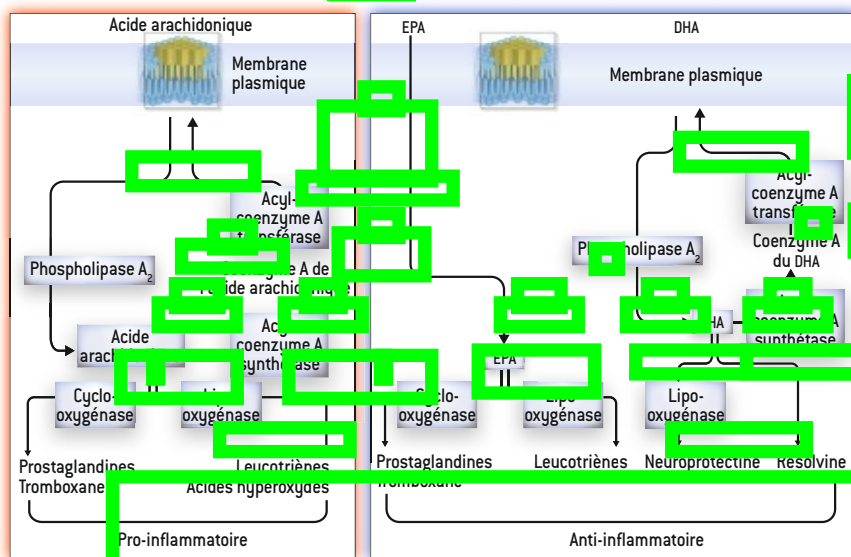
Les poissons et particulièrement les poissons gras, y compris les poissons d'élevage, sont la meilleure source d'oméga 3. Leur teneur est variable selon les tissus (le foie pour les poissons maigres, la chair pour les poissons gras), la maturité sexuelle, l'âge, la saison, le lieu de pêche et bien sûr l'espèce. Les plus

riches sont le saumon, le maquereau, le hareng, le flétan, la légine, le thon rouge... La teneur en oméga 3 du poisson di-



minue avec le temps dans les surgelés alors qu'elle se maintient dans les conserves, mais il se produit des transferts d'acides gras entre le poisson et l'huile qui le recouvre.

Les sources d'acide alpha linoléique sont dans l'étude *Aquitaine* pour 73 pour cent d'origine animale. Quarante-six pour cent proviennent des produits laitiers (dont 28 pour le lait et le fromage, 18 pour le beurre, 29 pour le fromage) et 27 pour cent des produits carnés. Onze pour cent sont issus des huiles végétales, et 16 pour cent des autres corps gras d'origine végétale. Dans l'étude S.U.V.I.M.A.X., 20 pour cent des apports en acide alpha linoléique sont issus des produits laitiers, et 17 pour cent de la viande, de la volaille et des œufs. De même, 17 pour cent de l'EPA et 18 pour cent du DHA proviennent aussi de la viande, de la volaille et des œufs. 66 pour cent de l'EPA (72 pour cent) et du DHA (65 pour cent) est fourni par les poissons et fruits de mer.



3. SELON LES VOIES MÉTABOLIQUES dans lesquelles ils sont impliqués, les acides gras poly-insaturés donnent naissance à des médiateurs de l'immunité et de l'inflammation, dont les propriétés opposées. Ainsi, l'oxydation de l'acide arachidonique par les enzymes cyclo-oxygénases ou les lipo-oxygénases libère des molécules qui stimulent les mécanismes inflammatoires : prostaglandines, leucotriènes, acides hyperoxydés (à gauche). L'EPA donne naissance à d'autres classes de prostaglandines et de leucotriènes qui, eux, inhibent les mécanismes de l'inflammation (à droite). De même, le DHA produit des résolvines et des neuroprotectines, qui ont des propriétés anti-inflammatoires. Cette voie d'oxydation enzymatique du DHA contribuerait à protéger le cerveau contre les dommages provoqués par le stress oxydant.

le cerveau. Toutefois, on a mis en évidence que les régimes riches en oméga 3 régulent plusieurs gènes dans le cerveau de rongeurs, et que les conséquences en sont nombreuses. Les gènes impliqués participent à la neurotransmission, la production d'ATP (l'énergie des cellules), la régulation des flux ioniques, le métabolisme énergétique, la plasticité synaptique, la neurogenèse, les connexions intercellulaires, etc. (voir la figure 4).

Le DHA libre peut également être peroxydé par des radicaux libres, ce qui aboutit à la production de dérivés peroxydés, les neuroprostanes. Ces molécules sont notamment concentrées dans le liquide céphalo-rachidien de personnes atteintes de la maladie d'Alzheimer en raison du stress oxydant élevé constaté dans cette pathologie. Ces composés participeraient aux dommages cellulaires et à la perte neuronale qui accompagnent les pathologies neurodégénératives.

Les acides gras polyinsaturés agissent sur le fonctionnement du cerveau par un autre biais : la régulation de la fonction synaptique. Cette dernière exige une action concertée de différents types de cellules : les neurones qui libèrent les neurotransmetteurs, les astrocytes qui régulent la neurotransmission et assurent l'équilibre

synaptique, et les cellules endothéliales qui fournissent de l'énergie sous forme de glucose aux neurones. Cette structure tripartite permet une plasticité morphologique et fonctionnelle.

Un rôle dans la neurotransmission

Les résultats des études menées depuis une vingtaine d'années montrent que les acides gras polyinsaturés influent sur l'activité de l'ensemble de ces cellules. Chez le rongeur, les changements de composition lipidique des membranes cérébrales déclenchés par un régime alimentaire dont on a éliminé les oméga 3 sont associés à des troubles du fonctionnement de la neurotransmission. Ces perturbations ont été particulièrement étudiées pour les systèmes impliquant les neurotransmetteurs monoamines et acétylcholine, qui régulent les grandes fonctions biologiques telles que la motricité volontaire, ainsi que les processus cognitifs et émotionnels.

Chez le rat carencé en oméga 3, on constate une diminution notable de la concentration de la dopamine, dans les synapses du cortex frontal, ainsi qu'une augmentation des concentrations de ses

métabolites, ce qui indique une hyperactivation de son métabolisme. Au contraire, dans le noyau accumbens, une aire cérébrale du circuit de la récompense intervenant dans l'apprentissage, la libération de dopamine est accrue. Les diverses données accumulées, notamment celles d'Ephraïm Avram et de ses collègues de l'Institut Weizman, en Israël, suggèrent que, chez le rat nouveau-né soumis à une carence périnatale en acides gras oméga 3, les récepteurs dopaminergiques sont surexprimés dans certaines aires cérébrales, probablement pour compenser les faibles concentrations de dopamine chez les animaux carencés.

Nous avons également montré qu'un autre neurotransmetteur impliqué notamment dans la peur et l'anxiété, la sérotonine, est aussi sous le contrôle des acides gras polyinsaturés. Ainsi, nous avons observé dans notre laboratoire des modifications de sa libération dans l'hippocampe, une aire cérébrale essentielle à la mémorisation. Ces modifications de libération de dopamine et de sérotonine observées chez les animaux qui présentent un déficit en oméga 3 sont réversibles à condition de réintroduire, très tôt, le précurseur des oméga 3 via l'alimentation maternelle ; les membranes cérébrales retrouvent alors une composition lipidique normale. En revanche, si la réintroduction a lieu après le sevrage, la libération de neurotransmetteurs reste perturbée, même si la concentration en DHA dans les membranes cellulaires cérébrales est normalisée.

Il existe un autre neurotransmetteur, l'acétylcholine, impliqué dans les processus d'apprentissage et de mémorisation. Dans ce cas également, on constate des perturbations des concentrations de l'acétylcholine chez les rongeurs carencés en oméga 3. Pour tous ces neurotransmetteurs sont stockés dans des vésicules (de petits sacs) qui fusionnent avec la membrane de la terminaison des neurones, et « s'ouvrent » pour libérer leur contenu dans les synapses (où on mesure leur concentration). Les études s'orientent aujourd'hui vers l'exploration de ce processus d'exocytose, dont les différentes étapes seraient régulées directement ou indirectement par les acides gras polyinsaturés.

Concernant les astrocytes, nous avons mis en évidence l'influence de la concentration membranaire en DHA sur leur plasticité morphologique ; le DHA influencerait sur les remaniements de cytosquelette (le

«squelette» des cellules) et le trafic des protéines vers la membrane. Par ailleurs, il inhibe la migration des astrocytes, et semble réguler de façon rapide le transport du glutamate, le principal neurotransmetteur exciteur, de sorte qu'il joue un rôle clé dans la neuroprotection assurée par les astrocytes en cas de stress physiologique.

Le renouvellement de ces cellules cérébrales à partir des cellules souches – la neurogenèse – participe également à l'activité synaptique, et contribue au maintien d'une neurotransmission efficace. Ce processus actif est impliqué chez l'adulte dans la réparation des lésions, ou la consolidation de l'apprentissage et de la mémoire. Limitée à quelques zones dans le cerveau adulte (notamment de l'hippocampe), la neurogenèse adulte est influençable par des facteurs externes, tels que l'âge ou le stress. Des données récentes montrent qu'un déficit

cérébral en DHA peut également perturber ce processus. C'est l'étape de migration de nouveaux neurones dans les zones cibles de l'hippocampe qui semble être retardée: dès lors, les nouveaux neurones risquent de ne pas se connecter correctement avec leur zone cible et, par conséquent, de ne pas être fonctionnels.

Tous ces résultats montrent qu'un déficit membranaire en DHA, même limité (correspondant à un apport d'oméga 3 insuffisant), peut contribuer à une dérégulation globale de la fonction synaptique. Il semble qu'il existe une période critique du développement (durant la grossesse et les deux premières années de vie) au cours de laquelle l'apport en oméga 3 doit être optimal afin d'assurer un bon fonctionnement cérébral chez l'adulte. Ces données ouvrent des perspectives d'études encore peu explorées.

LE RISQUE CARDIO-VASCULAIRE

Les premiers travaux concernant le rôle éventuel des acides gras oméga 3 dans la prévention des maladies cardio-vasculaires datent des années 1960-1970 avec des études réalisées sur les Eskimos du Groenland où la prévalence des infarctus du myocarde était très faible. On en déduisit que les apports très élevés en acides gras oméga 3 à travers la consommation de poissons en étaient la cause. Ils réduisent l'agrégation plaquettaire.

En France, Serge Renaud, alors à l'Hôpital de Bordeaux, a été le premier à montrer que l'acide alpha linoléique, précurseur de l'EPA, a un effet protecteur, et, à la fin des années 1980, avec Michel de Lorgeril, alors à l'Hôpital de Lyon, il a conçu un essai clinique utilisant une margarine riche en huile de colza administrée à des personnes à risque de maladie cardio-vasculaire. En 1988, un des auteurs (Jean-Michel de Groot) a travaillé point avec l'industriel la première margarine commerciale riche en acide alpha linoléique.

Pour évaluer les effets des acides gras oméga 3, il existe aujourd'hui soit d'études d'observation (comme dans le cas des Eskimos), soit d'études d'inter-

vention secondaire, c'est-à-dire qui consistent à suivre l'effet des oméga 3 administrés à des personnes ayant déjà eu un accident cardiaque. En revanche, on n'a fait aucune étude d'intervention en prévention primaire, ce qui consisterait à administrer des acides gras oméga 3 à des personnes n'ayant pas eu de maladie cardio-vasculaire. Quelques études d'intervention (qu'elles soient primaires ou secondaires), ont étudié l'effet du médicament administré à des personnes recevant aucun traitement.

Les premiers résultats furent donc fournis par des études épidé-

miologiques d'observation. Plus d'une trentaine d'entre elles ont systématiquement montré que les maladies cardio-vasculaires (infarctus du myocarde, maladies coronariennes) et la mortalité associée sont inférieures de 30 à 40 pour cent chez les plus gros consommateurs de poisson, notamment de poissons gras. Plusieurs études ont également confirmé le rôle primordial des acides gras oméga 3, longue chaîne et de l'acide alpha linoléique. Une réduction de 50 à 80 pour cent du risque de mort subite, la cause principale de décès coronarien.

Toutefois, des apports simultanés élevés en acides gras insaturés trans ou en acides gras oméga 6 diminuent le bénéfice. Avec les oméga 3 à longue chaîne, on dispose de plusieurs études d'intervention secondaire, qui ont montré une réduction de la mortalité ou des maladies cardio-vasculaires de 20 à 30 pour cent. Deux autres ont confirmé une amélioration de l'insuffisance cardiaque.

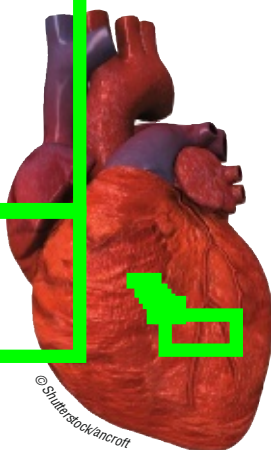
Récemment, on a rapporté une diminution de 49 pour cent de la mortalité coronarienne chez les personnes souffrant de troubles du rythme chez les diabétiques avec un apport faible en EPA (226 milligrammes) et DHA (150 mil-

ligrammes). En revanche, cette étude n'a révélé aucun bénéfice pour l'ensemble de cette population à risque coronarien sans doute en raison d'une meilleure prise en charge, aujourd'hui, au plan de la santé et de la nutrition. Mais il faut souligner que toutes ces études ont été réalisées après un infarctus, c'est-à-dire en prévention secondaire.

Quant à l'acide alpha linoléique, il n'y a eu qu'un seul essai d'intervention valide en prévention secondaire, mais il s'est révélé intéressant chez les fumeurs et les diabétiques.

Ainsi, les oméga 3 préviennent les maladies cardio-vasculaires après infarctus par leur effet positif sur l'agrégation plaquettaire (évitant ainsi une nouvelle thrombose), sur la stabilisation de la plaque d'athérome par un effet anti-inflammatoire (d'où l'intérêt de les prescrire le plus rapidement possible) et surtout sur la réduction de la mort subite, qui entraîne une réduction de la mort subite, souvent liée à une arythmie fatale.

De nombreux travaux expérimentaux et cliniques semblent indiquer que les oméga 3 réduisent la mortalité coronarienne, une maladie cardiaque ischémique, c'est-à-dire perturbant l'oxygénation des tissus.



© Shutterstock/ancroft

qui visent à mieux comprendre les effets précoces

DHA et dépression

En modulant les apports alimentaires en acides gras polyinsaturés de la mère durant la période critique de leur accumulation chez le fœtus en développement, on peut modifier la composition lipidique du cerveau. De cette façon, on a montré que des souris carencées en oméga 3 sont moins performantes dans les tests qui mettent en jeu les facultés de mémorisation spatiale impliquant l'hippocampe. Elles présentent également des déficits de mémoire de travail mettant en jeu le cortex frontal et des déficits dans l'apprentissage. Par ailleurs, des rats carencés en oméga 3 présentent une rigidité comportementale, s'illustrant par des difficultés à adapter leur comportement à un changement de leur environnement.

Inversement, l'enrichissement du régime en oméga 3 améliore les perfor-

mance cognitives. Ainsi, une souris transgénique (not 1), qui synthétise de grandes quantités de DHA, apprend mieux à se repérer dans l'espace. La prolifération et la différenciation des neurones sont accrues, en accord avec le rôle supposé du DHA dans la neurogenèse et l'apprentissage.

Les animaux carencés présentent aussi des signes d'anxiété, d'agressivité et de dépression. Ces perturbations se révèlent surtout quand l'animal est confronté à une situation de stress intense; elles s'accompagnent d'une élévation de la concentration sanguine en corticostéroïde, la principale hormone du stress, plus importante que chez des animaux recevant un régime équilibré.

Ces résultats suggèrent qu'un apport insuffisant en oméga 3 peut avoir un effet délétère sur la gestion du stress et favoriser, à long terme, l'apparition de trou-

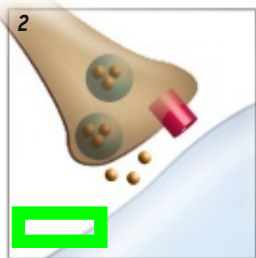
bles de type dépressif. Au contraire, l'apport d'oméga 3 par l'alimentation semble protéger du stress: le DHA aurait un effet anxiolytique, parce qu'il module notamment l'activité des récepteurs stimulés dans les états anxieux.

Les perturbations de la neurotransmission liées au déficit en oméga 3 peuvent-elles favoriser les troubles de l'humeur, en particulier la dépression? Cette pathologie est répandue dans les pays développés, notamment en France, avec une prévalence élevée (entre 15 et 20 pour cent de la population d'âge adulte).

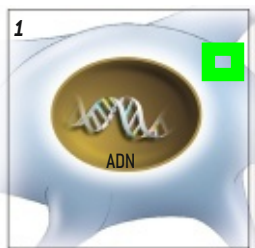
RÉGULATION DE LA COMMUNICATION ENTRE CELLULES



RÉGULATION DE LA NEUROTRANSMISSION



RÉGULATION DE L'EXPRESSION DES GÈNES

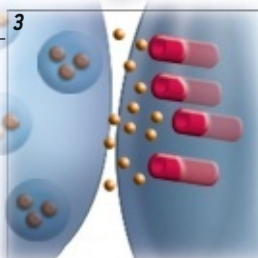


Astrocyte

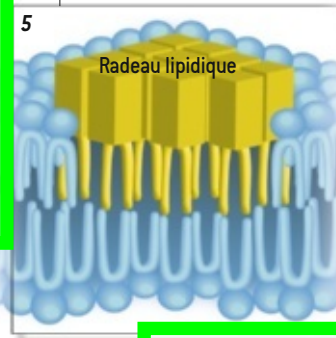
Noyau

Neurone

COMMUNICATION ENTRE NEURONES



INSERTION DANS LES MEMBRANES



4. LE DHA A DE MULTIPLES FONCTIONS dans le cerveau. Il intervient dans la communication entre neurones (en bleu) et astrocytes (en beige), l'autre grande catégorie de cellules présentes dans le cerveau. Il agit sur la transduction des signaux dans les cellules et sur l'activation des gènes (1). Par ailleurs, comme il intervient dans le contrôle de la synthèse, la libération et la recapture de différents neurotransmetteurs, il module les interactions entre les astrocytes et les neurones (2) et entre les neurones pré- et post-synaptiques (3). Enfin, le DHA intervient dans la communication entre les cellules (4). Les acides gras oméga 3 se présentent insérés dans les phospholipides des membranes neuronales. Des assemblages de lipides et de protéines, pauvres en DHA, nommés radeaux lipidiques, « flottent » sur les phospholipides membranaires. Ils favorisent l'activité de certaines protéines (5).

du Nord). La dépression est une pathologie multifactorielle, associant des causes génétiques, neurobiologiques, mais aussi socioculturelles et environnementales.

Contre les troubles de l'humeur

Des recherches récentes suggèrent que l'alimentation joue un rôle dans certaines formes de dépression. Les enquêtes d'observation montrent que les patients dépressifs ont des concentrations d'oméga 3 inférieures à la moyenne dans le sang et le tissu adipeux, et que les symptômes sont d'autant plus graves que la concentration en DHA est faible. Pourtant, les études où l'on a administré des oméga 3 à des personnes dépressives n'ont pas donné de résultats concluants en raison de la variabilité des préparations d'oméga 3 utilisées, des doses et des durées de traitement, mais aussi de la disparité des sujets étudiés. En revanche, l'administration de DHA et d'EPA améliore l'humeur. Des malades dépressifs résistants aux traitements ont vu leur état s'améliorer notablement avec un gramme par jour d'EPA. Toutes ces données suggèrent qu'un apport insuffisant d'oméga 3 pourrait accroître la susceptibilité à l'état dépressif.

Quel pourrait être le lien entre un déficit en oméga 3 et la dépression ? Nous l'avons souligné, le DHA intervient dans la régulation de nombreux neurotransmetteurs, notamment de la sérotonine et de la dopamine (le système monoaminergique), neurotransmetteurs utilisés dans les traitements antidépresseurs. Ainsi, le déficit chronique en oméga 3 favoriserait l'apparition de troubles dépressifs en altérant le fonctionnement des systèmes de neurotransmission. Une autre hypothèse a été proposée pour expliquer le lien entre oméga 3 et dépression. Le métabolisme des acides gras polyinsaturés serait perturbé en raison d'une trop faible activité des enzymes impliquées dans la chaîne métabolique. Ce défaut serait d'origine génétique. À cela s'ajouterait un apport insuffisant d'oméga 3. Ces deux anomalies auraient pour conséquence une présence insuffisante de DHA dans les membranes des cellules cérébrales.

Chez la femme enceinte, la concentration sanguine en DHA et EPA est diminuée durant le troisième trimestre, car, comme nous l'avons évoqué, c'est la période correspondante à l'accumulation

maximale du DHA dans les membranes cellulaires cérébrales du fœtus. La concentration en DHA chez la mère se normaliserait au bout d'un an. Mais, quand la concentration en DHA reste trop faible, les risques d'une dépression *post-partum* seraient augmentés. Ces risques seraient plus grands chez les femmes ayant des grossesses rapprochées, les stocks maternels de DHA s'épuisant progressivement. Toutefois, les essais de supplémentation en DHA (avant ou après l'accouchement) se sont révélés inefficaces dans la prévention de la dépression *post-partum*.

Toutes ces études suggèrent qu'une altération du métabolisme des oméga 3 ou une insuffisance des apports alimentaires de leurs précurseurs augmenterait la vulnérabilité au stress et à long terme à la dépression. Inversement, le maintien d'un statut optimal des oméga 3, reposant sur une alimentation variée et équilibrée favoriserait une bonne gestion comportementale du stress. D'un point de vue thérapeutique, ces données ouvrent d'intéressantes perspectives dans le traitement de la dépression avec l'utilisation de suppléments riches en oméga 3 et d'agents pharmacologiques augmentant la synthèse des phospholipides.

Les capsules d'oméga 3 ?

Les acides gras sont des constituants importants de notre alimentation, et ils jouent un rôle essentiel dans l'organisme. Diverses études ont confirmé que les oméga 3 réduisent les maladies coronariennes et améliorent l'état de certaines personnes dépressives. D'autres seront nécessaires pour mieux définir les indications. Quel qu'il en soit, pour les personnes en bonne santé, il faut privilégier une alimentation variée, riche en huiles végétales (colza et noix, entre autres) et en poisson. Quant aux personnes dépressives, une alimentation « normale » ne permet pas d'atteindre les apports conseillés pour obtenir des effets thérapeutiques : au moins 70 grammes de sardine ou 50 grammes de cabillaud par jour ! Dans ces conditions, la prescription de capsules d'« oméga 3 thérapeutique » s'impose. Enfin, l'avenir sera sans doute celui des aliments qui seront enrichis en oméga 3 – par le lin ou les microalgues, par exemple –, et qui deviendront des substituts potentiels du poisson.

LES AUTEURS



Jean-Michel LECERF est professeur associé à l'Institut Pasteur de Lille, où il dirige le Service de nutrition. Il est également attaché consultant en premier au Centre hospitalier régional universitaire de Lille, dans le Service de médecine interne.

Sylvie VAN CASSEL est chargée de recherche à l'INRA de Jouy-en-Josas dans l'Unité nutrition et régulation lipidique des fonctions cérébrales, NuReLiCe.

BIBLIOGRAPHIE

- M. Freeman et M. Rapoport, Omega-3 fatty acids and depression: from cellular mechanisms to clinical care, *J. Clin. Psychiatry*, vol. 72, pp. 258-259, 2011.
- D. Kromhout et al., n-3 fatty acids and cardiovascular events after myocardial infarction, *New England Journal of Medicine*, vol. 363(21), pp. 2015 - 2026, 2010.
- J.-M. Lecerf, Acides gras et risque cardio-vasculaire, *Médecine et Nutrition*, vol. 45, n° 2, pp. 1-25, 2009.
- R. Liperoti et al., Omega-3 polyunsaturated fatty acids and depression: a review of the evidence, *Current Pharmaceutical Design*, vol. 15, pp. 4165-4172, 2009.
- F. Kuperstein et al., Altered expression of key dopaminergic regulatory proteins in the postnatal brain following perinatal n-3 fatty acid dietary deficiency, *J. Neurochem.*, vol. 106, pp. 662-672, 2008.
- I. Fedorova et N. Salem, Omega-3 fatty acids and rodent behavior, *Prostaglandins Leukot Essent Fatty Acids*, vol. 76, pp. 271-289, 2006.
- Avis de l'Agence française de sécurité sanitaire des aliments relatif à l'actualisation des apports nutritionnels conseillés pour les acides gras : <http://www.anses.fr/Documents/NUT2006sa0359.pdf>

Des octonions pour la théorie des cordes

John Baez et John Huerta

D'après la théorie des cordes, l'Univers serait doté d'un espace-temps de dimension 10 ou 11. Un système de nombres découvert au XIX^e siècle et quelque peu oublié depuis en fournit peut-être l'explication la plus simple.

Enfant, nous avons tous appris à manier des nombres. On commence par compter, puis viennent l'addition, la soustraction, la multiplication et enfin la division. Mais les mathématiciens savent que le système de nombres qu'on nous enseigne à l'école n'est qu'une possibilité parmi bien d'autres. D'autres types de nombres sont importants pour comprendre la géométrie et la physique. L'une des alternatives les plus étranges est celle des octonions. Largement négligés depuis leur découverte en 1843, ils ont au cours des dernières décennies pris une importance étonnante dans la théorie des cordes. Et de fait, si la théorie des cordes constitue une représentation correcte de l'Univers, les octonions pourraient expliquer pourquoi l'Univers a le nombre de dimensions que lui attribue cette théorie.

Les octonions ne seraient pas le premier élément de mathématiques pures à être utilisé pour mieux comprendre le monde. Ce ne serait pas non plus le premier système alternatif de nombres à se révéler utile. Afin de comprendre pourquoi, considérons d'abord le jeu de nombres le plus simple, celui des «nombres réels». Les nombres réels peuvent se représenter sous la forme

d'une droite (voir l'encadré page 73), on peut dire que l'ensemble des nombres réels est unidimensionnel. On peut noter de même que la droite est unidimensionnelle parce que, pour en spécifier un point, il suffit d'un seul nombre réel.

Des imaginaires utiles

Jusqu'au XVI^e siècle, seuls les nombres réels étaient en lice. Mais à la Renaissance, des mathématiciens ambitieux ont tenté de résoudre des équations de plus en plus compliquées, allant même jusqu'à organiser des compétitions pour résoudre les problèmes les plus coriaces. Gerolamo Cardano (ou Jérôme Cardan), un mathématicien, médecin, joueur et astrologue italien, introduisit une sorte d'arme secrète, la racine carrée de -1 . Là où d'autres auraient ergoté, il a osé utiliser ce nombre mystérieux dans le cadre de calculs plus ou moins sérieux dont les résultats étaient des nombres réels ordinaires.

Cardan ne savait pas exactement pourquoi cette astuce fonctionnait, mais elle lui donna les bonnes réponses. Il publia ses idées en 1545, enclenchant une longue controverse : la racine carrée de -1 existe-t-elle vraiment, ou ne s'agit-il que

d'une astuce de calcul ? Près de 100 ans plus tard, le Français René Descartes rendit son verdict en qualifiant d'«imaginaire» cette entité, que l'on nota i .

Néanmoins, les mathématiciens ont suivi les pas de Cardan et ont commencé à travailler avec les nombres «complexes», c'est-à-dire les nombres de la forme $a + bi$, où a et b sont des nombres réels. Vers 1806, le Genevois Jean-Robert Argand répandit l'idée que les nombres complexes représentent des points sur un plan. L'idée est simple : dans $a + bi$, le nombre a indique la position horizontale du point correspondant, tandis que le nombre b spécifie sa position verticale.

On peut ainsi se représenter n'importe quel nombre complexe comme un point du plan, mais Argand est allé un peu plus loin : il a montré que les opérations arithmétiques (addition, soustraction, multiplication et division) sur les nombres complexes peuvent être interprétées comme des manipulations géométriques dans le plan (voir l'encadré page 73).

Presque tout ce que l'on peut faire avec les nombres réels peut être fait avec les nombres complexes. En réalité, la plupart des méthodes et raisonnements mathématiques fonctionnent tout aussi bien avec les

nombre complexes qu'avec les nombres réels. Cardan s'en était en partie rendu compte: on sait résoudre davantage d'équations avec les nombres complexes qu'avec les nombres réels.

Si un système bidimensionnel de nombres, les nombres complexes, offre une puissance accrue, qu'en est-il des systèmes de dimensionnalité supérieure? Malheureusement, une simple extension se révèle impossible. Un mathématicien irlandais allait découvrir le secret des systèmes de nombres à dimension supérieure des décennies plus tard. Et c'est seulement maintenant, à notre époque, que nous commençons à saisir l'étendue de leur puissance.

Hamilton et son ami Graves s'en mêlent

En 1835, à l'âge de 30 ans, le mathématicien et physicien William Rowan Hamilton découvrit comment traiter les nombres complexes comme des couples de nombres réels. À l'époque, les mathématiciens écrivaient généralement les nombres

complexes sous la forme $a + bi$ introduite par Argand, mais Hamilton remarqua que rien ne l'empêchait de considérer le nombre $a + bi$ comme une façon particulière de noter le couple (a, b) formé par les deux nombres réels a et b .

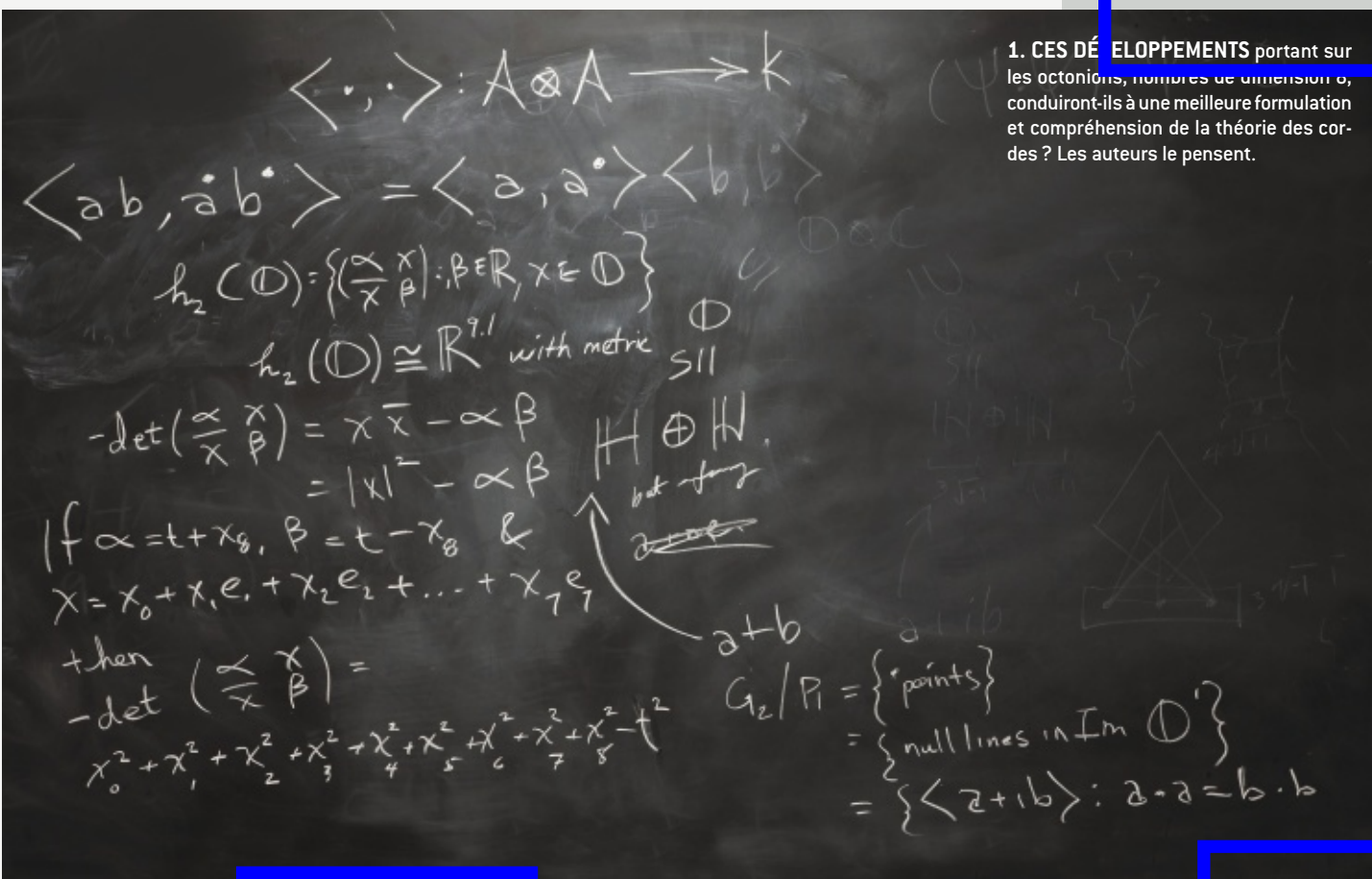
Cette notation permet d'additionner et de soustraire facilement des nombres complexes. Il suffit en effet d'additionner ou de soustraire les nombres occupant la même position dans les couples de nombres réels: ainsi, $(a, b) + (c, d) = (a + c, b + d)$. Hamilton a également mis au point des règles, légèrement plus compliquées pour multiplier et diviser les nombres complexes de façon à ce qu'ils conservent la belle signification géométrique découverte par Argand.

Après avoir inventé ce système algébrique pour les nombres complexes, Hamilton essaya durant de nombreuses années d'inventer une algèbre plus vaste, mettant en œuvre des triplets qui joueraient un rôle similaire à la géométrie tridimensionnelle.

Cette recherche fut pour lui très frustrante. Il écrivit un jour à son fils: «Tous les matins [...], lorsque je descendais pour le petit

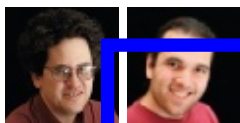
L'ESSENTIEL

- ✓ L'ensemble des nombres réels est de dimension 1, celui des nombres complexes est de dimension 2.
- ✓ On peut aussi construire des systèmes de nombres de dimension supérieure. Mais on ne peut définir de façon cohérente une addition, une multiplication et une division qu'en dimension 4 (quaternions) et 8 (octonions).
- ✓ Les octonions pourraient jouer un rôle clé dans la théorie des cordes et dans les symétries qu'elle fait intervenir.



1. CES DÉVELOPPEMENTS portant sur les octonions, nombres de dimension 8, conduiront-ils à une meilleure formulation et compréhension de la théorie des cordes? Les auteurs le pensent.

LES AUTEURS



Physicien-mathématicien de l'Université de Californie à Riverside, John BAEZ est actuellement au Centre des technologies quantiques de Singapour. John HUERTA vient d'achever sa thèse de doctorat en mathématiques à l'Université de Californie à Riverside.

BIBLIOGRAPHIE

J. G. Huerta, *Division Algebras, Supersymmetry and Higher Gauge Theory*, thèse de doctorat Université de Californie à Riverside, juin 2011 (<http://math.ucr.edu/home/baez/huerta.pdf>).

P. Girard, *Quaternions algèbre de Clifford et physique relativiste*, Presses Polytechniques Romandes, 2004.

J. C. Baez, *The octonions*, *Bulletin of the American Mathematical Society*, vol. 39, pp. 145-205, 2002 (<http://math.ucr.edu/home/baez/octonions>).

J. Conway et D. Smith, *On Quaternions and Octonions*, A K Peters, 2001.

S. Okubo, *Introduction to Octonion and Other Non-Associative Algebras in Physics*, Cambridge University Press, 1995.

déjeuner, son petit frère William Edwin et toi me demandiez : 'Alors, Papa, est-ce que tu arrives à multiplier les triplets ?' À quoi j'étais toujours obligé de répondre en secouant tristement la tête : 'Non, je peux seulement les additionner et les soustraire'. » Hamilton ne pouvait pas le faire à l'époque, mais la tâche qu'ils s'étaient fixée était mathématiquement impossible.

Quaternions de dimension quatre

Hamilton cherchait un système tridimensionnel de nombres où l'on peut ajouter, soustraire, multiplier et diviser. La division est la partie difficile : un système de nombres où l'on peut diviser (c'est-à-dire où tout élément non nul a un inverse pour la multiplication) est ce qu'on appelle une algèbre de division. Ce n'est qu'en 1958 que trois mathématiciens ont prouvé un fait remarquable soupçonné depuis des décennies : toute algèbre de division doit être de dimension 1 (l'algèbre des nombres réels), 2 (les nombres complexes), 4 ou 8. Pour parvenir à ses fins, Hamilton devait changer les règles du jeu.

Hamilton lui-même avait trouvé une solution le 16 octobre 1843. Il marchait à Dublin avec sa femme le long du Royal Canal, en route vers une réunion de l'Académie royale irlandaise, quand il eut une révélation soudaine. En dimension 3, on ne pouvait pas décrire les rotations et les dilatations à l'aide de trois nombres seulement. Il fallait un quatrième nombre, ce qui donnait lieu à un ensemble quadridimensionnel de nombres nommés quaternions et écrits sous la forme $a + bi + cj + dk$. Ici, les «nombres» i , j et k sont trois différentes racines carrées de -1 (c'est-à-dire vérifiant $i^2 = j^2 = k^2 = -1$, voir l'encadré page 74).

Hamilton écrivit plus tard : «J'ai sur-le-champ senti se fermer le circuit galvanique de ma pensée ; et les étincelles qui s'en sont échappées étaient les équations fondamentales entre i , j et k , exactement telles que je les ai utilisées depuis. » Et, remarquable geste de vandalisme mathématique, il grava ces équations dans la pierre du pont Brougham. Ces inscriptions ont maintenant disparu sous les graffitis, mais une plaque a été apposée pour commémorer la découverte.

Il peut sembler étrange que nous ayons besoin de points d'un espace quadridimensionnel pour décrire des changements

dans l'espace tridimensionnel, mais tel est bien le cas. Trois nombres servent à caractériser une rotation dans l'espace, ce que l'on peut aisément comprendre si l'on s'imagine en train de piloter un avion. Pour orienter l'appareil, on peut modifier son assiette (l'angle que fait son axe longitudinal avec l'horizontale), modifier sa direction dans le plan horizontal (c'est-à-dire le faire tourner à droite ou à gauche) et, enfin, modifier l'angle des ailes de l'avion par rapport à l'horizontale. Le quatrième nombre dont on a besoin sert à décrire la dilatation (l'étirement ou le rétrécissement).

Hamilton passa le reste de sa vie obsédé par les quaternions, et il leur trouva de nombreuses utilisations. Aujourd'hui, dans beaucoup de ces applications, les quaternions ont été remplacés par des cousins plus simples : les vecteurs, que l'on peut considérer comme des quaternions particuliers, de la forme $bi + cj + dk$ (le premier nombre a vaut simplement zéro). Les quaternions conservent cependant leur niche : ils sont efficaces pour représenter les rotations tridimensionnelles sur ordinateur et interviennent à chaque fois que cela est nécessaire, des systèmes de contrôle d'attitude d'un vaisseau spatial au moteur de rendu d'un jeu vidéo.

Malgré ces applications, nous pourrions nous demander ce que sont exactement j et k, étant donné que nous avons déjà défini i comme étant la racine carrée de -1 . Est-ce que ces racines carrées de -1 existent vraiment ? Pourquoi nous continuer à inventer autant de racines carrées de -1 qu'il nous plaît ?

Octonions de dimension huit

Ces questions ont été posées par un ami d'études de Hamilton, l'avocat John Graves, dont l'intérêt pour l'algèbre avait été à l'origine des réflexions de Hamilton sur les nombres complexes et les triplets. Le lendemain même de cette promenade décisive à l'automne 1843, Hamilton envoya à Graves un lettre décrivant sa percée. Graves répondit neuf jours plus tard et félicita Hamilton pour l'audace de son idée, mais il ajouta : «Il y a quand même quelque chose dans le système qui me chagrine. Je ne sais pas très bien dans quelle mesure nous sommes libres de créer arbitrairement des imaginaires et de les doter de propriétés surnaturelles. » Et il posait la question.

«Si avec ton alchimie tu peux faire trois livres d'or, pour quoi devrais-tu en rester là?»

Comme Cardan avant lui, Graves mit ses interrogations de côté suffisamment longtemps pour produire lui-même un peu d'or. Le 26 décembre, il écrivit de nouveau à Hamilton pour lui décrire un système de nombres à huit dimensions qu'il nommait octaves, et que l'on appelle maintenant les octonions. Mais Graves ne parvint pas à éveiller l'intérêt de Hamilton. Ce dernier promit de parler des octaves de Graves à la Société royale irlandaise, ce qui était à l'époque l'une des façons de rendre publics des résultats mathématiques. Mais Hamilton remettait sans cesse à plus tard sa communication, et en 1845 le jeune génie Arthur Cayley redécouvrit les octonions et coiffa Graves au poteau de la publication. C'est pourquoi les octonions portent parfois le nom de nombres de Cayley.

Une algèbre non associative

Pourquoi Hamilton n'aimait-il pas les octonions? D'une part, il était obsédé par ses recherches sur sa propre découverte, les quaternions. D'autre part, il avait une raison purement mathématique: les octonions enfreignent certaines lois chères à l'arithmétique.

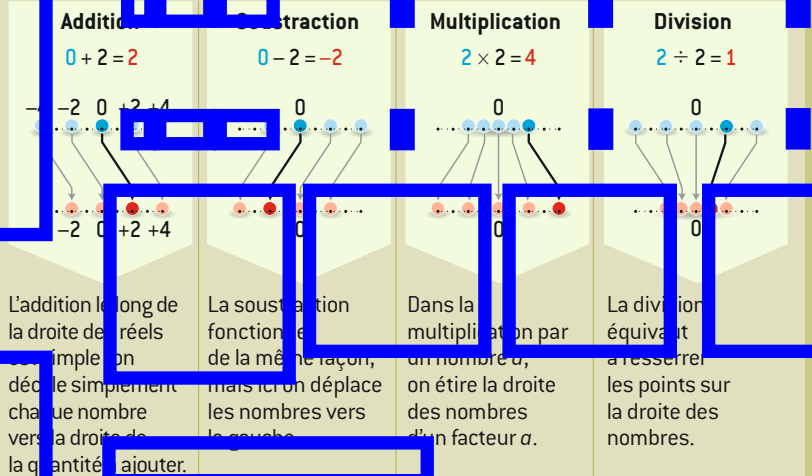
Les quaternions sont eux-mêmes déjà un peu étranges. Quand on multiplie des nombres réels, peu importe l'ordre dans lequel on le fait: 2×3 est égal à 3×2 , par exemple. La multiplication est «commutative». Il en va de même avec les nombres complexes. Mais ce n'est pas le cas de la multiplication des quaternions.

Les quaternions décrivent des rotations en trois dimensions, et l'on sait que le résultat de plusieurs rotations successives dépend de l'ordre dans lequel elles ont été effectuées. Chacun peut le vérifier (voir l'encadré page 75). Prenez un livre, retournez-le autour de son axe vertical (vous lisez maintenant la quatrième de couverture), et faites-lui faire un quart de tour dans le sens des aiguilles d'une montre. Maintenant, effectuez ces deux opérations dans l'ordre inverse: faites d'abord un quart de tour, puis retournez. La position finale est alors l'image inversée de celle de la première procédure. Puisque le résultat dépend de l'ordre, la composition des rotations n'est pas commutative. De même, la multiplication des quaternions ne l'est pas.

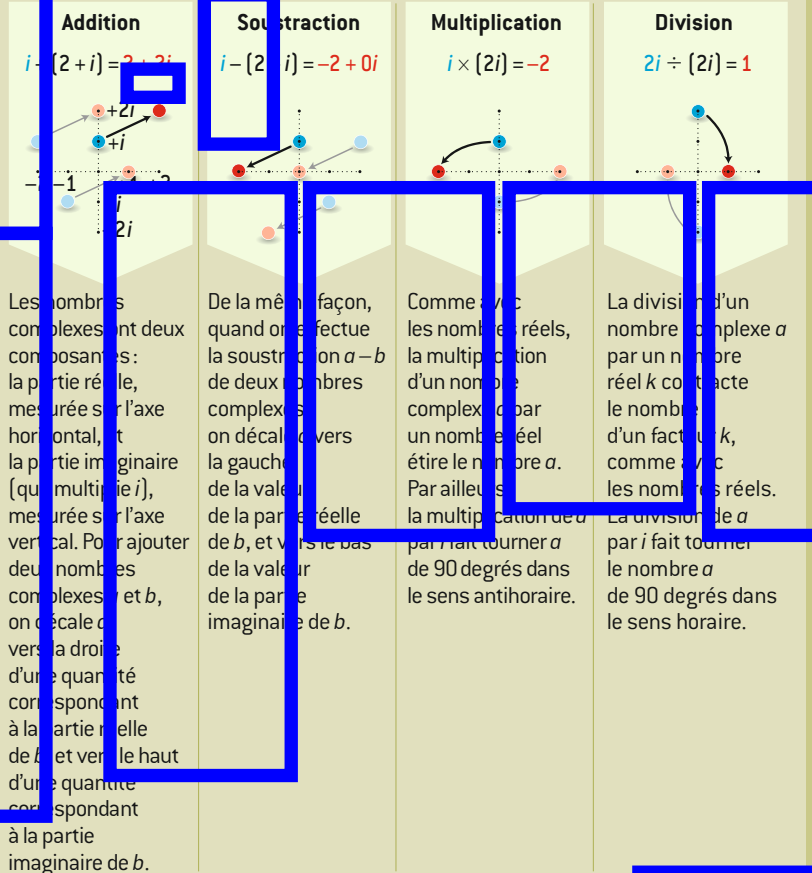
NOMBRES RÉELS ET NOMBRES COMPLEXES

À l'école, on apprend à relier les notions d'addition et de soustraction à des opérations concrètes: déplacer des nombres le long de la droite numérique. Ce lien entre l'algèbre et la géométrie se révèle très puissant. Grâce à lui, les mathématiciens peuvent utiliser l'algèbre des octonions pour résoudre des problèmes dans des mondes de dimension 8 difficiles à imaginer. Les tableaux ci-dessous montrent comment les opérations arithmétiques ou géométriques sur les nombres réels s'étendent aux nombres complexes, étendus à deux dimensions.

NOMBRES RÉELS (R)



NOMBRES COMPLEXES (C)



Les octonions sont bien plus étranges encore. Non seulement leur multiplication n'est pas commutative, mais ils contreviennent à une autre loi familière de l'arithmétique: l'associativité, c'est-à-dire l'égalité $(xy)z = x(yz)$ pour tous x, y et z (la soustraction n'est pas associative, mais elle peut être vue comme une addition de nombres négatifs, et l'addition est associative). Mais nous avons l'habitude que la multiplication soit associative et la plupart des mathématiciens ont toujours cette attente, même s'ils se sont accoutumés aux opérations non commutatives. Ainsi, la composition des rotations est associative, même si elle n'est pas commutative.

Pour quel usage ?

Le point le plus important était peut-être qu'il n'était pas clair à l'époque de Hamilton que les octonions puissent servir à quelque chose. Ils sont étroitement liés à la géométrie en dimensions 7 et 8, et on peut décrire les rotations dans ces espaces multidimensionnels à l'aide de multiplications d'octonions. Mais pendant plus d'un siècle, cela est resté un exercice purement intellectuel. Il a fallu attendre le développement de la physique des par-

ticules et de la théorie des cordes en particulier) pour voir à quoi pourraient servir les octonions dans le monde réel.

Dans les années 1970 et 1980, les physiciens théoriciens ont développé une jolie idée: la supersymétrie (dont on apprendra la suite qu'elle est nécessaire à la théorie des cordes). Selon cette idée, l'Univers présente aux niveaux les plus fondamentaux une symétrie entre la matière élémentaire et les interactions fondamentales. La matière est décrite par des particules (tels l'électron ou le proton) nommées fermions, tandis

que les forces fondamentales sont décrites par des particules (tel le photon, vecteur de l'interaction électromagnétique) nommées bosons. La supersymétrie stipule qu'à chaque particule de matière (un fermion) est associé un boson, et qu'à chaque particule de force est associé un fermion.

La supersymétrie contient également l'idée que les lois de la physique resteraient les mêmes si nous échangeons toutes les particules de force et de matière. Imaginez que vous regardiez le monde à travers un miroir qui, au lieu d'échanger la droite et la gauche, remplacerait chaque par-

ticule de force par une particule de matière, et inversement. Si la supersymétrie décrit vraiment notre Univers, cet univers miroir

se comporterait comme le nôtre. Bien que les chercheurs n'en aient pas encore trouvé de preuve expérimentale, la supersymétrie est une idée tellement séduisante et qui a conduit à des mathématiques tellement intéressantes que de nombreux physiciens espèrent et croient qu'elle est vraie.

Nombres unificateurs

Il y a cependant une théorie qui est bien vérifiée: la mécanique quantique. Et d'après la mécanique quantique, les particules sont aussi des ondes. Dans la version standard à trois dimensions de la mécanique quantique que les physiciens utilisent tous les jours, un type de nombres (les spinors) entre dans la description du comportement ondulatoire des particules de matière. Un autre type de nombres (les vecteurs) permet de décrire le comportement ondulatoire des particules de force. Pour comprendre les interactions entre particules, nous devons combiner les deux types de nombres à l'aide d'une multiplication triplée de toutes pièces. Même si le système que nous utilisons actuellement semble fonctionner, il est inélégant.

Comme alternative, imaginez un univers étrange dépourvu de temps, où seul

Quaternions et octonions

LES QUATERNIONS (H)

L'ensemble des quaternions est l'ensemble de tous les nombres qui s'écrivent sous la forme $a + bi + cj + dk$, où a, b, c, d sont des réels. Par définition, les symboles i, j, k satisfont les égalités suivantes:

$$i^2 = j^2 = k^2 = -1, \quad ij = -ji = k, \quad jk = -kj = i, \quad ki = -ik = j.$$

Cela peut être résumé par la table de multiplication ci-dessous.

La multiplication de deux quaternions x et y n'est pas commutative en général, commutative: xy n'est pas égal à yx pour tous x et y .

	1	i	j	k
1	1	i	j	k
i	i	-1	k	-j
j	j	k	-1	i
k	k	-j	i	-1

$$\text{si } x = a_1 + b_1 i + c_1 j + d_1 k \text{ et } y = a_2 + b_2 i + c_2 j + d_2 k, \text{ alors:}$$

$$x + y = y + x = (a_1 + a_2) + (b_1 + b_2)i + (c_1 + c_2)j + (d_1 + d_2)k.$$

L'ensemble des quaternions est un espace vectoriel de dimension 4 sur les réels (une longueur est attribuée à chaque nombre). Le carré de la norme de $x = a + bi + cj + dk$ est ainsi le nombre positif ou nul $xx^* = a^2 + b^2 + c^2 + d^2$, où $x^* = a - bi - cj - dk$ est le « conjugué » de x .

Les rotations dans l'espace peuvent être représentées de façon efficace à l'aide de quaternions. Plus précisément, considérons la rotation d'angle 2α (dans le sens direct, et compris entre 0 et 2π radians) autour de l'axe défini par le vecteur unitaire à trois composantes (u_x, u_y, u_z) . À tout vec-

teur de composantes x, y et z , on associe le quaternion $V = xi + yj + zk$. Appliquons le quaternion (vecteur) V à un quaternion (vecteur) V' donné par le produit:

$$V' = q_\alpha V q_\alpha^{-1} \text{ où } q_\alpha = \cos \alpha + \sin \alpha (u_x i + u_y j + u_z k).$$

LES OCTONIONS (O)

L'ensemble des octonions, noté $\mathbb{O}$, est celui de tous les nombres qui s'écrivent sous la forme $a + bi + cj + dk + el + fm + gn + hp$, où a, b, c, d, e, f, g, h sont des réels.

Les symboles $i_1, i_2, \dots, i_7$ vérifient la table de multiplication ci-dessous.

	1	i ₁	i ₂	i ₃	i ₄	i ₅	i ₆	i ₇
1	1	i ₁	i ₂	i ₃	i ₄	i ₅	i ₆	i ₇
i ₁	i ₁	-1	i ₃	i ₄	i ₂	i ₇	i ₆	-i ₅
i ₂	i ₂	i ₃	-1	i ₄	i ₁	i ₅	-i ₇	i ₆
i ₃	i ₃	i ₄	i ₁	-1	i ₂	-i ₆	i ₅	i ₇
i ₄	i ₄	i ₅	i ₂	i ₃	-1	i ₇	-i ₅	i ₆
i ₅	i ₅	i ₆	i ₇	-i ₅	i ₆	i ₇	-1	i ₄
i ₆	i ₆	-i ₆	i ₅	i ₇	-i ₅	-1	i ₃	i ₂
i ₇	i ₇	i ₆	i ₅	i ₄	i ₃	i ₂	i ₁	-1

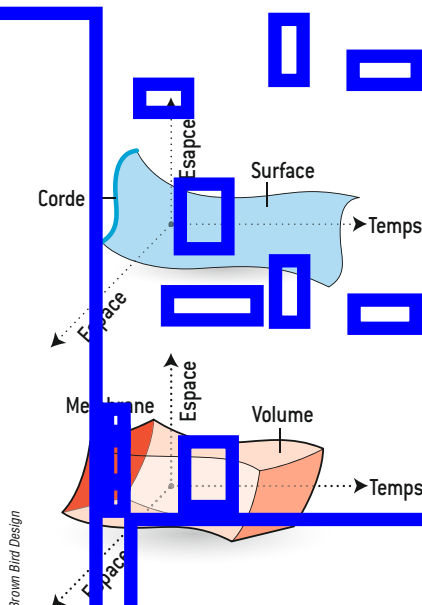
Par ailleurs, l'addition est définie comme pour les quaternions et a les propriétés habituelles.

existe l'espace. Si cet univers est de dimension 1, 2, 4 ou 8, les particules de matière comme de force seraient des ondes décrites par un seul type de nombres, à savoir des nombres d'une certaine algèbre de division, où l'addition, la soustraction, la multiplication et la division sont possibles. En d'autres termes, dans ces dimensions, les vecteurs et les spineurs coïncident : les uns comme les autres sont simplement des nombres réels, les nombres complexes, des quaternions ou des octonions, respectivement. La supersymétrie émerge naturellement et fournit ainsi une description unifiée de la matière et des forces. Une simple multiplication décrit les interactions, et toutes les particules (quel que soit leur type) sont décrites à l'aide du même système de nombres.

Mais cet univers-jouet ne peut pas être réel, puisque nous devons prendre le temps en considération. Dans la théorie des cordes, cette considération a un effet très curieux. À tout instant, une corde est un objet unidimensionnel, comme une courbe ou une droite. Mais à mesure que le temps s'écoule, la corde trace une surface bidimensionnelle. On montre que cette évolution modifie les dimensions dans lesquelles la supersymétrie apparaît naturellement, en en ajoutant deux : une pour la corde, et une pour le temps. Au lieu de supersymétrie en dimension 1, 2, 4 ou 8, on obtient une supersymétrie en dimension 3, 4, 6 ou 10.

Or, comme par hasard, les théoriciens des cordes nous disent depuis des années que seules les versions à dix dimensions de la théorie sont cohérentes. Les autres sont entachées de défauts nommés anomalies : quand on calcule certaines grandeurs de deux façons distinctes, on obtient des résultats différents. Il n'y a qu'en dimension 10 que la théorie des cordes pourrait être valide. Mais la théorie des cordes à dix dimensions est, comme nous venons de le voir, la version de la théorie qui utilise les octonions. Si la théorie des cordes est vraie, les octonions ne sont donc plus une curiosité inutile ; ils pourraient apporter un éclairage nouveau sur le fait que la théorie des cordes n'est cohérente qu'en dimension 10. À dix dimensions, les particules de matière et de force sont représentées par le même type de nombres, à savoir les octonions.

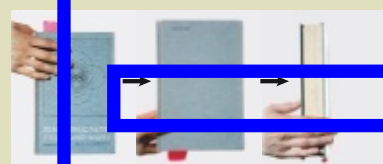
Toutefois, ce n'est pas le dernier mot de l'histoire. Récemment, les physiciens se sont mis à aller au-delà des cordes et à considérer les membranes. Par exemple, une membrane à deux dimensions



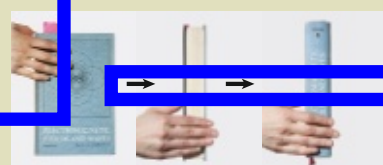
2. DANS LA THÉORIE DES CORDES, des cordes unidimensionnelles décrivent des surfaces bidimensionnelles au cours du temps. Dans la théorie M, les membranes bidimensionnelles décrivent des volumes tridimensionnels. L'ajout de ces dimensions aux huit dimensions des octonions fournit des théories impliquant 10 ou 11 dimensions.

NON-COMMUTATIVITÉ

D'ordinaire, on peut multiplier les nombres dans n'importe quel ordre. Par exemple, 2×3 est égal à 3×2 . Ce n'est plus le cas dans les systèmes de dimensionnalité supérieure, tels ceux des quaternions et des octonions, qui sont non commutatifs. Les quaternions peuvent décrire les rotations en trois dimensions, qui sont aussi non commutatives : si on fait tourner successivement un objet tel qu'un livre autour d'axes différents, le résultat dépend de l'ordre des rotations. Sur la première ligne, on retourne d'abord le livre verticalement puis on le fait tourner d'un quart de tour : la tranche apparaît. Sur la ligne du bas, on inverse les opérations et c'est le dos qui apparaît.



Une rotation d'axe horizontal, suivie d'une rotation d'axe vertical.



Les deux rotations dans l'ordre inverse.

braire, ressemble à tout instant donné à une nappette. À mesure que le temps passe, elle décrit un volume tridimensionnel dans l'espace-temps.

Alors qu'en théorie des cordes, nous devions ajouter deux dimensions à la séquence classique 1, 2, 4 et 8, il nous faut maintenant en ajouter trois. Ainsi, quand nous nous affairons à des membranes, nous devons nous attendre à ce que la supersymétrie émerge naturellement en dimensions 4, 5, 6 et 11. Et comme avec la théorie des cordes, une surprise nous attendait : les chercheurs affirment que la théorie M (où le « M » correspond entre autres à « membrane ») nécessite 11 dimensions, ce qui implique qu'elle fasse naturellement appel aux octonions. Hélas, personne ne comprend suffisamment bien la théorie M pour en écrire les équations fondamentales (ce qui signifie aussi bien « mystérieuse » !). Il est difficile de prédire la forme exacte qu'elle prendra.

Les octonions font-ils partie de la nature ?

À ce stade, insistons sur le fait que la théorie des cordes et la théorie M n'ont pas encore fait de prédictions que des expériences pourraient tester. Ce ne sont pour l'instant que de beaux rêves. Notre Univers ne nous semble pas avoir 10 ou 11 dimensions, et nous n'avons pas observé de symétrie entre particules de matière et particules d'interaction. David Gross, l'un des principaux spécialistes de la théorie des cordes, estime actuellement à 50 pour cent les chances de découvrir des preuves de supersymétrie au LHC, le grand collisionneur de hadrons du CERN. Les sceptiques pensent qu'elles sont beaucoup plus faibles que cela. L'avenir nous le dira.

Étant donné cette incertitude, nous sommes encore loin de savoir si les octonions ont une importance fondamentale pour la compréhension du monde qui nous entoure, ou s'ils ne sont que de la belle mathématique. Bien sûr, la beauté mathématique en soi est un objectif noble, mais cela serait encore plus merveilleux s'il s'avérait que les octonions font partie intégrante de la nature. Comme le prouvent l'histoire des nombres complexes et beaucoup d'autres développements mathématiques, cela ne serait pas la première fois que des inventions purement mathématiques apportent aux physiciens les outils dont ils ont ultérieurement besoin.

HISTOIRE DES SCIENCES

Du Trésor américain au projet Manhattan

En 1942, le Département américain de la Guerre a emprunté 13 000 tonnes d'argent au gouvernement pour mettre au point la première bombe atomique.

Cameroon REED

Le projet Manhattan – nom de code du projet américain de construction d'une bombe atomique pendant la Seconde Guerre mondiale – présente tous les ingrédients d'une superproduction cinématographique : des personnalités hors du commun, plus de 100 000 seconds rôles, une science d'avant-garde, de l'espionnage et des intrigues diplomatiques, le tout sur fond d'un conflit mondial et de la grave menace que l'Allemagne nazie soit la première à produire l'arme la plus puissante au monde. Des milliards de dollars ont été investis dans la construction d'énormes installations secrètes visant à produire des matériaux pour une arme dévastatrice dont rien ne garantissait qu'elle fonctionnerait.

Comme tout scénario bien ficelé, le projet Manhattan comprend aussi des intrigues secondaires, qui ont suscité moins d'analyses historiques que les principales implications scientifiques, techniques, éthiques et géopolitiques du développement des armes nucléaires. C'est le cas du programme *Silver*. Ce dernier, qui nécessita d'emprunter 13 000 tonnes d'argent au Trésor américain dans le plus grand secret, a pourtant joué un rôle essentiel dans la course à la production des dizaines de kilogrammes d'uranium enrichi nécessaires à la fabrication de l'arme de destruction massive.

En 1942, le projet secret du gouvernement américain de construire « la bombe » est transmis au Département de la Guerre. Le principal problème du nouveau quartier militaire dédié à ce projet, le MED (*Manhattan Engineer District*), est de trouver les moyens de produire suffisamment d'ura-

nium enrichi en uranium 235 – l'isotope fissile de l'uranium – pour réaliser une bombe atomique. Début 1942, seules des quantités de l'ordre du milligramme d'uranium 235 ont été isolées, et l'on ignore si les méthodes de laboratoire utilisées pourront être transposées à l'échelle industrielle.

L'une d'elles, la spectrométrie de masse, semble particulièrement prometteuse : elle consiste à séparer les deux isotopes (uranium 235 et 238) contenus dans l'uranium naturel en fonction de leur masse grâce à un champ électromagnétique. Toutefois, James Marshall et Kenneth Nichols, les deux ingénieurs militaires à la tête du projet, s'aperçoivent vite que la production du champ électromagnétique nécessitera un grand nombre d'aimants, et donc des quantités considérables de cuivre pour construire leurs bobinages. Or le cuivre, utilisé dans les douilles d'obus, est une matière première précieuse pendant la guerre. Les deux hommes ont alors l'idée d'utiliser l'argent comme substitut. Le Congrès a autorisé l'utilisation de 18 000 tonnes d'argent du ministère des Finances à des fins militaires ; en outre, on a emprunté une partie pour la bombe afin d'éviter de détourner de grandes quantités de cuivre – deux énormes atouts pour préserver le secret autour du projet.

Nichols rencontre le sous-secrétaire d'État aux finances le 3 août 1942, pour se renseigner sur la possibilité d'emprunter 5 000 tonnes d'argent aux caves du Trésor. Le projet est lancé. Une des premières démarches est du colonel Leslie Groves, nommé directeur militaire du MED en septembre 1942, d'acquiescer un vaste terrain isolé dans l'Est du Tennessee qui répond aux critères pour y

implanter des installations d'enrichissement. L'armée expulse un millier de familles pour prendre possession d'une zone de près de 250 kilomètres carrés, à une trentaine de kilomètres de Knoxville, pour y établir le site, nommé Clinton Engineer Works, puis Oak Ridge après la guerre. C'est là que doit être construite l'usine de séparation électromagnétique des isotopes. Son nom de code : Y-12. L'entreprise est colossale : la construction de Y-12 nécessite 67 millions d'heures de travail, effectuées par près de 20 000 employés. Le complexe compte plus de 200 bâtiments et emploie 5 000 personnes pour l'exploitation et la maintenance. La plupart n'aurait aucune idée du projet auquel ils contribuent jusqu'à l'annonce par le président Truman qu'une bombe a été larguée sur Hiroshima.

Des cyclotrons et des calutrons

Le besoin d'une telle quantité d'argent à Y-12 est une conséquence de la physique qui sous-tend la spectrométrie de masse. En optique, la spectrométrie consiste à séparer les différentes longueurs d'onde qui constituent la lumière à l'aide d'un prisme. De même, la spectrométrie de masse sépare les atomes ou molécules ionisés en fonction de leur masse et c'est un champ magnétique qui joue le rôle de prisme. Les spectromètres de masse utilisés à Oak Ridge – les calutrons – sont dérivés du cyclotron, inventé en 1931 par le physicien américain Ernest Lawrence, pour lequel il reçut le prix Nobel.

Le dispositif original de Lawrence n'avait aucun rapport avec l'enrichissement de l'uranium. Il l'avait inventé en réponse à une crise



© Greenwood/Corbis

1. LES LINGOTS D'ARGENT du Trésor américain, ici transportés de New York au dépôt de la guerre de Fort Belvoir, à Denver, en 1937. En 1942, le Congrès américain autorisa l'utilisation de 78 000 tonnes d'argent à des fins militaires. La même année, le Département de l'Énergie créa un dépôt pour le projet Manhattan, à l'origine de la première bombe atomique.

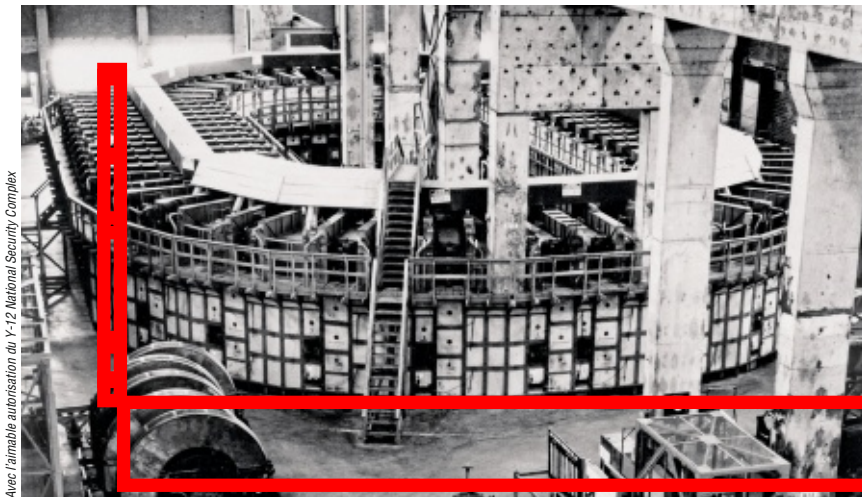
qui touchait la recherche en physique nucléaire. Pour étudier les noyaux atomiques, on bombardait des atomes cibles avec des projectiles adéquats – des particules alpha (noyaux d'hélium) –, afin de déclencher des réactions. Toutefois, dans les années 1920, les particules alpha, obtenues par désintégration radioactive naturelle de certains éléments chimiques, étaient de basse énergie et, par conséquent, repoussées par les protons des noyaux cibles, même de masse moyenne. Aussi les expérimentateurs étaient-ils limités à des éléments cibles légers tels que l'aluminium et le magnésium. Pour étudier des noyaux plus lourds, il leur fallait un moyen d'accélérer leurs projectiles.

Le cyclotron de Lawrence avait apporté une telle solution : ce type d'accélérateur circulaire utilise un champ magnétique intense et un champ électrique alternatif. Injecté en son centre, un faisceau de particules chargées est courbé par le champ magnétique et suit une trajectoire circulaire qui traverse périodiquement le champ électrique. Chaque passage dans le champ électrique augmente la vitesse – et donc l'énergie – des particules, et accroît le rayon de leur trajectoire dans le champ magnétique. Les particules suivent ainsi des trajectoires en spirale jusqu'à ce qu'elles heurtent les parois externes de l'enceinte, recouvertes des atomes cibles. Le premier cyclotron de Lawrence mesurait environ 13 centimètres de diamètre. La version de 1937, de 1,5 mètre de diamètre, nécessitait, pour la création du champ magnétique, un aimant de 200 tonnes.

Le cyclotron de Lawrence est construit selon le même principe, mais sans champ électrique alternatif : des molécules ionisées de tétrachlorure d'uranium, préalablement accélérées par un champ électrique, sont libérées dans une enceinte circulaire où un champ magnétique intense courbe leur trajectoire sans modifier leur vitesse. Leur trajectoire est ainsi circulaire et son rayon dépend de divers paramètres : l'intensité du champ magnétique, le degré d'ionisation des particules, leur vitesse initiale et, surtout, leur masse. Le rayon de l'orbite d'un ion est d'autant plus grand que sa masse est élevée. Ainsi, à partir d'uranium naturel, le calutron sépare les ions de l'isotope fissile de masse atomique 235, l'uranium 235, un isotope rare qui ne représente que 0,72 pour cent de l'uranium naturel, et ceux de l'isotope courant, non fissile, de masse atomique 238. L'écart entre les deux faisceaux est maximal après une demi-orbite seulement, mesurant donc là que les isotopes sont recueillis (voir la figure 3). Ensuite, l'uranium 235 est séparé chimiquement des molécules de tétrachlorure.

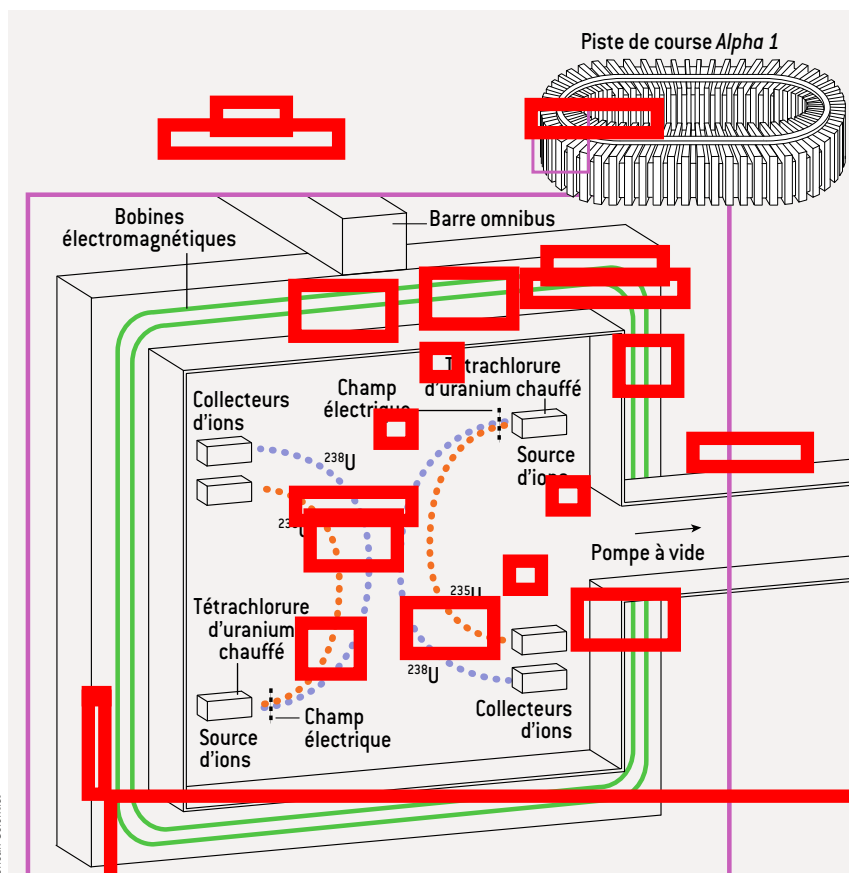
Si la méthode de séparation de l'uranium mise en pratique à Oak Ridge l'est beaucoup

plus, elle est aussi plus coûteuse. La séparation de l'uranium 235 par diffusion gazeuse, mise en pratique à Oak Ridge, est beaucoup



Avec l'aimable autorisation du Y-12 National Security Complex

2. À L'USINE Y-12, LES CALUTRONS, enceintes qui, à partir d'uranium naturel, produisent l'uranium fissile (^{235}U) nécessaire pour fabriquer la bombe de l'uranium non fissile (^{238}U). Ils sont équipés en énormes « pistes de course » pour optimiser la production.



American Scientist

3. DANS UN CALUTRON, du tétrachlorure d'uranium était vaporisé par chauffage, ce qui créait des ions de charge positive. Accéléré par un champ électrique, le faisceau d'ions pénétrait dans une enceinte à vide où il était courbé par le champ magnétique créé par un solénoïde – une bobine d'argent parcourue d'un courant continu. L'isotope ^{238}U a une masse légèrement supérieure à celle de l'uranium ^{235}U , conduit à une trajectoire moins courbe que l'uranium ^{235}U , ce qui sépare les deux isotopes.

moins. Par exemple, pour trier les ions de tétrachlorure d'uranium, le champ magnétique doit être parfaitement uniforme. En outre, une grande proportion d'ions s'écrasent sur les parois internes des enceintes et doivent être récupérés en raclant les parois. Dès lors, le rendement de collecte n'est que d'environ dix pour cent. Par ailleurs, les variations thermiques des vitesses initiales des ions conduisent à un mélange des faisceaux. Et pour compliquer encore les choses, la différence de masse entre les deux isotopes est si faible (un pour cent), que leur séparation nécessite un champ magnétique extrêmement puissant. Enfin, les faisceaux ioniques, de même charge, se repoussent l'un l'autre, ce qui écarte leurs trajectoires des courbes idéales. Cet effet limite la production à 100 milligrammes d'uranium ^{235}U par enceinte et par jour. Pour produire les 50 kilogrammes nécessaires pour une bombe atomique, Y-12 doit ainsi s'équiper de plus de 1 000 enceintes, dont la plupart contiennent plusieurs sources d'ions.

1 152 enceintes à construire

Début 1943, Groves autorise la construction de cinq unités d'enrichissement *Alpha-I*, contenant chacune 96 enceintes (et bobines) carrées. Les enceintes sont empilées en configurations ovales nommées « pistes de course » (voir la figure 2). Mais les enceintes situées dans les coudes des pistes sont difficiles à régler. À l'automne 1943, quatre pistes de course *Alpha-II*, rectangulaires cette fois, sont ajoutées au dispositif, contenant également 96 enceintes et utilisant des bobines en forme de D. Les dispositifs *Alpha* ne fournissant un enrichissement en uranium ^{235}U que de 15 pour cent, Groves approuve en outre la construction de huit unités *Bêta*, plus petites, qui enrichissent à leur tour l'uranium sorti des unités *Alpha* pour atteindre 90 pour cent, la qualité militaire requise pour la bombe (la dernière unité *Bêta* entra en service qu'une fois la guerre terminée, fin 1945). Finalement, les neuf unités *Alpha* et les huit *Bêta* contiennent un total de 1 152 enceintes.

C'est là qu'entre en jeu l'argent du ministère des Finances. Le métal est nécessaire pour produire les bobines des solénoïdes géants des calculons. Dans les unités *Alpha*, compte tenu de la vitesse que l'on peut donner aux ions, si l'on veut séparer d'au moins un centimètre les trajectoires des deux isotopes, les solénoïdes doivent engendrer un champ magnétique d'intensité suffisante pour imposer aux ions des trajectoires d'environ trois mètres de diamètre. Ce sera donc la taille des bobines, qui, avec 30 enroulements chacune, devront être alimentées d'un courant de 30 000 ampères pour fournir le champ requis. Au pic de son activité, durant l'été 1945, le site de Clinton Engineer Works consommera ainsi environ un pour cent de toute l'électricité produite aux États-Unis, dont une grande partie circule dans les bobines d'argent des unités d'enrichissement.

Le ministre de la Guerre Henry Stimson fait officiellement la demande de cet argent dans une lettre au ministre des Finances Henry Morgenthau le 29 août 1942, indiquant que le projet « est d'une nature très secrète ». Sa lettre stipule que l'argent doit être titré 999,9, qu'il restera aux États-Unis, et que tout le métal précieux reçu par le Département de la Guerre sera restitué en quantité, forme et titre identiques à l'endroit d'où il aura été prélevé. La date limite de restitution est fixée à cinq ans après réception, à moins qu'une notification écrite du Trésor raccourcisse ce délai pour des raisons connexes aux besoins monétaires des États-Unis. Stimson assure Morgenthau que le métal ne sera utilisé que dans des usines du gouvernement.

Le Département de la Guerre retire au total plus de 400 000 lingots d'environ 31,1 kilogrammes d'argent titré à plus de 999,9 (moins de 1 pour 1 000 d'impuretés) du dépôt de métaux précieux de West Point, dans l'État de New York. Le 30 octobre 1942, les premiers lingots sont transportés par camion une centaine de kilomètres au Sud, jusqu'à une installation de la *U.S. Metals Refining Company*, à Carteret, dans le New Jersey. Le jour suivant, l'usine commence à couler les lingots en billettes, de longues barres cylindriques mesurant environ

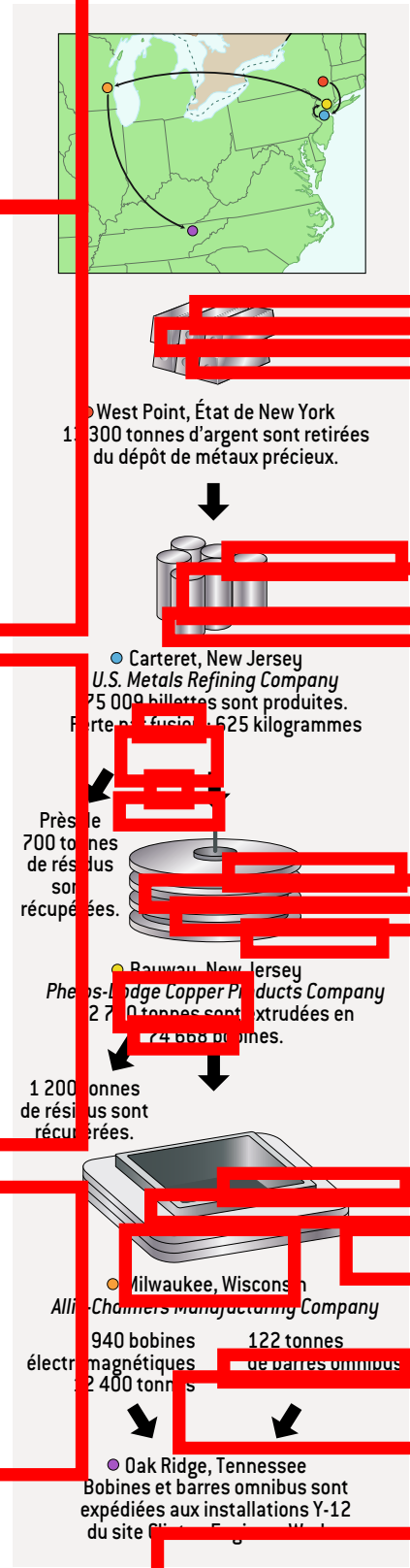
180 kilogrammes chacune. En janvier 1944, un peu plus de 75 000 billettes ont été coulées, pour une masse totale approchant les 14 000 tonnes. Ce poids dépasse les quelque 13 000 tonnes retirées du Trésor, car avant le coulage des billettes, les machines, outils, hauts-fourneaux, ateliers et zones de stockage de l'usine de raffinage ont été démantelés et recyclés pour récupérer les résidus d'argent accumulés précédemment.

Même les bleus de travail des ouvriers ont été passés à l'aspirateur. Des gardes armés veillent à chaque étape que toutes les ébauches ont été récupérées. La récupération des résidus d'argent est si efficace que près de 700 tonnes seront recueillies à Carteret et restituées au Trésor en plus de l'argent emprunté. À cela s'ajouteront 1 200 tonnes, récupérées dans l'usine de fabrication des bobines. Le total est bien supérieur à la quantité d'argent empruntée au Trésor qui n'a pu être restituée (cinq tonnes perdues au fil des différentes étapes de transformation de lingots en bobines).

Le péripète secret des 400 000 lingots

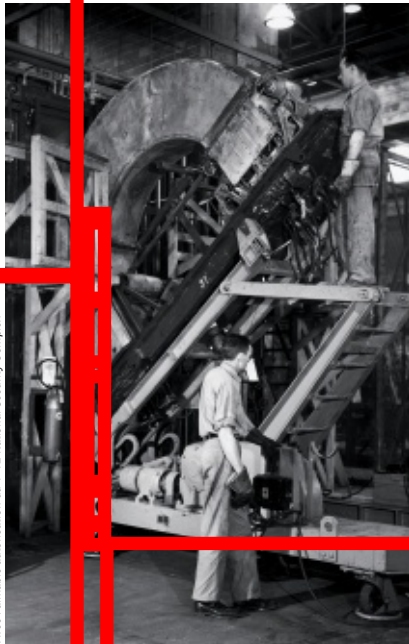
Une fois coulées, les billettes sont acheminées par la route quelques kilomètres plus au Nord jusqu'à une usine de la *Phelps Dodge Copper Products Company* de Bayway, toujours dans le New Jersey. Là, elles sont chauffées et étirées en bandes de 8 centimètres de large, 15 millimètres d'épaisseur et 12 à 15 mètres de long. Après refroidissement, les bandes sont laminées à froid pour obtenir différentes épaisseurs selon les spécificités des diverses bobines d'aimants requises, puis façonnées en bobines serrées de la taille de gros pneu de voiture.

4. DES LINGOTS D'ARGENT du Trésor aux aimants de l'usine Y-12, la route était longue : transportés par camions du dépôt de West Point, dans l'État de New York, à une usine du New Jersey, ils étaient fondus en billettes, puis extrudés en bandes dans une usine voisine, avant d'être acheminés par train dans le Wisconsin, où les bobines électromagnétiques destinées au projet Manhattan étaient enfin produites. Ainsi, 940 électroaimants furent construits et transportés en train jusqu'au site Y-12.



Plus de 74 000 bobines sont produites. La plupart sont expédiées dans le Wisconsin pour la fabrication des aimants, mais quelque 1 000 tonnes sont envoyées directement à Oak Ridge pour être façonnées sur le site en près de 9 000 « barres omnibus » – des barres conductrices qui alimentent les solénoïdes en courant. Durant leur manufacture, des gardes armés, munis de masques à gaz, rattrapent la poussière d'argent produite lors de l'usinage des pièces pour qu'il soit refondu et réutilisé.

Les bandes de bobine sont acheminées par rail du New Jersey au Wisconsin, par chargements de six wagons scellés et gardés 24 heures sur 24. À la *Allis-Chalmers Manufacturing Company* de Milwaukee, les bobines sont déroulées et assemblées avec des soudures à l'argent pour former des bobines plus longues, puis enfin enroulées autour des corps de bobine en acier des boîtiers d'aimants. Entre février 1943 et août 1944, 940 aimants sont enroulés. Chacun contient en moyenne environ 13 tonnes d'argent. Ces aimants sont alors acheminés jusqu'à Oak Ridge dans des wagons plats.



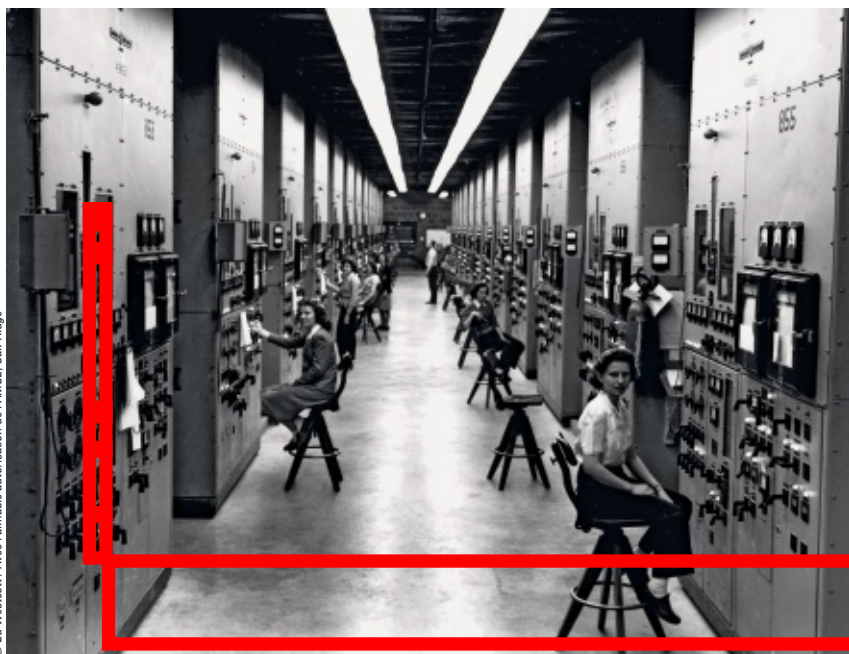
6. UN OUVRIER retire une enceinte d'un calutron du site Y-12 afin d'en extraire l'uranium. Les ouvriers devaient racler les parois des calutrons pour récupérer l'uranium qui n'avait pas atteint les collecteurs d'ions.

La première piste de course *Alpha* entre en service le 13 novembre 1943, mais son exploitation initiale est de courte durée : les bobines entrent en court-circuit parce qu'elles sont trop serrées et que de la matière organique a contaminé une huile isolante. L'exploitation est suspendue, et 80 aimants *Alpha-1* sont renvoyés à Milwaukee pour qu'ils soient réusinés. La deuxième piste *Alpha* entre en service le 22 janvier 1944, et la première est reconstruite le 3 mars. Fin janvier 1945, neuf pistes de course *Alpha* contenant 864 calutrons et six pistes *Bêta* contenant 216 calutrons fonctionnent dans huit gros bâtiments du complexe Y-12.

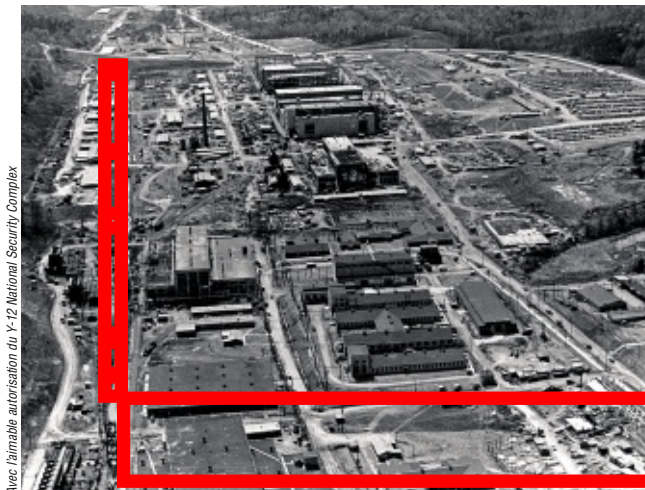
De la bombe Little Boy à... la médecine

L'isotope ^{235}U s'accumule peu à peu à Oak Ridge. En avril 1945, les installations Y-12 n'ont produit que 25 kilogrammes d'uranium de qualité militaire et, toutes méthodes d'enrichissement confondues (d'autres méthodes ont été développées sur d'autres sites), les quantités augmentent d'environ 200 grammes par jour. À la mi-juillet, les installations ont produit un peu plus de 50 kilogrammes. À ce stade, Y-12 a consommé environ 1,6 milliard de kilowattheures d'électricité, soit à peu près 100 fois l'énergie libérée par *Little Boy*, la bombe larguée sur Hiroshima le 6 août 1945. Presque chaque atome d'uranium ^{235}U entrant dans la confection de *Little Boy* provient des calutrons de Lawrence. Fin 1946, la production cumulée de Y-12 s'élève à un peu plus de 1 000 kilogrammes d'uranium ^{235}U , l'équivalent d'environ 15 bombes d'Hiroshima.

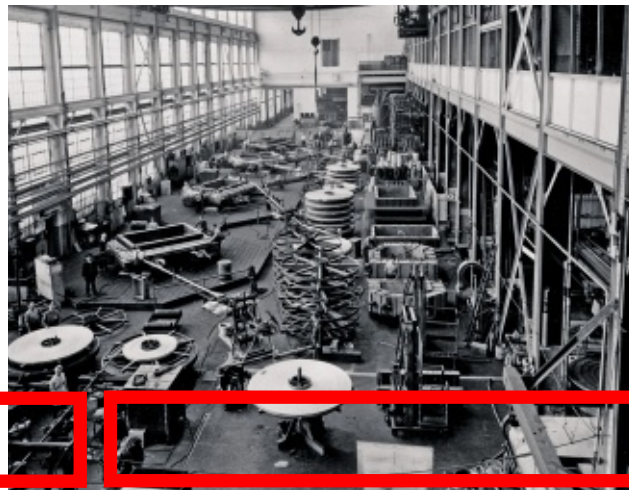
Fin 1946, la méthode de séparation de l'uranium par diffusion gazeuse obtient un bien meilleur rendement que le processus électromagnétique, si bien que l'enrichissement de l'uranium est arrêté en décembre dans tous les bâtiments de Y-12, sauf un. Mais c'est seulement le 1^{er} juin 1970 que le dernier lingot d'argent du projet Manhattan est restitué à West Point, quelques semaines avant la mort de Groves : certains calutrons de Y-12 sont restés en service, utilisés pour d'autres éléments du tableau périodique.



5. LE GOUVERNEMENT AMÉRICAIN avait embauché de jeunes bachelières pour faire fonctionner les calutrons du site Y-12. Les 200 jeunes femmes étaient formées à surveiller les compteurs et à régler les cadrans, mais on ne leur avait pas dit que produisaient les calutrons.



Avec l'aimable autorisation du Y-12 National Security Complex



Avec l'aimable autorisation de la Milwaukee County Historical Society

7. LE SITE SECRET CLINTON ENGINEER WORKS, dans l'Est du Tennessee, où fut construit le complexe électromagnétique Y-12. Fin 1945, plus de 11 000 calutrons étaient en service sur le site.

8. À LA ALLIS-CHALMERS MANUFACTURING COMPANY, dans le Wisconsin, les bobines d'argent étaient déroulées, soudées, puis montées autour des corps de bobine en acier des boîtiers d'aimants.

Après la guerre, de nombreux calutrons sont rééquipés avec des bobinages en cuivre, mais pas les calutrons de l'usine pilote. Ceux-ci fonctionnent jusqu'en 1974 (avec 60 tonnes d'argent dans les bobinages de leurs aimants jusqu'en 1970) pour séparer des isotopes autres que ceux de l'uranium, dont certains sont utilisés dans le réacteur à graphite du tout proche Laboratoire national d'Oak Ridge. L'installation crée des marqueurs radioactifs pour certains examens médicaux. D'autres calutrons développés pour le projet Manhattan séparent des isotopes stables jusqu'en 1993 ; ensuite, l'arrivée de sources meilleur marché d'isotopes impose la fin de l'exploitation. La fermeture de ces installations est due à des raisons de l'actuelle pénurie d'isotopes médicaux aux États-Unis.

Les deux visages du projet Manhattan

Aujourd'hui, les installations Y-12 d'Oak Ridge sont toujours en service en tant que Complexe de la sécurité nationale du ministère de l'Énergie, sous contrat avec la *Babcock & Wilcox Company*. Elles ont été récemment reconverties en site de récupération et de stockage de matériaux nucléaires. Un rapport datant de 2010 de la *Nuclear Posture Review*, qui définit la stratégie nucléaire américaine pour les prochaines années,

prône également la construction d'une nouvelle installation de traitement de l'uranium sur le site Y-12, qui pourrait être opérationnelle en 2021.

Souvenons qu'Oak Ridge, de même que les deux autres sites du projet Manhattan – Los Alamos, au Nouveau-Mexique, et Hanford, dans l'État de Washington – resteront accessibles pour aider les générations futures à explorer et comprendre le projet. Los Alamos centralisait les recherches scientifiques du projet, et Hanford mettait en œuvre une autre stratégie pour obtenir un matériau fissile : la synthèse, dans des réacteurs géants de plutonium à partir d'uranium.

Les historiens débattront sans fin pour savoir si le projet Manhattan a vraiment contribué à accélérer la Seconde Guerre mondiale ou permis d'éviter une invasion sanglante du Japon. Le fait d'accélérer la fin de la guerre valait-il le coût en victimes civiles et les dégâts en termes d'image et d'autorité morale de l'Amérique ? Quoi qu'il en soit, le projet Manhattan a été la plus grande entreprise mondiale de « Big Science ». Il a influencé des événements à court et à long terme comme aucune autre initiative scientifique de l'histoire. Le projet et son programme S ont servi des modèles de ce que la science et l'ingénierie, conduites par des professionnels compétents, peuvent accomplir quand le besoin se fait pressant.

L'AUTEUR



Cameron REED est professeur de physique à l'Alma College à Alma dans le Michigan, aux États-Unis.

Article publié avec l'aimable autorisation de *American Scientist*.

✓ BIBLIOGRAPHIE

C. Reed, *The Physics of the Manhattan Project*, Springer, 2010.

C. Reed, Bulletin of the Field of the Silver Program of the Manhattan Project, *Michigan Academician*, vol. 39, n° 3, pp. 205-212, 2009.

Le site Web du Complexe de sécurité nationale Y-12 propose de nombreuses archives : www.y12.doe.gov

LOGIQUE & CALCUL

La culturomique

L'étonnant corpus de textes créé récemment par une équipe internationale de chercheurs dévoile des phénomènes linguistiques insoupçonnés.

Jean-Paul DELAHAYE

De nombreuses informations, concernant le monde physique, culturel ou social sont trop coûteuses à collecter : il n'est pas envisageable par exemple de savoir combien de personnes connaissent le nom de Kurt Gödel et le sujet de ses recherches. Alors que pour évaluer le nombre de personnes qui connaissent une personnalité très en vue, nous pouvons opérer par sondage, pour une personnalité scientifique à la notoriété moindre, il faudrait, pour un résultat fiable, un échantillon de plusieurs dizaines de milliers de personnes... ce qui revient trop cher. On a pallié aujourd'hui ce problème en utilisant un énorme corpus de données comportant cinq millions de livres !

Sonder ou tout prendre en compte ?

Les sondages donnent accès à des informations globales sur de grands ensembles impossibles à explorer de manière exhaustive : groupes humains, populations animales, objets sortant d'une chaîne de production, etc. Malheureusement, les sondages ne voient pas les faibles fréquences.

Pour des statistiques fines, il nous faut procéder autrement et nous savons que les élections sont le seul moyen pour mesurer l'importance des petits partis. Sans les approches exhaustives ou presque exhaustives, les faibles fréquences sont impossibles à mesurer. L'informa-

tique élargit le champ des variables évaluées : elle offre des capacités de stockage massif d'informations, elle réalise des collectes de faits, de chiffres et d'images à grande échelle et les automatise. Elle donne aussi des moyens de traitement numériques ultrarapides pour l'exploration des gigantesques bases de données. Plusieurs domaines de recherche sont nés ou ont été renouvelés. Ainsi, la fouille de données (*data mining*) conçoit des méthodes pour extraire l'information pertinente des masses inouïes de données enregistrées sur les supports numériques et la technologie des moteurs de recherche sur Internet se fonde sur des bases d'informations stockées sur les disques durs de centaines de milliers d'ordinateurs des *datacenters*, information mise à jour en permanence, puis manipulée instantanément pour répondre aux milliers de requêtes des utilisateurs que nous sommes tous.

De nombreuses disciplines scientifiques (toutes ?) sont concernées. Citons la météorologie où les réseaux de collectes d'information et les outils de calcul sont perfectionnés sans relâche ; la géographie et la démographie, qui disposent de tableaux chiffrés de plus en plus variés et nombreux ; l'économie, elle aussi soumise à une multiplication des informations mises à sa disposition ; la biologie et la génétique, avec ces centres de données de séquences qui sont devenus un outil quotidien des chercheurs ; les mathématiques avec, par exemple, la base de suites numériques de Neil Sloane.

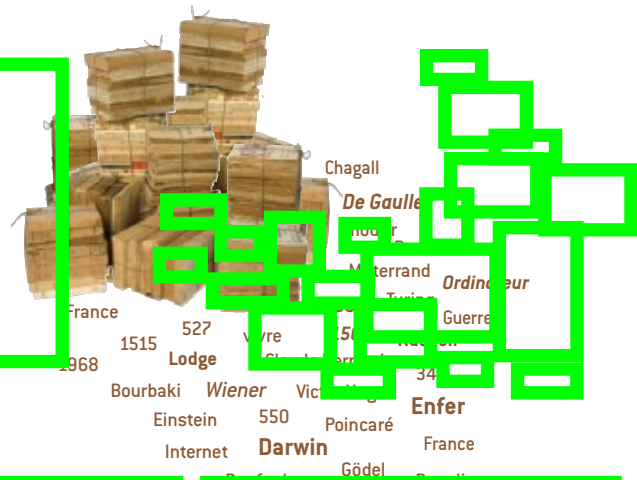
La linguistique utilise depuis longtemps les outils informatiques. La constitution de corpus de textes donne une vision objective des langues parlées ou écrites. La réunion de tous les textes d'un auteur permet l'étude statistique du vocabulaire d'un écrivain et de ses habitudes stylistiques.

Les conclusions sont parfois étonnantes. Dominique Labbé, après analyse des œuvres de Molière et de Corneille, prétend que les 16 œuvres principales de Molière ont été écrites par Corneille, thèse qui, sans faire l'unanimité, s'appuie sur des arguments sérieux.

Cinq millions de livres

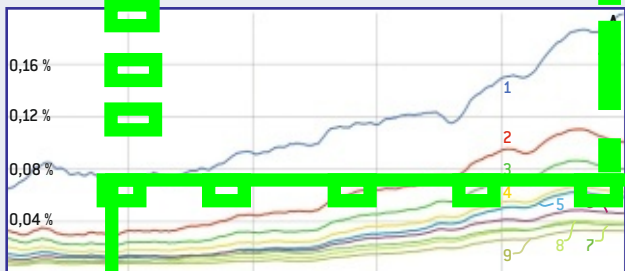
Un pas n'est d'être franchi dans la taille des corpus linguistiques auquel la science informatique donne accès : une base de 5 195 769 livres a été constituée.

Ces livres, qui proviennent des bibliothèques de 40 universités, ont été numérisés par la société Google ; ils représentent quatre pour cent de la totalité des livres jamais publiés. Les ouvrages ont été sélectionnés parmi 12 millions de livres numérisés en prenant en compte la qualité de la numérisation et des informations générales, les « métadonnées » dont on dispose sur eux. Le corpus ainsi constitué comporte 500 milliards de mots. C'est énorme : en lisant un livre chaque jour pendant 50 ans, vous n'en aurez parcouru que 18 000, soit 0,36 pour cent du corpus constitué. Les textes mis bout à bout, à raison de dix syllabes par centimètre,

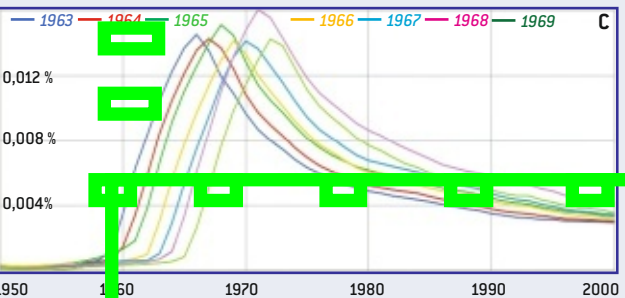
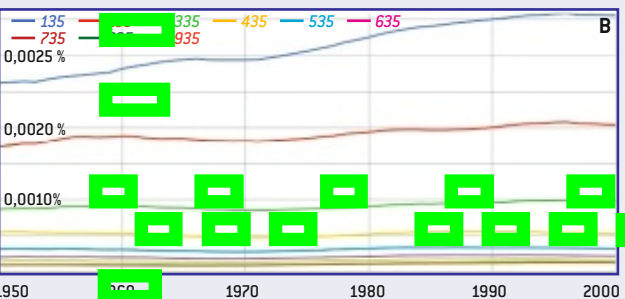


1 Des raffinements insoupçonnés de la loi de Benford

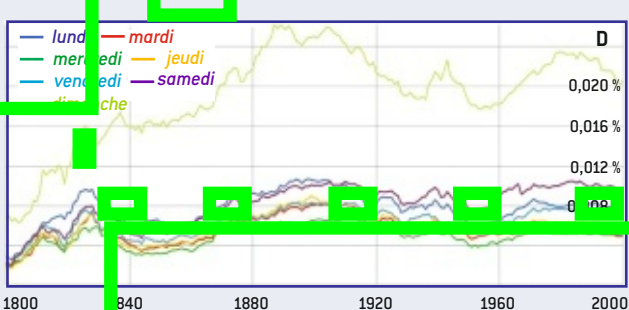
La loi de Benford est étonnante : si nous prenons des nombres au hasard dans une série en comportant beaucoup, comme les populations des villes, les longueurs des fleuves, les surfaces des pays, les cours de la Bourse, etc., les chiffres de 1 à 9 se répartissent de façon remarquable : les nombres commençant par le chiffre 2, eux-mêmes plus nombreux que ceux commençant par 3, etc. Plusieurs tentatives d'explication du phénomène ont été proposées, pas toujours convaincantes.



Une façon de tester cette loi est de comparer les fréquences d'usages des signes isolés 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, ce que permet le système des *n-grammes* (groupes de *n* signes) associé à la base de cinq millions de livres. La loi est bien vérifiée. La pente montante de toutes les courbes prouve que la loi de Benford n'est pas une simple coïncidence. Les techniques dans l'ensemble des livres publiés (A) plus finement peut-être, la loi de Benford implique que 235 doit être plus souvent utilisé que 23, lui-même plus utilisé que 2, etc. C'est vrai (B).

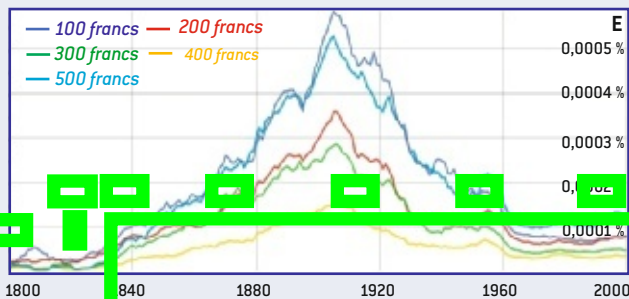


Bien sûr, des biais d'une autre nature se produisent par endroits, favorisant un nombre particulier pendant quelques années. Les nombres ronds sont favorisés : 15 est plus utilisé que 14 ou 16, et 150 est aussi plus utilisé que 140 ou 160. Sans surprise encore, quand nous nous approchons de 1965, le nombre 1965 est de

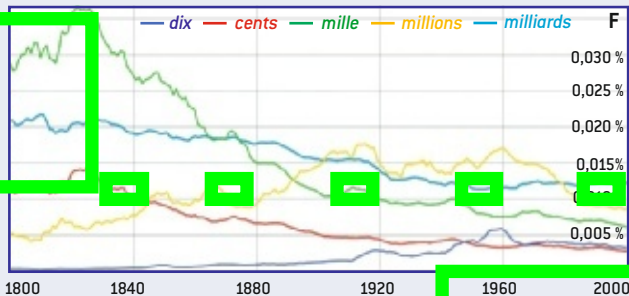


plus en plus cité. Du coup, c'est trois ou quatre ans après 1965 que 1965 atteint son pic d'utilisation. Ce décalage temporel n'est pas l'explication de tout ce qui se passe. En fait, la loi de Benford est vérifiée dans les années comprises entre 1963 et 1969 dans les livres en français (C), alors qu'un examen similaire montrerait que ce n'est pas le cas en anglais : les raffinements de la loi de Benford semblent sans limites.

Dans l'ordre d'idées proche, l'étude de la fréquence d'utilisation des nombres des jours de la semaine en français présente une structure imprévue, mais qui s'explique. On sait que le *lundi* est en deuxième position, mais il se fait dépasser par *samedi* aujourd'hui bien installé en second. Viennent alors *vendredi* et *jeudi*, puis



Autre mystère : est-ce parce que nous devenons plus riches, est-ce un effet de la mondialisation, ou est-ce simplement parce que nous avons pour expliquer que (dans la courbe entre *cent*, *cent mille*, *million*, *milliards*) *milliard* vient en 1980 de passer en tête devant *million* qui lui-même avait battu *mille* vers 1900 (F) ?



2. La popularité des scientifiques

L'évolution de la fréquence d'utilisation des noms des quatre mathématiciens Turing, Gödel, Cantor et Bourbaki entre 1950 et 2000 dans les livres écrits en anglais et dans les livres écrits en français montre que, dans le monde anglo-saxon, Cantor est de manière constante le préféré, suivi par Turing qui prend la deuxième place dès 1955. Dans les ouvrages écrits en français, il est bien plus instable et Turing dépasse Gödel à partir de 1984. Mais la renommée internationale, mesurée par la

est plus appréciée en français qu'en anglais. On remarquera aussi qu'en français, d'une façon générale, ces mathématiciens sont moins cités qu'en anglais : Turing par exemple atteint 0,00014 pour cent (14 occurrences pour 10 millions de mots) en anglais en 2000, tandis qu'il n'arrive qu'à la même date qu'à 0,00006 pour cent (6 occurrences pour 10 millions de mots) en français.

Bohannon a défini une unité de mesure de notoriété, le darwin (<http://www.sciencemag.org/site/feature/news/webfeat/gonzoscien-tist/episode14/index.xhtml>) et a classé les principales figures de la science. Voici, mesurés en milliardaires, les cinq premiers scientifiques : Bertrand Russell (1 500), Charles Darwin (1 000), Albert Einstein (878), Isaac Newton (478), et Galilée (429).

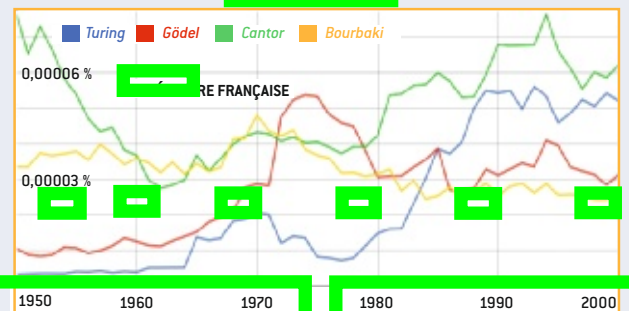
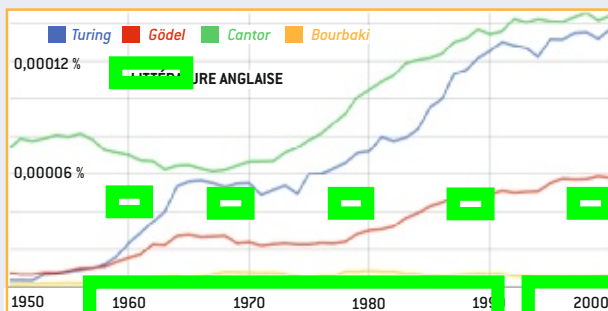
Planck (266), Francis Galton (255), Robert Oppenheimer (252), Louis Pasteur (237), et Haïm Weizmann (236). Pour les mathématiciens, le classement est du étrange par la présence de physiciens mathématiciens ou d'écrivains : Bertrand Russell (1 500), Lewis Carroll (479), Karl Pearson (346), et N. Whitehead (229), James Jeans (182), Norbert Wiener (162), et John von Neumann (142).

est bien plus instable et Turing dépasse Gödel à partir de 1984. Mais la renommée internationale, mesurée par la

Sur la base des fréquences d'utilisation de leurs noms dans le corpus de livres, les mathématiciens les plus cités sont John von Neumann (1 422), Alan Turing (1 500), Charles Darwin (1 000), Albert Einstein (878), et Galilée (429).

nard (429), Oliver Lodge (394), Julian Huxley (350), Karl Pearson (346), et Max Planck (266).

Poincaré (108), Ronald Ross (98), James Clerk Maxwell (92), Stephen Hawking (88), Simon Newcomb (82).



formeraient une ligne de cinq millions de kilomètres, plus de dix fois la distance de la Terre à la Lune !

Ce corpus contient 361 milliards de mots anglais, 45 milliards de mots français, 45 milliards de mots espagnols, 37 milliards de mots allemands, et quelques milliards de mots d'autres langues. Les plus vieux ouvrages pris en compte datent du XVI^e siècle. À partir de 1800, le corpus contient plus de 60 millions de mots par an, et à partir de 1900, il compte plus d'un milliard de mots par an.

Le projet de numérisation de Google inquiète les auteurs et encore plus les éditeurs qui craignent d'être dépossédés de leurs fonds. Toutefois, nul ne nie qu'un tel ensemble de livres présente un intérêt historique, linguistique, littéraire, social, scientifique et même philosophique..., pourvu qu'il soit consultable.

Jean-Baptiste Michel, de l'Université Harvard, et l'économiste Eytan Barabási ont proposé un nom, la *culturomique*

(en anglais *culturomics*) pour la nouvelle discipline née de l'étude de ce corpus.

La mise à disposition directe du corpus, accompagnée des informations spécifiques à chacun des livres qu'il inclut pour que chacun puisse y organiser les études statistiques qui l'intéressent, n'est hélas pas envisageable, du fait des règles et lois qui protègent la propriété intellectuelle. De plus, la taille informatique du corpus, environ quatre téraoctets (4×10^{12} octets), excède les capacités de stockage d'un ordinateur courant et encore plus les capacités des traitements qu'un utilisateur pourrait souhaiter mener.

L'accès n'est que partiel

Aussi pour permettre l'exploitation des cinq millions de livres, les chercheurs ont opéré par avance une multitude de calculs : à défaut de mettre la libre disposition tout le corpus, ils autorisent l'exploration de la fréquence des mots et groupes de mots, par langue et par année, ce qui est déjà d'un grand intérêt.

Pour chaque mot ou groupe de mots de moins de cinq mots apparaissant un minimum de fois, et pour chaque année entre 1800 et 2000, vous pouvez savoir quelle a été sa fréquence exacte d'utilisation dans le corpus. Vous pouvez même vous intéresser à plusieurs séquences de mots simultanément dont l'évolution de la fréquence d'utilisation est rendue comparable par l'affichage d'un graphique. Les courbes obtenues (des *n-grammes*) sont automatiquement engendrées par les programmes du site Internet du projet ([voir la bibliographie](#)).

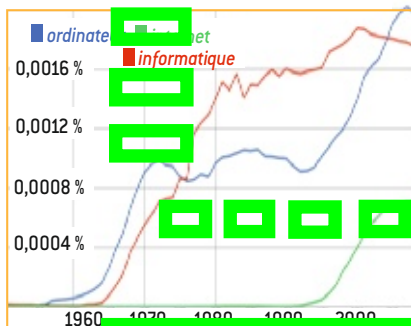
Tout internaute peut mener ses propres recherches. Essayez : dès que vous aurez commencé à produire quelques courbes, vous serez pris au jeu et de nouvelles questions vous viendront à l'esprit.

L'outil mis à la disposition de tous est donc un jouet linguistique que la suite de la rubrique va exploiter, mais c'est aussi un outil sérieux et plusieurs publications scientifiques ont déjà été réalisées en exploitant les *n-grammes* produits.

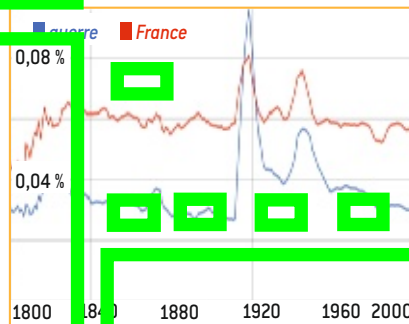
Le corpus ne prend pas en compte journaux, revues, tracts publicitaires et autres imprimés comme les notices, formulaires administratifs, affiches, etc. La date de publication retenue pour les livres du corpus est celle que donne l'éditeur et donc un livre peut apparaître plusieurs fois avec des dates différentes s'il a été réédité. Malgré le soin mis à l'élaboration du corpus, les erreurs de numérisation ne sont pas rares et introduisent des artefacts. Ainsi, le mot *internet* est utilisé avec une très faible fréquence même au XIX^e siècle. La raison est que l'abréviation d'usage courant *internat* pour *international* entraîne une erreur provenant de la confusion entre *a* et *e*. Le piège des homonymes doit aussi être pris en compte : un certain Chirac écrivait son code socialiste en 1886 !

Prévisible... et vrai

Bien des courbes obtenues ne font que confirmer des évidences que précise l'étude du mégatexte. Si, par exemple, on s'intéresse en français à l'usage des mots *ordinateur*, *informatique*, *internet* le long de la période 1960-2008, on obtient un graphe qui montre sans surprise que l'usage du mot *ordinateur* prend une importance mesurable à partir de 1960. À cette date, sa fréquence atteint 0,0001 pour cent, ce qui signifie que parmi tous les mots du corpus français pour l'année 1960, un mot sur un million environ est le mot *ordinateur*. Légèrement plus tard, vers 1964, le mot *informatique*, introduit en 1962 par Philippe Dreyfus, atteint un usage mesurable, puis dépasse le mot *ordinateur* en 1975. Le mot *internet* n'apparaît de manière significative vers 1995 pour atteindre 0,0004 pour cent en 2000.



L'étude de la fréquence d'usage en français des mots *guerre* et *France* donne elle aussi un résultat sans surprise. Les deux mots ont des pics d'utilisation simultanés pendant les périodes 1914-1920 et 1940-1948. Le graphique nous apprend cependant que *guerre* est presque toujours un mot moins utilisé que *France* sur la période de la Première Guerre mondiale. On montre une inversion : malgré le nationalisme exacerbé des deux belligérants, le mot *guerre* passe devant le mot *France* sans doute une conséquence des multiples difficultés matérielles de la guerre qui préoccupent les Français.

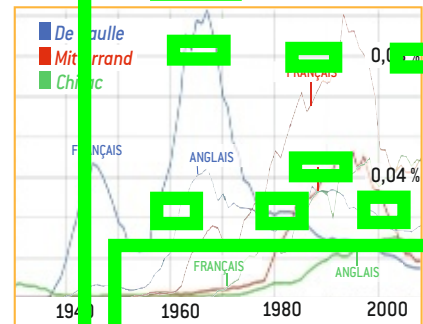


Le corpus des 500 milliards de mots est un outil idéal pour mesurer la notoriété des personnalités intellectuelles, politiques ou autres. On comprend pour la suivre année après année sur les deux derniers siècles.

Mesures de notoriété

Il est par exemple amusant de comparer l'évolution de la notoriété de *De Gaulle*, *Mitterrand* et *Chirac* entre 1930 et 2008 dans la partie anglaise du corpus et dans la partie française. On remarque que *De Gaulle* dans la partie anglaise n'est dépassé par *Mitterrand* qu'à partir de 1984, alors que dans la partie française, le croisement se produit dès 1975. Dans la partie anglaise, *De Gaulle* domine globalement. Dans la partie française, c'est *Mitterrand*. Quant à *Chirac*, il a de la peine, même élu président, à égaler les deux autres. Dans la partie française, alors qu'il est président de la République depuis 1995, il ne dépasse *De Gaulle* qu'en 1998, et *Mitterrand* qu'en 2004 !

L'encadré 2 examine la notoriété des scientifiques et montre que, selon les



pays, les gagnants ne sont pas les mêmes. Avec le corpus géant des cinq millions de livres, John Bohannon, dans un article de la revue *Science* de janvier 2011, a concocté un panthéon objectif des scientifiques. Contrairement aux études fondées sur les indicateurs de citations qui ne prennent en compte que les publications « strictement scientifiques » et publiées dans des revues spécialisées, ce panthéon mesure l'impact sur la société des célébrités de la science. Les cinq hommes de science qui arrivent en tête sont : Bertrand Russell, Charles Darwin, Albert Einstein, Lewis Carroll, Claude Bernard. Bertrand Russell, le premier, est souvent mentionné à propos de ses prises de position politique sans qu'elles aient nécessairement un lien avec la science. On peut donc considérer que le gagnant est plutôt Charles Darwin. Son nom apparaît 148 429 fois dans les livres de la base publiés entre 1930 et 2000, livres qui sont 69 048 à le mentionner au moins une fois.

L'unité de mesure introduite pour réaliser les classements est le millidarwin, le millième du darwin. Un darwin est la fréquence annuelle moyenne de mentions que Charles Darwin obtient entre l'année où il a atteint 30 ans et l'année 2000. Un scientifique qui atteint un millième de cette fréquence moyenne entre l'année de ses 30 ans et l'année 2000 se voit donc attribué une notoriété de un millidarwin. Toutes sortes de difficultés méthodologiques se présentent pour calculer cette note de célébrité. Par exemple, le mathématicien collectif Bouphaki n'est pas classé, car il est le plus souvent mentionné sans son prénom et, que sans son prénom, il est alors confondu avec le géomètre Bouphak. La notoriété a été forte durant la seconde

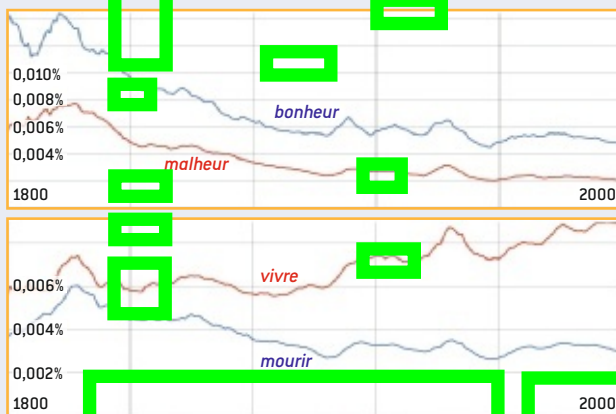
Le biais de positivité

La préférence pour le terme positif d'un couple de mots opposés est remarquable et étonnante par sa stabilité et sa régularité. Les courbes montrent ainsi ce biais pour les couples *positif/négatif*, *vivre/mourir*, *content/mécontent*, *beau/laid*, *bon/mal*, *mieux/pire*, *plus/moins*, *bien/mal*, *bonheur/malheur*, *succès/échec*, *réussir/échouer* et *bon/mauvais*.

Les fréquences d'utilisation des mots *bonheur* et *malheur* diminuent légèrement au cours des ans, mais *bonheur* domine de manière constante. Le mot *vivre* bat de plus en plus nettement *mourir*, trace sans doute du fait souvent noté de la diminution de la mortalité. *En recul* est moins en moins l'idée de la mort et donc l'évoquent aussi de moins en moins.

Le biais de positivité semble dans bien des cas de plus en plus fort : pendant le XIX^e siècle, le mot *pauvre* domine sur le mot *riche*, mais depuis 1920, il a été doublé. À chacun de formuler ses explications en évoquant le changement de société, le développement de la religion, ou d'autres facteurs encore.

Contrairement au biais de positivité attendu, l'expression *en progrès* domine largement sur *en recul*. Cependant, sa fréquence perd proportionnellement entre 1914 et 1920 (un effet dépressif de la guerre) et surtout perd nettement depuis 1990, *en recul* est passé en tête. Notre époque aurait-elle perdu confiance en elle ?



moitié du XIX^e siècle : il faudrait trier à la main chaque mention, tâche impossible étant donné la taille du corpus.

Une des conclusions de ce classement de notoriété est que les mathématiques, seules, ne sont pas un moyen recommandé pour gagner une bonne place dans le panthéon scientifique. Parmi les mathématiciens, on notera *John von Neumann* (mathématicien, mais aussi physicien) qui obtient 137 millidawns, *Henri Poincaré* 108, *Kurt Gödel* 40, *Felix Klein* 39, *Georg Cantor* 29, *Benoît Mandelbrot* 19, *Émile Borel* 12, *René Thom* 10. Le plus prolifique de tous les mathématiciens, *Paul Erdős*, ne s'étant occupé que de mathématiques au plus haut niveau sans penser à un public plus large, obtient un score de quatre millidawns seulement.

Ce contraste entre réussite scientifique et notoriété mesurée par le grand corpus est très net pour les lauréats du prix Nobel dont certains ne dépassent pas un millidawns. Dans le monde de la littérature, il est même par

millidawns. L. Robappon conseille de participer à de nombreuses controverses et d'écrire des livres visant des audiences aussi larges que possible.

Préférence pour les termes positifs

Le *bias de positivité* identifié en psychologie est mis en évidence avec une étonnante régularité (voir l'encadré ci-dessus). Ce biais est la tendance qu'ont les sujets humains à préférer le terme positif entre les deux termes opposés d'un couple d'expressions. On le met classiquement en évidence en demandant à un ensemble de sujets de choisir très rapidement au hasard *oui/non*, *amour/haine*, *mort/vie*, etc. Non seulement une préférence claire pour le terme positif se manifeste systématiquement, mais, de plus, Nicolas Gauvrit a établi que, chez les personnes déprimées, ce biais était atténué et constituait donc une mesure de la gravité d'une dépression.

Parmi les exceptions à cette règle figure le couple *oui/non*, mais cette exception ne signifie sans doute rien puisque l'usage du mot *non* dans l'expression de la négation (« c'est un non-dit », « ceci est non significatif », « c'est un non-sens » etc.) ne vient pas en négation du mot *oui* pour les cas positifs (« c'est dit », « ceci est significatif », « cela est sensé »).

L'exception du couple *guerre/paix* (*guerre* domine *paix*) est notable. Sans surprise, l'utilisation du mot *guerre* triple dans la période 1914-1920. Le mot *paix*, lui, augmente seulement un peu durant cette période tout en restant en second derrière *guerre*. L'explication est sans doute que la *paix* est l'état « normal » qu'on ne nomme pas quand on en bénéficie, contrairement à la guerre qu'on subit et dont on parle.

Plus récemment, l'usage des séries ordonnées de mots montre de curieuses régularités souvent insoupçonnées et d'une remarquable stabilité dans le temps.

Logique & calcul 87

ART & SCIENCE

Le cerveau caché de Michel-Ange

Dans deux panneaux du plafond de la chapelle Sixtine, la Création d'Adam et la Séparation de la lumière et des ténèbres, Michel-Ange aurait dissimulé des planches anatomiques du système nerveux.

Loïc MANGIN

En 1505, Michel-Ange (1475-1564) quitte Florence et rejoint Rome à la demande du nouveau pape Jules II (1443-1513). Ce dernier confie au sculpteur le soin de lui concevoir un tombeau monumental dans la basilique Saint-Pierre : le mausolée ne sera jamais achevé... Après un exil de quelques mois à Bologne, Michel-Ange s'attelle à un autre projet, le plafond de la chapelle Sixtine qu'il peint entre 1508 et 1512. Le projet fut proposé à l'artiste à l'instigation de l'architecte Bramante qui était persuadé de l'échec de son rival. Mal lui en prit, le plafond est un des plus célèbres chefs-d'œuvre de la Renaissance italienne !

Le plafond, de 40 mètres de longueur et 14 de largeur, est situé à 20 mètres de hauteur. Il est constitué de différentes surfaces en demi-lunes, en triangles, en rectangles... où Michel-Ange devait, selon son contrat, représenter les 12 apôtres. L'artiste vit plus grand et proposa d'y peindre des épisodes de la Genèse (voir la figure a), de la Séparation de la lumière et des ténèbres jusqu'à l'ivresse de Noé en passant par la Création d'Adam. Les murs latéraux étaient déjà ornés de fresques du Pérugin, Botticelli et d'autres ont raconté les vies du Christ et de Moïse.

Intéressons-nous à la Séparation. Les historiens ont longtemps été intrigués par les irrégularités du cou de Dieu dans ce panneau (voir les figures b et c) et par le traitement de la lumière dans cette région du corps. Le personnage divin est représenté en diagonale, du bas à gauche vers le haut à droite, mais le

cou semble illuminé par une lumière venant de la droite. Est-ce une erreur ? Ian Suk et Rafael Tamargo, experts en neuroanatomie à l'École de médecine de l'Université Johns Hopkins, à Baltimore, y voient plutôt le signe d'un message caché...

D'accord, ils ont vérifié qu'aucun autre cou peint par Michel-Ange n'est aussi étrange et « grumelleux ». Ensuite, ils ont montré que les détails du cou se superposent à l'anatomie d'un cerveau humain vu de dessous (voir la figure d). De fait, la correspondance est étonnante.

Les détails du cou de Dieu se superposent à l'anatomie d'un cerveau humain.

Les deux neurologues vont plus loin et discernent la moelle épinière dans les replis du drapé qui traversent le torse (voir la figure e). De plus, au niveau de l'abdomen, un pli semble se prolonger par deux protubérances sphériques situées sous le thorax (voir la figure f) : ce schéma coïncide précisément avec un dessin du pericrânium et des yeux, effectué par Léonard de Vinci en 1488. Ces deux artistes sont contemporains et s'apprécient mutuellement.

En 1970, Frank Meshberger avait déjà remarqué que, dans la Création d'Adam, le rideau entourant les anges et Dieu reproduit une coupe transversale de cerveau humain

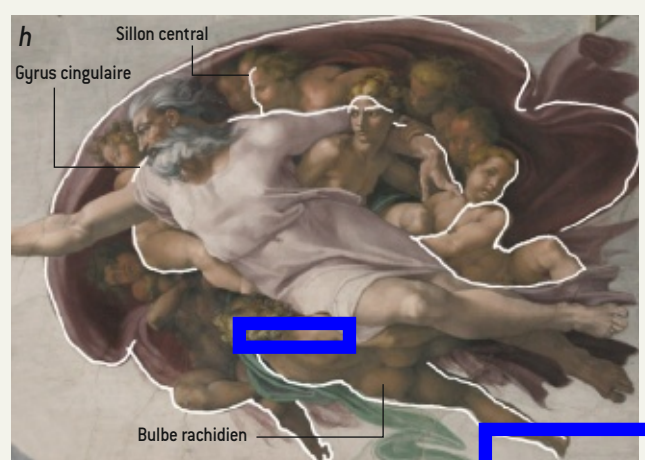
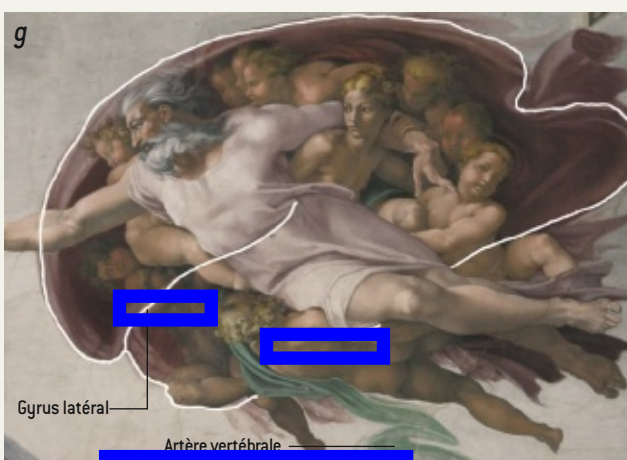
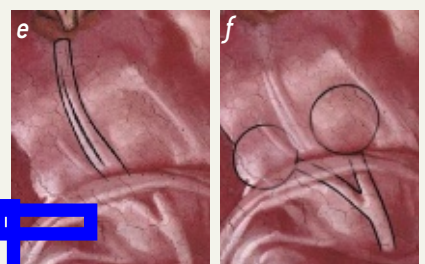
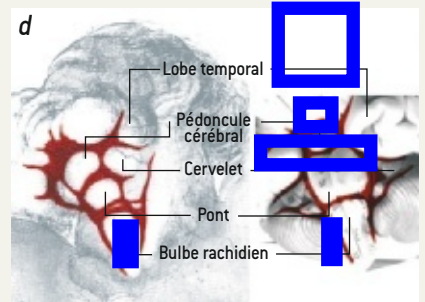
(voir les figures g et h). Précisons que d'autres y voient un rein, un organe qui fit beaucoup souffrir Michel-Ange...

De même que nous voyons un visage dans le moindre nuage, ces ressemblances trahissent peut-être la trop grande habitude qu'ont les deux Américains des planches neuroanatomiques. Pourtant, Michel-Ange disposait des connaissances requises pour « cacher » un cerveau. En 1493, il offre au prêtre de la basilique Santa Maria del Santo Spirito, à Florence, un crucifix en bois peint. En échange, les autorités ecclésiastiques l'autorisent à examiner, et à disséquer, le corps de défunts en provenance de l'hôpital du couvent. Plus tard, il illustrera un traité d'anatomie de son ami, le chirurgien Realdo Colombo.

Si la ressemblance n'est pas fortuite, que signifie cette planche anatomique cachée dans la Séparation ? Selon I. Suk et R. Tamargo, Michel-Ange aurait cherché à rehausser le sens de ce panneau. Le neurologue américain Douglas Fields s'interroge : n'y aurait-il pas là une illustration de la lutte entre la religion et la science ? Ou bien Michel-Ange pensait-il que l'intelligence – et l'organe qui en est le support, comme Hippocrate le pensait déjà – suffit au croyant pour communiquer avec Dieu, rendant l'Église inutile ? On comprendrait alors pourquoi il dissimulerait la planche anatomique !

I. Suk et R. Tamargo, *Concealed neuroanatomy in Michelangelo's Separation of light from darkness in the Sistine Chapel*, *Neurosurgery*, vol. 66 (suppl. 3), pp. 601-602, 2010.

Regards



IDÉES DE PHYSIQUE

Les jetpacks ou l'homme-fusée

S'élève dans l'air comme une fusée, grâce à un petit équipement individuel ? Cette prouesse devient possible : divers dispositifs sont en cours de développement.

Jean-Michel COURTY et Edouard KIERLIK

Déuni des pouvoirs de Superman, le héros de bandes dessinées Rocketeer utilise un réacteur placé dans son dos pour voler. Ce type de propulsion individuelle existe en réalité depuis plus de 50 ans ! Mais la puissance nécessaire interdisait une autonomie supérieure à la minute. Aujourd'hui, de nouveaux dispositifs permettent de voler durant plus d'une demi-heure. Sur quels principes physiques ces « jetpacks » sont-ils fondés, et quelles sont leurs limitations actuelles ?

Tous les jetpacks utilisent le principe de la propulsion à réaction, qui est fondé sur la loi de conservation de la quantité de

mouvement (produit de la masse par la vitesse). Lorsqu'un moteur expulse vers l'arrière un jet de fluide, il apparaît par réaction une force de poussée dont l'intensité est égale à la quantité de mouvement du fluide éjectée par unité de temps.

Poussée par réaction

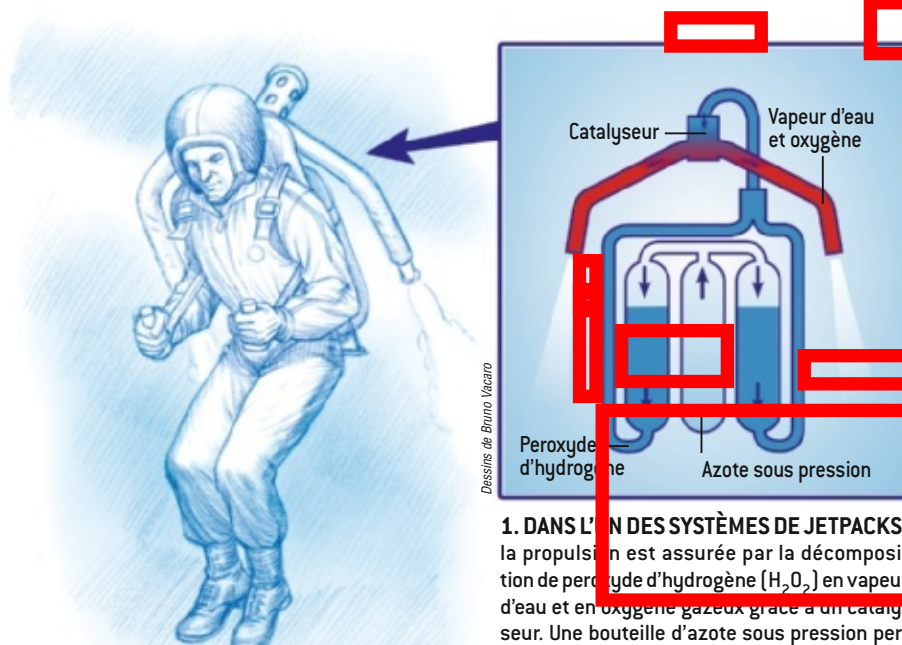
Voici des estimations avec des chiffres ronds. La force nécessaire à la sustentation d'une personne de 100 kilogrammes (équipement compris) est de 1 000 newtons. Par conséquent, si la vitesse d'expulsion du fluide est de 1 000 mètres par seconde, il faut éjecter un kilogramme de matière par seconde,

soit l'équivalent d'un mètre cube d'air à pression atmosphérique. Avec une seule tuyère, la section de cette dernière doit donc être de dix centimètres carrés. L'énergie cinétique du gaz éjecté par seconde, qui est au rendement près la puissance requise du moteur, est de un demi-mégawatt, soit 700 chevaux.

Cette puissance semble hors de portée pour un dispositif compact. Et pourtant, ces chiffres sont à peu de choses près les caractéristiques du premier modèle de jetpack, la *Bell Rocketbelt* développée dans les années 1960. La puissance nécessaire était obtenue grâce à une réaction chimique : la décomposition de peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) à l'aide d'un catalyseur tel que l'argent. En moins d'un dixième de seconde, le liquide se décompose en eau et oxygène selon la réaction $2H_2O_2 \rightarrow 2H_2O + O_2$. On obtient un gaz (mélange de vapeur d'eau et d'oxygène) à près de 750 °C et à la pression de 20 atmosphères.

L'avantage de ce procédé est qu'il est beaucoup moins dangereux et plus facile à mettre au point qu'un réacteur ordinaire à combustion, dont la température est bien plus élevée. En revanche, toute la matière éjectée doit être emportée dans le réservoir. En utilisant les estimations faites au paragraphe précédent, cela signifie qu'une quarantaine de kilogrammes de peroxyde d'hydrogène assurent une quarantaine de secondes d'autonomie.

En pratique, l'homme volant portait sur son dos deux bouteilles pleines de peroxyde d'hydrogène (sur à 90 pour cent) ainsi qu'une troisième bouteille pleine d'azote sous pression dont le rôle était de pousser à un débit suffisant le peroxyde



1. DANS L'UN DES SYSTÈMES DE JETPACKS, la propulsion est assurée par la décomposition de peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) en vapeur d'eau et en oxygène gazeux grâce à un catalyseur. Une bouteille d'azote sous pression permet de pousser le peroxyde vers le catalyseur et d'obtenir ainsi un débit suffisant.

d'hydrogène vers le catalyseur. Après la zone de décomposition, deux tuyères dirigées vers le bas et orientables permettaient au courageux pilote de contrôler son vol.

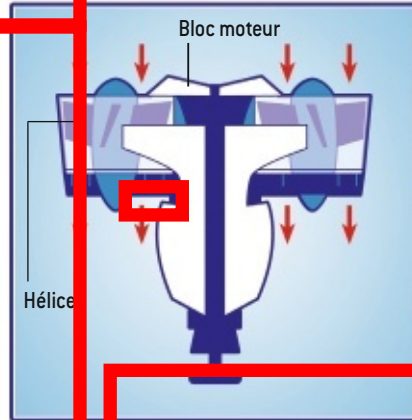
La quantité de peroxyde d'hydrogène que l'on peut embarquer étant limitée, les performances demeurent modestes : un vol de 20 secondes, à un peu plus de 55 kilomètres par heure et à une altitude maximum de 18 mètres. Toutefois, le caractère spectaculaire du vol a justifié une démonstration aux jeux Olympiques de Los Angeles en 1984.

Aujourd'hui, l'entreprise *Thunderbolt Aerosystems* assure la pérennité et la commercialisation de tels dispositifs. Son modèle TR262D est conçu pour emporter quelques kilogrammes de kérosène et le brûler en même temps que se décompose le peroxyde : cette combustion augmente la vitesse d'éjection des gaz, ce qui permet de réduire le débit et d'améliorer l'autonomie. Le constructeur californien annonce une autonomie de 75 secondes pour un parcours de plus de 1 000 mètres, à une vitesse de pointe de 120 kilomètres par heure. Notons qu'il existait un dispositif français, le *Ludion SA-610*, qui a volé au salon du Bourget en 1967 avec un propulseur différent, l'isopropyl-nitrate.

Gagner en autonomie

Que faire pour améliorer les performances des jetpacks ? Les facteurs limitants sont d'une part la masse importante de fluide à éjecter, d'autre part la puissance requise pour cette éjection. La matière qui sert à la propulsion était initialement embarquée dans des réservoirs portés par l'homme volant. Si l'on veut une quantité plus importante, il est nécessaire d'utiliser l'air ambiant. Cela signifie-t-il le retour au réacteur ?

C'est ce que pense le Suisse Yves Rossy, surnommé « Jetman » depuis qu'il vole avec des ailes de 2,40 mètres en fibre de carbone, fixées sur son dos et propulsées par quatre petits réacteurs à kérosène. En mai 2011, il a réalisé un vol spectaculaire de huit minutes à 300 kilomètres par heure au-dessus du Grand Canyon du Colorado. Le choix d'ailes aérodynamiques lui permet sans doute de bénéficier d'un



effet de portance, qui améliore la sustentation. Néanmoins, le départ du vol s'est fait à partir d'un hélicoptère à haute altitude, et l'arrêt par le déclenchement de parachute au décollage et atterrissage sont fort délicats avec un engin qui se contrôle uniquement avec les mouvements du torse, de la tête et des bras !

Pour explorer d'autres pistes, revenons à la physique de la propulsion à réaction : la poussée est le produit du débit massique par la vitesse du gaz éjecté, tandis que la puissance requise est le produit du débit massique par le carré de cette vitesse. Si l'on multiplie le débit massique par 10, on obtient la même poussée en divisant par 10 la vitesse d'éjection et la puissance. Comme le débit est plus important et la vitesse plus faible, cela signifie que la section de la tuyère d'éjection sera plus grande dans notre cas d'un facteur 100. Le diamètre correspondant sera donc dix fois plus grand, soit une trentaine de centimètres au lieu des deux ou trois centimètres du premier jetpack.

C'est cette solution qui a été retenue pour la conception du récent *Martin Jetpack*. L'homme volant porte sur le dos deux hélices carénées qui expulsent de l'air vers le bas. Le moteur du dispositif fonctionne à l'essence et déploie une puissance de 150 kilowatts. Il soulève une charge utile de 130 kilogrammes avec une autonomie de 30 minutes, ce qui lui permet de parcourir 50 kilomètres à 100 kilomètres par heure. Présenté au public en 2008, le *Martin Jetpack* a effectué en mai 2011 à Canterbury

2. LE MARTIN JETPACK met en œuvre deux hélices carénées mues par un moteur à essence et qui expulsent de l'air vers le bas.

LES AUTEURS



Jean-Michel COURTAY et Édouard MERIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Leur blog : <http://blog.idphys.fr>

✓ SUR LE WEB

<http://www.thunderbolt-aerosystems.com/>

<http://www.thunderman.net/>

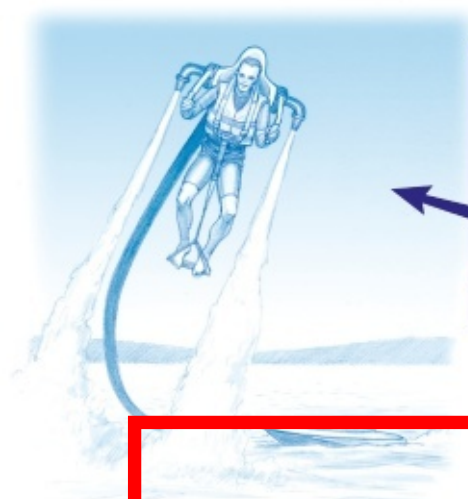
<http://martinjetpack.com/>

<http://www.jetlev-flyer.com/>

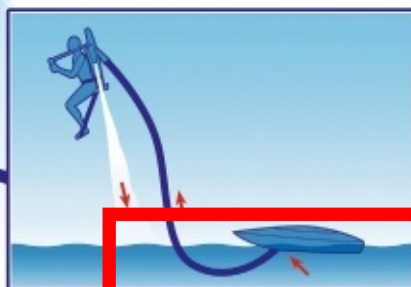
✓ BIBLIOGRAPHIE

K. Michaelson, *Rocketman : My Rocket-Propelled and High-Octane Operations*, Motorbooks, 2007.

Retrouvez les articles de M. COURTAY et E. MERIK sur www.pourlascience.fr



3. DANS LE DISPOSITIF **JETLEV-FLYER**, de l'eau est aspirée via un tuyau assez gros et expulsée par deux tuyères. La pompe et son carburant sont dans le bateau auxiliaire, ce qui évite de soulever une lourde charge.



(Nouvelle Zélande) un vol automatique jusqu'à une altitude de 1 500 mètres avec une vitesse ascensionnelle de quatre mètres par seconde. Mais comme en témoignent les vidéos, l'engin a un peu perdu son caractère portatif : plus de 120 kilogrammes à vide et un encombrement de 1,5 mètre

dans les trois directions de l'espace...

Une autre approche est de changer de fluide. Pourquoi ne pas remplacer l'air par

de l'eau ? Le liquide ayant une masse volumique 1 000 fois supérieure, une vitesse d'éjection 30 fois plus faible suffira avec des tuyères de mêmes dimensions (le débit massique à section donnée est proportionnel à la vitesse d'éjection). À géométrie comparable, la puissance nécessaire est alors 30 fois plus faible.

C'est la solution retenue pour le *Jetlev-Flyer*, qui permet de voler jusqu'à huit mètres au-dessus d'un plan d'eau. Le harnais de l'utilisateur est juste équipé de deux tuyères orientées vers le bas et relié, grâce à un tuyau flexible d'une dizaine de mètres de long, à un vaisseau indépendant qui transporte la pompe et son carburant (ce bateau est miraculeusement absent de toutes les vidéos...)

Pour un peu moins de 100 000 euros, voilà de quoi parader le long des berges de Paris cet été !

59^e CONGRES NATIONAL
PHYSIQUE CHIMIE

SCIENCES &
INNOVATIONS
TECHNOLOGIQUES

MONTPELLIER 2011

du 23 au 26 OCTOBRE

MONTPELLIER

*Congrès des Professeurs de
Physique Chimie*

Renseignements et Inscriptions
<http://montpellier2011.udppc.asso.fr>

*Tout un programme vous attend en
Languedoc Roussillon : conférences,
visites, ateliers, rencontres entre collègues,
découverte de la région et de ses produits*

PC

Union des professeurs
de physique et de chimie

SCIENCE & GASTRONOMIE

Améliorer le pistou

Le goût et la longueur en bouche de la préparation dépendent de sa microstructure. On peut enrichir celle-ci en réconciliant tradition et modernité.

Hervé THIS

Alors que l'on envoie des sondes vers les confins du Système solaire et que l'on construit des nanomoteurs, certains cuisiniers préconisent d'utiliser des outils anciens : la bassine en cuivre pour les confitures, le feu de bois, le pilon et le mortier... Souvent, c'est un attachement à des objets familiers qui les retient de passer à des techniques actuelles, mais parfois aussi, les techniques modernes ne donnent pas les mêmes résultats que les techniques traditionnelles.

Par exemple, c'est un fait que le cuivre (toxique quand il est à doses notables) des bassines permet de ponter les molécules de pectines qui, extraites des fruits, font prendre les confitures, de sorte que ces dernières sont plus fermes. Par exemple, c'est un fait que des cuillers en bois font des sauces mayonnaises de consistance et de goût différents de celles qui sont obtenues, à partir des mêmes ingrédients, à l'aide d'un fouet ou d'un mixeur. En effet, la cuiller en bois écrase les gouttelettes d'huile contre le bord du récipient, ce qui produit une émulsion de microstructure particulière. Comme le goût résulte des solutés de la phase aqueuse de l'émulsion, pour la saveur, ainsi que des composés hydrophobes plutôt présents dans les gouttelettes d'huile, pour l'odeur, des microstructures différentes engendrent des goûts différents.

Il y a donc lieu de s'interroger chaque fois que la tradition est opposée à la modernité : faut-il mettre au musée les « bonnes vieilles méthodes d'autan » ou, au contraire,

les conserver, en comprenant leurs vertus, afin, éventuellement, de les perfectionner ?

La question a été récemment posée à propos de la confection du pistou (certains disent « sauce au basilic frais », ou « sauce au pistou »), et les tests expérimentaux montrent que la réconciliation éclairée de la tradition et de la modernité mérite d'être conservée comme une méthode générale.

Nous sommes partis de la préconisation d'un cuisinier étoilé, selon lequel le pistou doit toujours se faire au mortier et au pilon. La recette est simple : il suffit de piler de l'ail, des pignons de pin, du basilic, de l'huile d'olive, éventuellement avec des tomates ou du sel, du poivre et du parmesan, jusqu'à obtention d'une pâte... qui accompagne merveilleusement des pâtes, par exemple. La « précision culinaire » donnée était que le résultat est bien « meilleur » quand la préparation est faite au mortier et au pilon que quand elle est faite au mixeur électrique. Passéisme ?

L'expérience valant tous les raisonnements, nous avons comparé les pistous obtenus à partir des mêmes ingrédients, dans les mêmes proportions, préparés des deux manières. Il n'est point besoin d'avoir l'œil particulièrement aiguisé, ni le palais particulièrement averti, pour constater la différence : la préparation au mortier est d'un vert terne, brun, et elle est d'une consistance un peu granuleuse, avec beaucoup de longueur en bouche pour le goût du pistou, le tout sous-entendant la nécessité de mastiquer permet de mieux percevoir les composés sapides et odorants, conformément à des mesures dont il a déjà été fait



état dans cette rubrique et qui montrent que la sensation est augmentée par l'allongement de la mastication. Travaillée au mixeur, la préparation est d'un vert très frais, printanier ; elle est bien lisse, et, en bouche, a une « attaque » puissante, mais moins de longueur en bouche.

Que choisir ? Puisque l'on nous propose pile ou face, choisissons évidemment la tranche qui nous convient le mieux... que l'on obtienne en mêlant les deux préparations, de sorte que le vert printanier du pistou fait au mixeur impose sa couleur et une belle attaque tandis que le pistou fait au mortier donnera de la longueur en bouche !

Une telle procédure mérite d'être généralisée chaque fois que nous ciselons du persil, du céchalote, du basilic, du cerfeuil, de la verveine, de la sauge, de la coriandre fraîche, etc., ne nous contentons pas d'utiliser un couteau pour obtenir des fragments aussi petits que possible. Utilisons aussi un mixeur pour bien ouvrir toutes les cellules des fragments de tissus végétaux, ce qui libérera les composés odorants et sapides contenus dans ces cellules. Ne souons pas l'ardeur de nos efforts : c'est le goût des préparations culinaires qui est en jeu !



Hervé This est chimiste dans le Groupe INRA de gastronomie moléculaire, professeur à AgroParisTech et directeur scientifique de la Fondation Sciences & Culture Nîmègue (Académie des sciences).



Retrouvez les articles de Hervé This sur www.purlascience.fr

→ AÉRONAUTIQUE

Solar Impulse HB-SIA

Jacques Herlihy et Bertrand Piccard

Favre, 2014
[174 pages, 28 euros].

Solar Impulse HB-SIA, tel est le nom d'un avion pas comme les autres voulu par Bertrand Piccard et issu de sa collaboration avec un passionné d'aéronautique, André Borschberg. Sa réalisation a été le fruit du travail d'une équipe de près de 100 personnes. Ce projet a aussi reçu le soutien de nombreux industriels sensibilisés par l'enjeu. L'idée : développer un projet symbole de nouvelles technologies pour économiser les ressources naturelles. L'objectif : faire voler un avion pendant plus de 24 heures sans consommer d'énergie autre que celle provenant du Soleil.

Essentiellement composé de magnifiques photos, cet ouvrage nous raconte les différentes étapes du projet, lancé fin 2003 et concrétisé par un vol le 7 juillet 2010. Pendant la journée, les cellules solaires de l'avion ont chargé les batteries et fait tourner les moteurs. Au soir et à mesure du vol, les réserves d'énergie augmentaient. À l'aube du matin suivant, après un vol de plus de 26 heures, il restait encore plus de 4 heures d'autonomie.

Dans la continuité de ses exploits personnels, de ceux de son père Jacques et de son grand-père

Auguste, Bertrand Piccard nous invite à une nouvelle aventure, une exploration scientifique coréalisée, cette fois, de la cause environnementale, en souhaitant que ce travail pionnier soit le symbole d'une révolution des esprits.

Techniquement, le pari n'était pas gagné d'avance. Les caractéristiques de construction et d'aérodynamisme imaginées pour l'occasion, jamais osées jusqu'ici, ont ouvert un domaine de vol encore inexploré. Le résultat est un avion de 63 mètres d'envergure, donc aussi large qu'un Airbus A340, mais ne pesant que 1 600 kilogrammes. Sans carburant, l'engin est équipé de plus de 11 000 cellules photovoltaïques alimentant quatre moteurs à hélice de 10 chevaux chacun et de 3,5 mètres de diamètre. Le poids des batteries représente un quart du poids total de l'appareil. Les technologies les plus en pointe ont été mises en œuvre pour la réalisation de l'avion. Bien sûr, Solar Impulse n'a pas été construit pour transporter des passagers, mais pour véhiculer des messages.

Les difficultés n'étaient pas que d'ordre technique. Il a fallu trouver des financements, motiver les partenaires, constituer une équipe de spécialistes dans des domaines très variés. Pionnier mais pas naïf, Bertrand Piccard a su apporter toute sa volonté et son opiniâtreté pour y parvenir.

Les protagonistes ont sans doute dépensé plus d'énergie pour mettre en place le projet et le faire aboutir que l'avion n'en a consommé pour voler jour et nuit pendant plus de 24 heures. À travers cet ouvrage, nous partageons les grands moments de l'aventure, une aventure humaine et technique soustraite par une ambition au service d'une cause. Une suite nous est promise avec un avion amélioré, capable de faire

un tour du monde en cinq étapes de cinq jours chacune.

→ Jean Cousteix

→ HISTOIRE DE LA BIOLOGIE

Mourir pour un crapaud...

Catherine Bousquet

Le Pommier, 2014
[132 pages, 13 euros].

Le docteur Paul Kammerer, étudiant amarré au XIX^e siècle, il devint célèbre en prétendant avoir réalisé une série d'expériences sur des crapauds qui, selon lui, prouvaient l'hérédité des caractères acquis. C'était une hérésie à l'égard de la génétique de Mendel alors en plein développement. La controverse atteignit son point d'orgue en 1926 quand il fut accusé de fraude. Six semaines après la publication de l'accusation dans la prestigieuse revue *Nature*, Kammerer se suicida ; du moins, c'est la version officielle de son décès. Cette histoire dramatique, qui connut un fort retentissement, a souvent servi à illustrer la fraude scientifique ; mais ce n'était pas l'absurdité d'un y aurait-il à s'accrocher contre vents et marées à une théorie prétendument caduque.

Catherine Bousquet revient sur cette histoire dont certains épisodes restent encore mystérieux. Elle utilise la forme romanesque, probablement pour toucher un plus grand nombre de lecteurs, mais, sur le fond, sa prose colle aux données historiques. Surtout, à travers un récit bien mené, elle offre une belle leçon d'épistémologie. Que faut-il en effet retenir de cette histoire de crapauds ?

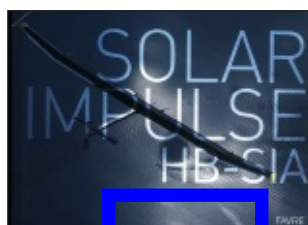
D'abord, Kammerer n'a vraisemblablement pas été l'auteur de la fraude. L'accusation, précipitée,



fut donc malheureuse. Ensuite, il est possible que ce virtuose de l'élevage de batraciens ait vraiment réussi à obtenir des crapauds dont certains traits étaient induits par des modifications de l'environnement dans lequel vivaient leurs géniteurs. On s'est en effet rendu compte depuis lors que l'hérédité est bien plus complexe que ne l'avanceraient à l'époque les tenants de la génétique de Mendel. Des facteurs environnementaux pourraient ainsi avoir influencé l'expression de certains gènes des crapauds, ce qui aurait pu donner l'impression d'une transmission de caractères acquis. Si Kammerer a commis une erreur, ce serait donc dans l'interprétation de ses résultats. Mais ses adversaires auraient également eu tort de dénigrer des expériences annonciatrices de futures découvertes concernant l'épigénétique, c'est-à-dire l'influence de l'environnement sur l'expression des gènes.

En somme, l'erreur des uns et des autres fut de prendre une position tranchée dans ce débat et de ne pas réfléchir au-delà de leur théorie de prédilection. Nous sommes gré à ce livre de nous rappeler les méfaits de cette attitude...

→ Thomas Lepeltier
Université d'Oxford



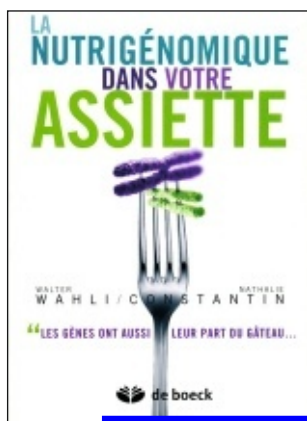
→ NUTRITION

La nutriginomique dans votre assiette

Walter Wahli et Nathalie Constantin

De Boeck, 2011
(228 pages, 32 euros).

Le message de Walter Wahli et de Nathalie Constantin est d'avoir su rendre intelligible, vivant et passionnant un sujet aussi complexe que la génétique appliquée à la nutrition. Nos modèles alimentaires sont au cœur des grands enjeux de santé publique. Ils conditionnent nombre de choix économiques, sociaux et éthiques et alimentent le débat scientifique. Nouvelle science issue des progrès de la génétique, la nutriginomique, qui étudie la façon dont les gènes et les nutriments interagissent, révolutionne le domaine de la nutrition en offrant une approche systémique qui ouvre d'immenses perspectives. Au confluent des sciences humaines et sociales, de la médecine, de la biochimie, de la génétique et de la biologie moléculaire, elle permet d'identifier les facteurs génétiques individuels prédisposant à certaines pathologies et de caractériser des prédispositions ou des compétitions entre nutriments et gène. L'enjeu est d'importance : percer les mécanismes d'exposition



ou de protection vis-à-vis des facteurs de risques, mieux comprendre le rôle de l'épigénétique impliquée dans la transmission transgénérationnelle et à terme, organiser à un stade pré-symptomatique la prévention individualisée et collective de maladies telles que l'obésité, le diabète ou le cancer.

Par un des acquis de la génétique, ce ouvrage nous conduit progressivement et de façon très pédagogique dans les champs complexes de la génomique (le séquençage de l'ADN), la transcriptomique (mesure du niveau de production de l'ARN messager), la protéomique (caractérisation de l'ensemble des protéines produites sous la dépendance d'un gène) et la métabolomique (analyse de la réponse métabolique à l'activation de cette cascade de phénomènes).

Le rôle des nutriments et des phytoéléments est bien analysé. Un chapitre entier est consacré aux perspectives d'avenir en matière de santé : gènes candidats, déterminants des variations individuelles, nouveaux marqueurs de facteurs de risque et pharmacogénomique. La réflexion sur les implications sociales et la bioéthique est largement abordée : peut-on généraliser les tests génétiques ? Qui aura accès à la nutriginomique et comment ? Quelle politique alimentaire *visus* liberté de choix et responsabilité individuelle ? L'ouvrage s'achève par un glossaire fort complet et une bibliographie actualisée. De quoi se sentir moins alphabète face à une science en passe de devenir le nouveau modèle scientifique d'un futur proche. Soyons gracieux auteurs d'avoir réussi le défi d'écrire dans un style limpide cette excellente synthèse par ailleurs enrichie d'une belle iconographie.

→ Bernard Schmitt
CERNh, Lorient

→ HISTOIRE DES SCIENCES

Marie Curie

Janine Trotureau

Gallimard, 2011
(266 pages, 8,40 euros).

Marie Curie a été une pionnière de la science. En fallait-il du courage pour accepter le phénomène d'une chambre à Paris afin de suivre les cours de licence de mathématiques et de physique. En fallait-il pour se lancer à corps perdu et au risque de sa vie dans la recherche d'un élément inconnu dans un laboratoire de planches sur un sol en terre battue, en fallait-il pour vaincre les lourdeurs administratives et créer une compagnie d'ambulanciers-radiographes, en fallait-il pour ne pas se laisser abattre par la mort brutale de son mari Pierre Curie, en fallait-il pour résister à l'opinion publique et élever ses enfants dignement... et avec quel succès : sa fille physicienne obtint avec son mari le prix Nobel !

Marie Curie n'est pas une sainte laïque, on s'en faut (ses lettres à Paul Langevin sont terribles de méchanceté), mais c'est une héroïne qui menait ses combats et qui savait s'entourer d'amis de grande valeur (les Perrin, les Borel, ses amis de l'Arcouest). Il ne semble pas que quiconque ait eu beaucoup d'influence sur elle, même pas le directeur de l'École supérieure de physique et chimie qui lui avait procuré un laboratoire et autant de facilité qu'il pouvait en apporter à une époque où la recherche était pauvre.

Le livre de Janine Trotureau est une merveille de précision et de compréhension dans la description des multiples vies de Marie Curie. Dans cette époque troublée par les affaires (Dreyfus), les scandales (Panama), les forfaits (les décorations vendues par le genre

Brèves

CENT VINGT ANS D'INNOVATIONS EN AÉRONAUTIQUE

Jean Carpentier

Hermann, 2011
(736 pages, 14 euros).

Les risques pesant sur toute machine volante et son coût... élevé font de l'aéronautique un domaine d'excellence dans l'innovation. Membre de l'Académie de l'air et de l'espace, l'auteur retrace d'un point de vue historique le développement de l'aviation aéronautique, qu'il complète par une série de biographies d'aviateurs et d'inventeurs bien tournées.



LE PONT DE SOMMIÈRES

Sophie Assaël

et Laurent Boissier

Errance, 2011
(128 pages, 15 euros).

Depuis 2000 ans, un irréductible Dardainien romain résiste dans le Gard, à Sommières. C'est le dossier peu banal de cette merveille de la Narbonnaise et de son terrible adversaire torrentiel – le Vidourle – qui a fait de ce lieu un lieu de mémoire. Le livre est accompagné d'un DVD. Idéal pour découvrir un des joyaux du Midi, et en préparer la visite et le tour prochain !

LES TABLES DES VOLCANS

André Demaison

Glénat, 2011
(192 pages, 12 euros).

Voilà 20 ans que Katia et Maurice Krafft ont disparu sur les flancs du mont Unzen au Japon, emportés par une coulée pyroclastique. L'auteur, qui les a côtoyés pendant 20 ans, nous plonge dans la logique volcanologique et le déroulement de 18 de leurs missions dans le monde entier. Soixante-dix photographies, des tables des volcans qui sont allés si souvent en ces enfers qu'ils ont fini par ne plus en revenir.

IRD Éditions Institut de recherche pour le développement
Un éditeur pour le développement

Guide des serpents d'Afrique occidentale
Savane et désert
Jean-François Trape, Youssouf Bana
IRD Éditions

Les serpents d'Afrique occidentale et centrale
J.-P. Chippaux
312 p. 28 €

Venins de serpent et envenimations
J.-P. Chippaux
288 p. 28 €

Les serpents marins de Nouvelle-Calédonie
Y. Inéchi, P. Laboute
304 p. 51 €

Sea snakes of New Caledonia
Y. Inéchi, P. Laboute
304 p. 51 €

Les serpents marins de Nouvelle-Calédonie
Y. Inéchi, P. Laboute
304 p. 51 €

Diffusion libraires : Eyrolles/Géodif
Vente par correspondance : IRD Diffusion
32, av. Varagnat - F 93143 Bondy cedex
Tél : 01 48 02 56 49 - Fax : 01 48 02 79 09
diffusion@ird.fr
www.ird.fr

du président de la République), la riche bourgeoisie voit le pouvoir lui échapper au profit des intellectuels et des « techniciens » (entendez les scientifiques et les ingénieurs) à elle résiste. Pierre et Marie Curie sont désintéressés, ils ne prennent pas de brevet sur la séparation de l'uranium et ses applications, mais se passionnent pour les retombées pratiques de leurs recherches. Et surtout ils ont la veine patriotique. Marie Curie est doucement patriote, française et polonaise. Cependant la droite ne l'appréhendera pas et l'étranger souffrira de la vindicte des partis catholiques, revanchards et xénophobes.

Janine Trotereau relate la vie de son héroïne avec simplicité et dans un style fluide, comme l'aurait aimé Marie Curie. Sans emphase inutile et sans dithyrambe



fatigant, elle relate les combats de cette femme d'honneur qui a marqué la vie scientifique et intellectuelle française. Sans Marie Curie, la science française n'aurait peut-être pas la même stature. Ici Janine Trotereau, votre livre est une délectation utile.

→ ENVIRONNEMENT

Biomimétisme

Janine Benyus

Rue de Schœlcher
(408 pages, 23 euros).

Voilà un livre qui a popularisé le biomimétisme : cette nouvelle approche des problèmes scientifiques et techniques cherche à observer la nature pour orienter le développement des industries et de l'agriculture. Janine Benyus donne de nombreux exemples dans des domaines clés comme la fabrication des matériaux, la production d'énergie, le stockage de l'information ou la structuration de l'économie. Ainsi, en agriculture, l'auteur nous fait découvrir les recherches en cours aux États-Unis pour mettre au point des systèmes agricoles aussi efficaces que l'agriculture industrielle et d'impact environnemental moindre : en favorisant la polyculture, en optant pour la rotation des cultures, en multipliant les variétés et en augmentant le nombre d'espèces cultivées, les résultats obtenus sont impressionnants. On découvre aussi des exemples passionnants sur l'utilisation par des animaux et plantes à vertus médicinales et sur l'élaboration de matériaux composites inspirés d'exemples trouvés dans la nature.

On aurait aimé que ce livre constitue un merveilleux plaidoyer en faveur de la recherche fondamentale, souvent interdisciplinaire, celle qui ose se poser des questions indépendamment du marché et de ses exigences de rentabilité à court terme. Mais n'est malheureusement rien, car l'auteur s'arrête dans



la vision idéalisée d'une nature parfaite et harmonieuse. Il s'agit de « faire confiance à la sagesse mystérieuse des solutions naturelles », et l'auteur de louer ces espèces qui, contrairement à l'homme, ne polluent pas et n'ont pas opté pour des solutions engageant leur avenir. En un mot, rompant le lien sacré avec la nature, l'espèce humaine aurait commis une sorte de péché, amorcé par l'agriculture il y a 10000 ans et aggravé par l'industrialisation il y a plus d'un siècle.

Les différentes recherches que présente ce livre sont passionnantes, mais elles n'ont aucune chance de se traduire dans la réalité si on laisse de côté les mécanismes et les raisons d'être du système actuel. Il ne suffit pas de critiquer, avec raison, les excès de l'agriculture industrielle ou notre soif insatiable d'énergie, il faut aussi concevoir de véritables analyses politiques, sociales et économiques : les excès reposent d'abord sur une certaine organisation sociale privilégiant par exemple la concentration des richesses ou l'inégalité devant l'accès aux ressources. Or ce livre est dépourvu de ce type de réflexions.

→ Valérie Chansigaud

Retrouvez l'intégralité de votre magazine et plus d'informations sur : **www.pourlascience.fr**