

POUR LA SCIENCE

Décembre 2010 - n° 398

www.pourlascience.fr

Édition française de Scientific American

La vision aveugle **Voir** sans en avoir conscience

Champagne

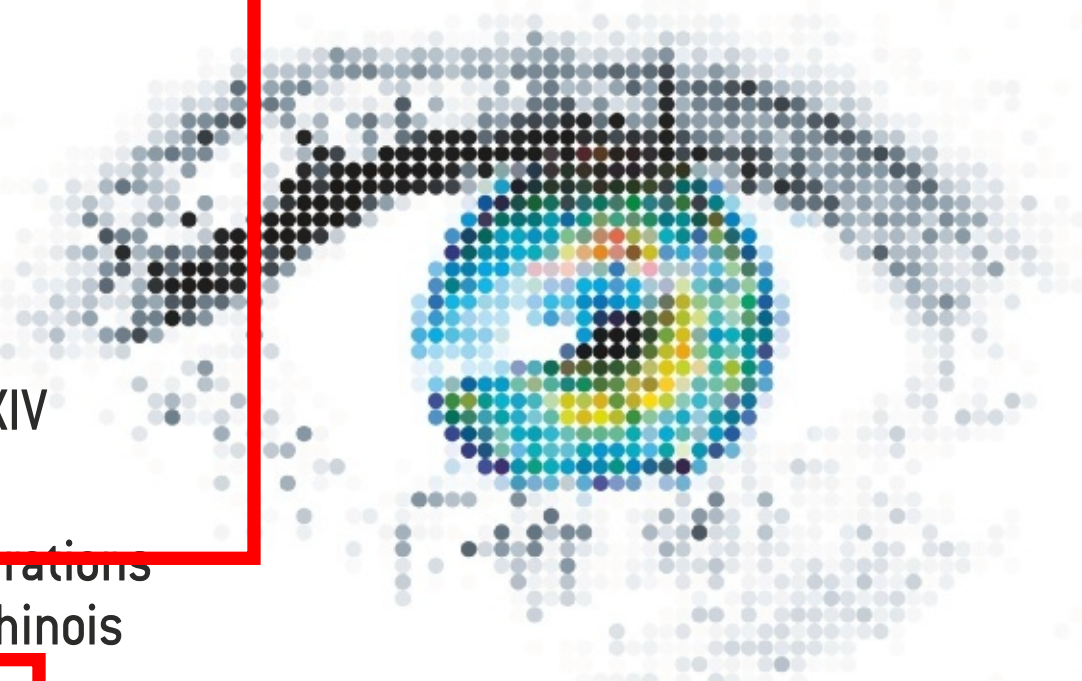
L'arôme au cœur
des bulles

Le diamant bleu

Enquête autour
d'un joyau de Louis XIV

Le tangram

De nouvelles configurations
pour ce casse-tête chinois



M 026 27 200 F 6 20 €



France métro : 6,20 € - DOM : 7,30 € - BEL : 7,20 € - CH : 12 FS - CAN : 10,95 \$ - Grèce : 7,60 € - LUX : 7,20 €
Italie : 7,20 € - PORT : 7,20 € AND : 6,20 € - ALL : 9,30 € - MAR : 60 DH - REU : 9,30 € - TOM surface : 980 XPF - TOM Avion : 1770 XPF

Assurance vie : alliez performance et sécurité !

L'assurance vie demeure le produit d'épargne préféré des Français. Dans la multitude des contrats présents sur le marché, la GMF se distingue par des solutions offrant rendement et sécurité.



La crise financière n'entame pas la confiance des Français dans l'assurance vie ! Les cotisations collectées au 1^{er} semestre 2010 par la GMF sont en hausse de 17% par rapport à la même période de l'année précédente. Rien d'étonnant à cela lorsqu'on constate les taux servis par la GMF en 2009 et qui sont parmi les meilleurs du marché. Le rendement de ses contrats et supports d'assurance vie en euros a atteint 4,15%⁽¹⁾.

Un taux non seulement supérieur à la moyenne du marché, qui n'excède pas 3,70%⁽²⁾

en 2009, mais aussi beaucoup plus intéressant que ceux désormais offerts par les livrets d'épargne traditionnels. Ainsi, alors que ces livrets classiques garantissent à l'épargnant la sécurité contre un faible rendement, le contrat Altinéo de la GMF, lui, offre sécurité et performance. Vous profitez d'un taux minimum garanti chaque année, les intérêts vous sont définitivement acquis et génèrent eux-mêmes d'autres intérêts. De plus, vous investissez sans plafond, tout en profitant d'une fiscalité privilégiée. Profitez-en !

UNE PERFORMANCE RÉCOMPENSÉE

Depuis 2000, le contrat d'assurance vie en euros Compte Libre Croissance – aujourd'hui remplacé par Altinéo, un produit qui offre des caractéristiques et un niveau de performance similaires – a offert à l'épargnant un rendement moyen de 4,48%⁽³⁾ par an, soit plus de 36,84%⁽⁴⁾ sur 8 ans. C'est pour distinguer notamment la régularité de ses performances que les experts des Dossiers de l'Épargne ont, en 2010, décerné pour la troisième année consécutive le label d'excellence à Altinéo.

Didier Ledeur, Directeur Général de la GMF VIE

« Une expertise qui profite directement aux épargnants »

« La GMF propose une large gamme de produits d'assurance vie, d'épargne et de placement depuis maintenant plus de 30 ans. C'est cette expertise, constituée au fil des ans, qui lui permet aujourd'hui d'afficher d'excellents résultats, et ce malgré un environnement économique et boursier plus difficile. L'épargnant en bénéficie directement, comme il tire profit des valeurs mutualistes qui animent au quotidien l'entreprise : refus des effets d'annonce, absence de taux « boostés » à court terme pour recruter de nouveaux clients... Sans oublier une solide santé financière, un élément indispensable dans le contexte actuel. »

Pour en savoir plus :
appelez le 0 820 809 809
(0,12€ TTC/mn) ou consultez
le site www.gmf.fr



Assurément Humain

(1) frais de gestion déduits, avant prélèvements sociaux.

(2) source : Fédération Française des Sociétés d'Assurances, estimation au 23.6.10.

(3) taux de rendement annualisé du 31.12.01 au 31.12.09, frais de gestion déduits et avant prélèvements sociaux.

(4) taux de rendement du 31.12.01 au 31.12.09, frais de gestion et prélèvements sociaux déduits.

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

POUR LA SCIENCE

Directrice de la rédaction - Rédactrice en chef : Françoise Pétry

Pour la Science :

Rédacteur en chef adjoint : Maurice Mashaal
Rédacteurs : François Savatier, Marie-Neige Cordonnier,
Philippe Ribeau-Gésippe, Bénédicte Salthun-Lassalle,
Jean-Jacques Perrier

Dossiers Pour la Science :

Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin
Rédacteur : Guillaume Jacquemont

Cerveau & Psycho :

Rédacteur : Sébastien Bohler

L'Essentiel Cerveau & Psycho :

Rédactrice : Émilie Auvrouin

Directrice artistique : Céline Lapert

Secrétariat de rédaction/Maquette : Annie Tacquenet,
Sylvie Sobelman, Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy

Site Internet : Philippe Ribeau-Gésippe

Marketing : Héli Chappes

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 : Patrick Berger,
Bettina Debû, Nicolae Ghinea, Évelyne Host-Platret,
Philippe Maurice, Christophe Pichon, Marie-Ingrid Richard,
David Saintillaud, Daniel Tacquenet, Manuel Théry

PUBLICITÉ France

Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin
(jf.guillotin@pourlascience.fr), assisté de Nada Mellouk-Raja
Tél. : 01 55 42 84 00 ou 01 55 42 84 97 • Fax : 01 43 25 18 29

SERVICE ABONNEMENTS

Ginette Bouffard. 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 dossiers ou de magazines :
02 37 82 06 62 (de l'étranger : 33 2 37 82 06 62)

DIFFUSION DE POUR LA SCIENCE

Canada : Éditions Écos, 1000 Avenue du Parc, 1000 Québec, H3N 1V3 Canada.

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

Belgique : La Cavellerie, 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 Nadler, 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 rédactrice en chef

Voir l'invisible

On est souvent surpris d'entendre les récits de plusieurs personnes ayant assisté à une même scène. Les descriptions diffèrent parfois au point que l'on se demande s'il s'agit bien du même événement. Face aux incohérences des propos des témoins directs, on s'interroge sur le crédit que l'on peut accorder à l'observation et sur la façon dont le cerveau traite les informations visuelles. La vision consciente se laisse-t-elle si facilement piéger ? La question se pose d'autant plus qu'il existe une vision inconsciente qui, elle, semble fiable.

Certaines personnes sont atteintes d'une pathologie nommée vision aveugle : à la suite d'une lésion cérébrale, elles ont perdu la vue, c'est-à-dire qu'elles déclarent ne rien voir dans tout ou partie de leur champ visuel. Pourtant, quand on les fait marcher dans un couloir encombré d'objets, elles avancent sans s'y cogner. Ou encore, quand on leur présente des photographies de personnages exprimant la peur ou la joie, on constate non seulement qu'elles devinent l'état émotionnel véhiculé par l'image, mais aussi que les imperceptibles mimiques de leur propre visage reproduisent celles du visage « vu sans être vu », c'est-à-dire qu'elles ressentent ces émotions (voir *La vision inconsciente des aveugles*, page 26).

Ces personnes voient l'invisible, comme le font les « enquêteurs cristallographes » qui reconstituent le diamant bleu, une des plus belles pièces des bijoux de la couronne de Louis XIV, avant aussi, une fois son

« Le vrai mystère du monde est le visible. »

d'or de Louis XV. Enquête autour d'une pièce unique, disparue et sans doute retournée, mais qui reprend vie grâce à une réplique en plomb retrouvée dans un tiroir du Muséum national d'histoire naturelle, à la connaissance des techniques de taille des lapidaires, à l'étude des textes historiques et à la modélisation. Le mystère qui entoure sa disparition, sa retaille et la fabrication de la réplique en plomb ne fait que renforcer l'intérêt de cette saga gemmologique (voir *Sur les traces du diamant bleu*, page 54).

Les astronomes aussi cherchent à voir l'invisible dans l'Univers. Le télescope spatial *Hubble* a transmis des images stupéfiantes du cosmos observé dans le visible. Mais ses jours sont comptés, et le télescope *James Webb* doit prendre la relève en 2014. Placé à un million et demi de kilomètres de la Terre, il fournira des images dans le domaine des infrarouges, révélant ainsi les toutes premières galaxies de l'Univers (voir *Le télescope spatial James Webb, un observatoire origami*, page 40).

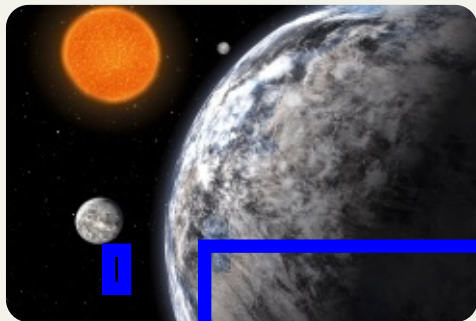
L'invisible se révèle, ce qui conforte les propos d'Oscar Wilde dans *Le portrait de Dorian Gray* : « Le vrai mystère du monde est le visible, et non l'invisible. »

1 **ÉDITO**

4 **BLOC-NOTES**
Didier Nardon

Actualités

6 **Des milliards de planètes de type terrestre dans la Voie lactée**



8 **Un marqueur universel du cancer ?**

11 **La marche de Neandertal reconstituée**

14 **Les vents soufflent moins fort**
... et bien d'autres sujets.

16 **ON EN REPARLE**

Opinions

18 **POINT DE VUE**
Comment distinguer l'incertitude et l'ignorance
Hervé Le Treut

19 **ÉCONOMIE**
Cherchez la justice
Ivar Ekeland

20 **DÉVELOPPEMENT DURABLE**
Que devient le pétrole des marées noires ?
Jean Oudot

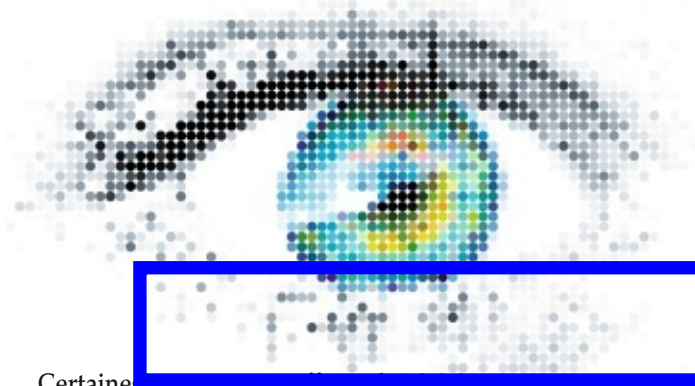
22 **VRAI OU FAUX**
Les « décas » contiennent-ils la caféine ?
Michel Mambelli

24 **COURRIER DES LECTEURS**

À LA UNE

26 **NEUROSCIENCES** **La vision inconsciente des aveugles**

Beatrice de Gelder

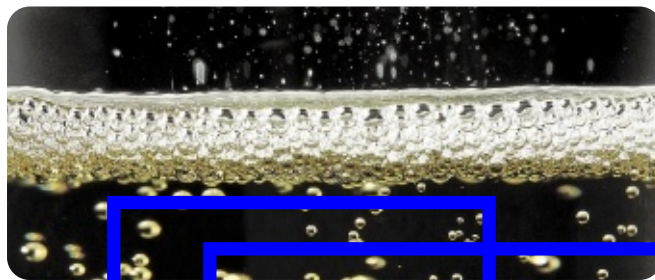


Certaines personnes souffrant de cécité ont une « vision aveugle » : sans le savoir, elles se déplacent en évitant les obstacles. Une structure cérébrale participe à cette vision inconsciente.

34 **CHIMIE** **Champagne : l'arôme au cœur des bulles**

G. Liger-Belair, R. Gougeon et P. Schmitt-Kopplin

Lorsqu'elles éclatent, les bulles dispersent au-dessus de la coupe de champagne un brouillard de minuscules gouttelettes, où se concentrent les molécules aromatiques.



40 **TECHNOLOGIE SPATIALE** **Le télescope spatial James Webb, un observatoire origami**

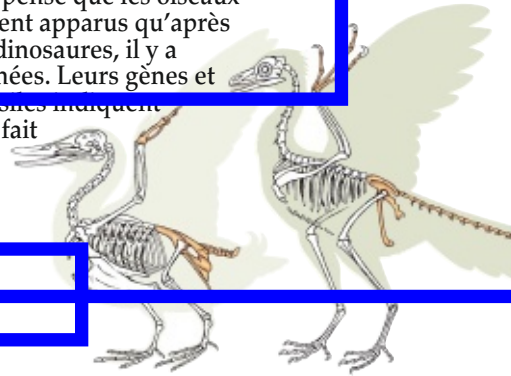
Robert Inion

Orbite lointaine, températures glaciales, opaque active et déploiement dans l'espace... D'immenses défis techniques attendent le télescope spatial James Webb, qui succédera à Hubble en 2011.

48 **PALÉONTOLOGIE** Des canards au temps des dinosaures

Gareth A. Dyke

On a longtemps pensé que les oiseaux modernes n'étaient apparus qu'après l'extinction des dinosaures, il y a 65 millions d'années. Leurs gènes et de nouvelles fossiles indiquent qu'ils étaient en fait contemporains des dinosaures.



54 **MINÉRALOGIE** Sur les traces du diamant bleu

François Farges

Les caractéristiques optiques et cristallographiques du plus gros diamant bleu connu – « Caspara » au XVIII^e siècle – ont été reconstituées grâce à une réplique d'époque... en plomb. On en déduit jusqu'à la forme qu'il avait dans le manteau terrestre.



64 **INFORMATIQUE** Des jeux vidéo plus réalistes

Henrik Wann Jensen et Tomas Akenine-Möller

Grâce à l'évolution conjointe des algorithmes et des composants matériels, l'informatique graphique crée des images de plus en plus proches de la réalité.

74 **MÉDECINE** Le retour des vaccins à ADN

Matthew Morrow et David Weiner

Après plusieurs faux départs et échecs, une nouvelle génération de vaccins et de médicaments à base d'ADN est en cours de développement et de tests cliniques.

Regards

82 **HISTOIRE DES SCIENCES** L'émergence de la question des ressources naturelles

Valérie Gansigaud

En 1948, deux ouvrages exposant les dangers d'une croissance raisonnée font prendre conscience de la complexité des questions environnementales.

88 **LOGIQUE & CALCUL** Tangram

Jean-Paul Delahaye

Le plus célèbre des puzzles suggère de nouvelles variantes du jeu et d'intéressants problèmes de géométrie, que parfois seule la patience d'un ordinateur peut affronter.

94 **ART & SCIENCE** Les halenguiers de Delft

Loïc Mangin

96 **IDÉES DE PHYSIQUE** Le verre : attention, fragile !

Jean-Michel Courty
et Édouard Kierlik

100 **SCIENCE & GASTRONOMIE** Cueillir le bon roi Henri

Hervé This

102 **À LIRE**

Sur la totalité des numéros :

Un encart d'abonnement pages 24 et 25.

Un encart commande de livres et abonnement pages 26 et 27.

Un encart jetté Encyclopédie Universalis

En couverture : © Shutterstock/Petr Vaclavek

Rendez-vous sur

SCIENCE.fr

» Plus d'informations

- L'intégralité de votre magazine en ligne
- Des actualités scientifiques chaque jour
- Plus
- 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

→ PRÉVISIONS DE MAUVAIS ALOI

Étant donné que mon voisin ne fait pas les mêmes besoins que moi, il souhaite le soleil, par exemple, car il voudrait bronzer sur son balcon. Moi, il me faut la pluie, pour que ma pelouse reste verte pendant l'escapade que je projette en Californie. Heureusement, chacun peut s'adresser à l'institut de prévision météorologique de son choix. Je suis prêt à payer cher un institut pour obtenir qu'il prévoie de la pluie. Mon voisin se fera refiler des prévisions au rabais, qui lui annonceront le beau temps qu'il a envie de s'entendre promettre. Pourvu d'une loi, le temps, évidemment, se conforme aux prévisions de l'institut le plus huppé, le mieux introduit auprès des hautes sphères.

Vive la privatisation de la météorologie !

Quand un botaniste fait une excursion à travers champs et compose un joli bouquet, il travaille.

Quand un géographe classe dans son ordi des photos qu'il a prises au cours de son dernier voyage, il travaille.

Quand un commentateur politique y réfléchit sur les chances que telle personnalité a d'être élue si elle se présente aux prochaines élections, il travaille.

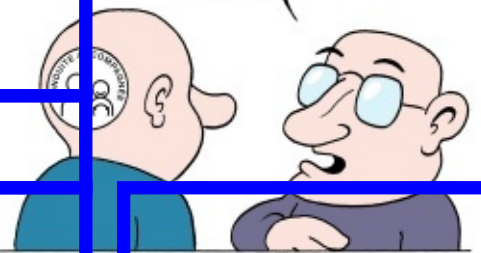
Quand un écrivain explore les limites extrêmes auxquelles l'absorption d'alcool peut mener un être humain, il travaille.

Quand un pâtissier lèche en connaisseur ses doigts maculés de chocolat, il travaille.

Quand un physicien découvre que, si elle se détache de l'arbre sur lequel elle a mûri, une pomme tombe par terre, il travaille.

Dans ces conditions, on comprendra pourquoi, moi qui suis un homme sérieux, je me procure de la fois éternelle.

T'inquiète ! Moi je pense tout seul, mais je vais pas plus loin pour autant...



tation personnelles ; aucun ne doit être contraint de se conformer aux limitations de quelque despote.

→ L'ACTEUR A DIT...

En Chine, par exemple, passe pour sage celui qui se tait ou, du moins, parle peu. En France, nous sommes plus soucieux d'intelligence que de sagesse, et nous nous vanterions le fait d'être intelligent par la capacité à exprimer beaucoup d'idées, sous des situations les plus diverses.

Comme chacun tient à passer pour intelligent, il doit effectivement l'être, nous ne sommes pas de hasarder des idées, même dans des cas où nous n'en avons aucune qui vaille. Chacun estime que le conseil donné par le mufti à Monsieur Jourdain (*Le Bourgeois gentilhomme*, IV/V) « Sotie, s'habiller, Ti respondit, S'habiller, Tezir, tezir », que ce conseil est à suivre par les autres, pas par lui-même.

Combien le désir d'avoir l'air intelligent nous mène à préférer de bâties !

→ UNE NOUVELLE THÉORIE DU COMLOT

Pendant des années, la presse nous a soufflé mot de la maladie de Pompidou. Pendant des années, elle n'a soufflé mot de la fille de Mitterrand. A coup sûr, elle se livre actuellement à d'autres cachotteries. Celle-ci n'est pas de jurer.

→ LIBERTÉ DE PENSÉE SURVEILLÉE

Loin de nous la tentation de brouter ce qu'il est convenu d'appeler la « liberté de pensée ». Observons cependant que la phrase « Chacun est libre de penser comme il le veut » signifie en réalité : « Chacun est contraint de penser comme il le peut. »

En effet, nul n'est siège d'une volonté souveraine préexistante à sa pensée et commandant à celle-ci. Tout individu est emprisonné dans un tissu serré de déterminismes sociaux, historiques, culturels, psychologiques ; sa tournure d'esprit lui donne des œillères auxquelles il n'échappera jamais.

Quelle que soit sa puissance intellectuelle, il a forcément des insuffisances auxquelles il se heurte ; celles-ci biaisent sa connaissance du monde, et la rendent tellement partielle qu'elle en devient partielle. Obligé de faire l'impasse sur ce qu'il dépasse, chacun pense avec les moyens du bord, c'est-à-dire partant de ses limitations.

La lutte pour la liberté de pensée est donc à comprendre ainsi : chaque citoyen doit avoir le droit de n'obéir qu'à ses limi-



→ SILENCE ! IL RÉFLÉCHIT...

Quand un philosophe se promène au bord de son humeur pour s'imprégner de l'atmosphère d'une ville, il travaille.

Quand un poète rêve, allongé dans une prairie, voyant sans les voir la fleur proche ou le ciel lointain, il travaille.

Quand un mathématicien reste le regard absent, songeant à ce qu'on lui dit, il travaille.

Quand un chimiste se perd dans la contemplation d'une goutte de lait en train de diffuser dans son café, il travaille.

que, jamais, elle ne se fait complice de complots visant à celer la vérité.

Certes beaucoup de ses manquements n'ont d'autre cause que l'unisson des médiocres. L'homme au pouvoir veut le silence sur quelque affaire, ses courtisans sont pressés à complaire, la presse craint de se couper de ces interlocuteurs haut placés. La conjonction de la servilité et du plaisir minable consistent à imiter le fait d'être au courant parmi une foule d'ignorants cimente les langues aussi bien qu'un complot en bonne et due forme.

Reste que les complots authentiques visant à imposer quelque version officielle existent, même si les repérer cas par cas n'est pas toujours possible. Toutefois, manifester du mépris à l'égard des gens enclins à subordonner des complots est de bon ton. Cela vous pose en détenteur d'un savoir supérieur si vous êtes en mesure d'affirmer qu'aucun complot n'est à l'origine de telle vérité reçue à propos de telle affaire, c'est que vous avez une connaissance parfaite de l'ensemble de l'affaire et des personnes impliquées ; les puissants n'ont aucun moyen de vous cacher quoi que ce soit. Au contraire, en jugeant plausible une hypothèse de complot, vous vous désignez comme en marge ; on ne vous dit pas tout. Vous ne vous laissez pas duper pour autant : vous avez compris que le monde est régi par des menées occultes.

Regarder de haut les explications par le complot, ou bien leur faire la part belle, ces deux attitudes expriment moins une recherche de la vérité qu'une façon de se positionner socialement. ■





**Institut de recherche
pour le développement**

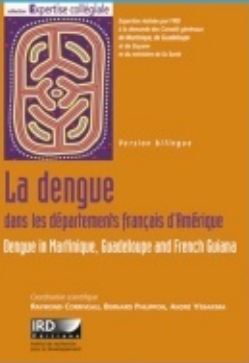
Un éditeur pour le développement



**Sociétés
environnements
santé**

Sous la direction de
Nicole Vernazza-Licht,
Marc-Éric Gauvain,
Daniel Bley

**Sociétés,
environnements,
santé**
N. VERNAZZA-LICHT,
M.-E. GRUENAI, D. BLEY
364 p. 38 €



La dengue
dans les départements français d'Amérique
Dengue in Martinique, Guadeloupe and French Guiana

Expertise collective
Bernard Gervais, Bernard Proust, Anne Vigneron

**L'énergie
dans le
développement
de la
Nouvelle-Calédonie**
Y. LE BARS, E. FAUGÈRE,
P. MENANTEAU, B. MULTON
A. RIEDACKER, S. VELUT
472 p. 15 €

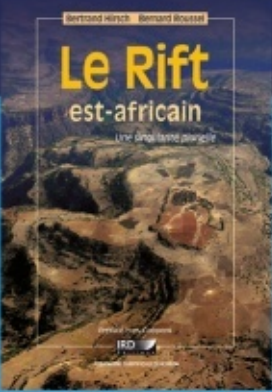


**La dengue
dans les
départements
français d'Amérique**
R. CORRIVEAU, B. PHILIPPON,
A. YERAKIMA
208 p. 15 €



**L'énergie
dans le développement
de la Nouvelle-Calédonie**
Energy in the development of New Caledonia

Expertise collective
Yves Le Bars, Eric Faugère, Pierre Menanteau,
Philippe Multon, Anne Vigneron, Daniel Bley



**Le Rift
est-africain**
Une grande vallée plongeante

Bertrand Hirsch, Bernard Roussel

Le Rift est-africain
B. HIRSCH, B. ROUSSEL
424 p. 45 €

**En vente dans toutes les librairies
et 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

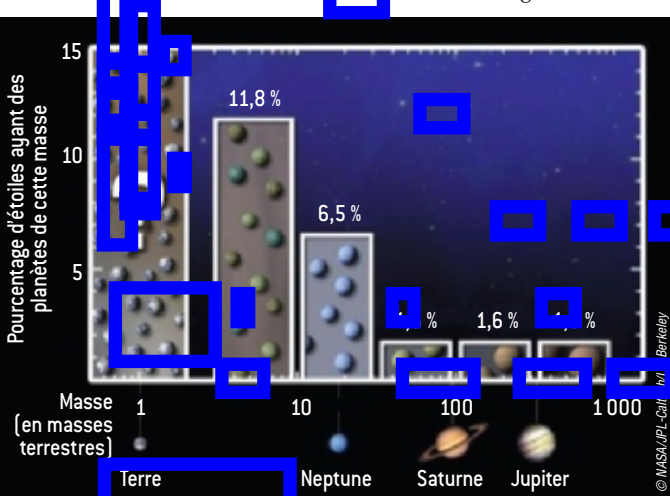


Astronomie

Des milliards de planètes de type terrestre dans la Voie lactée

Une étude statistique suggère qu'une étoile de type solaire sur quatre aurait une planète de la taille de la Terre.

On connaît aujourd'hui près de 100 planètes en orbite autour d'autres étoiles. Mais il pourrait en exister des milliards dans la Voie lactée. C'est ce qui ressort d'une étude de grande ampleur, tant par la taille de l'échantillon que par la sensibilité des mesures, réalisée par Andrew Howard, de l'Université de Californie, et ses collègues.



Cinq ans durant, ils ont étudié avec le télescope Keck de dix mètres de diamètre, à Hawaï, 166 étoiles de type G (semblables au Soleil) et K (plus petites et plus « rouges ») situées dans un rayon de 80 années-lumière. Ils cherchaient à observer d'éventuelles planètes de 3 à 1000 masses terrestres, en analysant les données de ces étoiles (en deçà de 0,25 unité astronomique, soit un quart de la distance Terre-Soleil).

Les astronomes ont utilisé la méthode des vitesses radiales : l'attraction gravitationnelle d'une planète en orbite imprime un mouvement périodique à son étoile qui se traduit par un décalage dans la longueur d'onde de son rayonnement. Ils ont ainsi découvert 3 planètes, en orbite autour de 2 étoiles ! Les planètes de petite taille prédominent. A. Howard et ses collègues estiment qu'environ 30 pour cent des étoiles de type solaire ont des planètes de la masse de Jupiter, environ 6 pour cent ont une pla-

neté intermédiaire (entre 10 et 30 masses terrestres), et 12 pour cent ont des super-Terres (entre 3 et 10 masses terrestres).

En extrapolant aux planètes de 0,5 à 2 masses terrestres, les chercheurs prédisent qu'environ 23 pour cent des étoiles ont une telle planète. La Galaxie pourrait ainsi abriter près d'une quarantaine de milliards de planètes de type terrestre... Et ce n'est qu'une limite inférieure : comme cette étude ne concerne que les planètes proches de leurs étoiles, il pourrait y en avoir d'autres à plus grande distance.

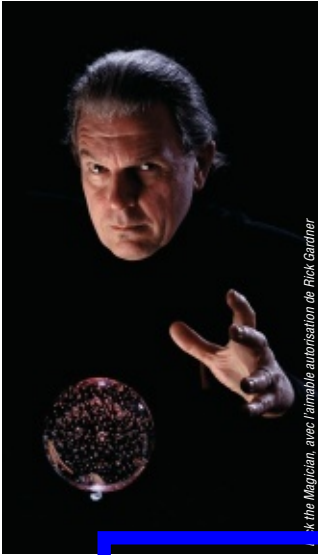
Cette étude remet également en cause une prédiction de certaines théories de la formation des planètes, selon lesquelles les régions proches de l'étoile seraient un « désert » en petites planètes, les planètes géantes étant supposées migrer en grand nombre dans ces régions.

→ Philippe Ribeau-Gésippe

Science, vol. 358, pp. 655-659, 2010

Psychologie

La magie opère aussi sur les autistes



* the Magician, avec l'aimable autorisation de Rick Gardner

Vous y avez suivi la balle lancée en l'air par le magicien de façon répétitive. Soudain, elle disparaît ! Vous jureriez l'avoir vue quitter la main du prestidigitateur. Pourtant, elle est restée cachée dans sa pousse : vous avez été berné par le regard de l'illusionniste, qui s'avère être une bonne indication. Les autistes ont des difficultés à ces indices sociaux, ici le regard, on supposait qu'ils se laisseraient moins facilement prendre à ce tour. Selon Gustav Kuhn, de l'Université de Bonn, au Royaume-Uni, et de ses collègues, ce n'est pas le cas.

Quand ils ont montré à des adolescents, autistes ou non, une vidéo d'un magicien effectuant le tour, les premiers ont été plus enclins que les autres à prétendre avoir vu la balle en l'air avant qu'elle ne s'évanouisse. Selon G. Kuhn, ces résultats traduisent l'enseignement qu'ont reçu les autistes dans un établissement spécialisé, enseignement qui les incite à prendre en compte les indices sociaux (les regards, les gestes, les intonations de la voix). Cette période présente, même si l'étude montre que les autistes continuent à avoir des difficultés à s'adapter à la situation, à attirer l'attention au bon endroit au bon moment.

→ Loïc Mangin

G. Kuhn et al., *Psychological Science*, vol. 21(10), pp. 1487-1495, 2010

L'ORCHIDÉE SONNE L'ALARME

L'orchidée *Ophrys sphegodes*, qui pousse en Turquie, est pollinisée par les syrphes, des mouches qui ressemblent à des guêpes. Or les larves de ces insectes se nourrissent de pucerons. Les biologistes ont montré que la fleur émet trois molécules que l'on retrouve... dans le bouc et d'odeurs libérées par les pucerons lorsqu'ils sont en danger ! Les mouches sont attirées par l'odeur, pondent leurs œufs sur la plante, les pucerons mangent le pollen. Elles les entraînent ensuite vers d'autres orchidées.

TÉLÉPRÉSENCE 3D

Une vue holographique et en temps réel d'une scène qui se déroule à des milliers de kilomètres de vous ? Cette idée, exploitée dans le film *La guerre des étoiles*, datant de 1977, n'est plus de la science-fiction. L'équipe de l'Université de l'Arizona, a fait la démonstration d'un dispositif qui, via le lien Ethernet, crée à distance et dans un polymère photoréfractif des images holographiques millimétriques en quelques millisecondes.

LE PROTÉINE DU SONAR

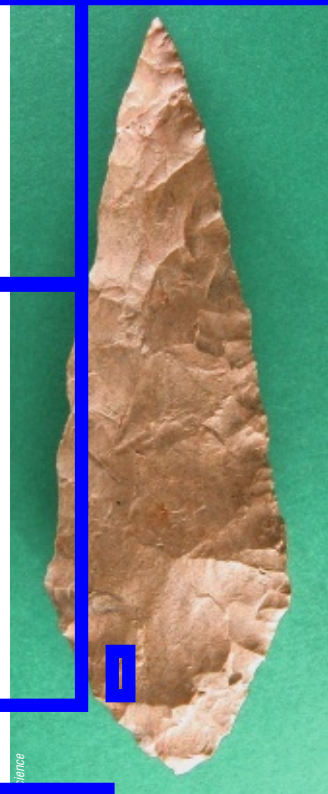
Les chauve-souris et les cétacés à dents (cachalot, orques, dauphins, etc.) émettent des ultrasons qui se réfléchissent sur les objets de l'environnement. Bien que ces espèces soient éloignées sur l'arbre de l'évolution, leurs sonars mettent en jeu une même protéine des cellules ciliées de l'oreille interne, l'organe de la perception auditive, la prestine. Cette molécule assure la perception des hautes fréquences, montrent deux équipes à Londres et à Shanghai. Selon la séquence des acides aminés, la fréquence sonore perçue par les cétacés à dents diffère.

Archéologie

Une technique de taille vieille de 75 000 ans

Sensation chez les préhistoriens : une technique de taille de pierres parmi les plus avancées, la retouche par pression, était pratiquée en Afrique du Sud depuis 75 000 ans, soit 55 000 ans plus tôt que ce que l'on pensait. En exerçant sur les bords de la pièce travaillée une pression avec la pointe d'un percuteur en os ou en pierre dure, cette technique permet de détacher de petits éclats. Le tailleur obtenait ainsi des pointes de projectile bien affûtées.

Vincent Mourre, de l'INRAP (Institut national de recherches archéologiques préventives) et deux collègues, Paola Villa et Christopher Henshilwood, ont étudié les pointes de projectile trouvées dans l'abri-sous-roche de Blombos, en Afrique du Sud. Fouillé depuis 1991 par Ch. Henshilwood, de l'Université de Bergen, en Norvège, cet abri est célèbre en raison des artefacts qui y ont été retrouvés. Il s'agit notamment de blocs d'ocre gravés de motifs géométriques et d'objets



L'une des pointes de projectile retrouvées à Blombos, en Afrique du Sud, et façonnées par la technique dite de la retouche par pression.

de parure et de quincaillerie percés, qui illustrent les capacités cognitives avancées des hommes les ayant fabriqués.

L'analyse des pointes de projectile de Blombos et l'expérimentation révèlent que la technique de retouche par pression était pratiquée par les occupants du site. Ils obtenaient ainsi des pointes en silicrète, roche siliceuse qui constituait leur matière première.

Les plus anciens témoignages de cette technique dataient jusqu'à présent du Solutrén, c'est-à-dire du maximum de la dernière glaciation, il y a 20 000 ans. En Amérique du Nord, la retouche par pression n'est apparue qu'il y a 11 000 ans.

→ François Savatier

V. Mourre et al., *Science*, vol. 330, pp. 659-662, 2010

Médecine

Un marqueur universel du cancer ?

Le récepteur d'une hormone sexuelle ne s'exprime que dans les tumeurs.

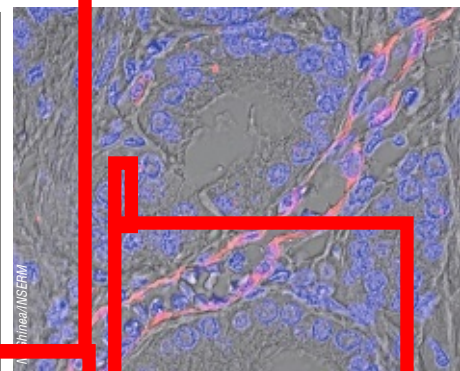
Le cancer est marqué par l'accumulation d'anomalies génétiques dans une cellule, qui se multiplie alors de façon désordonnée au point de former une tumeur. Cette dernière ne survit que si elle trouve les nutriments et l'énergie nécessaires à sa croissance. Elle se développe donc avec son propre réseau de vaisseaux sanguins, indépendant du système vasculaire de l'organisme. Nicolae Ghinea, de l'équipe INSERM Institut Mondor de recherche biomédicale à l'Université Paris-Est de Créteil, a récemment identifié une molécule spécifique des cancers présente sur la paroi interne des vaisseaux sanguins tumoraux.

Cette molécule est le récepteur de l'hormone folliculostimulante ou FSH, nécessaire à la maturation des ovules chez la femme et à la production des spermatozoïdes chez l'homme. Les récepteurs de cette hormone ne sont présents normalement que dans les ovaires et des testicules, et en très faible quantité dans les vaisseaux sanguins de ces organes.

Les biologistes ont recherché ce récepteur dans des biopsies de tumeurs pratiquées chez 1336 patients. Onze types de cancers ont été trouvés (prostate, colon, pancréas, vessie, rein, poumon, foie, estomac, testicules et ovaires) à des stades différents.

Resultat : le récepteur de la FSH est présent à la surface des cellules qui tapissent la paroi interne des vaisseaux sanguins tumoraux, mais absent du reste de l'organe. Et ce, pour tous les cancers étudiés. Les chercheurs ont en outre injecté à tous les tumeurs une molécule qui se fixe spécifiquement sur ce « marqueur » et ont ainsi détecté la tumeur qu'elle portait. On a peut-être là un nouvel outil diagnostique, voire thérapeutique. On peut en détruire la tumeur avec des agents antitumoraux se fixant sur le récepteur de la FSH.

→ Bénédicte Salthun-Lassalle

A. Radu et al., *The New England Journal of Medicine*, vol. 363, pp. 1621-1630, 2010

Tissu d'une tumeur de la prostate à un stade d'évolution précoce.

Le vaisseau irriguant cette tumeur exprime le récepteur de la FSH (en rouge, et en bleu les noyaux des cellules cancéreuses).

22 POUR CENT : c'est la baisse du taux de mortalité par cancer chez les hommes en France entre 1983-1987 et 2003-2007. Chez les femmes, elle est de 14 pour cent.

Biologie animale

Comment l'abeille devient reine

On comprend pourquoi la gelée royale fait que certaines larves deviennent des reines et d'autres des ouvrières.

De grande taille, lente à se mouvoir, la reine d'une colonie d'abeilles passe l'essentiel de sa vie – quatre à cinq ans – à pondre, choyée par sa cour. Les

ouvrières, au contraire, petites, agiles et stériles ne vivent que quelques semaines. Pourtant, la reine et les ouvrières sont génétiquement identiques. Comment un même génome peut-il produire des individus si différents ? Une équipe germano-australienne vient d'écarter les mécanismes moléculaires en jeu.

On savait l'alimentation en jeu : les larves élevées comme de futures reines et la reine survivante (après avoir éliminé ses rivales) sont nourries plus abondamment de gelée royale. Les autres larves, qui deviendront des ouvrières, sont nourries surtout de miel et de pollen.

En 2008, l'équipe de Sylvain Forest et Richard Rodd, de l'Université de Canberra, en Australie, a montré que la suppression d'une enzyme, l'ADN méthyle-

transérase, chez des larves nourries pour devenir ouvrières, fait qu'elles se développent en reines fécondes : supprimer cette enzyme a le même effet que la gelée royale. Cette enzyme étant nécessaire à la méthylation de l'ADN, c'est-à-dire à la ajout de groupes méthyle sur certaines bases (des cytosines) de l'ADN, la gelée royale apporte vraisemblablement des substances inhibant ce processus, dit épigénétique.

Supposant que les gènes ne s'expriment pas de la même façon chez la reine et les ouvrières, ces biologistes ont associé à un groupe du Centre allemand de recherche sur le cancer, à Heidelberg, ont séquencé les génomes de reines et d'ouvrières et identifié tous les sites méthylés de l'ADN. Ils ont observé que quelque 560 gènes

étaient méthylés différemment. La méthylation régule le type et la quantité des protéines produites, chez une reine et chez une ouvrière.

Comment les enzymes de méthylation repèrent-elles les cytosines cibles parmi les dix millions de sites possibles chez l'abeille ? On l'ignore, mais un mécanisme expliquant les différences entre reines et ouvrières se dessine : la présence ou l'absence de gelée royale détermine différents profils de méthylation de leur ADN. En ajustant l'expression de certains gènes, ces profils donnent lieu à des caractéristiques anatomiques, physiologiques et comportementales distinctes.

→ Jean-Jacques Perrier

F. Lyko et al., *PLoS Biology*, vol. 6, e166366, 2008

Une reine et sa cour.

Paléontologie

L'homme, issu d'un primate passé d'Asie en Afrique ?

Des microprimates, dont des fossiles ont été mis au jour en Lybie, seraient nos lointains ancêtres.

Les anthropoïdes, c'est-à-dire les primates regroupant toutes les formes apparentées à *Homo sapiens*, sont-ils apparus en Afrique ou en Asie ? Les restes d'anthropoïdes retrouvés dans une falaise du désert libyen à Dur At-Talah apportent des éléments de réponse.

Jean-Jaques Jaeger, de l'Université de Poitiers, et Mustapha Salem, de l'Université de Tripoli, rapportent la découverte de la plus ancienne communauté d'anthropoïdes africains connue. Elle comprend *Afrotarsius*, l'espèce de primate la plus ancienne dont nous sommes issus, qui aurait vécu il y a quelque 38 millions d'années. Trois groupes de primates archaïques mis au jour dans des dépôts de l'Éocène supérieur ou de l'Oligocène plus récents (entre 34 et 32 millions d'années) – *Afrotarsiidés*, *Oligopithécidés* et *Parapithécidés* – y sont représentés. Parmi les découvertes à Dur At-Talah, trois nouveaux représentants de ces groupes ont été découverts : *Talapithecus parvus* pour les *Oligopithécidés*, *Afrotarsius libycus* pour les *Afrotarsiidés*, et *Biretia piveteaui* pour les *Parapithécidés*.



Le site de Dur At-Talah, en Lybie

Tous les restes appartiennent à des organismes de moins de 500 grammes. Or les premiers grands anthropoïdes trouvés dans le Fayoum, en Égypte, datent de 31 millions d'années et ne pèsent guère plus de deux à trois kilogrammes. Ces nouvelles découvertes confortent l'idée que nos ancêtres anthropoïdes étaient très petits et qu'ils n'auraient grossi qu'à partir de 37 millions d'années.

Par ailleurs, les microprimates de Dur At-Talah partagent des caractères particuliers avec les Éosimiidés, des cousins asiatiques. Ils ont en outre été retrouvés avec une communauté de rongeurs archaïques elle aussi d'origine asiatique. Le fait que ces rongeurs soient partagés en plusieurs groupes non seulement suggère plusieurs vagues migratoires, mais illustre aussi la diversité plus grande produite par les immenses espaces asiatiques. Des mécanismes de spéciation similaires expliquent-ils la diversité de la communauté d'anthropoïdes de Dur At-Talah ? L'histoire des anthropoïdes en Afrique est comparable à celle de ces microrongeurs d'origine asiatique ? C'est l'avis des chercheurs, qui partent maintenant à la recherche d'antécédents, qu'en Asie, des ancêtres des premiers anthropoïdes africains.

→ F.S.

J.-J. Jaeger et al., *Nature*, vol. 467, pp. 1096-1098, 2010

Physique

Transition de phase continue dans un ferroélectrique

On a découvert un changement continu de polarisation dans un matériau ferroélectrique.

Les molécules qui constituent les matériaux ferroélectriques portent des dipôles électriques alignés, ce qui crée une polarisation électrique dont on peut changer la direction en appliquant un champ électrique externe. Les théoriciens y voient un modèle pour étudier les transitions de phase. Pour les industriels, les applications potentielles des ferroélectriques sont nombreuses : stockage d'information binaire, capteurs, catalyseurs commutables, électronique à basse puissance...

Toutefois, ces utilisations nécessitent de bien comprendre comment se fait le changement de polarisation. Une équipe du Laboratoire américain d'Argonne, de l'Université d'Illinois du Nord et de l'Université Paul Cézanne/IM2NP à Marseille, apporte une réponse grâce à un dispositif qui lui permet d'observer l'inversion de polarisation dans un film ferroélectrique ultramince.

En théorie, l'inversion se produit soit par apparition et croissance de domaines dont la polarisation change brusquement de sens tout en conservant la même amplitude – la nucléation –, soit de façon continue, par diminution progressive de l'amplitude de polarisation de l'ensemble du matériau, annulation puis augmentation progressive jusqu'à l'amplitude initiale, mais de sens opposé. Seul le premier scénario avait été observé. Les physiciens ne parvenaient pas à déterminer avec précision l'amplitude de champ à l'intérieur de films ultraminces.

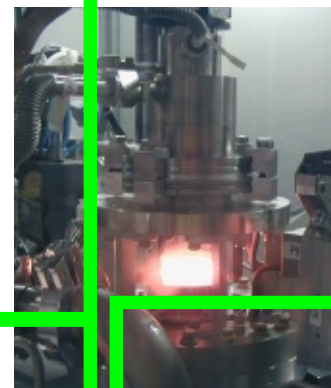
Les chercheurs ont pallié cette difficulté en étudiant l'inversion de polarisation d'un film ferroélectrique ultramince avec des rayons X produits par une source synchrotron. Du profil de la diffusion des rayons X, ils ont déduit

l'amplitude et la direction de polarisation dans le matériau ferroélectrique. Ils ont ainsi non seulement observé une transition continue d'une direction de polarisation à une autre, mais aussi montré qu'il n'est pas nécessaire d'appliquer un champ électrique pour provoquer l'inversion de polarisation : le film est si mince qu'il suffit de modifier la charge électrique en surface, en contrôlant la teneur en ions du milieu environnant.

Ces travaux devraient permettre d'améliorer le contrôle de l'inversion de polarisation des ferroélectriques et d'obtenir des dispositifs nanométriques polarisés et stables – deux facteurs clés pour les industriels. Quant aux théoriciens, ils devraient maintenant pouvoir approcher un peu plus précisément la stabilité lors d'une transition de phase.

→ Marie-Neige Cordonnier

M. Higgins et al., *Physical Review Letters*, vol. 105, 167601, 2010



La chambre à haute température où est fabriqué le film ultramince de titane et de plomb. L'échantillon est ensuite refroidi à une température comprise entre 250 et 600 °C, et l'inversion de polarisation électrique obtenue en ajustant la teneur en oxygène de l'atmosphère.

Biologie

Un filet d'ADN pour des cellules kamikazes

Dans le sang, des globules blancs nommés neutrophiles forment une des premières lignes de défense de l'immunité innée contre les micro-organismes. En 2004, l'équipe de Volker Brinkmann et Arturo Zychlinsky, de l'Institut Max Planck de biologie des infections de Berlin, a découvert qu'ils émettent dans le milieu extracellulaire des filaments composés d'ADN et de protéines lorsqu'ils sont activés. Ces filaments forment un filet, ou NET (pour *Neutrophil Extracellular Trap*, piège extracellulaire de neutrophile, *net* signifie filet en anglais) pour des bactéries et des virus.

Les chercheurs décrivent aujourd'hui les mécanismes permettant la formation d'une telle structure. En présence de bactéries, des formes réactives de l'oxygène sont produites. Elles endommagent les bactéries, mais ont aussi une autre action. Elles entraînent la libération d'une enzyme à partir de granules cytoplas-

miques du neutrophile. Cette enzyme, l'élastase, passe dans le noyau où elle agit sur la fibre qui associe ADN et protéines. En conséquence, l'ADN se « débolit ». L'élastase contribue de la même manière à la mort du neutrophile permet l'éjection du filet d'ADN vers le milieu extérieur et les agresseurs.

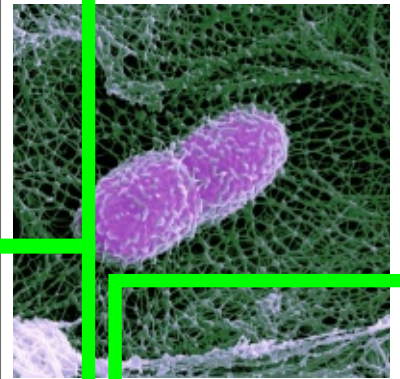
Les chercheurs ont exposé des souris à des bactéries pathogènes, *Klebsiella pneumoniae*. En observant les voies respiratoires des animaux malades, les biologistes ont visualisé de nombreux neutrophiles et des filets témoignant de leur activité antibactérienne. Inversement, chez les souris qui avaient inactivé le gène de l'élastase, ils n'ont pas observé la présence de ces filets destructeurs.

Cette expérience confirme le rôle central de l'élastase dans la formation de ces filets. Elle montre plus complètement que les filets des neutrophiles ont une fonction physiologique, ce que l'on pourrait faire par

imagerie grâce à des marqueurs fluorescents, souligne Jamel El Benna, de l'INSERM U773, à Paris.

→ J.-J. P.

El Benna, J. et al., *J. Cell. Biol.*, vol. 191, pp. 677-691, 2010



vue au microscope électronique d'une bactérie *Klebsiella pneumoniae* (en rose) prise dans le filet (en vert) d'ADN et de protéines d'un neutrophile.

Le consensus en sciences, dynamique ou obstacle ?

avec Jean-Pierre Aubin
autour de son essai **La mort du devin, l'émergence du demiurge**

et
Jean-Michel Besnier,
professeur de philosophie, université Paris-Sorbonne et CREA (École polytechnique/CNRS)
Georges Haddad,
mathématicien, directeur des enseignements supérieurs à l'UNESCO
Jean-Pierre Kahane,
professeur émérite de mathématiques, université de Paris-Sud et membre de l'Académie des sciences
Jacques Weber,
économiste et anthropologue, chercheur au CIRAD et enseignant à l'Ehess.

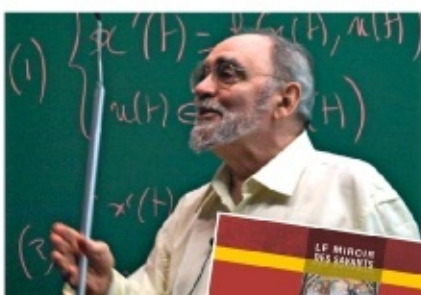
Débat animé par Michèle Chouchan

Jeudi 20 janvier 2011 à 18h30,
à la librairie Eyrolles, 57-59 Bd Saint-Germain, Paris 5^e

Entrée gratuite inscrivez-vous au 01 44 41 11 74,
ou à conference@eyrolles.com, ou directement auprès de nos libraires

LIBRAIRIE EYROLLES BEAUCHESNE

Débat-Dédicace



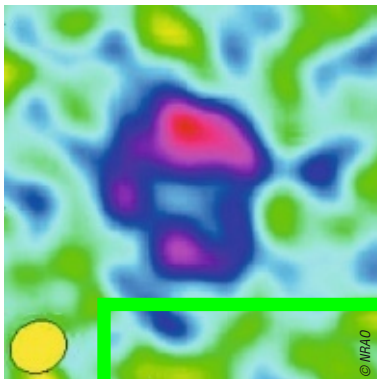

Parution novembre 2010
900 pages
Prix de lancement 39 €
valable jusqu'au 28 février 2011,
ensuite 64 €

Astrophysique

Une galaxie lointaine découverte en ondes radio

Sur des gamma, pulsars, rayonnement de fond cosmologique... Quelques-unes des plus belles découvertes en astronomie sont le fruit du hasard : les observations qui les ont mises en évidence étaient initialement conçues pour tout autre chose. C'est ce qui vient d'arriver, toutes proportions gardées, à l'équipe de Jean-François Lestrade, de l'Observatoire de Paris : en recherchant des disques de débris autour d'étoiles proches, les astronomes ont découvert la galaxie la plus intense de l'hémisphère Nord. Elle date d'une époque où l'Univers avait à peine 1,3 milliard d'années et présente une flambée de formation d'étoiles massives.

Les astronomes ont découvert cette source intense avec le radiotélescope de 30 mètres de l'Institut de radioastronomie millimétrique (IRAM) situé dans la Sierra Nevada, en Espagne. Cette source visible en ondes radio n'était pas en fait une étoile, mais après avoir éliminé d'autres hypothèses, les astronomes ont supposé qu'il s'agissait d'une galaxie active très lointaine, fabriquant un grand nombre d'étoiles massives, lesquelles explosent en supernovae et



Avec une meilleure résolution spatiale, la galaxie nouvellement découverte pourrait ressembler au quasar PSS J2322-1944, ici observé par le Very Large Array à la longueur d'onde de 1,3 mm. La raie du monoxyde de carbone. Amplifiée par une lentille gravitationnelle, ce quasar forme un anneau d'Einstein.

inondent la galaxie de poussière et de gaz moléculaire, notamment de monoxyde de carbone. Les raies d'émission de cet énorme réservoir hypothétique de gaz et de poussière devaient être décelables en ondes radio.

Effectivement, les astronomes ont détecté les raies d'émission du monoxyde de carbone dans une bande du spectre radio (due à l'expansion de l'Univers) signifiant que la galaxie source est très éloignée : les photons ont été émis lorsque l'Univers avait le dixième de son âge actuel, soit il y a 12,3 milliards d'années environ.

De cette distance, on déduit que la luminosité totale de cette galaxie dans l'infrarouge lointain équivaldrait à 400 000 milliards de soleils. Cette valeur est bien trop élevée pour être réelle. Elle ne peut s'expliquer que par l'existence d'une lentille gravitationnelle, c'est-à-dire un objet massif situé sur le trajet de la lumière émise par la galaxie lointaine, qui courbe les rayons lumineux et les focalise, amplifiant ainsi artificiellement l'intensité de la source. Reste à déterminer le coefficient d'amplification de la lentille gravitationnelle. Nous saurons alors si cette galaxie étonnante tient dans le rang, ou s'il s'agit réellement d'un objet atypique.

→ Ph. R.-G.

J.-F. Lestrade et al., *Astronomy and Astrophysics*, 2010 (arXiv: 1009.044v2)

Biomécanique

La marche de Neandertal reconstituée

Le LABO, c'est-à-dire le Laboratoire d'anatomie, biomécanique et organogénèse de la Faculté de médecine de l'Université Libre de Bruxelles, vient de montrer que les Néandertaliens marchaient comme les hommes modernes.

Si l'on ne doutait pas que l'homme de Neandertal marchait et courait, les membres inférieurs auraient pu fonctionner différemment de ceux de l'homme moderne. Pour tester cette possibilité, Tara Chapman, Serge Van Sint Jan, Patrick Semal et leurs collègues ont créé un modèle de jambes néandertaliennes à partir de os fossiles de Spy II (découvert en Belgique), de Kebara 2 (Israël) et de Neandertal 1 (Allemagne).

Après avoir tomographié les os des membres inférieurs, ils ont procédé à une reconstitution tridimensionnelle de ces os sur ordinateur ; une mise à l'échelle et certains réglages leurs ont permis de rendre cohérentes les tailles et les configurations de ces os issus de modèles différents. Les jambes néandertaliennes virtuelles ainsi obtenues ont ensuite été mises en mouvement à l'aide d'un logiciel développé au LABO pour analyser la marche de personnes souffrant de troubles musculo-squelettiques. La marche néandertalienne reproduit à l'échelle

comparée aux mouvements des membres inférieurs d'individus modernes et de bonobos.

Les chercheurs ont constaté que le marcheur néandertalien virtuel a la même enjambée qu'un marcheur actuel, très supérieure à celle des bonobos. Tous les comportements des différentes composantes de la marche sont en adéquation avec le fonctionnement d'une jambe moderne. Cela dit, à taille égale, le squelette néandertalien reconstruit suggère qu'il était plus robuste que celui des hommes modernes. Cette robustesse constitutive entraîne un

placement anormal de nombreuses insertions musculaires. Les biomécaniciens ont constaté que ces insertions sont anormalement proches des articulations des couples parfois bien plus importants qu'chez *Homo sapiens*.

Selon Van Sint Jan, à puissance égale, un Néandertalien dépensait moins d'énergie mécanique. Puisque les jambes des deux espèces fonctionnent de façon similaire, les Néandertaliens étaient vraisemblablement aussi mobiles que l'homme moderne, même si l'agilité de la jambe dépend aussi de l'entraînement et du cerveau qui la contrôle.

Un autre facteur – l'usage de chaussures – a pu jouer un rôle : Erik Trinkaus, de l'Université Washington à Saint Louis, aux États-Unis, pense avoir mis en évidence que les phalanges des petits orteils sont devenues de plus en plus grandes au cours d'une période allant du début du Paléolithique inférieur jusqu'à l'époque moderne, il y a entre 35 000 et 8 000 ans. En effet, le port de chaussures atténue la réaction du sol supportée par le petit orteil, ce qui expliquerait son évolution.

→ F.S.

www.dedeb.ac.be/db/revue/communiques.cfm



Un homme de Neandertal aux prises avec la neige. Il semble qu'il marchait en dépensant moins d'énergie que l'homme moderne.

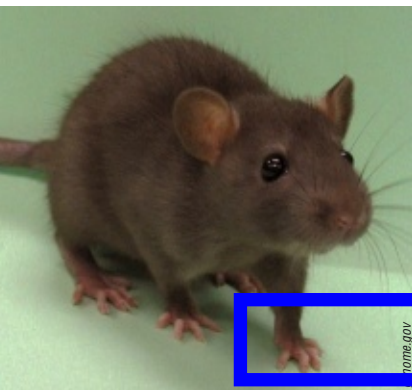
En bref

FARINE DE 30 000 ANS

Sur trois sites archéologiques européens du Paléolithique moyen-supérieur, des chercheurs italiens, russes et tchèques ont détecté, sur des pierres identifiées comme des pilons et des mortiers, des grains d'amidon. Les grains proviendraient de diverses racines, tel le rhizome de roseaux à massette et de fougères. Les racines étaient probablement pelées, séchées, broyées et cuites, étapes nécessaires pour éliminer leur toxicité et augmenter l'apport calorique.

ÇA SENT LE VINAIGRE !

On n'attire pas les mouches avec du vinaigre ? L'adage est à revoir ! Johannes Söhl, de l'Institut Max Planck pour l'écologie chimique, à Jena, en Allemagne, et ses collègues, ont montré qu'une fleur, *Arum palaestinum* libère des fragrances rappelant le vinaigre pour attirer spécifiquement des mouches drosophiles, c'est-à-dire les mouches du... vinaigre. De fait, le bouquet de l'arum et des composés obtenus par fermentation activent les mêmes régions du système nerveux de l'insecte.



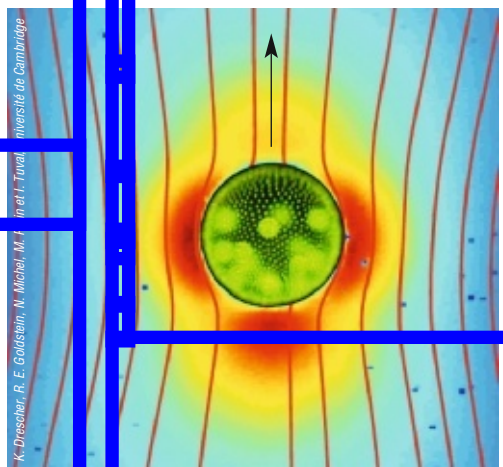
L'empreinte de l'environnement sur les gènes se transmettent des pères à leurs filles

Biophysique

Dans le sillage agité des algues nageuses

De nombreux micro-organismes peuplent les mers, les lacs ou... nos intestins. Chacun, en se déplaçant, crée des courants qui influent sur les mouvements de ses congénères. Les mouvements collectifs engendrés conditionnent la survie et la croissance des colonies en facilitant l'accès aux nutriments et à l'oxygène; dans les océans, le brassage produit par le plancton et les microalgues favorise l'absorption du dioxyde de carbone dissous par le phytoplancton et la production d'oxygène qui en découle. En mesurant en vidéo-microscopie les courants produits par des micro-organismes en mouvement, deux équipes ont constaté que l'influence d'un micro-organisme sur son environnement est complexe : les courants créés varient selon l'organisme, voire au fil du mouvement d'un même organisme.

La première équipe, de l'Université de Cambridge, en Grande-Bretagne, a mesuré la vitesse moyenne de microbilles en suspension autour de deux microalgues : *Volvox carteri*, une algue sphérique de 400 micromètres de diamètre se déplaçant grâce à un millier de petites cellules flagellaires réparties sur sa surface, perturbe le fluide sur un plus vaste rayon et plus fortement que prévu à très courte distance; quant à *Chlamydomonas reinhardtii*, une algue verte unicellulaire de 10 micromètres de longueur nageant la «brasse» à l'aide de deux flagelles, elle crée des tourbillons sur les côtés et un courant devant elle.



En nageant avec ses nombreux flagelles, la microalgue *Volvox carteri* (en vert) anime le milieu (lignes rouges) et augmente sa vitesse (la vitesse est d'autant plus grande que le fluide est rouge).

La seconde équipe, du Collège Haverford, aux États-Unis, a analysé la vitesse de microbilles similaires durant un mouvement de «brasse» de *Chlamydomonas reinhardtii* : en un mouvement, l'algue non seulement crée les tourbillons et le courant décrits par l'équipe de Cambridge, mais, en ramenant ses flagelles le long de ses parois, inverse le sens de ces écoulements. Les chercheurs ont également observé des comportements observés. Reste à étendre l'étude à un ensemble de plusieurs organismes ou à d'autres structures telles que les bactéries ou le plancton.

→ M.-N. L.

K. Drescher et al., *Physical Review Letters*, vol. 105, 168101, 2010;
J. Guasto et al., *Physical Review Letters*, vol. 105, 168102, 2010;
D. Saintillan, *Physics*, doi: 10.1103/Physics.3.84, 2010

Génétique

Pères gras, filles diabétiques ?

Chez l'animal, des mères obèses durant la gestation et la lactation enfantent plus souvent que la normale des petits atteints eux-mêmes d'obésité ou de maladies métaboliques à l'âge adulte. Le surpoids des pères a-t-il aussi un effet sur la descendance ? Probablement, montre l'équipe de Margaret Morley, à l'Université des Nouvelles Galles du Sud, à Sydney : des femelles de rats sont plus souvent atteintes de diabète et leur genreur a été nourri trop grassement.

Les chercheurs australiens ont soumis neuf rats mâles à un régime

hyperlipidique pendant quatre semaines, et huit rats contrôles à un régime normal, puis les ont mis chacun en présence d'une femelle nourrie normalement, pour qu'ils se reproduisent. Les descendants femelles ainsi obtenus ont présenté, à partir de quatre semaines, deux signes de diabète dont l'intensité a augmenté avec l'âge. La cause en était la réduction du volume des îlots de Langerhans, qui, dans le pancréas, produisent l'insuline. De plus, l'expression de plusieurs centaines de gènes y était anormale.

Ces résultats suggèrent que des changements chimiques, dits épi-

génétiques, sont intervenus dans l'ADN des spermatozoïdes des pères : des variations de la méthylation de l'ADN (la fixation de groupes méthyle en différents sites de la molécule), qui perturbent l'expression de certains gènes. Ainsi, en modifiant l'expression des gènes paternels, l'alimentation exercerait des effets d'une génération de rats à la suivante. Chez l'homme, il est vraisemblable que des facteurs liés au mode de vie influent aussi sur la régulation épigénétique et l'expression des gènes.

→ J.-J. P.

S.-F. Ng et al., *Diabetes*, doi: 10.2337/db09-1111, 2010

tamaco

small size agency, big market

COMMUNIQUER LA SCIENCE ET LES TECHNOLOGIES EST UN MÉTIER ! NOUS EN AVONS FAIT LE NÔTRE...

communication scientifique
relations presse
conseils
innovation

tamacoscience

communication institutionnelle
communication d'entreprise
identité visuelle

tamacodesign

design interactif
lancement de produits
site web
vidéo

tamacolab

événements scientifiques
logistique & organisation
congrès BtoB
...

tamacoevents

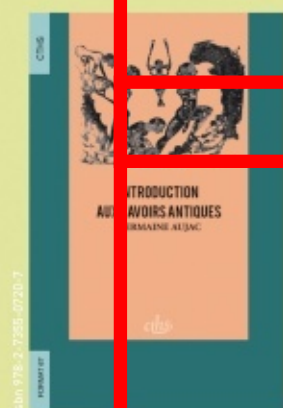
PARIS
AIX-EN-PROVENCE

187 RUE DU TEMPLE 75003 PARIS, T. +33 (0)6 98 38 89 01
24 RUE EMERIC DAVID 13100 AIX-EN-PROVENCE, T. +33 (0)4 42 61 11 24

www.tamaco.fr

Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques

la plus importante collection d'instruments de travail pour la recherche en sciences humaines



● Introduction aux savoirs antiques

Germaine Aujac

Vaste et approfondie, toujours concrète, la culture générale du citoyen réco-romain continue de nous surprendre. Cette étude explore l'usage que les Anciens faisaient de leurs connaissances théoriques et pratiques au quotidien. Elle montre aussi, textes à l'appui, que leurs préoccupations n'étaient curieusement pas si éloignées des nôtres.

Spécialiste de géographie grecque et d'astronomie sphérique, Germaine Aujac s'intéresse ici à l'élaboration d'un idéal de civilisation sur plus de huit siècles d'Antiquité, d'Hésiode à Marc-Aurèle.

399 p., 17 x 18,5 cm, 15 €



● Nature du monde, dessins d'enfants

Hélène Paganzy, Stéphanie Carrière

et Catherine Sabinot [dir.]
À l'initiative d'anthropologues, cet ouvrage rassemble plus de deux cents dessins réalisés par des enfants de onze régions du monde. Munis de feutres, de crayons de gouache et de papier à dessin, ils ont livré leurs conceptions et leurs perceptions d'une nature familière, domestique ou sauvage. Utilisant leurs connaissances fines du contexte socioculturel ou écologique, les chercheurs nous livrent des clés permettant de décrypter chaque représentation géographique. Au-delà des savoirs sur les natures et les cultures du monde, ces dessins nous étonnent et nous invitent à l'observation.

264 p., ill. couleur, 24 x 22 cm, 27 €



● Des images et des mots : les documents figurés dans les archives

Christiane Demeulenaere-Duyère, Martine Plouvier et Cécile Souchon [dir.]

Depuis les sceaux du Moyen Âge et les enluminures des chartes royales jusqu'à la moderne Marianne courant au frontispice des documents officiels contemporains, l'image est une marque du pouvoir. Mais de tout temps, l'Administration a aussi utilisé dessins et photographies pour informer, garder une trace, justifier une action, faire de la propagande...

Cet ouvrage apporte une contribution précieuse à l'iconographie administrative et documentaire, étudiée et questionnée en considération des principales missions des services d'archives : collecter, conserver, valoriser.

430 p., ill. noir et blanc, 17 x 22 cm, 35 €



● Voyages et voyageurs

Sources pour l'histoire des voyages

Thérèse Carmasson [dir.]

Qu'il s'agisse de voyages dans des pays lointains ou proches, voyages d'explorations, expéditions ou missions scientifiques, voyages d'études, voyages diplomatiques et voyages d'agrément ou de déplacements dans les limites du territoire national, les sources de l'histoire des voyages, dans les différentes acceptions de ce terme, sont multiples et souvent dispersées. Cet ouvrage attire l'attention sur un certain nombre de sources qui, bien que relevant de disciplines différentes, que rassemble un même intérêt pour le voyage, à quelque discipline qu'ils se rattachent.

392 p., ill. noir et blanc, 17 x 22 cm, 29 €



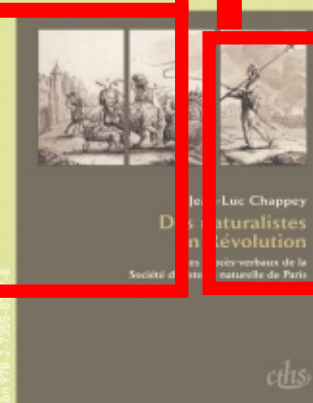
● Claude Aubriet, artiste naturaliste des Lumières

Aline Hamon-Mahieu

Avec le fin de *xviii* siècle, l'histoire naturelle émerge en tant que véritable science. Nommé « peintre du roi », Claude Aubriet collabora, sous l'égide de l'Académie royale des sciences, avec plusieurs académiciens de renom : Tournefort, qu'il accompagna pour un voyage de plus de deux ans au Levant, Jussieu, Vaillant, Réaumur...

Cet ouvrage s'appuie sur une iconographie variée, choisie dans un demi-siècle de travail acharné au service des savants.

217 p., ill. couleur, 21 x 27 cm, 35 €



● Des naturalistes en Révolution

Les procès-verbaux de la Société d'histoire naturelle de Paris (1790-1798)

Luc Chappey

Ces procès-verbaux constituent des sources exceptionnelles pour analyser une période riche en transformations théoriques et méthodologiques. Permettant de mettre à distance certains stéréotypes et les interprétations canoniques véhiculés par l'histoire des sciences, ces sources précieuses permettent de confirmer l'importance de l'histoire naturelle dans les dynamiques tant scientifiques que politiques de la Révolution française.

346 p., 21 x 27 cm, 28 €

Climatologie

Les vents soufflent moins fort

Dans la plupart des régions continentales de l'hémisphère Nord, la vitesse des vents de surface a diminué en 30 ans (entre 5 et 18 pour cent), en partie en raison de l'augmentation de la couverture forestière. C'est ce que concluent Robert Vautard et ses collègues du Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement, à Gif-sur-Yvette, et du Centre européen de prévision météorologique à moyen terme (CEPMET), à Reading, en Grande-Bretagne.

Les chercheurs ont analysé les mesures de vitesse du vent effectuées entre 1979 et 2008 à dix mètres au-dessus du sol, dans 822 stations météorologiques. Il apparaît que les vents de surface, notamment les plus forts, ont diminué dans les zones tempérées de 10 pour cent en moyenne en 30 ans : 8,7 pour cent, par exemple, en Europe. Cela confirme à une échelle semi-globale un phénomène jusque-là observé à l'échelle régionale, notamment en Chine, aux Pays-Bas ou en Australie.

Divers arguments suggèrent que la régression des vents de surface est due, non à une variation de la circulation générale de l'atmosphère, mais à des changements de la « rugosité » de surface des régions concernées. Les chercheurs ont effectivement remarqué que les régions où le vent a le plus dimi-

nué sont celles où la végétation (repérée par l'indice normalisé NDVI), suivie par satellites, a le plus augmenté : la baisse est trois fois supérieure dans les zones d'indice élevé que dans celles où il est faible. Ainsi, l'augmentation de la couverture végétale dans les zones tempérées – moindre déforestation, superficies jadis agricoles regagnées par des fourrés puis des forêts – rendrait compte de 25 à 60 pour cent du déclin des vents.

→ J.-J. P.

Nature Geoscience, vol. 3, pp. 756-761, 2010



La réduction des vents aura-t-elle des répercussions sur la production d'énergie par les éoliennes ?

Paul Chyan, U.S. Geological Survey

Biologie

Comment se forme un cil cellulaire ?

La plupart des cellules de l'organisme ont un cil primaire, c'est-à-dire une sorte d'antenne portant à sa surface des récepteurs qui détectent des substances de l'environnement cellulaire. Comment se forme ce cil ? Manuel Théry, du Laboratoire de physiologie cellulaire et végétale au Commissariat à l'énergie atomique de Grenoble, et ses collègues ont montré que la forme des cellules contrôle l'apparition du cil primaire.

Le cœur du cil, l'axonème, est constitué de microtubules qui lui confèrent sa tenue mécanique et guident le transport de molécules. Il naît d'une structure cellulaire nommée centrosome. Celui-ci s'ancre dans la membrane cytoplasmique, s'allonge et donne naissance au cil primaire. Les cellules formant un tissu se divisent et prolifèrent. À certaines étapes du développement, elles arrêtent de se diviser et entrent dans une phase de repos, ou « quiescence ». C'est à ce moment que le centrosome engendre la croissance du cil primaire.

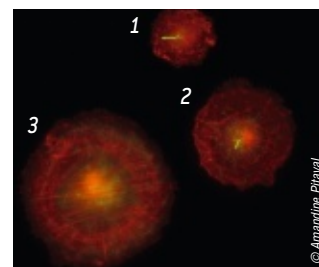
On pensait que c'était l'arrêt de la prolifération qui déclenchait la formation de ce cil. Mais il n'en est rien : l'apparition du cil, au moment où la cellule est quiescente, dépend des contraintes spatiales imposées à cette cellule. Les biologistes grenoblois ont montré que seules les cellules confinées dans un espace réduit assemblent un cil ;

les cellules libres d'occuper un espace plus grand ne le font pas. Pourquoi ? Quand des cellules sont confinées, leur réseau d'actine – les fibres de soutien – forme à leur surface dorsale (au-dessus du noyau) une structure nommée pôle apical. Le centrosome s'y dirige et y assemble le cil.

En revanche, lorsque les cellules ont davantage de place, le réseau d'actine ne produit pas de pôle apical. Le centrosome migre alors contre la surface ventrale (au-dessous du noyau) de la cellule et ne parvient pas à assembler le cil. C'est donc l'organisation spatiale du réseau d'actine et de microtubules, en réaction à la géométrie de l'environnement cellulaire, qui détermine la capacité des cellules à former un cil primaire.

→ B. S.-L.

J. Cell. Biol., vol. 191, pp. 303-312, 2010



Un cil primaire (en vert) est visible sur les deux petites cellules épithéliales de rétine (1 et 2, en rouge, le réseau d'actine). Aucun cil ne se forme dans la grosse cellule moins confinée (3).

© Amandine Pivaval

DERNIÈRE minute ...

LA CHARGE ANNULÉE PAR LA GRAVITÉ

En électrodynamique quantique, la charge de l'électron caractérise l'intensité de l'interaction électron-photon. Sa valeur dépend en fait de l'échelle d'énergie en jeu. Que devient-elle à très haute énergie ? Une analyse de David Toms, de l'Université de Newcastle, en Grande-Bretagne, montre que des corrections quantiques dues à l'interaction gravitationnelle font tendre

vers zéro la charge électrique quand l'énergie augmente. Un résultat qui confirme des études restées controversées.

NARBONNE, UN PORT ANTIQUE IMPORTANT

Déjà connue, l'importance du port antique de Narbonne se confirme. Une équipe mixte du CNRS, de l'INRAP et de l'Université de Montpellier vient d'y découvrir une zone portuaire

dédiée au transfert du vin, une plage aménagée pour l'accostage des embarcations légères et divers équipements portuaires dont des appontements, les ancrages d'une machine élévatrice, plus de 200 pieux...



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

Retour sur des sujets déjà traités dans nos colonnes

→ DES NANOTUBES

CELLULAIRES ÉLECTRIQUES

Qu'étaient ces colonnes minuscules et minuscules initiales, les cellules communiquent entre elles en formant des synapses, voire des nanotubes (voir *Dialogue entre cellules immunitaires*, *Pour la Science*, mars 2006, <http://bit.ly/plsoer341>). Ces structures, identifiées pour la première fois en 2004, sont formées de membranes cellulaires. Elles constitueraient un système de communication sur de longues distances, permettant à deux cellules d'échanger de petites molécules, mais leur rôle précis reste inconnu. En enregistrant l'activité électrique de tels tubes reliant deux cellules rénales de rat en culture, des scientifiques norvégiens ont montré que les nanotubes connectent électriquement deux cellules : ils transportent un signal électrique dans les deux sens sur des distances allant de 10 à 70 micromètres (*PNAS*, 20 septembre 2010). En outre, les nanotubes existeraient pour diverses cellules animales et naîtraient au niveau de jonctions cellulaires dites communicantes ou gaps, c'est-à-dire des canaux dans les membranes des cellules. Voilà un mécanisme possible de synchronisation électrique des cellules à distance.

→ LE CORBEAU UTILISE

UN OUTIL POUR BIEN MANGER

La réputation des corbeaux et des corneilles – de proches cousins – n'est plus à faire : ce sont des oiseaux intelligents, c'est-à-dire qu'ils ont un cerveau bien développé, sont capables de comportements innovants, ont une compréhension cohérente de leur environnement physique et vivent en groupes sociaux complexes, où chaque individu a une idée de ce qui se passe dans l'esprit de ses congénères. Le corbeau calédonien (un petit corvidé endémique à la Nouvelle-Calédonie) est de ceux-là : il fabrique et utilise des outils pour chercher sa nourriture. Par exemple, il découpe des sortes de « fourchettes à escargots » dans des feuilles et utilise ces branchettes de façon que leur extrémité pré-

→ COUP FRANC EN SPIRALE

Plusieurs joueurs de football sont capables de brosser leur ballon pour lui imprimer une trajectoire courbe (voir *L'art du ballon bien brossé*, *Pour la Science*, juin 2004, <http://bit.ly/plsoer320>). Mais rien n'égale le coup franc de Roberto Carlos lors d'un match France-Brésil en 1997. Le ballon frappé de face avec l'intérieur du pied gauche, part vers la droite du tireur et effectue une courbe vers la gauche. Il semble cependant manquer la cage quand sa trajectoire s'incurve brusquement : le ballon frappe le poteau et rentre dans les filets. Le gardien français, Fabien Barthez, n'a pas bougé. Des physiciens français ont étudié ce phénomène et l'expliquent (*New Journal of Physics*, 2 septembre 2010) en le reconstituant avec de petites balles de plastique tournant sur elles-mêmes et tirées à grande vitesse dans de l'eau. Les chercheurs ont trouvé de nouvelles équations décrivant une trajectoire en spirale lorsqu'une sphère en rotation traverse un fluide à grande vitesse. L'effet Magnus explique déjà pourquoi une balle avec de l'effet adopte une trajectoire courbe : en tournant sur elle-même, la balle entraîne les filets d'air qu'elle traverse. Ces derniers sont accélérés d'un côté de la sphère et ralentis de l'autre. Cette différence d'écoulement crée une légère dépression qui attire la balle vers l'intérieur de la trajectoire, laquelle dessine une spirale exponentielle. Mais, dans le cas de ce coup franc, un autre phénomène survient. Quand la vitesse de la balle est suffisamment réduite, la courbure de la trajectoire augmente et la vitesse de rotation diminue : le ballon s'inscrit alors, de façon brutale, sur une spirale différente. En outre, les physiciens précisent qu'un tel coup franc n'est possible qu'à partir d'une certaine distance : environ 35 mètres. Celle justement qui séparait Roberto Carlos du but de F. Barthez...



© Shutterstock/Intokola

sente un crochet (voir *Rusé comme... un corbeau*, *Pour la Science*, octobre 2004, <http://bit.ly/plsoer324>). Ce genre de baguette lui permet notamment de déloger des larves de coléoptères hors de trous

d'arbres pourris. Mais ce comportement, qui se transmet de génération en génération, est long à apprendre pour les jeunes et difficile à mettre en œuvre, même pour un adulte expérimenté. Alors pourquoi se donner tant de mal pour se nourrir ?

Des chercheurs anglais ont déterminé la composition des repas des corbeaux en analysant certains isotopes, d'azote notamment, dans les plumes et le sang des oiseaux (les larves portent en effet dans leur flore intestinale des bactéries particulières fixant l'azote). Ainsi, quelques larves suffisent aux besoins énergétiques quotidiens d'un corbeau, tant elles sont riches, en lipides notamment (*Science*, 16 septembre 2010). Le corbeau tire donc un avantage rapide et important de sa récolte de larves. Les chercheurs ont d'ailleurs montré que pour ce faire, le corbeau pique la larve dans son trou avec la baguette jusqu'à ce que la proie se dégage et morde le bâton s'accroche à l'objet ; le corbeau retire alors le bâton et déguste son repas.



Simon Waller

Avec cette baguette, le corbeau importune une larve pour qu'elle s'accroche au bâton : il la remontera alors pour la consommer.



Futura-Sciences, le magazine de la découverte, de la science et de l'innovation

WWW.FUTURA-SCIENCES.COM



- **Actualités** : l'actu des sciences et des technologies analysée en continu.
- **Dossiers** : du réchauffement climatique à la grippe A, les enjeux clés en images avec plus de 800 dossiers.
- **Forums** : 50 forums thématiques pour poser toutes vos questions et échanger avec 300 000 membres.
- **Questions / réponses** : des réponses simples à des questions du quotidien.
- **Services** : fonds d'écran, cartes virtuelles, emploi, téléchargements, puzzles...



Retrouvez tous ces thèmes sur
www.futura-sciences.com

Grippe A

Environnement

Nutrition

Jardinage

Réchauffement climatique

POINT DE VUE

Climat : distinguer incertitude et ignorance

Les conclusions du débat organisé par l'Académie des sciences autour de la question du réchauffement climatique rejoignent celles du GIEC.

Un pas vers un climat scientifique plus serein ?

Hervé LE TREUIT

La question du changement climatique est l'enjeu d'inquiétudes et d'intérêts allant bien au-delà de la science. La communauté scientifique a fait le diagnostic d'un risque climatique depuis les années 1970, sur la base d'éléments qui sont désormais peu contestés. La teneur atmosphérique en dioxyde de carbone et en plusieurs autres gaz à effet de serre ne cesse d'augmenter, après une période de quasi-stabilité durant les 10 000 dernières années de l'histoire de la planète. Dès 1979, un rapport de l'Académie des sciences américaine a montré que beaucoup de travaux scientifiques convergeaient pour indiquer qu'un doublement de la teneur en dioxyde de carbone suffirait à engendrer des évolutions climatiques majeures.

La conscience de ce risque a conduit à la création, en 1988, du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC), groupe de scientifiques bénévoles et constamment renouvelés chargé d'exprimer les éléments de consensus et de désaccord au sein de la communauté scientifique. Le GIEC a exploré largement les enjeux du problème climatique, des bases physiques du changement aux aspects socio-économiques, en passant par l'étude des impacts.

Le GIEC s'appuie sur une méthode qui a été améliorée au fil du temps et qui laisse une large place aux interactions et au partage d'information : revue des articles publiés dans des journaux à comité de lecture, rédaction de plusieurs synthèses d'un rapport reçu par un grand nombre de scien-

tifiques (dont les remarques sont étudiées et font systématiquement l'objet d'une réponse publique), élaboration d'un résumé « pour décideurs ». De plus, toutes les informations mentionnées dans le résumé doivent provenir du document complet, et le résumé doit faire consensus (aucun élément ne peut être intégré au résumé contre l'avis d'un quelconque des experts qui sont nommés à cet effet par chaque gouverne-

ment). Cette expertise collective est nécessaire, car chaque année plusieurs dizaines

LES ACADEMIES CONSTITUENT, par leur interdisciplinarité, l'un des lieux privilégiés pour un débat serein et approfondi.

de milliers d'articles scientifiques sur le changement climatique sont publiés, et aucune personne ne peut à elle seule les synthétiser. Enfin, un rapport récent d'un comité interacadémique sur la fonctionnement du GIEC en a validé la démarche et les résultats, demandant essentiellement d'en renforcer l'organisation.

Malgré tous ces mécanismes et le soin apporté à sa mise en œuvre, aucune expertise n'est possible sans qu'une confiance réelle ne soit accordée à la communauté scientifique. Personne ne peut refaire les calculs ni suivre en détail un argumentaire qui repose sur plusieurs décennies de travail, et il est nécessaire d'être convaincu que les scientifiques effectuant ce travail le font avec honnêteté et

compétence. De ce point de vue, les accusations que l'ensemble de la communauté scientifique travaillant dans le domaine de la climatologie se comporterait comme un clan soudé, mafieux, pour défendre des positions relevant d'une forme de complot, et parallèlement, la mise en doute de l'honnêteté de la démarche du GIEC, ont pu avoir une rôle dévastateur.

Une question se pose alors : où sont les lieux de contre-expertise ? Comment peut-on débattre de la légitimité d'une discipline scientifique dont les fondements seraient brusquement remis en question ? Certainement pas dans les médias grand public, du moins pas exclusivement. Le rôle des académies est essentiel de ce point de vue, puisqu'elles rassemblent des scientifiques de disciplines diverses, cette interdisciplinarité étant un gage d'indépendance. Elles constituent donc l'un des lieux privilégiés pour ce débat « serein et approfondi » que les scientifiques concernés ont appelé de leurs vœux au printemps 2010 en s'adressant à Valérie Pécresse, ministre de l'Enseignement supérieur et de la Recherche. En France, un autre lieu d'expertise pluridisciplinaire en situation de porter une telle démarche est le Comité national de la recherche scientifique.

L'Académie des sciences, saisie par la ministre, a alors organisé un débat qui a porté avant tout sur les méthodes de la recherche climatologique. Il ne m'appartient pas de commenter les modalités d'un débat dont je n'ai été qu'un des participants, sinon pour souligner le travail qu'il a réclamé aux personnes qui l'ont organisé et en ont signé le rapport.

(Jean Salomon, Alain Carpentier, Jean-Loup Pugeat et René Blanchet), et pour indiquer qu'il ne s'est pas limité à la journée de débat du 10 septembre, mais a été précédé et suivi d'un grand nombre de contributions écrites.

Ce rapport rejoint ceux des Académies américaine ou britannique. Il confirme les éléments principaux du rapport du GIEC (augmentation des gaz à effet de serre, évolution significative et conjointe d'un grand nombre d'indicateurs climatiques, rôle majeur des gaz à effet de serre dans cette évolution) et il aborde le rôle des modèles climatiques qui constituent un outil indispensable pour prédire ces évolutions dans le futur.

Il pointe aussi les éléments d'incertitude associés à ces prévisions. Ce point mérite commentaire. L'incertitude est un élément essentiel de l'articulation entre

le débat scientifique et les débats d'un autre ordre (débat citoyens, débats de valeur) qui doivent conduire aux prises de décision dans le domaine environnemental. Le mot « incertitude » apparaît souvent dans le rapport de l'Académie des sciences, comme il apparaît souvent dans le résumé pour décideurs du GIEC, et c'est un élément indissociable de toute démarche scientifique. Mais l'un des effets pervers les plus préjudiciables d'un débat scientifique qui s'enferme est de confondre incertitude et ignorance.

Il est nécessaire et légitime de ne pas se soucier de ce que l'on ignore complètement. En revanche, on ne peut considérer comme rassurant l'incertitude portant sur les contours détaillés d'un changement climatique, dont beaucoup d'éléments objectifs montrent qu'il est très probablement en

marche. Prenons un exemple concret. Comment réagir face à la perspective encore incertaine dans ses détails, mais que tous les modèles actuels prévoient, d'un assèchement du pourtour méditerranéen : en incitant à construire dès maintenant des infrastructures qui permettraient de s'y adapter, ou en attendant qu'une décennie de recherche ne vienne renforcer le diagnostic ? La décision n'a pas à être prise par les scientifiques, mais il s'agit bien de décisions qu'un comité scientifique dépassionné peut aider à prendre de façon rationnelle. ■

Hervé Le Treut, directeur de l'Institut Pierre-Simon Laplace, a aussi été membre de l'Académie des sciences et directeur de recherche au CNRS.

www.pourlascience.fr

ÉCONOMIE

Cherchez la justice

Les gens sont plus sensibles à l'équité qu'à l'efficacité. L'équité est en effet aisément vérifiable sur des points particuliers, alors que l'efficacité économique de l'ensemble est difficilement appréciable.

Ivar EKELAND

Du temps où j'étais président d'université, j'avais vite compris que mes administrés étaient infiniment plus sensibles à l'équité qu'à la gestion. Le budget de l'université n'intéressait guère que moi, mes proches collaborateurs, et quelques adversaires politiques. En revanche, quand il s'agissait d'allouer les maigres ressources de l'université, un bureau par-ci ou un demi-poste par-là, la moindre apparence de favoritisme déchaînait aussitôt la tempête, et il fallait de toute urgence monter sur le pont.

Je m'étais étonné à l'époque d'être jugé sur les petites choses plutôt que sur les grandes, et j'ai depuis été convaincu que

c'était assez raisonnable. La comptabilité peut être créative : entre les dépenses engagées, mais non encore payées, les recettes anti-



cipées, mais non encore rentrées, la trésorerie, les provisions et les amortissements, un président expérimenté peut toujours présenter le budget qui l'arrange. Les administrés, ne sachant pas trop si le surplus qu'on leur présente ne dissimule pas une situation difficile, ou si au contraire le déficit invoqué pour justifier des mesures d'économie n'est pas artificiel, s'en remettent plutôt à des choses qu'ils peuvent juger directement : comment le président traite-t-il les gens, comment arbitre-t-il les conflits, comment répond-il aux demandes de moyens ?

Je pense que la leçon a une portée générale. À l'heure où j'écris, manifestions et grèves contre la réforme des retraites en

France se succèdent depuis deux mois. Je ne sais pas encore quelle en sera l'issue, mais je vois bien que la contestation porte moins sur la loi elle-même que sur un contexte général qui est perçu comme inique.

C'est que la question des retraites est complexe. Il faut faire des choix politiques, arbitrer entre des intérêts divergents, nous contre nos descendants, actifs contre retraités, revenus du travail contre revenus du capital, et des choix économiques, régime général ou régime particuliers, retraite par capitalisation ou par répartition.

Les spécialistes eux-mêmes sont en désaccord et le citoyen peut se sentir perdu et s'interroger sur les intentions véritables de ceux qui le gouvernent. Dans ce contexte, apprendre que le fisc ferme l'œil sur les îles aux Seychelles, même si l'incidence directe sur le budget de l'État est minime, est un mauvais signal. Il confirme le citoyen dans ses soupçons et le conduit à rejeter l'ensemble du dispositif. Qui est inique dans les petites choses le sera aussi dans les grandes.

En d'autres termes, l'efficacité n'est pas vérifiable, mais l'équité l'est. Il y a là un paradoxe ; car si l'on a une idée précise de ce qu'est l'efficacité, il n'en est pas de même de l'équité. Pour l'économiste, une allocation de ressources, qu'il s'agisse d'une université ou de la société, est efficace si l'on ne peut pas redistribuer ces ressources de façon que chacun soit plus satisfait de son sort. Si s'agit d'un gâteau, par exemple, tout partage sera efficace pourvu que tout ait été distribué. Cela laisse une multitude de possibilités, de la solution dictatoriale (je prends tout pour moi) à l'égalitaire (toutes les parts sont égales). Toutefois, elles ne seront pas toutes équitables.

Bien entendu, on a envie de dire que la solution égalitaire est la seule équitable, mais qu'en est-il si le gâteau n'est pas homogène, de sorte que les parts peuvent être de taille égale et de contenu différent, ou si la société elle-même est hétérogène ? L'ouvrier de la onzième heure doit-il être traité comme les autres ?

En dépit de l'importance du sujet, il y a peu de travaux sur l'équité. Pour l'essentiel, on en est resté à Aristote, qui la définit comme l'art de traiter les égaux également, et les inégaux inégalement, à proportion des ressemblances et des différences qui sont pertinentes. Cette définition soulève plus de problèmes qu'elle n'en résout, à commencer par le premier : qui sont mes égaux ?

L'économiste ne peut pas répondre à cette question, mais une fois la réponse donnée, il peut s'interroger sur la manière de traiter les égaux également, voire en donner une formalisation mathématique. C'est le politique qui fixe les limites du terrain et les règles du jeu, l'économiste ne fait que suivre. Robert Fogel, prix Nobel en 1993, a montré que dans les États du Sud des États-Unis, l'esclavage était une activité qui était encore parfaitement rentable au moment de sa suppression : celle-ci fut donc un acte politique. Il n'y a pas de nécessité économique.

Ivar EKELAND est professeur d'économie.

DÉVELOPPEMENT DURABLE

Que devient le pétrole des marées noires ?

Face aux marées noires, ne surestimons pas les capacités d'autoépuration du milieu marin.

Jean OLIVOT

La dernière grande marée noire accidentelle, celle de la plateforme pétrolière *Deepwater Horizon* dans le golfe du Mexique, a libéré 600 000 tonnes de pétrole brut dans l'environnement, soit l'équivalent de trois *Amoco-Cadiz*, la pire catastrophe pétrolière survenue sur les côtes françaises, en mars 1978. Régulièrement se repose la question des conséquences de tels accidents, bien qu'ils ne représentent que cinq à dix pour cent de la pollution pétrolière. L'origine humaine – l'essentiel est dû à l'extrac-

tion, au transport et à l'utilisation des produits pétroliers, et au dégazage des navires. Chaque marée noire a ses propres caractéristiques, selon le volume et la composition chimique du pétrole répandu et les conditions environnementales du site de déversement. Toutefois, on peut tirer quelques enseignements communs.

D'où qu'il provienne, le pétrole comporte toujours des milliers de constituants, les hydrocarbures. Les pétroles dits légers contiennent jusqu'à 40 pour cent de molécules de faible masse molaire, tel le butane,

jusqu'à 50 pour cent d'hydrocarbures de masse molaire moyenne, comme les paraffines et les aromatiques à deux et trois cycles, et 10 à 20 pour cent de fractions lourdes, par exemple les asphaltènes. Les pétroles dits lourds ont des proportions inverses de fractions légères et lourdes.

Lorsque le pétrole est léger ou moyen, comme dans les cas de *Deepwater Horizon*, de l'*Amoco-Cadiz* et de l'*Exxon Valdez* (1989), plus de 30 pour cent de sa masse s'évapore en quelques jours à la surface de la mer. Les composés légers, surtout

les aromatiques, sont les plus toxiques pour les organismes marins à brève échéance (quelques semaines) ; et une très faible part se dissout dans l'eau de mer.

Deux phénomènes sont responsables de l'élimination des hydrocarbures contaminants : la photo-oxydation sous l'action du rayonnement solaire ultraviolet, et surtout la biodégradation microbienne. Lorsque le milieu est suffisamment aéré et que des éléments nutritifs sont disponibles, entre 30 et 70 pour cent des hydrocarbures restent après évaporation sont dégradés par des micro-organismes.

LES COMPOSÉS LOURDS

persistent des dizaines d'années dans les sédiments.

Ces derniers, surtout des bactéries, utilisent les hydrocarbures comme source de carbone et d'énergie. La biodégradation d'une nappe de pétrole dure de quelques semaines à quelques mois, voire des années lorsque l'oxygène manque, comme dans les sédiments vaseux. Elle est plus active lorsque le pétrole se trouve sous la forme d'une émulsion fine, formée de gouttelettes dispersées dans l'eau, ce qui se produit naturellement sous l'action des vagues et des courants, ou peut être favorisée par l'emploi raisonné de dispersants.

La biodégradation des molécules est le plus souvent complète : les hydrocarbures sont alors intégralement transformés en dioxyde de carbone et en eau. Il est possible en théorie de l'accélérer en apportant aux micro-organismes un supplément d'azote et de phosphore, ou en ensemençant le milieu naturel à l'aide de bactéries sélectionnées ou génétiquement modifiées, censées dégrader plus rapidement les hydrocarbures.

En réalité, le milieu marin côtier contient généralement assez d'éléments nutritifs. Et les organismes issus du laboratoire ne parviennent jamais à s'implanter dans le milieu naturel : ils entrent en compétition avec les bactéries du site, mieux adaptées aux conditions locales. La biorestauration n'est en fait pas nécessaire. Car dans tous les milieux étudiés, une seule population bactérienne, pré-

dominante après quelques jours en cas de marée noire, assimile progressivement tous les hydrocarbures biodégradables.

Peut-on en déduire qu'il ne reste plus trace d'une marée noire au bout de quelques années ? Non. D'une part, les composés lourds présents dans tous les pétroles ne sont pas biodégradables et persistent des dizaines d'années en profondeur, au fond des océans et dans les sédiments côtiers ; en outre, on fait s'ils sont jamais éliminés.

Parmi eux, les polycycliques saturés, les résines et les asphalènes sont en principe non toxiques ; mais il en va tout autrement des hydrocarbures aromatiques polycycliques lourds (HAP), cancérogènes.

D'autre part, lorsque le pétrole contient des molécules complexes, sa dégradation par les micro-organismes n'est pas complète. Elle produit des métabolites non dégradables dont la composition chimique et la toxicité ne sont pas connues. Eux aussi persistent dans le milieu. Aucune méthode de biorestauration ne parviendra à les dégrader.

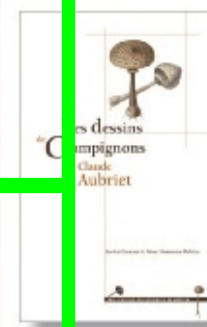
En définitive, tous les composés persistants, qu'ils soient trop stables ou complexes pour être dégradés ou qu'ils résultent de la biodégradation, finissent enfouis dans les sédiments côtiers ou profonds, avec des conséquences inconnues.

Ajouter que, dans le cas des marées noires provoquées par un fioul lourd, comme celles de l'*Érika* (1999) ou du *Prestige* (2002), les processus d'évaporation et de biodégradation éliminent que 10 à 20 pour cent de la masse. Presque tous les composés légers et moyens dégradables, ont été enlevés lors du raffinage, et les fractions lourdes non dégradables prédominent. L'enlèvement mécanique du pétrole, dans l'eau et sur le rivage, est alors la seule parade possible.

Ainsi, même si des mécanismes naturels limitent les conséquences des marées noires, il ne faut pas surestimer les capacités d'auto-purification du milieu marin.

Jean Durrant est professeur au Muséum national d'Histoire naturelle, à Paris, et travaille dans l'Unité moléculaire de communication et adaptation des micro-organismes (MCAM).

• J.-P. Vandecasteele, Microbiologie pétrolière, Éditions Technip, 2005.
www.cedre.fr



MUSÉUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE

Les dessins de Champignons de Claude Aubriet

Xavier Carteret & Aline Hamonou-Mahieu

Les documents manuscrits de la famille des Jussieu, professeurs de botanique au jardin du Roy puis au Muséum d'histoire naturelle ont été acquis en 1858 par le Muséum après la mort d'Adrien de Jussieu. Conservés à la Bibliothèque centrale du Muséum ils forment un fonds riche d'informations pour l'histoire des sciences, particulièrement celle du Jardin et celle de la Botanique. Parmi les plus anciens se trouve un portefeuille contenant 98 dessins de champignons, réalisés vers 1730, par Claude Aubriet sous la direction d'Antoine de Jussieu. Claude Aubriet, peintre miniaturiste au Jardin du Roy, est connu pour la réalisation des illustrations des *Flora de botanique* que publie Joseph Pitton de Tournefort en 1694. Ces dessins sont loués pour leur précision par Carl von Linné lui-même. Les dessins de champignons par Aubriet furent exécutés à une période « clé » de l'histoire de la mycologie, puisqu'en 1729, Pier Antonio Micheli publie un ouvrage fondamental (*Nova plantarum genera*) sur la physiologie des champignons, accompagné d'excellentes gravures en noir et blanc. Les réalisations d'Aubriet, souvent soignées et fidèles aux modèles sont précieuses, car les représentations en couleurs de champignons sont rarissimes avant la fin du XVIII^e siècle. Elles témoignent en outre du regard que l'on portait alors sur ces cryptogames, qui apparaissaient bien mystérieux du point de vue de leur organisation, de leur reproduction et, pour tout dire, de leur « existence » même. Cette publication intéressera vivement les mycologues et contribuera à faire connaître Claude Aubriet. En outre, elle souligne le rôle décisif que les illustrateurs scientifiques ont toujours joué au cours de l'histoire.

ISBN : 978-2-85653-654-4 • 330 p. • 94 € TTC

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES DU MUSÉUM

Commandes et renseignements :
Muséum national d'Histoire naturelle
Publications scientifiques
Case postale 41 • 57 rue Cuvier • 75231 Paris cedex 05
Tél. : 01 40 79 48 05 • Fax : 01 40 79 38 40
diff.presse@museum-np.fr

VRAI OU FAUX

Les « décas » contiennent-ils de la caféine ?

Oui. Et si on y regarde de plus près, de nombreux autres produits en comportent aussi.

Mickaël NAASSILA

À la fin d'un dîner au restaurant, vous répondez souvent au serveur que vous ne voulez pas de café, ou alors « juste un déca... pour pouvoir dormir cette nuit ». Mais le café décaféiné est-il moins excitant ?

La caféine est un alcaloïde de la famille des méthylxanthines ; elle est présente dans les graines, les feuilles et les fruits de nombreuses plantes où elle agit comme un pesticide naturel, protégeant la plante de différents prédateurs. On la consomme quotidiennement sous forme d'infusions de la graine du caféier ou des feuilles du théier, et dans plusieurs aliments et boissons qui contiennent des produits dérivés de la noix de kola.

La caféine stimule les systèmes nerveux et cardio-vasculaire, diminuant ainsi la somnolence et augmentant temporairement la vigilance. Les produits naturels contenant de la caféine les plus utilisés sont le café, le thé et, dans une moindre mesure, le cacao. Les disparités constatées expérimentalement entre les différentes sources naturelles de caféine sont dues au fait que la caféine extraite de ces plantes est associée à des proportions variables d'autres molécules des xanthines alcaloïdes, par exemple la théophylline et la théobromine, qui sont des stimulants cardiaques, et d'autres substances tels des polyphénols (ou tanins) qui forment des complexes insolubles avec la caféine et ralentissent son assimilation. Le café, par exemple, contient de faibles traces de théophylline, mais pas de théobromine.

On fabrique le café à partir de la graine du caféier qui est infusée. La teneur en caféine du café dépend et dépend du type de grain de café et de la méthode

de préparation ; les graines issues d'un même café peuvent avoir des différences de conservation. C'est l'infusion qui solubilise le plus la caféine. Ainsi, plus elle est longue, comme pour les cafés dits américains, plus la teneur en caféine est importante. La quantité contenue dans une tasse de café (de 25 centilitres) est d'environ 90 milligrammes pour un espresso (1/5^e de tasse) de la variété *arabica*, de 80 à 100 milligrammes pour un café soluble (instantané), de 135 milligrammes pour un café infusé et de 180 milligrammes pour du café filtré. Le café torréfié présente moins de caféine car le fait de griller la graine diminue sa teneur en caféine.

Extraire la caféine

Il est difficile d'échapper à la caféine. Même dans le « décaféiné » : cinq à dix tasses de décaféiné procurent une quantité de caféine équivalente à celle de deux tasses de café normal. Une étude scientifique américaine a montré en 2006 que les décaféinés provenant de différents vendeurs contenaient tous, sauf un, de la caféine, avec des concentrations allant de 8,6 à 13,9 milligrammes par tasse.

Pour fabriquer les décaféinés, on utilise une molécule qui se lie à la caféine : un solvant organique, un fluide supercritique (le dioxyde de carbone) ou de l'eau. L'extraction est réalisée sur les grains de café cru, qui sont lavés avec le solvant, puis séchés avant d'être torréfiés. Techniquement, il est presque impossible d'extraire toute la caféine. Après extraction, le café contient au maximum 0,1 pour cent de caféine. La caféine extraite est ensuite utilisée dans les sodas ou les médicaments.

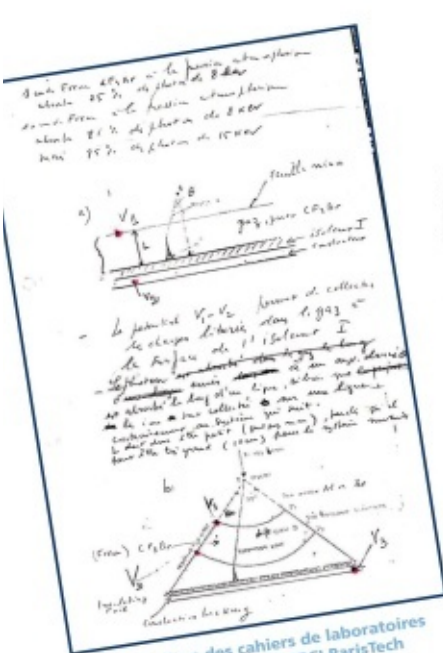


Par ailleurs, on a découvert certaines variétés de caféiers naturellement dépourvues de caféine, à cause de l'absence d'une enzyme de synthèse. Produire des décaféinés à partir de ces grains améliorerait les arômes qui sont souvent éliminés avec la caféine quand celle-ci est extraite des grains.

Le thé est une autre source de caféine, mais son effet sur l'homme est plus doux et progressif car il contient une grande quantité de tanins qui ralentissent l'assimilation de la caféine. De plus, bien qu'à poids égal le thé ait plus de caféine que le café, une tasse en contient moins (30 à 50 milligrammes), car le thé est souvent moins infusé.

On trouve aussi la caféine dans le chocolat, mais en faible quantité, dans certains sodas à des concentrations importantes, ou dans les boissons énergisantes en quantités très élevées. Certains médicaments en contiennent aussi, car elle agit comme un antalgique ou accélère l'absorption de substances tel le paracétamol. Par ailleurs, la caféine est présente dans certains savons ou shampoings, car elle renforcerait les racines capillaires et favoriserait la circulation sanguine du cuir chevelu...

Mickaël NAASSILA dirige l'équipe de recherche sur l'alcool et les pharmacodépendances de l'Université de Picardie Jules Verne, à Amiens, et préside le groupe Task force alcool de Picardie.



Une page d'un des cahiers de laboratoires de Georges Charpak à l'ESPCI ParisTech
© J. Lewiner/ESPCI ParisTech.

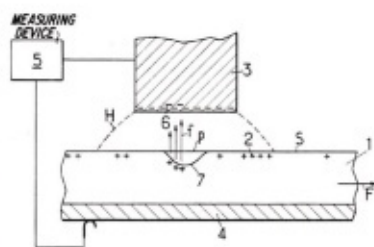


Schéma extrait du brevet international n°4,553,089 déposé par Jacques Lewiner et Georges Charpak (date de priorité : 17 mars 1982) décrivant des dispositifs permettant de mesurer localement les charges dans les diélectriques (à des fins d'imagerie par radiation, par exemple).
© ESPCI ParisTech



Georges Charpak à l'ESPCI ParisTech le 22 octobre 1992, quelques jours après l'annonce de son prix Nobel.
© D. Morisseau/ESPCI ParisTech

Georges Charpak et l'ESPCI ParisTech

Une rencontre prolifique et exemplaire

Georges Charpak (1924 - 2010) a trouvé à l'ESPCI ParisTech un environnement unique qui lui a permis de transformer avec brio ses inventions pionnières en applications révolutionnaires, en particulier dans le domaine biomédical.

Dès 1980, Georges Charpak rejoint en tant que Professeur associé le laboratoire d'Électricité générale dirigé par Jacques Lewiner. Sur ce terrain fertile, où l'innovation se cultive avec passion, le physicien développe les applications des chambres à fils qu'il avait mises au point au CERN. Il en démontre lui-même la portée concrète et captera ainsi l'attention du Comité Nobel. Au laboratoire d'Électricité générale, Georges Charpak déploie une activité prolifique et variée, à la fois en recherche (avec des publications multiples et régulières), en enseignement (dans le cadre du DEA d'électronique et sous forme de conférences passionnées pour les élèves-ingénieurs), dans le domaine de l'innovation (succession de brevets pris avec des chercheurs du laboratoire) et de la création d'entreprises (co-fondation de *Molecular Engines Laboratories*, *Biospace Instruments* (aujourd'hui *EOS Imaging*) et *Supersonic Imagine*).

Georges Charpak était un scientifique exceptionnel : contributeur à part entière de ses inventions géniales, il est le dernier physicien à recevoir un prix Nobel en son nom seul. Authentique pionnier, artisan véritable de ses prototypes, il se faisait le champion de la démarche expérimentale, passerelle indispensable entre la science fondamentale et les applications industrielles. Aussi Georges Charpak restera-t-il une figure emblématique de la pédagogie originale et de la culture scientifique de l'ESPCI ParisTech, et continuera à inspirer des générations d'étudiants et de chercheurs, par son panache et par l'exemple de son immense créativité scientifique.



L'École supérieure de physique et de chimie industrielles de la Ville de Paris est à la fois une Grande École d'ingénieurs originale, un centre de recherche de renommée internationale et un moteur d'innovations pour l'industrie. Fondée en 1882 par le Conseil municipal de Paris, l'ESPCI ParisTech attire depuis plus d'un siècle les plus grands esprits scientifiques novateurs : Pierre & Marie Curie, Paul Langevin, Frédéric Joliot-Curie, Pierre-Gilles de Gennes et Georges Charpak sont autant de noms illustres qui contribuent à la réputation de l'École, en France comme à l'international. Aujourd'hui, l'ESPCI ParisTech est membre fondateur de ParisTech et de Paris Sciences et Lettres.



Pour réagir aux articles : courrier@pouirlascience.fr
ou directement sur les pages correspondantes du site www.pouirlascience.fr

✓ MULTILICITÉ DES TEMPS

Votre numéro spécial sur les temps (*Pour la Science* n° 397, novembre 2010) est très intéressant. Mais à la lecture des différents articles, j'ai l'impression que le temps « biologique », le temps « psychologique » et le temps « physique » sont des grandeurs distinctes. Existe-t-il réellement une multilicé de temps différents ?

Florence Duhamel

→ RÉPONSE D'ÉTIENNE KLEIN

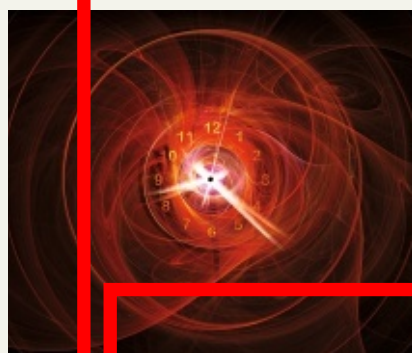
L'horloge biologique est un mécanisme endogène et autonome permettant à la majorité des êtres vivants de rythmer certains processus sans recours à des cycles temporels extérieurs, notamment ceux liés à la rotation de la Terre. Comment fonctionne-t-elle ? La réponse n'est pas claire. Mais on peut se demander si le terme d'« horloge » biologique n'est pas abusif. En effet, cette prétendue horloge ne fait qu'imposer des rythmes et asservir certains mécanismes à l'œuvre dans l'organisme : il s'agit donc d'un « oscillateur », dont la période se mesure en unités de temps physique, plutôt que d'une horloge proprement dite.

Quant au « temps biologique », qui s'écoulerait de façon autonome en marge du temps physique, il relève sans doute lui aussi d'un abus de langage. Les phénomènes biologiques ont des rythmes et une dynamique spécifiques, mais comme tous les autres phénomènes temporels, ils se déroulent dans le temps, et se mesurent en secondes, minutes, heures, années, etc.

De la même façon, le constat selon lequel divers facteurs psychologiques influencent et distordent notre perception des durées ne prouve pas l'existence d'un temps psychologique indépendant, mais bien plutôt que notre rapport au temps est soumis à toutes sortes d'influences, notamment d'ordre psychologique.

À force de supposer que le temps a les propriétés des processus temporels, on en vient à admettre implicitement l'existence d'une multilicé de temps : il y aurait en somme autant de sortes de temps qu'il y a de temporalités différentes. Et c'est ainsi que le temps se trouve affublé de divers qualificatifs qui précisent le type de phénomènes auquel on l'associe : temps psychologique, temps biologique, temps physique, temps historique multiples... Une telle

prolifération n'est pas sceptique : il y aurait un temps des pierres et des roches ? Un temps des cellules et des bactéries ? Un temps des atomes et molécules ? Et un temps des étoiles et des galaxies ? L'amalgame que nous ne cessons de faire entre le temps et les phénomènes temporels enrobe le premier d'une métaphorisation inspirée des seconds qui, en définitive, ne nous engage guère à penser le temps pour ce qu'il est.



✓ LETTRES POSTALES

Dans l'article *La mission jésuite en Chine : tempêtes, science et politique*

(*Pour la Science* n° 397, novembre 2010, <http://bit.ly/p397-ricci>), l'auteur écrit qu'une lettre de Matteo Ricci, missionnaire jésuite en Chine, a mis 17 ans pour arriver à son père en Italie. Pourquoi autant de temps ?

Georges Weisense

→ RÉPONSE DE ISAÏA IANACCONE

Pour expliquer pourquoi une lettre de Matteo Ricci est arrivée après 17 ans, ou plus généralement, pourquoi le courrier de la Chine vers l'Europe pouvait aller aussi lentement, il faut prendre en considération plusieurs facteurs. Tout d'abord, au vu des aléas de la traversée marine – typhons, naufrages, pirates, etc. – les jésuites écrivaient souvent de multiples copies de leurs courriers. Les deux copies étaient d'abord envoyées à Macao, où elles prenaient la route de la mer. Or pour arriver à Macao, il fallait, depuis Pékin, traverser toute la Chine.

L'une des copies voyageait ensuite sur la route maritime portugaise (l'océan Indien), l'autre sur la route espagnole (l'océan Pacifique). Arrivé dans un port intermédiaire (par exemple Goa, en Inde, pour les bateaux portugais, ou Manille, aux Philippines, pour les espagnols), le cour-

rier changeait souvent de bateau, car les marchandises étaient prioritaires. Les lettres restaient donc fréquemment dans des dépôts de courrier avant de continuer leur route.

À l'arrivée en Europe, la distribution du courrier était tributaire de toutes sortes de circonstances contingentes et plus ou moins imprévisibles : moyens de transport lents et irréguliers, routes souvent infestées de brigands, guerres, épidémies, etc.), erreurs de distribution. Un véritable voyage infernal, comme celui des jésuites !

✓ FLÈCHE DU TEMPS ET EXPANSION

Selon l'article *Le paradoxe de l'irréversibilité*

(*Pour la Science* n° 397, novembre 2010, <http://bit.ly/p397-irreversibilite>), le sens du temps en thermodynamique est celui pour lequel l'entropie, c'est-à-dire

le désordre, augmente. Or, en cosmologie, à mesure que le temps passe, c'est au contraire l'ordre qui s'accroît dans l'Univers, sous l'effet de la gravité.

N'y a-t-il pas une contradiction ?

Patrice Leterrier

→ RÉPONSE D'ALAIN RIAZUELO

En possédant la matière à s'agréger, la gravité structure effectivement le cosmos au cours du temps. Mais aussi paradoxal que cela puisse paraître, cette structuration ne s'accompagne pas d'une baisse du désordre, bien au contraire. L'exemple extrême en est donné par les trous noirs, stades ultimes de la structuration de la matière sous l'influence de la gravité.

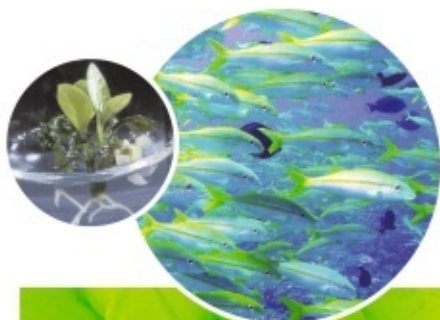
Un bouillir d'une masse solaire possède une entropie de $1,5 \times 10^{54}$ joules / kelvin, soit plus de dix ordres de grandeur de plus que le Soleil ! Les calculs montrent d'ailleurs que l'entropie d'un trou noir augmente bien plus vite avec sa masse que n'augmente l'entropie d'une étoile. Ainsi, sous couvert d'une structuration apparente du cosmos, la gravité est en fait le plus grand pourvoyeur d'entropie du cosmos : si, peu après le Big Bang, le gros de l'entropie de l'Univers était porté par le rayonnement électromagnétique et les neutrinos, cette part a décroché avec l'expansion cosmique, et aujourd'hui ce sont les trous noirs qui en sont les plus gros dépositaires. Une telle situation perdurera encore plus de 10^{100} ans, le temps que les plus gros trous noirs s'évaporent et dissipent enfin leur entropie par rayonnement de Hawking.

L'institut de recherche pour le développement

L'IRD MET EN ŒUVRE DES
RECHERCHES MULTIDISCIPLINAIRES
DANS LA ZONE INTERTROPICALE

EAU • CHANGEMENTS CLIMATIQUES • MALADIES ÉMERGENTES • MIGRATIONS • LUTTE CONTRE LA PAUVRETÉ • ÉCOSYSTÈMES

L'IRD conduit des **recherches**
avec ses **partenaires** du Sud
et les acteurs du développement dans
trois grands domaines :



Ressources vivantes



**Milieux et
environnement**



**Sociétés
et Santé**



L'IRD met ses
capacités d'**expertise**
et de **valorisation** au service
de multiples partenaires

L'IRD participe au
renforcement des capacités
scientifiques du Sud par
la **formation**

FRANCE • MÉDITERRANÉE • ROM COM • AFRIQUE • ASIE • AMÉRIQUE LATINE • PACIFIQUE
ÉTABLISSEMENT CRÉÉ EN 1944 • BUDGET : 231 MILLIONS D'EUROS • EFFECTIFS : 2 210 AGENTS, DONT 830 CHERCHEURS



Institut de recherche
pour le développement

44, bd de Dunkerque, CS 90009
13572 Marseille cedex 02
Tél. 33 (0)4 91 99 92 00 • Fax 33 (0)4 91 99 92 22

www.ird.fr

La vision INCONSCIENTE des aveugles

Certaines personnes souffrant de cécité ont une « vision aveugle » : sans le savoir, elles se déplacent en évitant les obstacles. Une structure cérébrale participe à cette vision inconsciente.

Beatrice de Gelder

Un homme aveugle se faufile à l'aveugle dans un couloir encombré de boîtes, de chaises et d'autres accessoires de bureau. L'homme ignore la présence des obstacles. Pourtant, il les évite, se faufilant prudemment entre la poubelle et le mur, contournant le trépied d'un appareil photo, sans se rendre compte qu'il a fait des manœuvres particulières. Cet homme est l'un de nos patients ; il est aveugle, mais il est doté d'une « vision aveugle ». En d'autres termes, il réagit à ce que ses yeux détectent sans savoir qu'il peut voir.

La cécité de ce patient est d'un type très rare. Elle est la conséquence de deux accidents vasculaires cérébraux dont il a été victime en 2003. Ces accidents ont détruit une région à l'arrière de son cerveau, nommée cortex visuel primaire ; la première lésion concernait l'hémisphère gauche, puis, cinq semaines plus tard, la seconde a touché l'hémisphère droit. Ses yeux sont fonctionnels, mais comme son

cortex visuel ne reçoit plus de signaux, il est devenu aveugle.

Cette étude où le patient se déplace dans un couloir est probablement la démonstration la plus spectaculaire de vision aveugle jamais publiée. D'autres patients ayant perdu la vision après des lésions du cortex visuel primaire sont des cas moins impressionnants, mais tout aussi mystérieux ; ils réagissent à des choses qu'ils ne peuvent pas voir consciemment, par exemple de simples formes géométriques ou des images d'un visage humain qui exprime une émotion. Aujourd'hui, on sait provoquer un effet semblable chez des sujets voyant normalement, par exemple en « éteignant » temporairement leur cortex visuel.

Les scientifiques cherchent à comprendre l'étendue des capacités perceptives susceptibles d'être préservées chez des personnes présentant une cécité corticale ; ils tentent en outre d'identifier les régions cérébrales et les circuits neuronaux responsables de la vision aveugle. Ces connaissances leur permettront de savoir quelles fonctions cérébrales inconscientes sont à l'œuvre, même chez une personne qui voit.

Dès 1917, des médecins ont rapporté des cas de vision aveugle – nommée alors vision résiduelle – chez des soldats blessés lors de la Première Guerre mondiale. Mais un demi-siècle plus tard, on a découvert que

L'ESSENTIEL

✓ Des personnes souffrant de cécité due à une lésion de leur cortex visuel primaire peuvent réagir face à des objets et des images qu'elles ne voient pas consciemment.

✓ La vision aveugle peut détecter de nombreuses caractéristiques visuelles : par exemple des couleurs, un mouvement, des formes simples et des émotions exprimées sur un visage.

✓ Les chercheurs étudient les régions cérébrales impliquées et les limites de cette remarquable capacité inconsciente.

ne commencent des recherches sur cette capacité. En 1967, les Britanniques Lawrence Weiskrantz et Nicholas Humphrey ont étudié des singes qui avaient subi une lésion du cortex visuel. Puis, en 1973, les psychologues américains Ernst Pöppel, Richard Held et Douglas Frost ont mesuré les mouvements oculaires d'un patient et découvert qu'il avait tendance à regarder en direction de stimulus qu'il ne voyait pas consciemment.

Ces travaux annoncèrent d'autres études, surtout réalisées par L. Weiskrantz et ses collègues, sur des modèles animaux dépourvus de cortex visuel primaire (aussi nommé V1). Ces recherches ont montré que les animaux conservent des capacités visuelles après ablation de leur cortex visuel (par exemple, ils détectent un mouvement ou distinguent des formes).

Prendre conscience de la vision aveugle

En 1973, L. Weiskrantz et ses collègues ont entrepris une série d'études avec un patient qui avait subi une ablation partielle du cortex visuel pour éliminer une tumeur. Mais la communauté scientifique a accueilli ces travaux avec scepticisme. L'incrédulité face à la vision aveugle n'est pas surprenante : le phénomène semble contre-intuitif, voire contradictoire. Comment une personne pourrait-elle voir sans savoir qu'elle voit ? De la même façon qu'il n'est guère cohérent de dire qu'on ne sait pas qu'on a mal, suggérer qu'une personne se disant aveugle peut voir quelque chose sans en avoir conscience semble *a priori* dénué de sens.

Pourtant, nous ignorons parfois que nous pouvons voir. Comme nous ignorons parfois que nous ne le pouvons pas. La relation entre voir et savoir est complexe. Par exemple, en condition normale, nous avons tous une tache aveugle dans notre champ visuel ; elle correspond à la région de la rétine d'où partent les fibres du nerf optique, région dépourvue de récepteurs sensoriels. Pourtant, cette tache ne nous handicape pas et nous n'en sommes pas conscients.

De surcroît, les données chez l'homme sont rares : il y a peu de sujets présentant une vision aveugle. Le cortex visuel primaire de l'adulte ne mesure que quelques centimètres de large, et les lésions cérébrales se limitent rarement à cette aire. Néanmoins, on sait désormais que



Ren Braun

L'AUTEUR



Beatrijs de GELDER, professeur de neurosciences cognitives, dirige le Laboratoire de neurosciences cognitives et affectives, à l'Université de Tilburg, aux Pays-Bas.

le nombre de patients ayant une lésion du cortex visuel et conservant une vision aveugle est plus important qu'on ne le pensait. Le scepticisme s'estompe.

Le cortex visuel primaire de la plupart de ces patients conserve quelques fonctions. Chez nombre d'entre eux, la lésion ne concerne qu'une petite région du cortex visuel primaire, ce qui entraîne un petit îlot de cécité dans leur champ visuel. D'autres perdent la moitié droite ou gauche du cortex visuel primaire: ils sont aveugles dans la moitié correspondante (à savoir opposée) de leur champ visuel. Dans ce cas, la vision aveugle implique la détection d'objets ou d'images présentés dans la région aveugle, où le patient ne les voit pas consciemment (voir l'encadré ci-dessous).

Comment étudie-t-on la vision aveugle de ces patients? Dans les méthodes classiques, le sujet explique lui-même ce qu'il perçoit: il déclare ne rien voir dans la partie aveugle de son champ visuel. Mais des méthodes indirectes permettent aux scientifiques de savoir si les sti-

mulus visuels non vus influent sur la façon dont un patient répond.

Dans certaines expériences, les sujets présentent des changements physiologiques, tels que la constriction de la pupille, qui indiquent une vision inconsciente. Et ils peuvent réagir différemment à des stimuli présentés dans leur champ visuel intact, selon ce qu'ils ont perçu simultanément dans leur champ aveugle. Quand on leur demande de deviner quelle figure, parmi plusieurs possibles, est présentée dans leur champ aveugle, les patients répondent correctement presque à chaque fois.

Une vision résiduelle

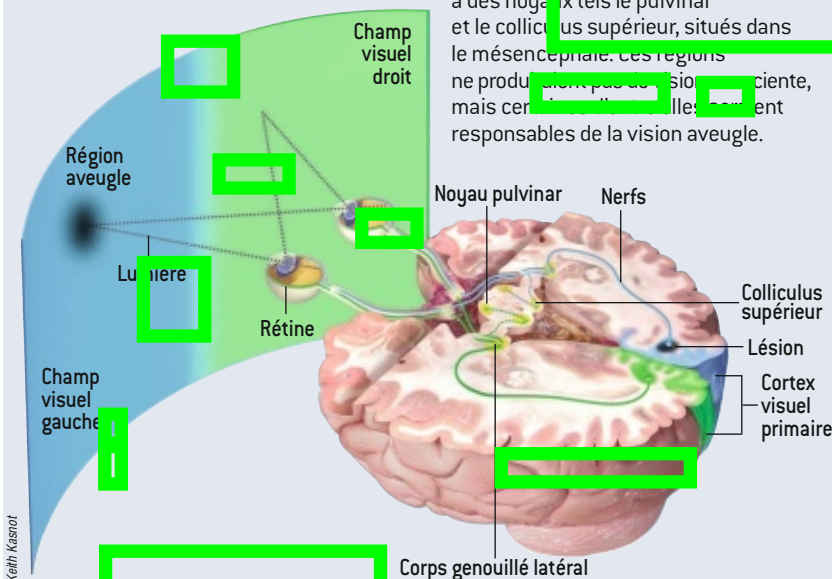
Qui plus est, l'imagerie cérébrale révèle les régions impliquées dans la vision aveugle, ainsi que les circuits empruntés par l'information visuelle. Elle a permis aux scientifiques d'être encore dubitatifs de balayer leurs dernières hésitations: des régions corticales épargnées expliqueraient la vision résiduelle.

VOIR SANS LE SAVOIR

Chez l'homme, la vision consciente dépend d'une région cérébrale nommée cortex visuel primaire (ci-dessous). Une lésion de cette région provoque une cécité dans les parties correspondantes du champ visuel. On parle de « vision aveugle » quand les patients réagissent d'une façon ou d'une autre à des stimuli présentés dans la partie correspondante de leur champ visuel, sans le savoir. Dans une démonstration de ce phénomène, un patient traverse un parcours d'obstacles malgré sa cécité totale (ci-contre).

Les circuits visuels

Les signaux émis par la rétine atteignent le cortex visuel primaire via les corps genouillés latéraux, des noyaux localisés dans le mésencéphale et les régions supérieures de traitement conscient. Les nerfs optiques transmettent aussi les informations visuelles à des noyaux tels que le pulvinar et le colliculus supérieur, situés dans le mésencéphale. Ces régions ne produisent pas de vision consciente, mais certaines d'elles sont responsables de la vision aveugle.



Naviguer à l'aveugle

Pensant que ce patient (au premier plan) présentait une vision aveugle, l'auteur et ses collègues lui ont demandé de marcher dans un couloir encombré, en lui disant qu'il était vide. Le patient a évité tous les obstacles, sans se rendre compte qu'il les contournait.

Toutes ces expériences ont montré que les patients peuvent détecter inconsciemment une large gamme de caractéristiques visuelles, dont la couleur, des formes simples telles que X et O, des mouvements et l'orientation de lignes ou de grilles. Les formes de grande taille, ainsi que les détails très fins, seraient plus difficiles à percevoir. Par exemple, les patients détectent mieux les caractéristiques d'une grille si ses lignes sont semblables à celles d'un score vénitien vu d'une distance de 1,5 à 4,5 mètres.

Dans les années 1970, L. Weiskrantz et N. Humphrey ont filmé un singe privé de cortex visuel primaire qui se déplaçait sans se cogner dans une pièce encombrée d'objets. D'où l'idée de faire naviguer notre patient dans un couloir. Nous avons été stupéfaits de le voir parcourir tout le couloir sans heurts. Grâce à des tests psychophysiques préalables, nous avions évalué sa vision consciente : il ne détectait rien, même pas de gros objets.

La capacité de ce patient n'était pas sans rappeler le somnambulisme, un autre phénomène où les individus peuvent agir, ou se déplacer, sans avoir conscience de leurs actes. En effet, lorsque nous avons interrogé notre patient, il a affirmé qu'il s'était contenté de marcher le long du couloir : non seulement il n'était pas conscient d'avoir vu quoi que ce soit, mais il n'était même pas conscient d'avoir contourné des objets. Il était incapable d'expliquer ou même de décrire ses actes.

Le contournement d'obstacles est l'une des tâches fondamentales auxquelles sont confrontés les animaux ; il ne serait donc pas surprenant que le cerveau soit capable d'assurer la navigation même quand le cortex visuel primaire et la vision consciente sont défaillants.

En tant qu'espèce sociale, la survie des êtres humains dépend aussi de la communication avec autrui. Ils doivent reconnaître les autres, ainsi que leurs gestes et les signaux reflétant ce qu'ils pensent. C'est avec cette idée à l'esprit que nous nous sommes demandé vers la fin des années 1990 si des personnes présentant une cécité corticale pouvaient détecter des stimulus visuels tels qu'une émotion sur un visage ou la signification d'une posture corporelle, dans la partie aveugle de leur champ visuel.

En 1999, nous avons réalisé des tests avec des films de visages. Les spécialistes de la vision considèrent que les visages sont complexes, car ils sont plus difficiles

à traiter que des grilles ou d'autres formes élémentaires. Mais un visage est une forme naturelle pour le cerveau humain.

L'un de nos sujets, dont la totalité du cortex visuel primaire gauche avait été lésé dans l'enfance (ce qui l'avait rendu aveugle du côté droit de son champ visuel), était capable de deviner de façon fiable l'expression de visages qu'il ne percevait pas consciemment. En revanche, il semblait complètement aveugle à diverses caractéristiques faciales non émotionnelles, telles que l'identité d'une personne ou son sexe.

Une réaction non consciente aux émotions

Afin d'approfondir ces travaux sur la vision aveugle des émotions, nous avons exploré en 2009 un phénomène nommé contagion émotionnelle, c'est-à-dire la tendance à adopter les expressions faciales des personnes que nous voyons. Pour mesurer la contagion émotionnelle, nous avons utilisé une technique d'électromyographie faciale : des électrodes placées sur le visage d'un sujet enregistrent les signaux envoyés aux muscles impliqués dans le sourire ou le froncement des sourcils. Nous avons testé nos deux patients, celui qui a navigué dans un couloir et celui qui a perdu son cortex visuel primaire gauche, et nous leur avons présenté des photographies de visages et de corps entiers exprimant la joie ou la peur.

Résultat : tous les stimulus engendraient des réactions émotionnelles, que la photo soit présentée du côté voyant ou du côté aveugle du champ visuel des patients. En fait, les photos non vues provoquaient même une réponse plus rapide que celles vues consciemment. Nous avons aussi enregistré la dilatation de la pupille, une mesure de l'éveil physiologique. Les photos non vues représentant une expression de peur produisaient l'effet le plus fort : nous en déduisons que plus nous sommes conscients d'un signal émotionnel, plus notre réaction serait lente et faible.

Selon un modèle théorique, la contagion émotionnelle a lieu parce qu'on imite inconsciemment les expressions qu'on voit, sans forcément prendre conscience de l'émotion. Toutefois, comme ces patients réagissaient non seulement aux visages, mais aussi aux corps (dont les visages

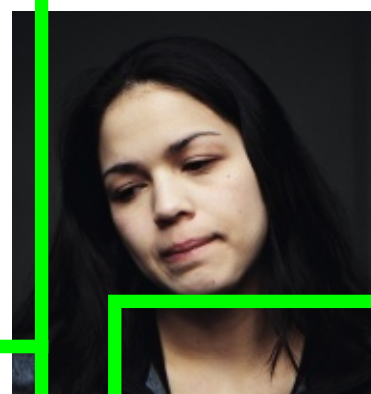
Que voit l'aveugle

Une personne présentant une vision aveugle distingue des détails de l'ordre de la taille d'une pièce de 10 centimètres vue d'une distance de 1,5 à 4,5 mètres. Elle peut détecter diverses propriétés visuelles telles que :

- ✓ Des formes géométriques
- ✓ Des séries de lignes
- ✓ Des objets apparaissant et disparaissant
- ✓ Un mouvement
- ✓ Une couleur
- ✓ L'orientation de lignes



© Getty Images/Anthony Marsland



© Getty Images

Un sujet présentant une vision aveugle reconnaît les émotions exprimées par un visage ou une posture, mais pas l'identité d'une personne ni son sexe.

Des patients aveugles « voient » : un nouveau consensus

Dans le domaine de la perception, la vision peut devenir déficitaire après une lésion survenant dans l'œil, le long des voies visuelles qui relient l'œil au cerveau, ou encore dans les aires visuelles cérébrales. Quand la lésion concerne le cortex visuel primaire, elle engendre une amputation du champ visuel proportionnelle à l'étendue de cette lésion.

L'hémianopsie latérale homonyme (HLH) correspond alors à la perte du champ visuel du côté opposé à la lésion cérébrale; elle est sans aucun doute l'une des conséquences les plus fréquentes d'une lésion cérébrale. En effet, 30 pour cent des accidents vasculaires cérébraux et 70 pour cent des accidents vasculaires impliquant les artères cérébrales postérieures entraîneraient une telle amputation du champ visuel.

La pathologie est particulièrement handicapante pour les patients, car la vision est le mode perceptif le plus utilisé dans les activités quotidiennes. Dans 38 pour cent des cas, les patients perdent totalement leur vision, mais seulement dans une faible partie de leur champ visuel.

Jusqu'à présent, on traitait uniquement les patients hémianopsiques en les aidant à compenser l'amputation de leur champ visuel : on leur apprendait notamment à modifier la direction des saccades oculaires – les mouvements très rapides des yeux – vers le champ aveugle. Aujourd'hui, on sait que le phénomène de la vision inconsciente, le stimulus, permettrait une récupération de la vision dans le champ visuel aveugle.

Malgré l'absence de vision consciente dans l'hémichamp visuel aveugle de singes et de chats cérébrolésés ou même de patients hémianopsiques, on a montré que des capacités de perception persistent. Il est entendu qu'il s'agit d'une vision non consciente, car les patients affirment ne pas voir la cible présentée alors qu'ils peuvent néanmoins agir (éviter, etc.). Les amputations du champ visuel, telles les hémianopsies, seraient donc à considérer

non pas comme une perte totale de vision dans l'hémichamp aveugle, mais plutôt comme un défaut de vision consciente.

Conscients du potentiel que représentent l'existence de vision aveugle chez les patients hémianopsiques, nous avons récemment tenté d'entraîner la vision « consciente » à partir de cette vision inconsciente. En 2008, nous avons ainsi montré

comment, en montrant une cible, déterminer son orientation, comparer des formes ou encore reconnaître parfois en comparant ce qui apparaissait dans leurs deux champs visuels – le voyant et l'aveugle.

Pour la première fois, nous avons montré qu'une récupération signifi-

cative de la vision consciente se produisait lors de l'examen des champs visuels chez des patients présentant une hémianopsie chronique et pour lesquels aucune

gle. Cette technique, qui fait aussi ses preuves chez l'enfant et chez l'adulte

tion des deux champs visuels –, est en passe d'être systématisée afin d'être plus largement utilisée.

Quel mécanisme neurologique participe à l'entraînement de la vision consciente et à la récupération

de la vision consciente? En 2007, Linda Henriksson et ses collègues, de l'Université de technologie à Helsinki, en Finlande, ont montré qu'une réorganisation corticale existe après une stimulation intensive dans le champ visuel aveugle. Ils ont notamment prouvé que les aires cérébrales autour de la lésion, et celles du cortex visuel primaire de l'hémisphère sain, s'activent lors de la stimulation du champ visuel aveugle avec des cibles de forme de damier noir et blanc. En outre, les voies sous-corticales – de la rétine jusqu'au colliculus supérieur – interviendraient dans ces différentes activations.

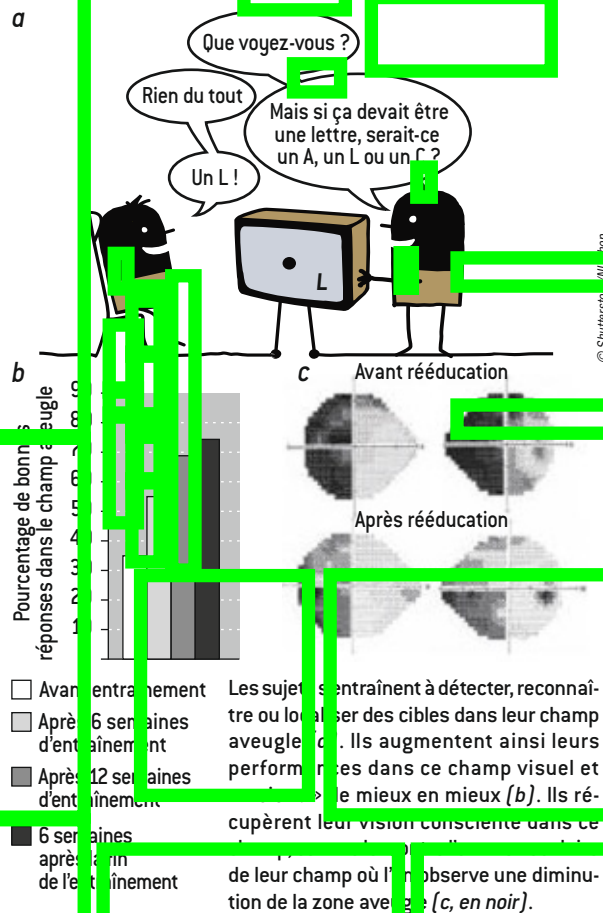
Les recherches que nous menons actuellement en neuro-imagerie fonctionnelle auprès des patients avant et après rééducation confirment ces données préliminaires, et nous permettront peut-être de déterminer les facteurs pronostiques de la récupération de la vision dans le champ aveugle, ainsi que les régions neuro-anatomiques d'une telle récupération.

L'entraînement de la vision inconsciente pour améliorer la vision consciente soulève une autre question : quel est le lien entre les processus perceptifs inconscients et conscients? L'enjeu de ces recherches est donc de taille, que ce soit dans le domaine clinique ou fondamental. Tant donné que nous avons montré l'efficacité de la prise en charge, nous devons nous consacrer au dépistage de ces troubles, en particulier chez l'enfant.

Sylvie Chokron,

Laboratoire de Psychologie expérimentale et de Neurosciences

et Équipe TREAT Vision à la Fondation ophtalmologique Rothschild de Paris



qu'il est possible de récupérer une vision consciente dans le champ visuel aveugle après l'utilisation intensive des capacités de vision aveugle chez des patients présentant des lésions du cortex visuel primaire. Comme nous nous sommes rééduqué les patients, nous avons stimulé les phénomènes de vision aveugle dans

la zone aveugle (c, en noir). La récupération spontanée n'était a priori attendue (voir la figure ci-dessus). Au cours de l'entraînement qui a duré 12 semaines, les patients avaient d'abord la sensation de quelque chose de petit et noir, puis ils disaient sentir quelque chose, avant de voir réellement le stimulus présenté.

On peut donc entraîner les capacités de vision consciente chez ces patients hémianopsiques, et cela afin de restaurer la vision consciente dans le champ visuel aveugle.

étaient masqués), nous en avons conclu qu'ils réagissent aux émotions et ne font pas que les imiter inconsciemment.

Le nombre de patients susceptibles de participer à des études sur la vision aveugle étant faible, la possibilité d'engendrer temporairement le phénomène chez des sujets sains est un outil expérimental précieux. Dans une technique de « masquage » visuel, on utilise des images subliminales: un stimulus visuel est présenté brièvement au sujet et immédiatement suivi d'une texture qui apparaît au même endroit. La texture interfère avec le traitement conscient de l'image subliminale, de sorte que le sujet n'a pas conscience de l'avoir vue, mais des expériences permettent aux scientifiques de prouver qu'elle l'a été. On peut aussi inactiver temporairement le cortex visuel en appliquant des champs magnétiques sur l'arrière de la tête – une technique nommée stimulation magnétique transcrânienne.

Plusieurs études ont montré que des personnes saines peuvent deviner la nature d'un stimulus même s'il est présenté trop brièvement pour être perçu consciemment, ou quand une stimulation magnétique transcrânienne inactive leur cortex visuel. D'autres travaux ont évalué la réaction de participants à des stimulus émotionnels qu'ils ne voyaient pas consciemment.

Des régions cérébrales de la vision aveugle

Avant même que de telles expériences de vision aveugle n'aient commencé, des études chez l'animal et chez l'homme suggéraient déjà que des structures sous-corticales – des régions cérébrales plus profondes et plus anciennes que le cortex d'un point de vue évolutif – peuvent déclencher des réactions appropriées avant que des aires corticales, telle le cortex visuel, n'aient analysé en détail le stimulus. Ce système non conscient agirait en parallèle des voies corticales. Et il pourrait participer au traitement des émotions détecté dans la vision aveugle chez des patients vraiment non-voyants.

Pourtant, les scientifiques se demandent encore si ces formes temporaires de cécité provoquées chez des sujets voyant normalement sont semblables à la vision aveugle des patients ayant une lésion corticale permanente. En particulier, les techniques de masquage visuel permettent au cortex visuel de traiter l'information normalement, mais interfèrent avec l'analyse

consciente qui suit. En conséquence, la « vision aveugle » d'images subliminales se distinguerait de la vision aveugle des patients, qui implique un ensemble caractéristique de régions cérébrales. La stimulation magnétique transcrânienne mime certainement la lésion, mais pour savoir si la vision aveugle qui en résulte implique les mêmes circuits neuronaux, il faut combiner cette technique avec l'imagerie cérébrale.

À l'inverse, après une lésion, le cerveau d'un patient (même adulte) peut se réorganiser pour compenser la perte. Cette plasticité neuronale pourrait créer des circuits de vision aveugle qui n'existent pas chez les personnes voyant normalement... Jusqu'à ce que ces questions soient résolues, l'étude des patients souffrant de lésions cérébrales reste essentielle pour

APRÈS UNE LÉSION, LE CERVEAU D'UN PATIENT, même adulte, peut se réorganiser pour compenser la perte. Cette plasticité neuronale pourrait créer des circuits de vision aveugle.

comprendre comment les régions non corticales produisent la vision résiduelle.

On n'a pas encore identifié l'ensemble des structures neuronales responsables de la vision aveugle chez les patients ayant une cécité corticale. Toutefois, on pense qu'une région nommée colliculus supérieur et située dans une aire sous-corticale, nommée mésencéphale, joue un rôle central.

Chez les animaux autres que les mammifères, tels les oiseaux et les poissons, le colliculus supérieur est la principale structure cérébrale qui reçoit des signaux en provenance des yeux. Chez les mammifères, il est éclipsé par le cortex visuel, mais participe notamment aux mouvements oculaires. La vision aveugle exploiterait les informations qui transitent de la rétine vers les colliculus supérieurs sans passer par le cortex visuel primaire.

En 2009, nous avons montré que la région du mésencéphale est essentielle pour traduire en actes les signaux visuels qui ne peuvent pas être perçus consciemment. Nous avons demandé à un patient d'appuyer sur un bouton quand nous lui présentions un carré dans son champ visuel voyant. Dans certains essais, nous présentions simultanément un carré dans son champ aveugle. Certains carrés étaient gris, d'autres violets. Nous avons choisi une nuance de violet qu'un seul type de

✓ SUR LE WEB

Le film du patient doté de vision aveugle qui voit dans un couloir encombré : www.ScientificAmerican.com/may2010/blindsight.

Le film du scientifique du cerveau visuel en 1921, Helen, a blind monkey who sees everything : bit.ly/blindsightmonkey.

Le site de la fondation ophtalmologique Rothschild de Paris : <http://www.ebdrf.com/>

Le film sur la cécité corticale et sa rééducation : www.france5.fr/a-vous-de-voir/archives/51100435-fr.php?page=2

✓ BIBLIOGRAPHIE

M. Tamietto et al., Collicular vision guides nonconscious behavior, *Journal of Cognitive Neuroscience*, vol. 22, pp. 888-900, mai 2010.

C. Cavéziar et al., Assessment of visuo-attentional abilities in young children with or without visual disorder: toward a systematic screening in the general population, *Research in Developmental Disabilities*, vol. 31, pp. 102-1108, 2010.

M. Tamietto et al., Unseen facial and bodily expressions trigger fast emotional reactions, *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 106, pp. 17661-17666, octobre 2009.

C. Perez et al., Plasticité des aires visuelles corticales : effets de la latéralisation de la lésion et du type de tâche, *Revue de Neuropsychologie, Neurosciences Cognitives et cliniques*, vol. 1, pp. 1-7, 2009.

S. Chokron et al., From blindsight to sight : a cognitive rehabilitation of visual field defects, *Restor. Neurol. Neurosciences*, vol. 26, pp. 305-20, 2008.

ÉTUDIER LA VISION AVEUGLE

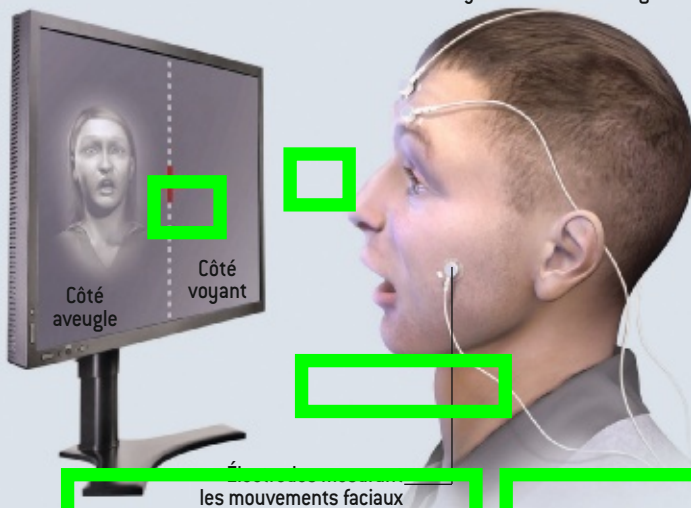
Comme la cécité corticale totale est rare, les spécialistes de la vision aveugle travaillent souvent avec des patients aveugles d'un côté de leur champ visuel. Les patients fixent un point tandis que des images sont présentées de part et d'autre. On peut demander au sujet de « deviner » ce qui se trouve du côté aveugle, ou de presser un bouton quand il voit des stimuli du côté voyant. Diverses techniques mesurent l'activité cérébrale et les réactions involontaires, telles de légères mimiques ou la dilatation des pupilles.

La vision aveugle voit-elle les émotions ?

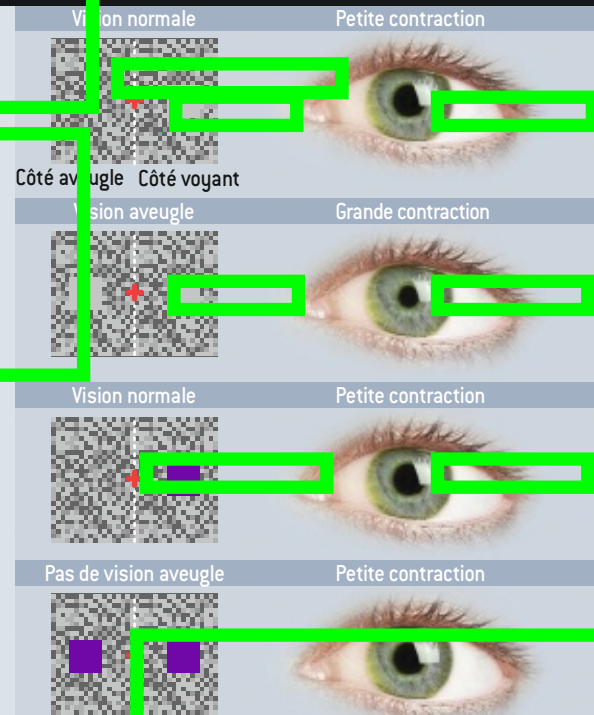
Lorsque l'auteur et ses collègues ont projeté des images de personnes exprimant des émotions dans le champ aveugle des patients, ces derniers ont le plus souvent deviné l'émotion. Les muscles faciaux sollicités pour sourire ou froncer les sourcils s'activaient en accord avec le type d'émotion non vue [ci-dessous, exagéré].

En conséquence, les émotions étaient reconnues sans vision consciente. Le même effet était obtenu avec des images de corps sans visage, ce qui suggère que les patients ne faisaient pas qu'imiter inconsciemment les expressions faciales, mais qu'ils reconnaissaient les émotions.

Patient ayant une vision aveugle



les mouvements faciaux



Quelles sont les régions cérébrales impliquées ?

L'auteur et ses collègues ont montré des carrés gris et violets à des patients, sachant que le colliculus supérieur dans le mésencéphale ne reçoit pas de signaux rétinien correspondant aux objets violets. Les carrés gris, mais pas les violets, déclenchaient des signes de vision aveugle – par exemple une contraction de la pupille plus importante. Ces résultats, avec ceux obtenus en imagerie cérébrale fonctionnelle, suggèrent que le colliculus supérieur joue un rôle majeur dans la vision aveugle.

Keith Kasrat, Lucy Redding-Ikanda

cônes rétiniens peut détecter – les cônes étant un des types de cellules réceptrices de la rétine – sachant que le colliculus supérieur ne reçoit pas de signaux de ces cônes. Le colliculus supérieur est aveugle à ce violet.

Un carré gris projeté sur le champ aveugle du patient accélérât sa réaction et provoquait une constriction plus importante de ses pupilles – ce qui indique un traitement inconscient du stimulus; le carré violet n'avait aucun effet. En d'autres termes, le patient présentait une vision aveugle pour les carrés gris, mais pas pour les violets (voir l'encadré ci-dessus).

Grâce à des scanners cérébraux, nous avons montré que seuls les carrés gris présentés dans son champ aveugle activaient davantage son colliculus supérieur. D'autres régions du mésencéphale seraient impliquées dans la vision aveugle, mais dans notre expérience, la vision aveugle semblait pas liée à la vision aveugle.

Chez l'homme, le colliculus supérieur intervient entre le traitement sensoriel (la vision) et le traitement moteur (aboutissant à l'action du patient); il participe ainsi au comportement guidé visuellement, mais de façon apparemment indépendante aux circuits corticaux et sans expérience visuelle consciente. La vision aveugle des émotions implique aussi le colliculus supérieur, ainsi que d'autres aires du mésencéphale, tel le noyau amygdalien.

Trainer les patients ?

Les philosophes s'intéressent à la vision aveugle, tout intrigués qu'ils sont par l'idée paradoxale de voir sans savoir que l'on voit. À l'évidence, cette idée n'est un paradoxe que si « voir » signifie « voir consciemment ». Or cette conception a rendu sceptiques bon nombre de scientifiques et a retardé notre compréhension du rôle de la vision inconsciente dans la cognition humaine.

Cet scepticisme peut aussi être un obstacle pour les patients qui souffrent d'une perte de vision dépendante du cortex, ce qui les empêche de mettre à profit le potentiel de leurs capacités visuelles résiduelles dans leur vie quotidienne.

Par exemple, notre patient naviguant dans un couloir encombré se considère aveugle et restera totalement dépendant de sa canne blanche tant qu'il ne sera pas convaincu qu'il peut voir sans le savoir. La pratique est pourtant utile. Après trois mois de simulations quotidiennes, des patients ayant une cécité corticale avaient amélioré leur capacité à détecter des cibles dans leur champ aveugle... Savoir si l'entraînement améliore vraiment les capacités de navigation reste, comme d'autres aspects de la vision aveugle, une question ouverte. Toutefois, les premières études françaises montrent qu'une récupération de la vision « consciente » dans le champ aveugle est envisageable (voir l'encadré page 38).



Charles D. est médecin
Et il sait que c'est grâce
à la recherche
qu'il peut mieux soigner

Toutes les maladies
doivent bénéficier
de la recherche

Photo : Christian Chamourat - Agence : beezart.com



Comme Charles, donnez à la *Fondation pour la Recherche Médicale*

La Fondation pour la Recherche Médicale agit dans tous les domaines de la recherche médicale : cancers, maladies neurologiques, maladies infectieuses, maladies cardiovasculaires, maladies des os, maladies du système immunitaire, maladies du sang... Forte d'une expérience de 63 ans et de sa connaissance des besoins et des urgences de la recherche médicale, elle soutient des chercheurs couvrant tous les domaines de recherche. Fin 2009, les projets de plus de 750 équipes de recherche étaient financés. Ces projets sont sélectionnés par son Conseil scientifique car porteurs de grands espoirs de progrès médical. Totalement indépendante de l'État, reconnue d'utilité publique, la Fondation accomplit sa mission grâce à la générosité de ses donateurs.

En soutenant la Fondation pour la Recherche Médicale, vous participez au développement d'une recherche médicale de pointe, au service de votre santé, de celle de vos proches ; de la santé de tous.



FONDATION POUR LA RECHERCHE MÉDICALE - www.frm.org
54, rue de Varenne 75007 Paris - 01 44 39 75 75



1. LE PÉTILLEMENT DES BULLES à la surface de la coupe de champagne provoque l'expulsion de minuscules jets de liquide qui se scindent en plusieurs gouttelettes. L'aérosol formé est chargé en molécules aromatiques.

Le champagne, ce pétillant qui s'est notablement amélioré à la fin du XVI^e siècle sous l'impulsion du moine dom Pierre Pérignon (1639-1715), à l'abbaye de Hautvillers, près d'Épernay, est devenu synonyme de fête et de réussite. L'effervescence des bulles n'est pas étrangère à la notoriété de ce breuvage. Mais c'est seulement depuis quelques années que l'on commence à déterminer les mécanismes de la formation des bulles et leur rôle gustatif.

Quels sont les principaux acteurs responsables de l'effervescence du champagne? Le dioxyde de carbone dissous est-

commun à tous les vins) qui a lieu en bouteille close, dans la fraîcheur des caves. Lors de cette seconde phase, la prise de mousse, des levures sont ajoutées et transforment les sucres en alcool et en dioxyde de carbone.

Une bouteille de 75 centilitres contient environ neuf grammes de dioxyde de carbone dissous, ou cinq litres à pression atmosphérique, ce qui représente six fois le volume de la bouteille! Sous le bouchon, le dioxyde de carbone accumulé

la pression partielle de ce gaz atteint 6×10^5 pascals ou six bars, soit six fois la pression atmosphérique.

Champagne : l'arôme au cœur des bulles

G. Lige-Berlan, R. Gudgeon et Ph. Schmitt-Koppin

Lorsqu'elles éclatent, les bulles dispersent au-dessus de la coupe de champagne un brouillard de minuscules gouttelettes, où se concentrent les molécules aromatiques.

il perçu par le consommateur? Quel est le rôle joué par les bulles dans la perception des arômes du champagne? Des analyses chimiques ont permis de répondre à ces questions. Nous préciserons les mécanismes physico-chimiques liés à l'éclatement des bulles à la surface d'une flûte et nous analyserons leur rôle dans la libération des arômes.

Rapportons comment les bulles se forment dans une flûte. Sous le bouchon de liège, le liquide est calme, aucune bulle ne se forme. Le champagne n'a pourtant rien d'un vin tranquille (appellation donnée aux vins non effervescents). Il contient en réalité du dioxyde de carbone dissous, mais ce n'est qu'au moment où l'on débouche la bouteille que les bulles apparaissent. C'est l'effervescence.

Le dioxyde de carbone se forme lors de la seconde fermentation alcoolique (la première fermentation alcoolique, en cave

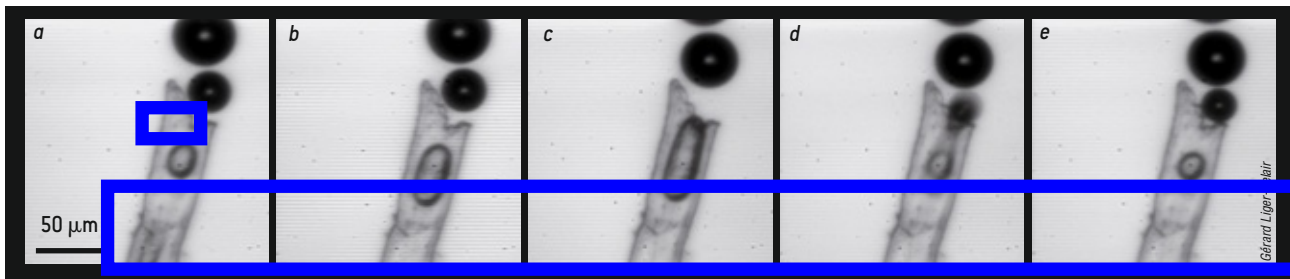
Selon la loi de Henry, à température constante et à saturation, la quantité de gaz dissous dans un liquide est proportionnelle à la pression partielle de ce gaz. En appliquant cette loi, on trouve que sous cet excès de dioxyde de carbone, le champagne peut dissoudre 12 grammes par litre de ce gaz. Dès l'ouverture, la surface du liquide est au contact de l'air extérieur, c'est-à-dire à la pression atmosphérique. La solubilité du gaz diminue brusquement et les premières bulles apparaissent.

Si l'effervescence est la seule visible à l'œil nu, elle ne représente que 20 pour cent du total du dégazage. Dans une flûte classique, environ 80 pour cent du dioxyde de carbone dissous s'échappent par diffusion à travers la surface, à l'interface liquide-air. Cette forme de dégazage est plus importante dans une coupe que dans une flûte.

L'ESSENTIEL

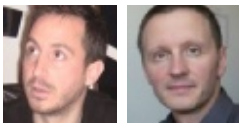
- ✓ Au-delà de leur aspect plaisant, les bulles favorisent la concentration des arômes du champagne.
- ✓ L'éclatement des bulles à la surface de la coupe forme un brouillard de gouttelettes chargées en molécules volatiles odorantes.
- ✓ Les bulles exercent un picotement mécanique et chimique lorsqu'elles éclatent sur la langue.
- ✓ L'arôme créé lors de l'explosion des bulles rappelle les embruns qui se forment à la surface des océans.

Alain Cornu/Collection CIVC



2. LES FIBRES CREUSES DE CELLULOSE adsorbées sur la paroi de la coupe (provenant de torchons d essuyage) piègent des bulles d'air qui grossissent à mesure de la diffusion du dioxyde de carbone dissous (a-c). Quand la bulle, enrichie en dioxyde de carbone, atteint une taille critique, elle s'échappe (d-e). Une milliseconde sépare deux clichés successifs.

LES AUTEURS



Gérard LIGER-BELAIR est professeur de physique au Laboratoire d'œnologie de l'Université de Reims. Régis GOUGEON est maître de conférences, dans l'Équipe Eau, Molécules Actives, Macromolécules, Activités (EMMA), de l'Institut universitaire de la vigne et du vin à l'Université de Bourgogne, à Dijon. Philippe SCHMITT-KOPPLIN est directeur de recherche au Centre Helmholtz, à Munich.

BIBLIOGRAPHIE

G. Liger-Belair et C. Delpech, *Tempête dans un verre de champagne ! Pour la Science*, n° 362, pp. 66-70, 2007.

G. Liger-Belair et al., *Unraveling different chemical fingerprints between a champagne wine and its aerosols*, *PNAS*, vol. 106, pp. 16545-16549, 2009.

Chandrasekhar et al., *The taste of carbonation*, *Science*, vol. 326, pp. 443-445, 2009.

G. Liger-Belair, *Effervescence : La science du champagne*, Odile Jacob, 2009.

Contrairement à une idée reçue, les bulles de champagne ne se forment pas sur les défauts du verre. Ce sont des particules des fibres de cellulose provenant des torchons d'essuyage ou des microcristaux de tartre présents dans le vin, qui donnent naissance aux bulles. De minuscules bulles d'air ont été piégées dans les safractuosités de ces particules au moment de verser le champagne. La pression à l'intérieur de ces microbulles d'air étant inférieure à la pression en dioxyde de carbone dissous, ce dernier y diffuse. La bulle gonfle à mesure de la diffusion du dioxyde de carbone, puis s'échappe de sa cavité quand elle a atteint une taille critique.

Ces microbulles d'air sont autant de mini-ascenseurs par lesquels le dioxyde de carbone dissous rejoint la surface en formant un train de bulles (voir la figure 2). Une fibre de cellulose émet plusieurs dizaines de milliers de bulles. On nomme « nucléation hétérogène » la formation de bulles de gaz carbonique à partir d'un germe de gaz préexistant dans le champagne (ou de toute autre boisson gazeuse).

Des centaines de bulles éclatent juste après le remplissage d'une flûte. Lorsqu'une bulle éclate à la surface de la coupe, elle projette un minuscule jet de champagne qui se brise en gouttelettes. La surface du liquide est alors piquetée de centaines de jets minuscules (voir la figure 3) se brisant à leur tour en plusieurs gouttelettes. Ce sont des centaines de gouttelettes, parfois des milliers, qui sont projetées chaque seconde, plusieurs centimètres au-dessus de la surface, sous la forme d'un « aérosol de champagne » qui picote le visage (voir la figure 1). Observons comment se forme cet aérosol.

Le jet de champagne se brise en plusieurs gouttelettes, car la somme des surfaces de multiples gouttelettes est inférieure à la surface du petit cylindre de liquide qui

jaillit de la surface. L'énergie de surface du système est ainsi minimisée. C'est l'instabilité de Rayleigh, également responsable d'un phénomène facile à observer : un mince filet d'eau qui s'écoule d'un robinet se scinde en gouttelettes.

Le jet de champagne parcourt une courte distance au-dessus de la coupe avant de se briser en gouttelettes. D'après les équations de la mécanique des fluides, on montre qu'il se fragmente au bout de quelques dixièmes de milliseconde. Pour des bulles millimétriques, comme celles du champagne, on compte environ cinq gouttelettes par bulle.

Picotes mécaniques et chimiques

Le dioxyde de carbone dissous influe de deux façons sur la dégustation du champagne. Il exerce deux types de stimulations : une « piqure » mécanique et une « piqure » chimique, faisant intervenir des récepteurs sensoriels de la douleur et des récepteurs sensibles à l'acidité. Les gouttelettes de liquide projetées à la surface lors de l'éclatement des bulles stimulent d'abord les nocicepteurs (les récepteurs sensoriels de la douleur) situés dans le nez. Quant aux bulles de dioxyde de carbone qui éclatent dans la bouche lors de la dégustation, elles stimulent les nocicepteurs situés à la surface de la langue et du palais.

Ces picotements mécaniques sont véhiculés par le nerf trijumeau. Ce nerf se subdivise en trois branches innervant les muscles de la face, l'une dans la cavité buccale, une autre dans la région nasale et la troisième au niveau des yeux. C'est pourquoi lorsque nous consommons certains aliments (par exemple de la menthe, du piment), la sensation de picotement remonte de la bouche vers le nez ou les yeux, sans picotement

La piqûre est d'autant plus forte que le champagne est effervescent (donc riche en dioxyde de carbone dissous). Ainsi, les vieux champagnes, appauvris en gaz car le bouchon poreux en a laissé s'échapper, sont perçus comme moins vifs que les champagnes jeunes.

Des picotements dus au dioxyde de carbone

En 2009, Charles Zuker et ses collègues, de l'Université Columbia à New York, ont montré qu'au contact de la langue, le dioxyde de carbone dissous dans le champagne exerce une piqûre dite chimique. Chez la souris, des cellules de papilles gustatives possèdent des récepteurs sensibles à l'acidité (des chimiorécepteurs) sont activées en présence de dioxyde de carbone. Ils ont identifié le gène impliqué : *Car4*. Il code une enzyme, l'anhydrase carbonique 4, située dans la membrane des cellules sensibles à l'acidité.

Cette enzyme catalyse la réaction d'hydratation du dioxyde de carbone dissous en acide carbonique H_2CO_3 , lequel se dissocie en protons H^+ et en ions bicarbonates HCO_3^- . Dans la salive (dont le pH est dans les conditions habituelles proche de 7, c'est-à-dire neutre), l'apport de dioxyde de carbone déplace l'équilibre de dissociation de H_2CO_3 en faveur des ions H^+ . Ces derniers, libérés dans le milieu extracellulaire, activent ensuite les chimiorécepteurs PKD2L1 des cellules sensi-

bles à l'acidité, d'où le picotement chimique caractéristique.

Les expériences ont été menées sur la souris, mais les résultats obtenus sont-ils transposables à l'homme ? Pour vérifier les conclusions de Ch. Zuker et de son équipe, il faudrait organiser une dégustation de champagne dans une enceinte sous pression (autour de quatre ou cinq bars) pour empêcher l'effervescence et par la même occasion la piqûre mécanique. Dans ces conditions, le dioxyde de carbone dissous devrait activer les récepteurs sensibles à l'acidité – via la formation des ions H^+ – et provoquer la piqûre chimique attendue. Sans doute aura-t-il trouvé une autre façon de valider l'hypothèse...

Une anecdote vient conforter les conclusions de l'équipe de Ch. Zuker. En 1988, un médecin nommé Stephan Kelleher venait de gravir un sommet. Afin de se prémunir contre le mal des montagnes dont il souffre, il a pris un médicament à base d'acétazolamide. Or les enzymes des cellules sensibles à l'acidité sont inhibées par cette molécule. Pour célébrer leur ascension, S. Kelleher et ses compagnons décident de déboucher une bouteille de champagne. À sa grande surprise, le médecin rapporte que dans sa bouche le breuvage fut d'une grande platitude. En 1988, il ne s'expliquait pas le

phénomène. On le comprend mieux aujourd'hui à la lumière des travaux de l'équipe américaine. Les enzymes des cel-

lules sont sensibles à l'acidité, neutralisées par l'acétazolamide, ne lui permettaient plus de ressentir la piqûre chimique du dioxyde de carbone dissous.

Outre les picotements mécaniques et chimiques, l'éclatement des bulles semble jouer un rôle majeur dans la libération des arômes du champagne. Des centaines de composés organiques sont présents dans le champagne. Or beaucoup d'entre eux sont amphiphiles, c'est-à-dire que leurs molécules ont une double affinité : une partie de la molécule amphiphile est hydrophobe tandis que l'autre est hydrophile. C'est notamment le cas des alcools, de certains aldéhydes ainsi que des acides organiques.

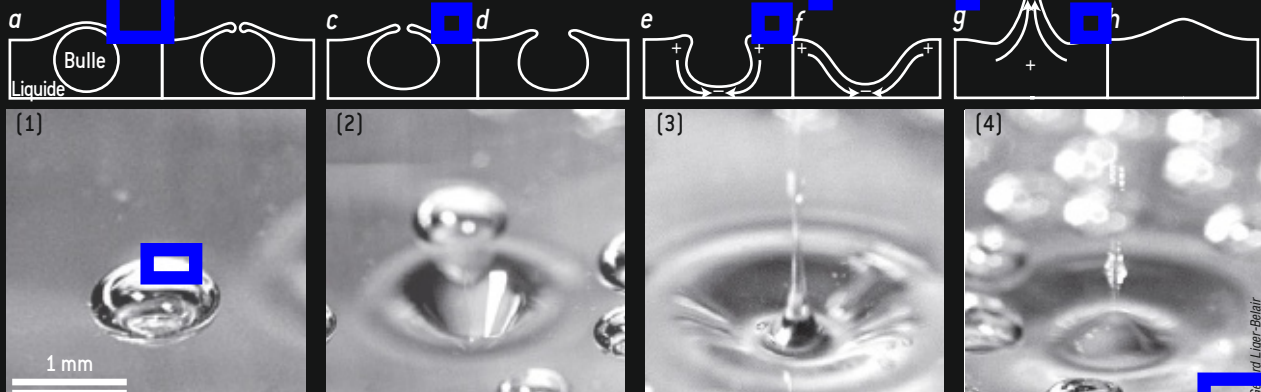
Les bulles, exhausteurs d'arômes

Les molécules amphiphiles tendent à se placer aux interfaces gaz-liquide. Leur partie hydrophile est orientée vers le liquide et leur partie hydrophobe vers le gaz. Les bulles participent à l'ascension des molécules amphiphiles – seule une partie d'entre elles ont des propriétés aromatiques qui s'y adsorbent. On estime que la surface cumulée de toutes les bulles produites dans une flûte avoisine deux mètres carrés.

Pour cette raison, les mini-ascenseurs qui véhiculent le dioxyde de carbone devraient aussi transporter les molécules aromatiques. Ces dernières devraient se

3. LA SÉQUENCE DE PHOTOGRAPHIES illustre la formation d'un jet de champagne (3) suite à l'éclatement d'une bulle en surface (1) et qui se scinde en plusieurs gouttelettes (4). Environ une milliseconde sépare deux clichés successifs. La séquence schématisée détaille les étapes de la formation de l'aérosol. La partie émergée de la bulle est séparée de l'atmosphère par un mince film de liquide (a). Ce film finit par se rompre sous l'effet de la pression de la bulle ; l'ouverture s'élargit à la vitesse de dix mètres par seconde (b à f). D'après la loi de Laplace reliant courbure

d'une interface et pression, il se crée un gradient de pression autour de la cavité. Une surpression (signe +) apparaît dans le liquide au bord du film et une dépression (signe -) sous la partie renflée (e). Le liquide se déplace vers les fortes pressions vers les basses pressions (f), un jet de liquide se forme (g), puis se scinde en gouttelettes (h).



La chimie des arômes de champagne

Le champagne est élaboré à partir de trois cépages (Chardonnay, Pinot noir et Pinot Meunier) dits non aromatiques, c'est-à-dire ne contenant pas de molécules responsables de l'arôme variétal, contrairement au Muscat ou au Gewürztraminer (un cépage qui rentre dans la composition de vins alsaciens). Les molécules qui participent à l'arôme du champagne sont les arômes primaires, présents dans le raisin et que l'on retrouve dans le vin.

Les raisins des cépages utilisés en Champagne ne contiennent que des précurseurs d'arômes non volatils. Ils sont formés par l'association d'une molécule odorante et d'un glucoside (un dérivé du glucose), ce qui les rend inodores. Au cours de la fermentation alcoolique, des enzymes libèrent les molécules odorantes en coupant la liaison glucosidique. Les molécules odorantes sont alors libérées.

Les arômes caractéristiques des vins de la région de Champagne résultent d'un mélange complexe de plusieurs composés d'origine fermentaire ou non (c'est-à-dire provenant du raisin). Parmi les molécules qui participent à l'arôme de ces vins, on détecte des acides organiques (acide méthylbutanoïque, acide

octanoïque...), avec des odeurs douces, épicées ou de pain croustillant. Ces odeurs sont dues à la formation de composés soufrés volatils (méthyl mercaptan, éthyl mercaptan, furanone et diméthyl sulfure...) dont la concentration augmente avec l'âge du champagne. Pour les vins tranquilles, comme pour les champagnes, les parfums ne résultent pas seulement de la présence de molécules odorantes spécifiques, mais des interactions de tous les composés du vin. De nombreux paramètres physico-chimiques – acidité, teneur en alcool, en tanins, en su-

crs... – influencent la composition du champagne. Les molécules qui participent à la saveur caractéristique du champagne sont libérées lors de la seconde fermentation correspondant à la prise de mousse. La période pendant laquelle le vin est au contact des levures peut durer plusieurs années. Les levures vont alors libérer les molécules responsables des arômes secondaires du champagne. On y trouve des esters, des acides gras et des alcools. Au cours de cette fermentation, la concentration en ces composés peut varier parce qu'ils s'adsorbent sur les lies des levures. Il en va de même pour les tanins, les associations tanins-protéines ou les complexes de ces derniers. Dans le cas des champagnes rosés, lesquels participent à l'astringence et à la couleur des vins.

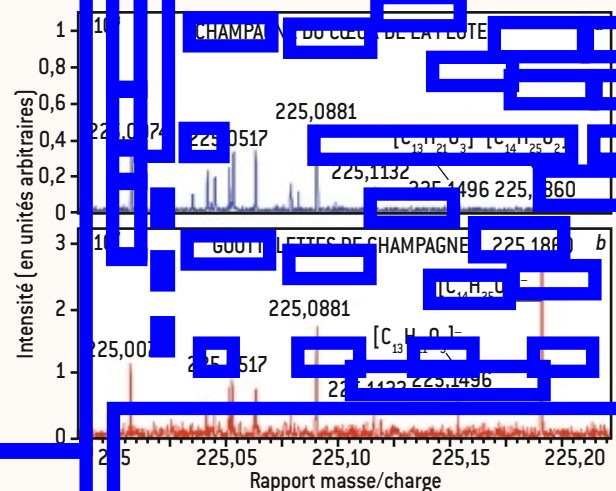
Les vieux champagnes, c'est la note empreinte de leur arôme qui évoque des odeurs de torréfac-

tion, de pain riche ou de pain croustillant. Ces odeurs sont dues à la formation de composés soufrés volatils (méthyl mercaptan, éthyl mercaptan, furanone et diméthyl sulfure...) dont la concentration augmente avec l'âge du champagne.

Pour les vins tranquilles, comme pour les champagnes, les parfums ne résultent pas seulement de la présence de molécules odorantes spécifiques, mais des interactions de tous les composés du vin. De nombreux paramètres physico-chimiques – acidité, teneur en alcool, en tanins, en su-

crs... – influencent la composition du champagne. Les molécules qui participent à la saveur caractéristique du champagne sont libérées lors de la seconde fermentation correspondant à la prise de mousse. La période pendant laquelle le vin est au contact des levures peut durer plusieurs années. Les levures vont alors libérer les molécules responsables des arômes secondaires du champagne. On y trouve des esters, des acides gras et des alcools. Au cours de cette fermentation, la concentration en ces composés peut varier parce qu'ils s'adsorbent sur les lies des levures. Il en va de même pour les tanins, les associations tanins-protéines ou les complexes de ces derniers. Dans le cas des champagnes rosés, lesquels participent à l'astringence et à la couleur des vins.

Les vieux champagnes, c'est la note empreinte de leur arôme qui évoque des odeurs de torréfac-



Le champagne

de la tradition à la science

NOUVEAU

Aucun livre récent ne traitait exclusivement et de manière complète du procédé d'élaboration du champagne ou des vins effervescents selon la méthode traditionnelle. Cette lacune est désormais comblée avec *Le champagne, de la tradition à la science* qui développe toutes les spécificités liées à cette œnologie.

Après un rappel historique qui permet de comprendre pourquoi le champagne a atteint la notoriété mondiale qu'il occupe aujourd'hui, cet ouvrage expose :

- les **spécificités de la culture** de la vigne en champagne
 - les différentes étapes de l'**élaboration** du champagne : pressurage, fermentations et assemblage
 - les étapes propres à l'élaboration des champagnes et des vins préparés **selon la méthode traditionnelle** en explicitant les étapes de tirage, de prise de mousse, de vieillissement sur lies en bouteilles, de remuage et de dégorgement
 - les différents **éléments extérieurs** (verre, température du champagne, etc.) qui contribuent à une effervescence généreuse et à un cordon stable
 - les **caractéristiques analytiques** du champagne et le sens des différents termes utilisés par les professionnels ou les œnophiles lors des dégustations
 - les différents **aspects toxicologiques et sanitaires** liés à une consommation modérée du champagne
 - les différents **modes d'élaboration** des vins effervescents existant de par le monde
 - les **problèmes d'environnement et de développement durable** liés à la culture de la vigne et à l'élaboration du champagne.
- En conclusion un essai de prospective sur ce que sera le champagne dans les années à venir est proposé.

Conçu pour les élaborateurs de vins effervescents, en particulier les récoltants manipulateurs, désirant mieux comprendre leur travail au quotidien, *Le champagne, de la tradition à la science* s'adresse aussi bien aux œnologues, qu'aux amoureux du champagne désirant mieux connaître ce produit qu'ils apprécient particulièrement.



Le champagne
de la tradition à la science
Bruno DUTEURTRE

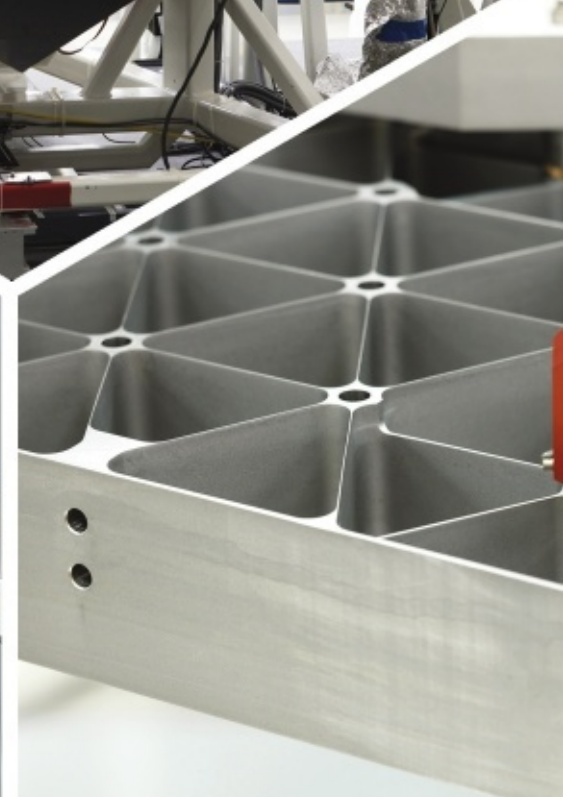
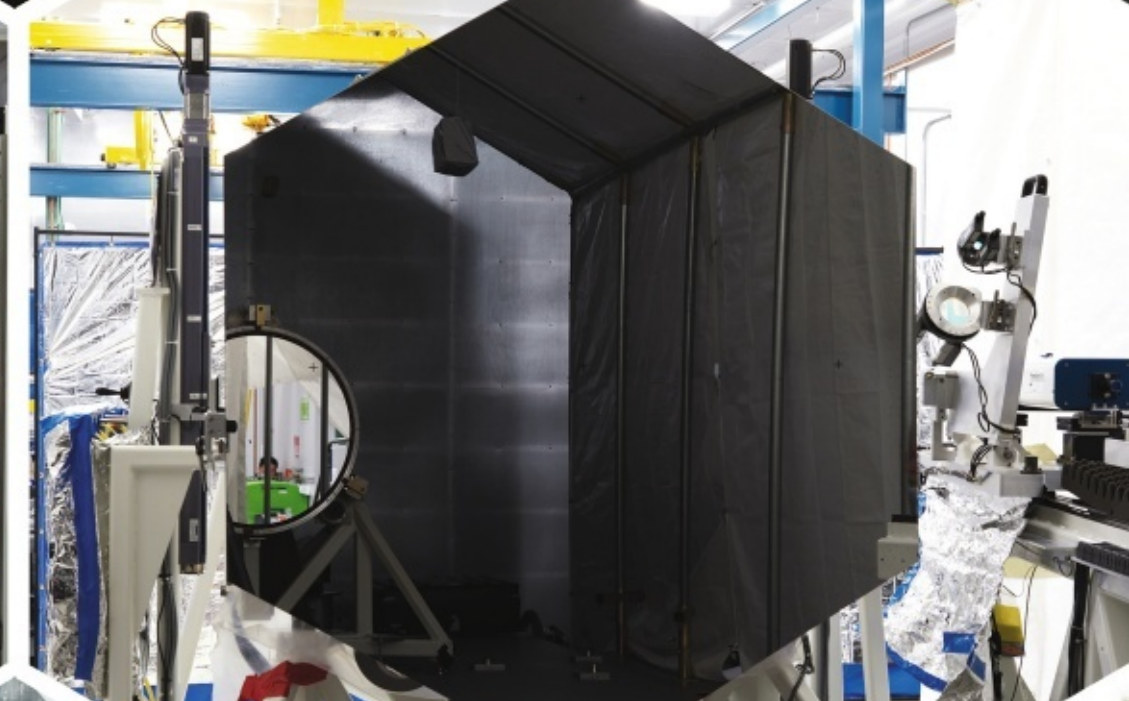
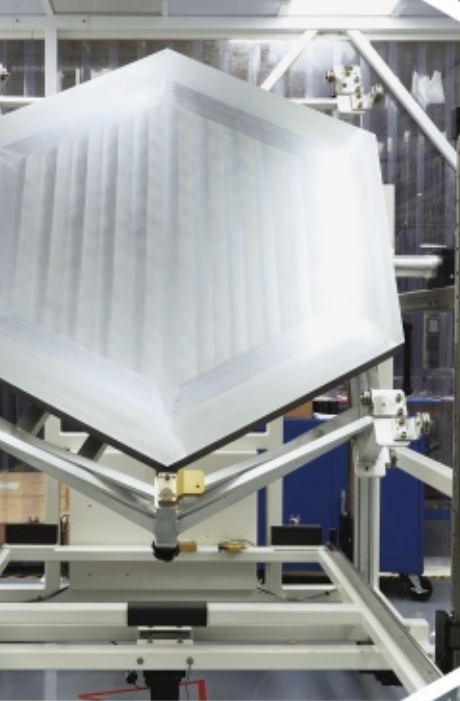
Éditions Tec & Doc - Lavoisier
ISBN : 978-2-7430-1272-2
364 pages • 15,5 x 24 cm • broché • 2010
75 €

L'auteur

Bruno DUTEURTRE, Ingénieur-docteur ENSAIA de Nancy, a travaillé pendant 11 ans pour les Brasseries Kronenbourg, particulièrement comme chef de projet microbiologie au centre de recherche Teptral, avant de rejoindre Moët & Chandon pour développer et diriger pendant plus de 20 ans le service de recherche dans différents domaines tels que la recherche viticole, les fermentations, le vieillissement sur lies du champagne, la mousse et l'effervescence.

En vente chez votre libraire habituel

ou à la librairie Lavoisier : 11, rue Lavoisier F-75008 Paris • www.Lavoisier.fr



Le télescope spatial *James Webb*, un observatoire origami

Robert L. Fienberg

Orbite lointaine, températures glaciales, optique active et déploiement dans l'espace... D'immenses défis techniques attendent le télescope spatial *James Webb*, qui succédera à *Hubble* en 2014.

Les saississantes, mais avec une vue beaucoup plus lointaine. Les astronomes l'ont conçu pour scruter les débuts de l'Univers. Il pourra repérer l'explosion des premières étoiles formées après le Big Bang, et découvrir l'origine des galaxies semblables à la Voie lactée. Il regardera aussi au plus profond des nuages de poussière et de gaz, où se déroule la gestation des étoiles et de leurs planètes.

Pour atteindre ces objectifs, le télescope *James Webb*, ainsi nommé en l'honneur de l'administrateur de la NASA durant l'ère *Apollo*, différera radicalement de son prédécesseur. Son miroir léger aura une envergure de plus de 6,5 mètres, ce qui lui conférera une surface collectrice de lumière six fois supérieure au miroir de *Hubble*. Recouverts d'or, les 18 panneaux hexagonaux indépendants du miroir s'aligneront avec une précision d'un dix-millième de l'épaisseur d'un cheveu pour se comporter comme une surface uniforme.

La NASA mettra cet observatoire sur une orbite située bien au-delà de la Lune. En chemin, un bouclier thermique géant s'ouvrira, dont l'ombre maintiendra les instruments à une température inférieure à 55 kelvins (-218°C), afin de détecter le rayonnement infrarouge émis par les objets lointains il y a plus de 13 milliards d'années.

1. DES ÉLÉMENTS DU MIROIR du télescope spatial *James Webb* sont montés pour être testés dans une chambre ultracryogénique (en haut à gauche). Chaque segment, large de 1,20 mètre, est constitué de beryllium, un matériau difficile à polir (en bas).

L'ESSENTIEL

✓ Le successeur du télescope spatial *Hubble*, le télescope *James Webb*, est d'un type entièrement nouveau.

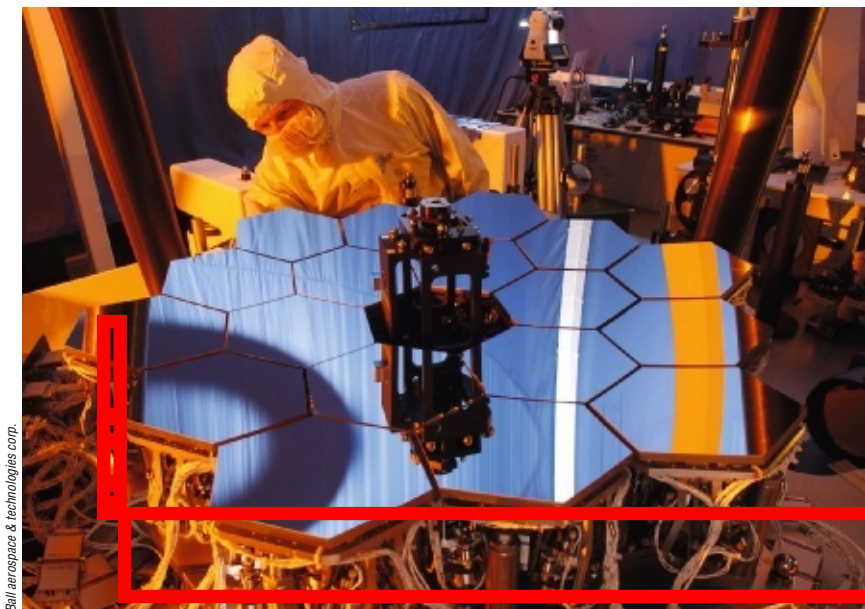
✓ Avec un miroir de 6,5 mètres composé d'une mosaïque d'éléments ajustables, il collectera six fois plus de lumière que *Hubble*.

✓ Dans l'infrarouge, il observera les premières étoiles et galaxies de l'Univers, ainsi que les étoiles naissantes au sein de leur cocon de poussière.

✓ Repliés pour le lancement, son miroir et son bouclier thermique se déploieront dans l'espace, un défi technique sans précédent.

Le miroir, entièrement parfait de son l'acier, est placé verticalement sur une plate-forme basse. Cette dalle de beryllium d'un peu plus de 1,20 mètre de diamètre, sculptée avec précision, luit dans la pénombre du laboratoire d'optique. Malgré ses cinq centimètres d'épaisseur, elle est étonnamment légère : elle est creuse. Les ingénieurs ont évidé son envers, ne laissant qu'un entrelacs de fines nervures. La face de beryllium poli restante ne mesure que 2,5 millimètres d'épaisseur. Il ne reste ainsi que 21 kilogrammes des 250 de départ. C'est suffisamment léger pour qu'une fusée *Ariane 5* puisse envoyer 18 éléments de miroir dans l'espace, où ils seront assemblés pour n'en former qu'un, au cœur du plus audacieux observatoire spatial jamais mis en orbite.

Le *James Webb Space Telescope* (ou JWST), développé par la NASA en partenariat avec les agences spatiales européenne et canadienne, est prévu pour succéder en 2014 au télescope spatial *Hubble*. Ce dernier, en orbite à 570 kilomètres au-dessus de la Terre depuis 1990, livre aux astronomes les vues les plus nettes de l'Univers lointain et de la naissance ou de la mort d'étoiles plus proches. Comme *Hubble*, le télescope spatial *James Webb* promet des ima-



Bell Aerospace & Technologies corp.

2. LE MIROIR PRIMAIRE d'une version à l'échelle 1/6 du télescope *James Webb* sur un banc d'essai. En forme de nid d'abeilles, il est constitué de 18 éléments hexagonaux en béryllium. Les instruments occupent l'hexagone central.

Ces objectifs impliquent une prise de risques sans précédent. En premier lieu, contrairement à *Hubble*, qui a eu droit à plusieurs réparations et améliorations au cours de ses deux décennies d'exploitation, le télescope *James Webb* une fois en service sera trop loin pour que des astronautes puissent le réparer. Il n'y aura pas de deuxième chance. De plus, l'engin devra être replié pour tenir dans le module porteur d'un lanceur *Ariane 5*, qui impose des limites strictes au poids et aux dimensions du télescope. Placé sur son orbite, l'observatoire devra alors se déployer comme un papillon sortant de sa chrysalide, avec une précision chorégraphique. C'est pour quoi on qualifie parfois ce projet de « télescope origami », en référence à l'art japonais du pliage de papier.

Le coût du projet, environ 3,5 milliards d'euros, a déjà largement dépassé le budget initial. Les défis techniques se sont révélés plus importants que prévu. Cet investissement n'est cependant pas très éloigné de ceux d'autres satellites pionniers. Le télescope à rayons X *Chandra*, en orbite depuis 1999, et la sonde *Cassini*, qui explore actuellement Saturne et ses lunes, ont par exemple coûté chacun environ 2,8 milliards d'euros.

Certains chercheurs pensent néanmoins que le télescope *James Webb* drainera une part disproportionnée du budget de la NASA pour l'astronomie, au détriment d'autres missions. Les projets destinés à

étudier les ondes gravitationnelles, l'Univers aux hautes énergies, et les planètes telluriques autour d'autres étoiles devront maintenant attendre 2020, voire davantage. Et même les partisans du télescope *James Webb* ont des doutes : la mission se déroulera-t-elle comme prévu ?

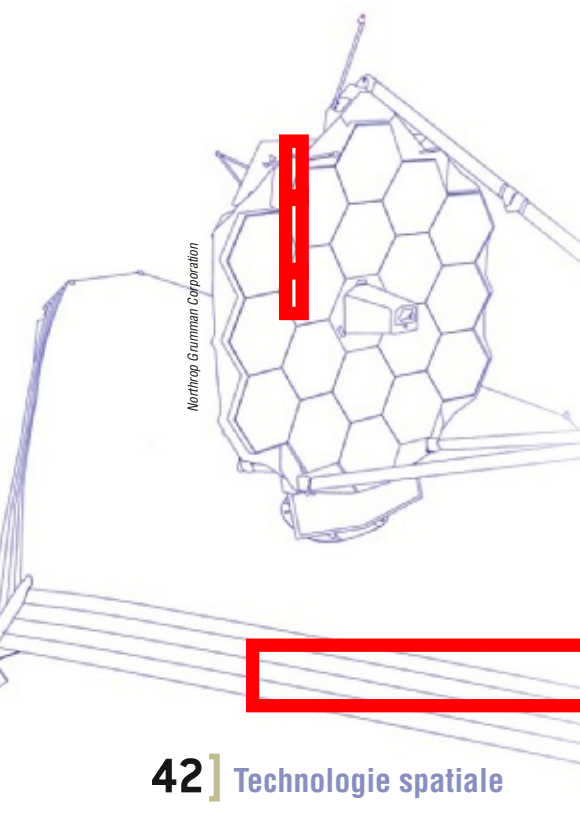
L'essentiel du déploiement du télescope se fera bien avant qu'il n'atteigne sa destination finale, le point de Lagrange L_2 , un point d'équilibre gravitationnel situé à 1,5 million de kilomètres dans la direction opposée au Soleil, où le vaisseau suivra le rythme de la Terre sur son orbite. De petites poussées des moteurs seront nécessaires pour maintenir l'observatoire en orbite autour du point de Lagrange. Ses réserves de combustible sont prévues pour une dizaine d'années.

Pourquoi placer le télescope aussi loin ? Pour éviter, comme l'Observatoire *Hubble*, il ne baigne dans la lueur infrarouge thermique de la Terre, et soit donc aveugle à la faible lumière infrarouge des objets lointains. La lumière émise dans le domaine visible du spectre lumineux par les objets des premiers âges de l'Univers a en effet été décalée vers l'infrarouge par l'expansion cosmique durant les milliards d'années qu'elle a mis pour nous parvenir.

Une fenêtre sur l'Univers lointain

Le télescope spatial *James Webb* utilisera ainsi des capteurs infrarouges pour repérer l'éclat des premières galaxies qui se sont assemblées. Ces embryons galactiques existaient probablement 400 millions d'années environ après le Big Bang, soit à peine trois pour cent de l'âge actuel de l'Univers. L'observatoire spatial pourrait même détecter des lueurs encore plus anciennes, celles des premières étoiles, des monstres 100 fois plus massifs que notre Soleil. Ces étoiles dites de population III ont dû exploser en supernovae après une brève existence, crachant des flots de lumière qui se propagent encore.

Le télescope est ainsi conçu pour voir très loin dans le passé. Mais l'infrarouge ouvre également une fenêtre sur des objets plus proches, en permettant de voir à travers les voiles de poussière qui cachent les pouponnières d'étoiles et de planètes dans notre Galaxie. À l'heure actuelle, les planètes extrasolaires sont essentiellement détectées dans le domaine visible, si bien qu'on voit seulement les objets ayant net-



toyé» le disque de gaz et de poussière qui les ont créés. Mais puisque le rayonnement infrarouge traverse la poussière, le télescope *James Webb* dévoilera les étapes précoces de ce processus de formation planétaire. Il nous aidera ainsi à déterminer si le Système solaire est rare ou banal. Il pourra aussi déterminer la composition de l'atmosphère des planètes en transit (qui passent devant le disque apparent de leur étoile). Et qui sait s'il ne trouvera pas un mélange d'oxygène, de dioxyde de carbone et de méthane ? Ce serait le premier signe de vie extraterrestre...

Les avantages du béryllium

Comme d'autres télescopes spatiaux, le miroir du télescope *James Webb* sera en béryllium, le deuxième métal le plus léger. Avec ses 6,50 mètres de diamètre, ce miroir principal n'est pas immense comparé à ceux des télescopes au sol actuels, qui atteignent 10 mètres, et bientôt 30 ! Mais la création de 18 panneaux de béryllium destinés à être assemblés de façon automatique dans l'espace est un défi technique inédit.

Il a été relevé par les ingénieurs de l'entreprise d'optique *Tinsley*, en Californie. Au début du projet, les astronomes pensaient qu'ils utiliseraient du verre ULE (à coefficient de dilatation ultrafaible), qui conserve sa forme quand la température varie. Mais quand les ingénieurs ont plongé des miroirs tests dans un froid proche de celui auquel sera soumis le télescope, le verre s'est contracté d'une façon qui aurait détérioré l'instrument. Le béryllium, en revanche, reste rigide dans les mêmes conditions.

Ce changement de matériau a cependant retardé d'un an la construction du miroir, car le béryllium est plus long à polir. Il est très difficile de réaliser un miroir en béryllium dépourvu de contraintes de cisaillement. Sculpter la surface a tendance à courber le métal vers le haut. Il faut alors éliminer cette couche en tension en attaquant doucement le miroir à l'acide ou en le raclant avec un outil bien affûté. C'est un processus fastidieux.

Huit machines, hautes de deux étages chacune, sont destinées au polissage des éléments du miroir. Chacune traite un élément à la fois. La durée du polissage par une tête rotative de la taille d'une grande assiette, sur chaque zone précise, est contrôlée par ordinateur. Le miroir est poli jusqu'à cinq millimètres du bord, processus qui

n'avait encore jamais été tentée sur des surfaces aussi grandes. Avec une marge de deux fois plus large, le télescope focaliserait 25 pour cent de lumière en moins, une grosse perte d'information pour les objets les moins brillants.

La précision du polissage est ensuite mesurée au laboratoire de métrologie de *Tinsley* dans un lieu fermé où la température est strictement contrôlée. Des lasers infrarouges et d'autres outils évaluent la hauteur de la surface du miroir en des centaines de milliers de points. Un panneau peut faire quelques dizaines d'allers et retours entre le polissage et le laboratoire de métrologie pour atteindre la forme et la finition requises par la NASA.

Chaque élément de miroir est ensuite acheminé par avion jusque chez *Ball Aerospace*, où les ingénieurs le fixent à une structure en composite de graphite qui le maintient en place dans le télescope. Il est ensuite envoyé au Centre Marshall de vol spatial de la NASA à Huntsville, dans l'Alabama, pour des essais dans une grande



3. L'OSSATURE DU MIROIR PRIMAIRE, fabriquée avec des composites de graphite, du titane et un alliage de nickel et d'acier, est conçue pour ne pas se courber de plus de 32 nanomètres.

L'AUTEUR



Robert IRION, ancien correspondant de la revue *Science*, dirige le programme de communication des sciences à l'Université de Californie à Santa Cruz.

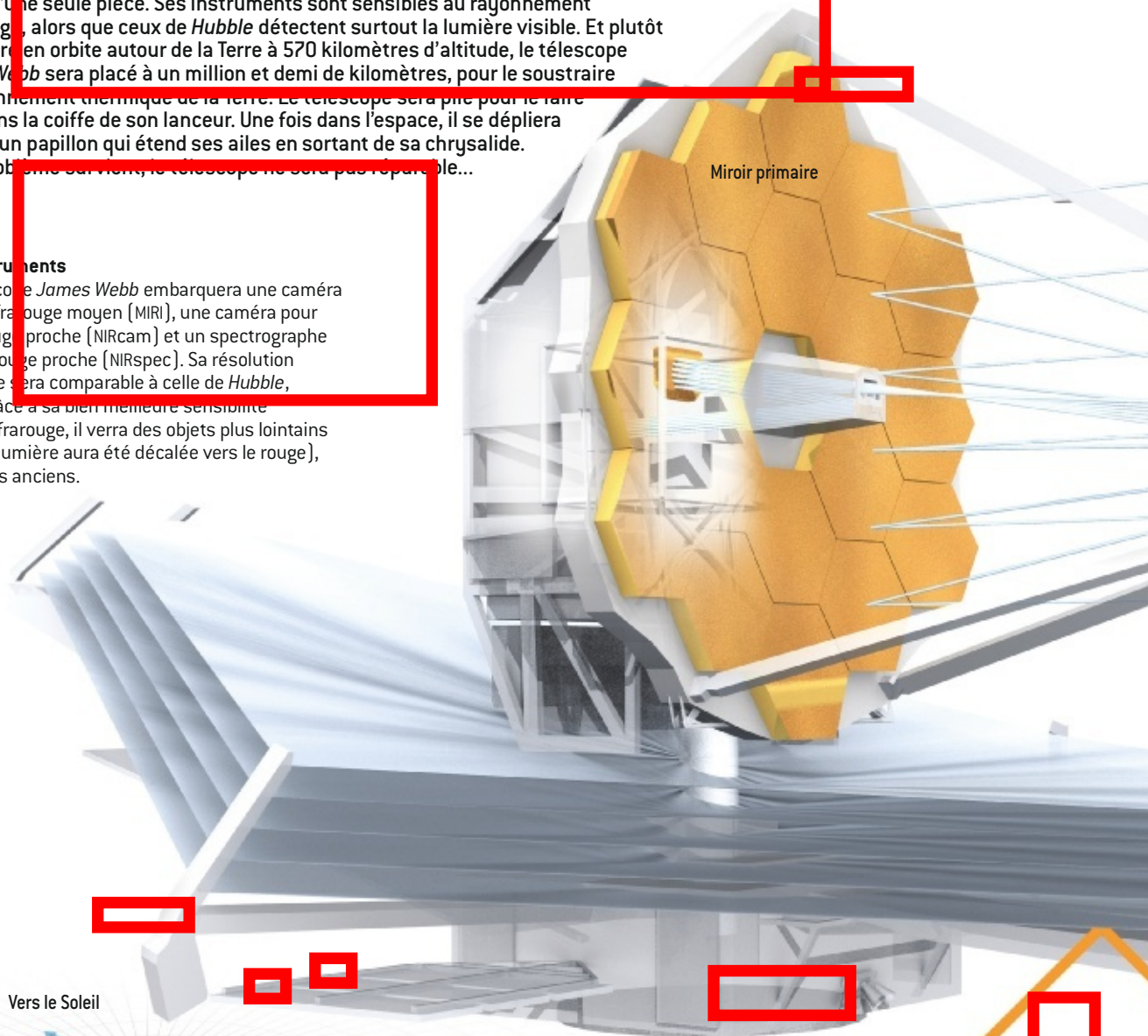
LE TÉLÉSCOPE SPATIAL JAMES WEBB

Des yeux neufs s'ouvrent sur le cosmos

Bien que souvent décrit comme le successeur de *Hubble*, le télescope spatial *James Webb* a peu de choses en commun avec l'actuelle star de la NASA. Son miroir primaire a une surface six fois plus importante, et il est composé de 18 éléments ajustables, et non d'une seule pièce. Ses instruments sont sensibles au rayonnement infrarouge, alors que ceux de *Hubble* détectent surtout la lumière visible. Et plutôt que d'être en orbite autour de la Terre à 570 kilomètres d'altitude, le télescope *James Webb* sera placé à un million et demi de kilomètres, pour le soustraire au rayonnement thermique de la Terre. Le télescope sera placé pour le faire tenir dans la coiffe de son lanceur. Une fois dans l'espace, il se déploiera comme un papillon qui étend ses ailes en sortant de sa chrysalide. Si un problème survient, le télescope ne sera pas réparable...

Les instruments

Le télescope *James Webb* embarquera une caméra pour l'infrarouge moyen (MIRI), une caméra pour l'infrarouge proche (NIRcam) et un spectrographe en infrarouge proche (NIRSpec). Sa résolution angulaire sera comparable à celle de *Hubble*, mais, grâce à sa bien meilleure sensibilité dans l'infrarouge, il verra des objets plus lointains (dont la lumière aura été décalée vers le rouge), donc plus anciens.



Vers le Soleil

Lune

Terre

Point de Lagrange L_2

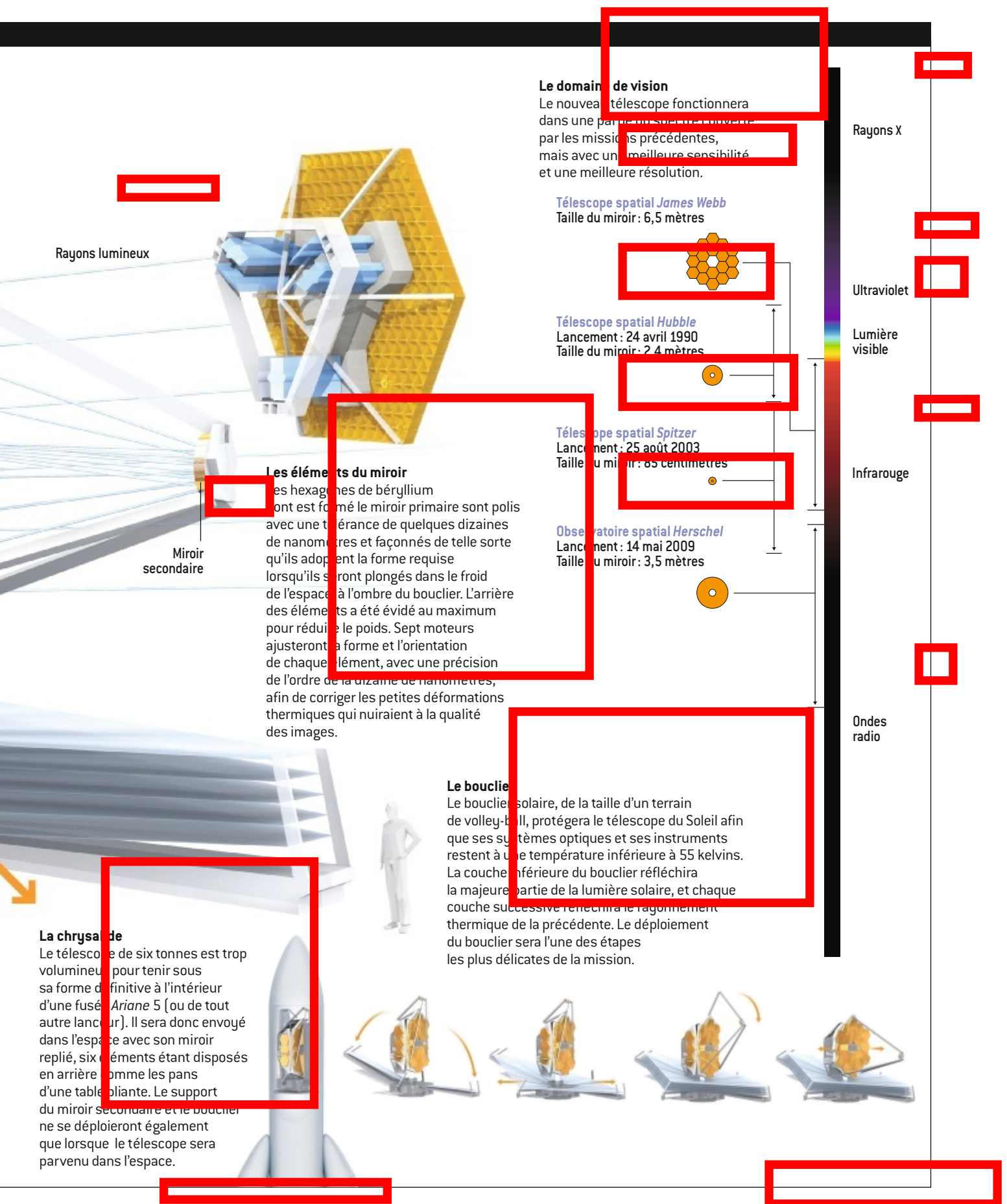
Orbite du télescope

Instruments de communication

Lumière du Soleil

L'orbite

Alors que la plupart des satellites suivent des orbites circulaires ou elliptiques autour de la Terre, le télescope *James Webb* sera mis en orbite autour du point d'équilibre gravitationnel L_2 (deuxième point de Lagrange). Situé à 1,5 million de kilomètres de la Terre, ce point tourne autour du Soleil à la même vitesse angulaire que la Terre. Le télescope fera une boucle tous les six mois autour du point L_2 .



Explorer l'univers profond avec James Webb

Le télescope spatial *James Webb* a été conçu pour regarder plus loin en arrière dans l'histoire cosmique que l'Observatoire *Hubble*. Ses détecteurs infrarouges scrutent aussi le plus près les pouponnières d'étoiles de notre Galaxie, ainsi que des régions de notre système solaire. En cinq ans, la mission cherchera à répondre à quatre questions principales :

❶ Comment l'âge sombre s'est-il terminé ? Le télescope *James Webb* devrait apercevoir les premières générations d'étoiles qui ont commencé à peupler l'univers d'hydrogène neutre baignant l'Univers, environ 180 millions d'années après le Big Bang.

❷ Comment les galaxies se forment-elles ? Les images du télescope *James Webb* montreront comment

les galaxies se sont formées à partir de halos de matière noire invisible qui, avec les trous noirs centraux, présidaient à leur formation.

❸ Comment les étoiles et les planètes ont-elles été créées ? Le Soleil est né dans un nuage de poussière et de gaz.

❹ Comment le télescope va préciser ces processus

en profondeur dans des nuages de poussière où les étoiles sont en train de se former.

❺ La vie pourrait-elle exister ailleurs ? Le télescope *James Webb* étudiera les systèmes planétaires autour d'étoiles proches, ainsi que les conditions environnementales du Système solaire, pour y détecter des indices sur la façon dont la vie a pu émerger.

✓ SUR LE WEB

Le site du *James Webb Space Telescope* à la NASA : <http://www.jwst.nasa.gov/index.html>

Vidéos du déploiement du télescope : <http://www.youtube.com/user/NASAJWebbTelescope#p/u/0/sihF1q8rWh4>

chambre à vide refroidie à 25 kelvins. Dans de telles conditions, le métal subit d'infimes déformations que les ingénieurs cartographient avec précision. Les éléments retournent alors en Californie, où est effectué un polissage de finition qui annulera les déformations subies par le béryllium dans le froid intense de l'espace.

Cette valise lente des éléments de miroir est en marche depuis décembre 2009. En août 2010, un panneau était terminé, et une demi-douzaine d'autres en étaient aux étapes finales de polissage. Les 18 éléments (et trois de rechange) devraient être livrés à la NASA d'ici la mi-2011.

Ne pas revivre les affres de Hubble

Les ingénieurs de *Tinsley* ont forcément à l'esprit le terrible défaut du télescope spatial *Hubble* à la suite d'une erreur de mesure, son miroir avait été poli avec une mauvaise forme, ce qui le rendait aveugle. Une mission de la *Nasat* spatiale avait permis d'installer des miroirs correctifs, sauvant ainsi la mission *Hubble*. Rien de tel ne sera possible avec l'Observatoire *James Webb*.

Lors des changements d'orientation du télescope dans l'espace, des gradients thermiques entraîneront des déformations minimes du miroir. Mais, contrairement aux autres observatoires spatiaux, le miroir du télescope *James Webb* sera ajustable et pourra compenser ces changements. Pour s'assurer que son miroir reste bien focalisé, de petites ventilles installées dans les instruments du télescope créeront des images floues reproduisant les aberrations qui avaient frappé *Hubble*. Après analyse de ces images, de minuscules moteurs à l'arrière de chaque élément de miroir seront activés. Chacun peut pousser ou tirer sur le miroir avec une précision de dix nano-

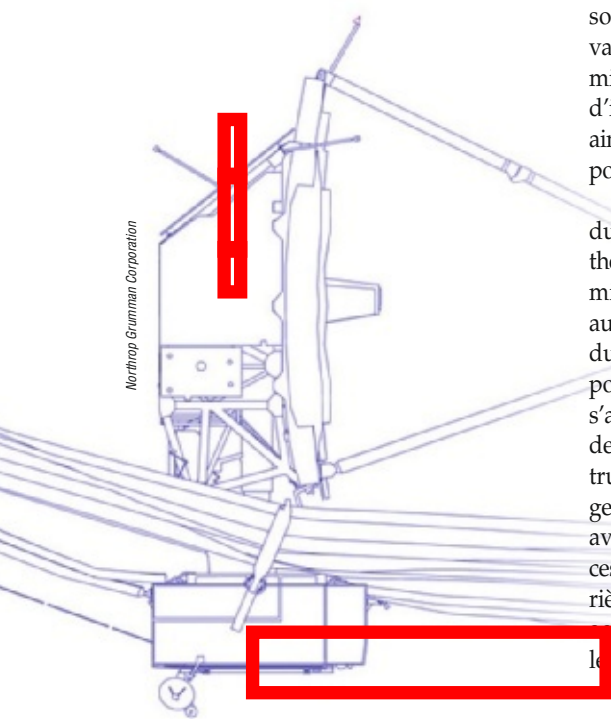
mètres. De quoi contrôler précisément la courbure de chaque panneau et sa position par rapport aux hexagones voisins. Le centre de contrôle recalibrera ainsi le miroir toutes les deux semaines environ.

Bien sûr, le télescope doit d'abord se déployer correctement. En particulier, deux « abattants » repliés, comportant chacun trois éléments du miroir, doivent bien se disposer pour compléter la surface réfléchissante. Un tétrapode doit également se déployer pour placer le miroir secondaire de 75 centimètres de diamètre à sept mètres au-dessus du centre du miroir principal.

Mais la manœuvre qui inquiète le plus les ingénieurs, c'est l'ouverture de l'énorme bouclier solaire, de 11 mètres de large sur 19 de long. S'il ne fonctionne pas, la chaleur du rayonnement solaire rendra les instruments aveugles à la plupart de leurs cibles. Le bouclier ressemble à un empilement de cinq panneaux de bonbon étalés, chacun grand comme un terrain de volley-ball. Le fournisseur de la NASA *Northrop Grumman* a déjà conçu des satellites avec des antennes géantes qui se déploient, mais du point de vue mécanique, le télescope spatial *James Webb* sera la mission de ce type la plus complexe jamais tentée.

Pour ajouter au stress, aucune chambre à vide n'est assez grande pour tester le bouclier complet avant le lancement. Pour limiter les coûts, la NASA a pris le risque de tester chacun des composants critiques de l'observatoire, mais jamais l'ensemble.

Pour l'heure, les scientifiques sont focalisés sur la construction du télescope et de ses instruments. Mais ils ne peuvent pas s'empêcher d'anticiper ce qui se passera après le lancement en 2014. Pour Leif Johansen, responsable des éléments optiques du télescope *James Webb*, « c'est la contribution de notre génération à la civilisation ».



le KANGOUROU des MATHS a 20 ANS !



jeudi 17 mars 2011

LE PLUS GRAND JEU-CONCOURS SCOLAIRE DU MONDE

SIX MILLIONS D'ÉLÈVES !

LE PRIX ERDÖS (2004)

LE PRIX D'ALEMBERT (1994)

L'engagement des enseignants
Le soutien des institutions

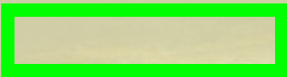
Le plaisir des élèves
Fête des maths !

Le Kangourou
des mathématiques
est au programme
prévisionnel des
actions éducatives
2010-2011



- Pour tous, écoliers, collégiens, lycéens :
le jeu-concours + 32 pages de mathématiques en couleurs !
- À gagner (plus d'un élève sur cinq) :
des livres, des médailles, des jeux, et 100 séjours-voyages.

**Association
Kangourou Sans Frontières**
12 rue de l'épée de bois 75005 Paris
www.mathkang.org

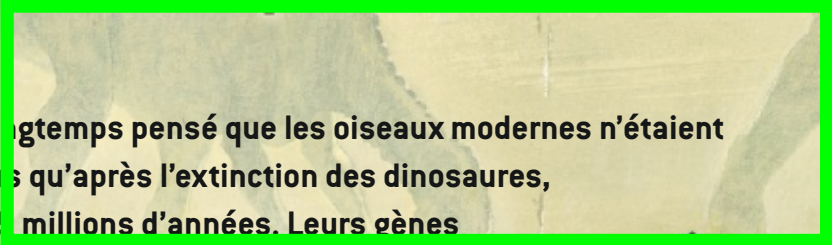


Paléontologie



Gareth Dyke

Des canards au temps des dinosaures



On a longtemps pensé que les oiseaux modernes n'étaient apparus qu'après l'extinction des dinosaures, il y a 65 millions d'années. Leurs gènes et de nouveaux fossiles indiquent qu'ils étaient en fait contemporains des dinosaures.





L'ESSENTIEL

- ✓ Les oiseaux descendent des dinosaures théropodes, mais l'origine précise de ceux qui vivent aujourd'hui restait floue.
- ✓ Selon la théorie la plus répandue, les oiseaux modernes se sont diversifiés après l'extinction massive due à l'impact d'un astéroïde, il y a 65 millions d'années.
- ✓ L'horloge moléculaire inscrite dans les gènes des oiseaux modernes invitait cependant à penser que leur séparation des oiseaux archaïques avait eu lieu bien avant.
- ✓ Deux fossiles d'oiseaux modernes effectivement antérieurs à l'impact confirment l'ancienneté de cette divergence.

Mardi 27 décembre 2011, le temps a chuté au-dessous de -15°C . Les radiateurs du café étant froids, j'y suis assis en gants et manteau devant une vodka, et je réfléchis aux oiseaux. Evgeny Kurochkin, de l'Académie russe des sciences, et moi-même venons de sortir du musée de Moscou. Nous y étudions les fossiles d'oiseaux retrouvés en Mongolie par des expéditions soviéto-mongoles. Une toute petite aile exhumée dans le désert de Gobi en 1987 nous a particulièrement intéressés. Comparée aux impressionnants restes de dinosaures remarquablement conservés au musée, elle n'a rien de spectaculaire – ces os délicats sont mélangés et écrasés. Mais elle constitue un indice fort qu'une opinion répandue sur l'évolution des oiseaux est fautive.

Plus de 10 000 espèces d'oiseaux peuplent la Terre aujourd'hui. Certaines sont adaptées à la vie au large, loin des côtes, d'autres à la vie dans des déserts arides, tandis que d'autres encore vivent sur des sommets enneigés. De toutes les classes de vertébrés terrestres, celle qui comprend les oiseaux est la plus diversifiée.

Les biologistes de l'évolution ont longtemps pensé que les ancêtres des oiseaux actuels ont dû leur succès à l'impact de l'astéroïde qui a balayé les dinosaures et de nombreux autres vertébrés terrestres, il y a quelque 65 millions d'années.

Leur raisonnement est simple : bien que des oiseaux soient apparus et aient évolué avant le cataclysme, les variétés anatomiquement modernes n'apparaissent dans les enregistrements fossiles qu'après cet événement. L'apparition des canaris, des coucous, des colibris et d'autres formes modernes, bref de ce que l'on nomme les Néornithes – les « nouveaux oiseaux » –, leur semble être un cas classique de radiation évolutive à la suite de l'occupation de niches écologiques laissées vacantes en raison d'une extinction massive. Dans ce cas, les niches étaient alors occupées par les dinosaures, les reptiles volants nommés ptérosaures et les oiseaux archaïques.

Cette dernière décennie, cependant, des témoignages fossiles de plus en plus nombreux – dont notre petite aile bri-

1 VEGA est une sorte d'oise archaïque, exploite les ressources du réservoir marin aux côtés de dinosaures à... bec de canard (nausosauroides). Reconstitué ici par un artiste, cet oiseau anatomiquement moderne vivait il y a plus de 65 millions d'années sur une terre aujourd'hui devenue l'Antarctique.

ève l'analyse de l'ADN des oiseaux modernes ont révélé la probable diversification des Néornithes bien avant l'extinction, il y a 65 millions d'années. Ces découvertes bouleversent la vision conventionnelle de l'évolution des oiseaux et soulèvent de nouvelles questions.

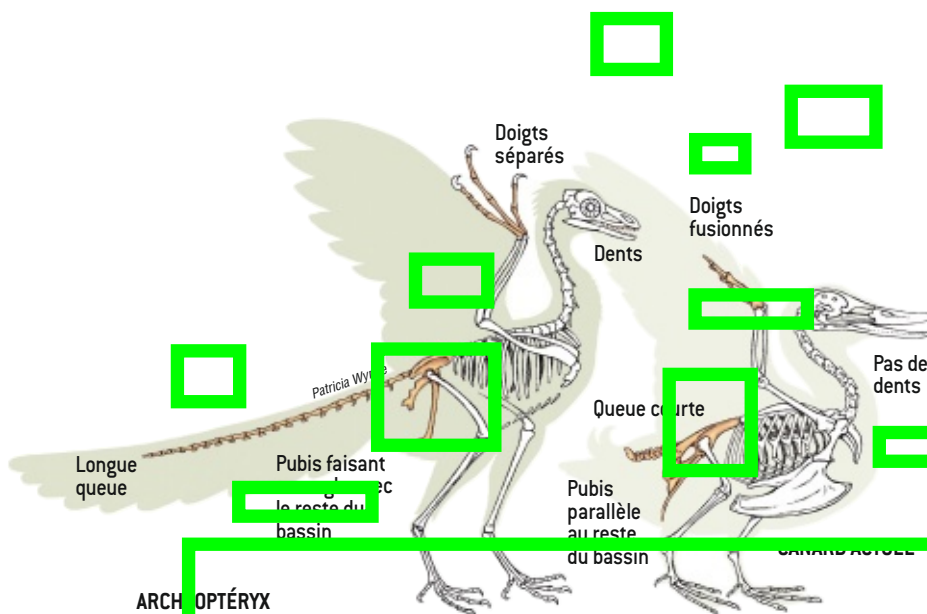
Les oiseaux sont l'un des trois groupes de vertébrés ayant acquis le vol battu. Les deux autres groupes sont les ptérosaures et les reptiles volants apparus au Trias (il y a 251 à 200 millions d'années), il y a 230 millions d'années, et disparus à la fin du Crétacé (145 à 65 millions d'années), et les chauves-souris, qui sont apparues beaucoup plus tard.

Oiseaux archaïques et oiseaux modernes

Les paléontologues débattent depuis des années sur l'origine des tout premiers oiseaux. Selon certains, ces oiseaux ont évolué à partir de petits dinosaures carnivores nommés Théropodes ; selon d'autres, ils ont évolué à partir de reptiles plus anciens. Toutefois, au cours des deux dernières décennies, la découverte de dinosaures semblables à des oiseaux, dont de nombreuses espèces à duvet, a convaincu la plupart des paléontologues que les oiseaux ont évolué à partir des Théropodes.

Curieusement, le lien entre les oiseaux archaïques et les oiseaux modernes s'est révélé beaucoup plus difficile à établir. Considérons le cas d'*Archaeopteryx*, le plus vieil oiseau connu. Découvert en Allemagne dans des terrains vieux de quelque 145 millions d'années, les fossiles de cette espèce offrent la plus ancienne preuve irrefutable de l'existence d'ailes dotées de plumes asymétriques nécessaires pour créer la poussée pendant le vol – l'une des propriétés caractéristiques des oiseaux modernes.

Pour autant, *Archaeopteryx* ressemble plus étroitement à nombre de petits dinosaures tels *Velociraptor*, *Deinonychus*, *Anchiornis* et *Troodon*, qu'aux oiseaux modernes. Comme ces dinosaures, les premiers oiseaux, tels *Archaeopteryx* ou les fossiles *Archaeopteryx* de Chine et *Rahonavis* de Madagascar, avaient de longues queues osseuses, et certains avaient des dents pointues, entre autres caractères primitifs. Les Néornithes, par contraste, sont dépourvus de ces caractéristiques et en présentent de plus évoluées. Citons notamment des métatarsiens (os longs constituant le



ARCHÉOPTÉRYX

2. LES OISEAUX ONT ÉVOLUÉ à partir de petits dinosaures carnivores nommés Théropodes. En conséquence, certains des plus anciens oiseaux fossiles connus, tel l'archéoptéryx (145 millions d'années), conservent un grand nombre de caractères primitifs qu'ils relient aux théropodes – par exemple des dents et une longue queue. Au contraire, les oiseaux modernes ont perdu ces caractéristiques. Ils ont notamment développé des ailes sans doigts et des poignets très souples, ce qui, avec d'autres caractéristiques, a augmenté leur aptitude au vol.

pied) complètement fusionnés et des ailes sans doigts, ce qui allège le squelette et permet un vol plus efficace. Les poignets et les ailes des oiseaux modernes sont aussi très flexibles, ce qui augmente leur manœuvrabilité dans les airs. Quand et comment les Néornithes ont-ils acquis ces caractères ? Il était jusqu'à présent difficile de le déterminer, car les fossiles concernant cette transition manquaient.

Cela ne veut pas dire que l'on ne dispose pas de fossiles d'âges intermédiaires entre les oiseaux archaïques et les Néornithes d'après l'extinction. Il y a plus de 100 millions d'années, les oiseaux présentaient une vaste gamme d'adaptations au vol et de spécialisations écologiques. Certains volaient grâce à de larges ailes, d'autres avaient des ailes longues et étroites. Certains vivaient en forêt en se nourrissant d'insectes et de fruits, d'autres nichaient sur les rives des lacs et pêchaient.

Cette norme diversité persistait à la toute fin du Crétacé, il y a 65 millions d'années. De fait, avec mes collègues néerlandais du Muséum d'histoire naturelle de Maastricht, j'ai par exemple décrit des restes d'oiseaux à dents trouvés juste au-dessous de la couche géologique marquant l'extinction de la fin du Crétacé. Toutefois, tous les fossiles d'oiseaux du Crétacé suffisamment complets pour être classés appartenaient à des lignées plus anciennes que les Néornithes, lignée qui

n'ont pas survécu à la catastrophe. C'est pourquoi jusqu'à récemment, les indices disponibles suggéraient que les oiseaux modernes étaient apparus et ont évolué après l'extinction massive.

L'horloge moléculaire raconte autre chose

Dans les années 1990, alors que les paléontologues recherchaient toujours en vain des Néornithes du Crétacé, une autre méthode de reconstitution de l'histoire évolutive des organismes, qui ne recourt pas aux fossiles, a pris de l'importance. Des biologistes ont en effet déterminé les séquences de l'ADN de nombreux organismes vivants et comparé les résultats afin d'estimer quand les groupes se sont séparés. Ces estimations sont fondées sur la vitesse de ce que l'on nomme l'horloge moléculaire, c'est-à-dire sur le rythme plus ou moins constant des mutations de certaines parties du génome.

De fait, les spécialistes de biologie moléculaire avaient depuis longtemps mis en doute la version de l'évolution des oiseaux modernes fondée sur les fossiles. Ils ont donc utilisé leur méthode pour dater les divergences des principales lignées d'oiseaux modernes. Parmi ces divergences, la séparation entre les Paléognathes (autruches, émeus et autres oiseaux généralement inaptes au vol) et les Gal-

loansères (poules et autres gallinacés, ainsi que les canards et autres Anseriformes). Les études de l'ADN invitent à penser que ces deux lignées – les plus primitives des Néornithes vivants – se sont séparées au début du Crétacé. Et les chercheurs ont obtenu des dates de divergence aussi anciennes pour d'autres lignées.

Un rouge-gorge perché sur un dinosaure ?

Ces découvertes impliquent que, contrairement à l'opinion communément admise en paléontologie, les Néornithes vivaient aux côtés des dinosaures. Il est cocasse d'imaginer un rouge-gorge perché sur le dos d'un *Velociraptor* ou un canard barbotant près d'un *Spinosaurus*. Mais les indices moléculaires du fait que les oiseaux modernes et les dinosaures ont été contemporains sont si convaincants que même les paléontologues – sceptiques en général envers l'ADN et convaincus seulement par les fossiles – commencèrent à adopter cette approche. Tout de même, nous autres paléontologues attendions des confirmations fossiles de cette nouvelle histoire des oiseaux.

C'est à ce moment que la minuscule aile sur laquelle Evgeny et moi nous étions penchés à Maastricht revint sur le devant de la scène. En 1987, quand Evgeny vit pour la première fois ce fossile, il trouvait qu'il ressemblait à un membre des Presbyornithides, un groupe d'oiseaux aujourd'hui éteint, mais apparenté aux canards et aux oiseaux actuels. Toutefois, comme elle avait 70 millions d'années, la petite aile ne pouvait appartenir qu'à un oiseau du Crétacé. C'est tout le monde savait, ou croyait savoir, qu'il n'existait aucune preuve concluante de l'existence de Presbyornithides au Crétacé.

Les observations poussées que nous avons faites au muséum durant cet hiver glacial de 2001 ont pourtant montré de façon certaine que cette aile – avec son carpométacarpes rectiligne (l'os formé par la fusion des os de la main) et ses détails de canaux, de crêtes et d'attaches musculaires – appartenait bien à un Presbyornithide; en outre, ce dernier était sans équivoque le plus ancien représentant de tous les groupes de Néornithes. Notre découverte corroborait les résultats des analyses moléculaires. Dans un article de 2002 décrivant l'espèce représentée par cette aile, nous lui avons donné le nom de *Trochodon*.

Ce premier Néornithe du Crétacé fut bientôt rejoint par un second, *Vegavis*, trouvé dans l'île de Vega, en Antarctique. *Vegavis* avait été découvert dans les années 1990, mais ce fossile resta dans un relatif anonymat pendant des années avant que sa véritable signification n'apparaisse.

Des Néornithes au Crétacé

En 2005, Julia Clarke, aujourd'hui à l'Université du Texas à Austin, et ses collègues publièrent un article montrant que *Vegavis* était un autre oiseau du Crétacé présentant un certain nombre de caractéristiques retrouvées chez les canards actuels, en particulier au niveau des épaules, du bassin, des os de la queue et des membres inférieurs. Datant de 66 à 68 millions d'années, *Vegavis* est un peu moins ancien que *Trogon*, mais il précède encore la date de l'extinction en masse. Beaucoup plus complets, ses restes fossiles comprennent la plus grande partie d'un squelette.

Pour la plupart des paléontologues, *Vegavis* mettait fin au débat sur les Néornithes du Crétacé. Ainsi éclairés, les chercheurs ont commencé à réexaminer les collections de fossiles datant de cette période, afin de retrouver de nouveaux exemples des premiers oiseaux modernes.

Sylvia Hope, de l'Académie des sciences de Californie à San Francisco, soutenait depuis des années que les espèces d'oiseaux qu'elle avait identifiées à partir de fossiles trouvés dans le New Jersey et dans le Wyoming datant de 80 millions à 100 millions d'années, étaient modernes. Mais ces découvertes – des os isolés pour la plupart – avaient été considérées par les autres chercheurs comme trop fragmentaires pour être concluantes. Les découvertes de *Vegavis* et de *Trogon* suggèrent qu'elle avait raison. Les comparaisons entre les os qu'elle avait trouvés et des fossiles plus complets nous en apprendront plus.

L'ancrage de l'origine des oiseaux modernes au Crétacé aligne parfaitement les enregistrements fossiles avec les dates de divergence fondées sur les analyses de l'ADN. Mais il soulève une nouvelle question : pourquoi les oiseaux modernes ont-ils survécu à l'impact d'un astéroïde et aux bouleversements écologiques correspondants, et pas leurs cousins aviens plus

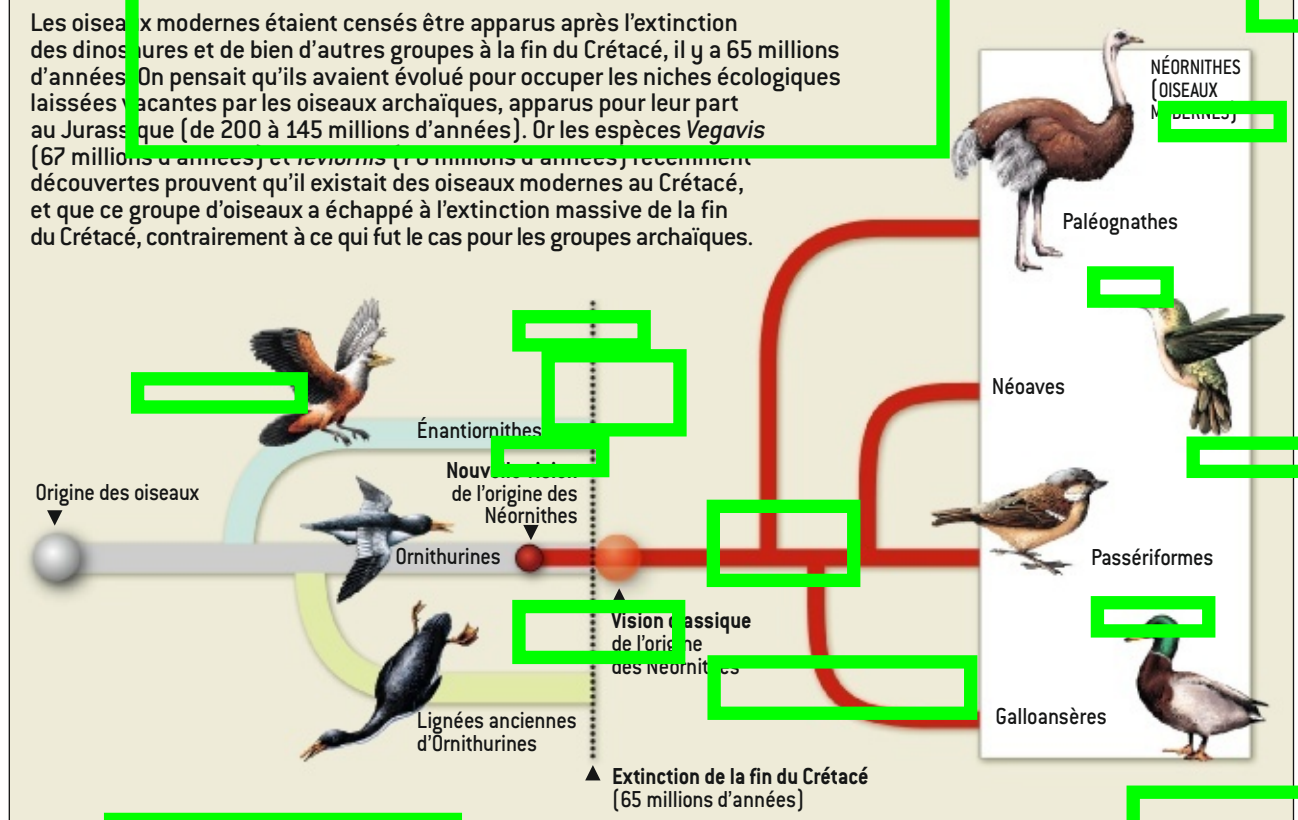
L'AUTEUR



Gareth DYKE est paléontologue à l'University College de Dublin, en Irlande.

UNE ORIGINE PLUS ANCIENNE

Les oiseaux modernes étaient censés être apparus après l'extinction des dinosaures et de bien d'autres groupes à la fin du Crétacé, il y a 65 millions d'années. On pensait qu'ils avaient évolué pour occuper les niches écologiques laissées vacantes par les oiseaux archaïques, apparus pour leur part au Jurassique (de 200 à 145 millions d'années). Or les espèces *Vegavis* (67 millions d'années) et *Trogon* (68 millions d'années) récemment découvertes prouvent qu'il existait des oiseaux modernes au Crétacé, et que ce groupe d'oiseaux a échappé à l'extinction massive de la fin du Crétacé, contrairement à ce qui fut le cas pour les groupes archaïques.



Shaw, Gould, Jan Christiansen

Tiré de J. Clarke et al., Nature, vol. 433, 20 janvier 2005



3. L'UNE DES PREUVES de l'existence d'oiseaux modernes du Crétacé est ce squelette partiel de *Vegavis* provenant de l'île de Vega en Antarctique. Extrait d'une strate vieille de 65 millions d'années, il présente les caractéristiques des oiseaux modernes : telles que de longues fémurs et des os de l'aile fusionnés.

primitifs et leurs compagnons volants, les ptérosaures ? Selon moi, voilà l'unique grand mystère relatif à l'évolution des oiseaux. La réponse est encore lointaine et je consacre une grande partie de mes recherches à essayer de la trouver.

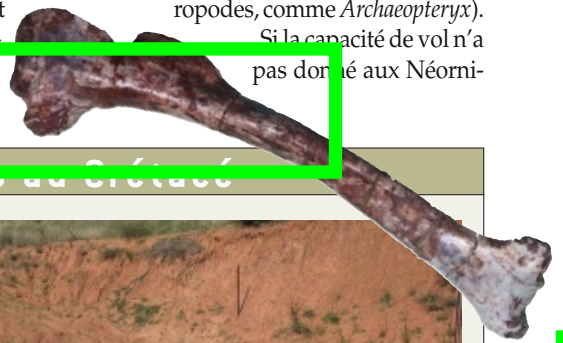
Avec seulement deux Néornithes du Crétacé confirmés, nous ne disposons pas de beaucoup d'indices fossiles pour aller de l'avant. Cependant,

l'étude des oiseaux actuels se révèle utile. En utilisant un énorme ensemble de données de mesures sur les oiseaux actuels et mes collègues au Royaume-Uni et moi-même avons montré, par exemple, que les proportions des os des ailes

des oiseaux modernes primitifs, dont *Teniornis* et *Vegavis*, ne sont pas différentes de celles des Énantiornithes

aujourd'hui éteints. La comparaison des proportions des os des ailes fossiles avec celles des oiseaux vivants nous permet de déduire certains aspects de la forme de l'aile et d'obtenir des informations sur les capacités aérodynamiques des oiseaux fossiles. Pour ce que nous pouvons en dire aujourd'hui, les ailes de ces deux groupes d'oiseaux fossiles n'avaient pas des formes différentes ; en d'autres termes, nous ne pensons pas que les premiers Néornithes étaient plus performants en vol que les Énantiornithes (quoique ces deux groupes aient été probablement plus agiles dans les airs que les oiseaux encore proches des Thé-

propodes, comme *Archaeopteryx*). Si la capacité de vol n'a pas donné aux Néorni-



Les Énantiornithes, oiseaux dominants du Crétacé

Alors que les oiseaux modernes (Néornithes) ont survécu à l'impact météoritique de la limite Crétacé-Tertiaire, d'autres en ont été les victimes. Il s'agit au premier chef des Énantiornithes, qui pourtant étaient sans doute plus abondants que les Néornithes à la fin du Crétacé. Alors que les restes de Néornithes du Crétacé sont des raretés, de nombreux fossiles d'Énantiornithes sont connus de par le monde.

C'est en 1981 que le paléontologue britannique Cyril Walker fit connaître ce groupe d'oiseaux éteints, à partir d'ossements provenant d'Argentine. « Énantiornithes » signifie « oiseaux opposés », car tant la fusion de leurs métatarsiens que la structure de leurs os de leur épaule sont à l'inverse de ce qu'elles sont chez les Néornithes. Les Énantiornithes ont eu une vaste répartition géographique, de l'Australie au Canada en passant par la Mongolie et l'Europe. Stratigraphiquement, leur distribution est également considérable, puisqu'on les connaît depuis le Crétacé inférieur, où ils sont particulièrement abondants en Chine dans des dépôts lacustres vieux d'environ 120 millions d'années, jusqu'à la limite Crétacé-Tertiaire, il y a 65 millions d'années.

ils ont bien sûr évolué. Les plus anciens d'entre eux avaient encore des dents, comme les oiseaux les plus

primitifs tels qu'*Archaeopteryx*, mais les formes plus avancées n'en avaient plus. Bien qu'ils n'étaient pas bâtis exactement comme les oiseaux modernes, les Énantiornithes étaient apparemment capables de voler de façon efficace, à en juger par le développement du squelette de leurs ailes et les indices de leur plumage, qui nous sont connus par des fossiles trouvés en Espagne et en Chine. Sans doute se sont-ils différenciés des autres oiseaux primitifs à l'époque.

Ce que nous savons des Énantiornithes laisse penser qu'ils ont connu un certain succès évolutif durant le Crétacé. Cela leur a permis de s'adapter à des milieux et des types d'alimentation divers. Suivant les espèces, les Énantiornithes pouvaient atteindre des tailles allant de celle d'un moineau à celle d'un goéland ou d'un canard. Il n'est pas exclu que certains d'entre eux aient pu se livrer à des migrations sur de grandes distances : le genre *Martinavis* est ainsi connu dans le Crétacé supérieur du Sud de la France, d'Amérique du Nord et d'Amérique du Sud.

Les documents fossiles disponibles, même incomplets, permettent d'entrevoir que les Énantiornithes ont été à certains égards les oiseaux dominants pendant la plus grande partie du Crétacé. Le fait que



CET HOMME (en haut) a servi à décrire une nouvelle espèce d'Énantiornithe en 2007. Il a été trouvé dans les terrains du Crétacé supérieur près de Cruzy, dans l'Hérault (ci-dessus).

les Néornithes soient rares durant cette période peut s'expliquer par l'occupation de la majorité des niches écologiques par les Énantiornithes, qui laissaient aux formes plus modernes peu de place pour se diversifier.

Même si les données paléontologiques sur les oiseaux de part et d'autre de la limite Crétacé-Tertiaire demeurent parcellaires, tout porte à croire que les Énantiornithes ont disparu lors de la catastrophe écologique mondiale qui s'est produite alors, provoquée par le manque de lumière consécutif à l'injection dans l'atmosphère d'énormes quantités de poussière, à la suite de l'impact météoritique du Mexique.

Les Énantiornithes ont survécu, peut-être avec des populations très réduites, mais suffisantes pour permettre un « re-

démarrage » une fois les conditions environnementales revenues à un état normal. La raison de leur surchaleur en être, comme le pense Gareth D., leur moindre spécialisation, les rendant plus opportunistes et capables de ce fait de persister dans les conditions très difficiles, notamment par manque de ressources alimentaires, qui ont régné pendant quelque temps à la suite de l'impact. Quoi qu'il en soit, la disparition des Énantiornithes, en libérant de nombreuses niches écologiques, a probablement favorisé la radiation évolutive des Néornithes, qui ont commencé dès le début du Tertiaire et a fini par produire l'immense diversité des oiseaux actuels.

Eric Buffetaut,
CNRS, Laboratoire de géologie de l'ENS, Paris

thes un avantage sur leurs homologues du Crétacé, qu'est-ce qui l'a fait? Un certain nombre de paléontologues, dont je fais partie, ont avancé l'idée que des différences dans le mode de vie des oiseaux de cette époque pourraient leur avoir conféré un avantage compétitif.

Moins spécialisés, donc plus adaptables

À l'appui de cette théorie, j'ai montré ces dernières années que les oiseaux modernes conservés peu après l'extinction massive, dans des roches vieilles de moins de 60 millions d'années, vivaient probablement pour la plupart dans des milieux humides (rivages, lacs, bords de cours d'eau, au large des océans, par exemple). Les oiseaux qui vivent dans de tels environnements aujourd'hui – les canards en font partie – sont pour la plupart des animaux généralistes, capables de tirer leur subsistance d'une grande variété d'aliments. Et les oiseaux semblables aux

canards constituent actuellement la seule lignée confirmée d'oiseaux modernes que nous ayons découverte au Crétacé.

Les groupes d'oiseaux du Crétacé qui n'ont pas survécu au désastre, en revanche, ont été découverts dans des roches qui se sont formées dans de nombreux types d'environnements différents – rivages, intérieurs des terres, déserts, forêts, etc. Cette diversité suggère que ces oiseaux archaïques étaient spécialisés afin de s'adapter à leurs niches. Ainsi, le succès des premiers oiseaux modernes serait peut-être simplement dû au fait qu'ils étaient moins spécialisés que les autres groupes.

Cette couplesse pourrait avoir rendu les Néornithes capables de s'adapter facilement aux conditions changeantes qui ont suivi l'impact de l'astéroïde. L'idée est séduisante, mais reste à démontrer. C'est uniquement en découvrant plus de fossiles, dans le sol ou dans les tiroirs des muséums, que nous pourrions comprendre comment les oiseaux modernes ont échappé à l'extinction et pris leur essor.

✓ BIBLIOGRAPHIE

L. Chiappe et G. Duke, *The Beginning of Birds: Recent Discoveries, Ongoing Arguments and New Directions*, Indiana University Press, 2007.

G. Kaiser, *The Inner Bird: Anatomy and Evolution*, University of British Columbia Press, 2007.

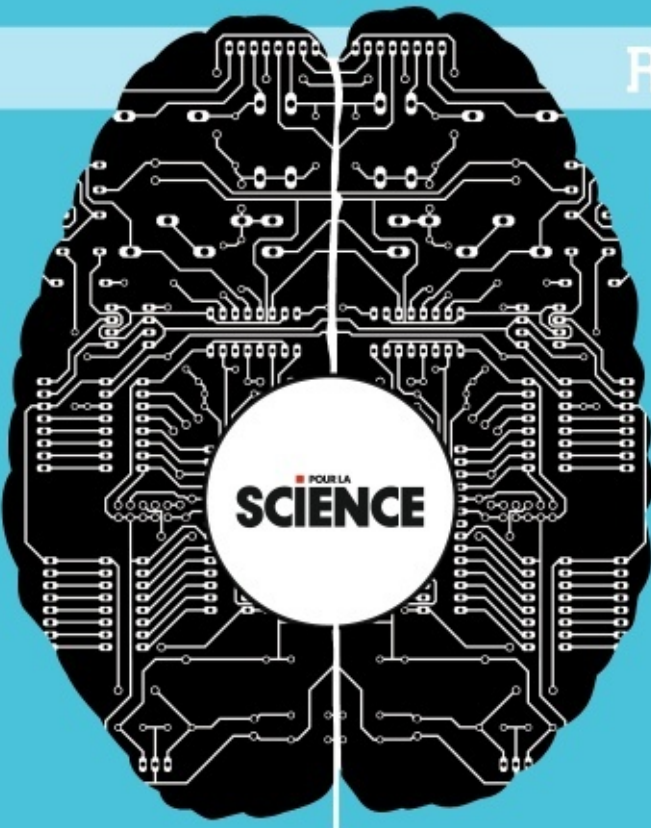
J. Clarke et al., *Definitive fossil evidence for the avian radiation in the Cretaceous*, *Nature*, vol. 433, pp. 305-308, 2005.

D. S. Robertson et al., *Survival in the first hours of the Cretaceous*, *Geological Society of America Bulletin*, vol. 116(5-6), pp. 760-764, 2004.

E. N. Kurochkin et al., *A new Presbyornis-like bird (Aves, Anseriformes) from the late Cretaceous of Southern Mongolia*, *American Museum Novitates*, vol. 3866, pp. 1-12, 2002.

RESTEZ CONNECTÉ !

Restez en contact avec l'actualité scientifique :
Retrouvez *Pour la Science* partout sur le web.



Rejoignez-nous sur Facebook

<http://bit.ly/pls-facebook>

Suivez-nous sur Twitter

<http://twitter.com/PourlaScience>

Abonnez-vous à nos flux RSS

<http://bit.ly/pls-rss>

Recevez nos lettres d'information

<http://bit.ly/pls-newsletters>

Visitez notre site Internet

<http://www.pourlascience.fr>

© Pour la Science - n° 398 - Décembre 2010

Paléontologie [53

Sur les traces du diamant bleu

François Farges

Les caractéristiques optiques et cristallographiques du plus gros diamant bleu connu – disparu au XVIII^e siècle – ont été reconstituées grâce à une réplique d'époque... en plomb. On en déduit jusqu'à la forme qu'il avait dans le manteau terrestre.

Paris, le 6 décembre 1668. Jean-Baptiste Tavernier, voyageur et commerçant français, rentre de son sixième voyage en Orient. Parmi les nombreux diamants qu'il rapporte de Perse et des Indes figure un diamant bleu de 115,28 carats provenant des alentours de Golconde, une ville du Sud-Est de l'Inde bâtie sur une colline granitique. Acquis par Louis XIV, le diamant bleu est taillé, vient compléter sa parure de diamants, puis est choisi par Louis XV pour orner son emblème, la Toison d'or. Mais en 1792, le diamant disparaît, dérobé avec la Toison d'or et d'autres bijoux de la couronne. Tous les grands diamants sont vite retrouvés, sauf un : le diamant bleu de Louis XIV.

Vingt ans et deux jours après le vol, en 1812, un diamant bleu plus petit, le *Hope*, apparaît à Londres, soit exactement à la fin de la durée de prescription du délit. Nombre et peu brillant, ce diamant paraît avoir été taillé à la hâte ou sans grande maîtrise. Coïncidence ? Dès 1858, nombre de auteurs ont évoqué un lien entre les deux diamants, mais aucun n'a pu en apporter la preuve formelle.

La découverte en 2007, dans les collections du Muséum national d'Histoire naturelle, à Paris, d'un modèle en plomb du

diamant bleu de la couronne», change la donne. À partir de cette réplique en plomb et à l'aide de simulations informatiques, nous avons, d'une part, prouvé la filiation entre les deux diamants et, d'autre part, reconstitué l'aspect du diamant avant sa disparition : le joyau de Louis XIV était-il réellement plus brillant que le *Hope* ? Le joaillier du Roi-Soleil avait-il tenu compte des derniers travaux scientifiques en optique lorsqu'il avait taillé le diamant de Tavernier ? Et quel était l'aspect du diamant rapporté par Tavernier ? Cette remontée dans le temps nous a conduits bien plus loin que nous ne l'imaginions, jusqu'à la cristallisation même du diamant dans le manteau terrestre, il y a plus de 1,2 milliard d'années.

Un diamant pour le Roi-Soleil

Le diamant bleu de Tavernier reste le plus gros diamant bleu jamais mis au jour (des informations circulent sur deux diamants bleus de 120 et 250 carats, mais leur existence n'est pas officielle). Bien que plus rares que les diamants incolores, les diamants de couleur (surtout les bleus, verts et rouges) n'ont été appréciés à leur juste valeur que récemment, sans doute à

cause de leur aspect moins brillant à l'état brut. Louis XIV, cependant, les a estimés à leur juste valeur. En 1669, le Roi-Soleil achète le diamant bleu à Tavernier et confie à Jean Piton (vers 1617-1676), le joaillier de la couronne, sa retaille pour le mettre « au goût du jour » : le nouveau diamant devra briller de mille feux, même si ses dimensions doivent en pâtir. En 1673, le travail est achevé et payé 22 000 livres, une fortune pour l'époque (l'équivalent de 350 000 euros aujourd'hui, un poulet coûtant l'équivalent de 2 euros). Pour une telle somme, Piton a dû proposer un dessin extraordinaire au roi, déjà engagé dans la rénovation du château de Versailles.

Louis XIV porte le diamant bleu en broche, sorti dans un petit bâton en or qu'il accrochait probablement à son foulard de dentelle, aux côtés de sa parure de diamants composée de milliers de carats de pierres. Après sa mort, le diamant bleu est peu usité, éclipisé par le *Régent*, diamant incolore de 140,5 carats acquis en 1717 par le duc d'Orléans, régent sous Louis XV. Cette perte d'intérêt perdure jusqu'au moment où Louis XV décide d'orner son emblème, la Toison d'or, du diamant bleu. Cet emblème aux couleurs imposantes est considéré par de nombreux joailliers comme le



L'ESSENTIEL

- ✓ En 1792, le diamant bleu de la couronne de France disparaît, volé.
- ✓ En 2007, une réplique en plomb du diamant est retrouvée. Sa modélisation prouve que le Hope, un diamant anglais, n'est autre que le diamant bleu retaillé.
- ✓ Elle montre aussi que la taille du diamant était un chef-d'œuvre optique.
- ✓ En combinant les données historiques, le profil géométrique du Hope et les données de la cristallographie, on remonte à la forme du diamant bleu natif.

chef-d'œuvre absolu de la joaillerie française du XVIII^e siècle. Au grand diamant bleu se joint un autre diamant bleu, de couleur plus claire et d'environ 33 carats ainsi qu'un spinelle rouge, retaillé en forme de dragon d'environ 107 carats, la *Côte de Bretagne*. L'un des 478 diamants composant le bijou d'environ 16 centimètres de haut, que le roi portait durant certaines cérémonies officielles (voir la figure 5).

En 1792, ce bijou extraordinaire est dérobé avec d'autres bijoux de la couronne et démontré, probablement à Nantes. Son voleur, le cadet Guillot Lordonner, exporte sans doute les pierres à Londres. La *Côte de Bretagne* réapparaît dès 1797 à Hambourg, en provenance de Londres. Elle est aujourd'hui au musée du Louvre à Paris et demeure le seul vestige conservé du bijou. Le grand diamant bleu a disparu à tout jamais.

Telle est l'histoire extravagante du plus gros diamant bleu trouvé et dont, en 2005 encore, aucun modèle n'était connu, hormis une gravure publiée en 1889 par l'héritier des joailliers de la couronne, Germain Bapst, dont la famille avait conservé une empreinte du diamant (empreinte qui demeure introuvable). Mais à partir de 2006, tout se précipite. Une gravure du diamant bleu fait surface, issue d'une collection de diamants

de 1749, cette gravure polychrome de la Toison d'or de Louis XV, avec le diamant bleu en son centre, corrobore celle de Bapst. Et en 2007, coup de théâtre au Muséum national d'histoire naturelle : au sein des collections de minéralogie et de gemmologie, nous avons retrouvé un modèle en plomb d'un diamant remarquable de par sa forme et la géométrie de ses facettes.

Renaissance virtuelle

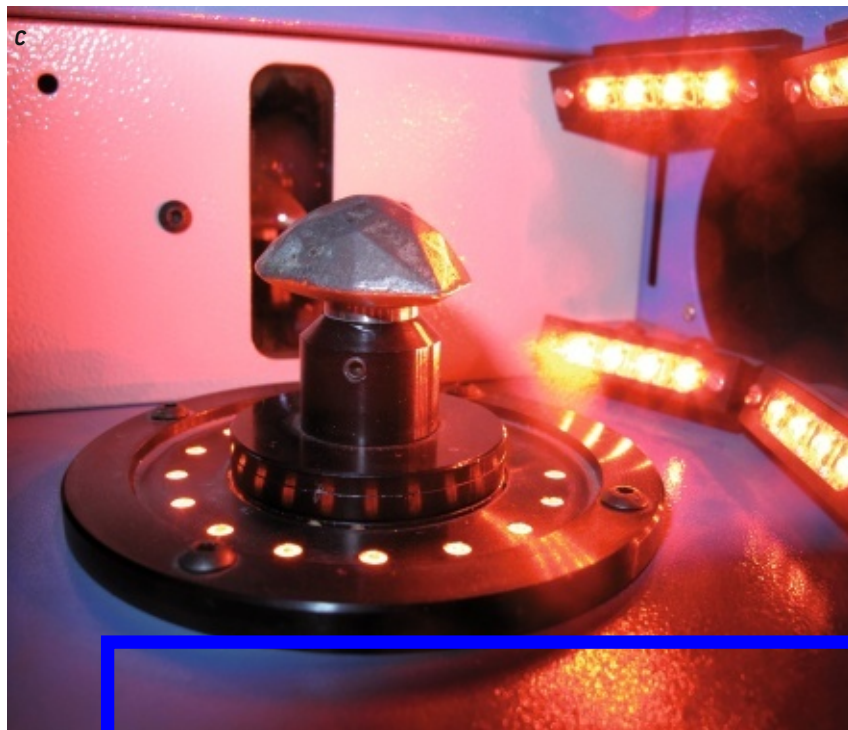
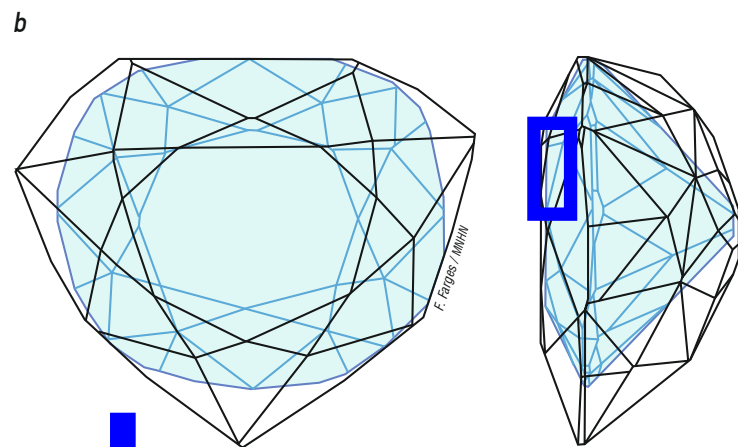
La comparaison de ce plomb avec les deux gravures montre qu'il s'agit d'un modèle du diamant bleu de la couronne : ses dimensions ($10,8 \times 25,48 \times 12,88$ millimètres) sont similaires à celles du diamant bleu de la couronne publiées avant la Révolution ($31,00 \times 22,81 \times 12,78$ millimètres), et son poids équivalent à 68,30 carats de diamant, ce qui est légèrement inférieur, mais néanmoins parfaitement compatible, avec les mesures rapportées en 1787 (69,03 carats) et en 1791 (68,97 carats) sur le diamant bleu. Le modèle en plomb révèle en outre une forme exceptionnelle : un diamant triangulaire à 609 facettes. Cette taille est d'une très grande complexité : essayez de couper une pizza triangulaire en sept parts égales du premier coup ! Les facettes à l'ar-

rière forment une rose de sept pétales autour d'une facette centrale, nommée « rose de Paris », grande invention technique de Jean Pittant pour ce diamant bleu.

En collaboration avec la Société *Diamond Matrix Technologies* d'Anvers, nous avons reconstitué le modèle en plomb en trois dimensions sur ordinateur, grâce à un scanner laser adapté à la retaille des diamants bruts (voir les figures 1 et 2). Notre premier objectif a été de comparer cette reconstitution du diamant bleu au diamant Hope, ce diamant apparu à Londres en 1812 et soupçonné d'être le diamant bleu retaillé. Jusqu'alors, personne n'avait eu la preuve formelle de sa véritable identité, car il manquait un modèle en trois dimensions du diamant bleu de la couronne.

1. SIMULATION DU DIAMANT BLEU

tel que le Roi-Soleil le portait : serti avec des feuilles d'or sur la face arrière et enchassé dans une coquille d'or. Cette technique typique de cette époque rehausse l'éclat de la pierre. Le diamant était taillé de façon telle que seules les huit facettes centrales (situées à l'arrière du diamant) laissaient passer la couleur dorée, formant un soleil d'or au milieu d'un univers étoilé.



2. POUR SAVOIR SI LE DIAMANT HOPE ÉTAIT BIEN LE DIAMANT BLEU DISPARU, l'auteur et ses collègues ont analysé la forme du diamant Hope (a, à droite) et celle de la réplique en plomb du diamant bleu (a, à gauche) à l'aide d'un scanner laser adapté pour la taille des diamants (c). Le traitement informatique des données obtenues a permis de modéliser ces diamants en trois dimensions. Non seulement les deux diamants s'encastrent parfaitement, mais la légère asymétrie du diamant Hope (en bleu) semble liée à la forme triangulaire du diamant bleu de la couronne (b).

En 2005, le Muséum national d'histoire naturelle américain, administré par la *Smithsonian Institution*, à Washington, avait certes effectué une première tentative, mais il s'était trouvé limité par le peu de documents alors disponibles. Surtout, le document principal de travail – la gravure de 1881 – était fort imprécis: le diamant y était représenté à une plus petite échelle (d'après des dimensions mesurées en 1787 sur le vrai diamant) et seulement sur ses faces inférieure et supérieure. Il manquait une vue de côté du diamant, dans son épaisseur. Les chercheurs de la *Smithsonian Institution* avaient donc dû extrapoler pour obtenir un modèle en trois dimensions; ce dernier leur avait servi de base à la taille d'une première réplique du diamant bleu en zircone bleue (oxyde de zirconium), un cristal qui imite les feux du diamant, mais pas sa couleur.

Le résultat était peu convaincant: d'après cette reconstitution, le diamant bleu de la couronne aurait été particulièrement focé et peu brillant, en d'autres termes aussi mal taillé que le Hope, dont la lumière fuit par les côtés (voir l'encadré page 58). Nos simulations ont clarifié la situation: en comparant la reconstitution numérique en trois dimensions du diamant bleu de la couronne à celle du Hope, nous avons montré que ce dernier est parfaitement contenu dans le diamant bleu de la couronne dans toutes les directions de l'espace (voir la figure 2). L'asymétrie même du Hope, qui lui confère son allure ovale, semble héritée de la forme triangulaire du diamant royal français.

Dans un deuxième temps, nous avons essayé de déterminer à quoi ressemblait le diamant bleu de Louis XIV. Était-il peu brillant, peu optimisé, peu travaillé, comme le suggère l'étude américaine? En outre, quelle était sa couleur? L'intensité du bleu dépend de la façon dont le diamant a été taillé. En 1787, un certain Brissot évoquait une apparence bleu saphir, mais le minéralogiste britannique John Mawe le décrivait en 1793 d'un bleu clair.

Nous avons chargé la simulation tridimensionnelle du modèle en plomb dans un logiciel qui recrée en trois dimensions les feux du diamant d'après les lois de la réfraction et de la dispersion optiques. Le logiciel calcule aussi le trajet des faisceaux lumineux à l'intérieur de la gemme et leur dispersion.

Par défaut, le logiciel produit des simulations de diamants incolores; pour obtenir la couleur du diamant bleu de la

couronner nous avons donc appliqué à notre simulation le «profil de couleur» du diamant *Hope*, c'est-à-dire son spectre d'absorption de la lumière en fonction de sa longueur d'onde, fourni par Jeffrey Post, conservateur à la *Smithsonian Institution*. Les résultats ont créé la surprise : d'une part, le diamant brillait de «mille feux», ce qui signifiait que la réplique en plomb était une copie fidèle d'un diamant optiquement optimisé et non une copie de mémoire ou à distance. D'autre part, le diamant était l'un bleu saphir brillant, comme l'indiquait Brisson en 1787. Comment Mawea-t-e-pu y voir un joyau «bleu ciel»? La question reste ouverte, car les lois de l'optique n'expliquent pas cette couleur.

Taillé selon les lois de l'optique

La simulation prouve aussi que Pittan avait créé un diamant très brillant. Avait-il intégré, dans sa taille, les découvertes majeures de l'optique de Descartes, Snell, Fermat et Newton? Sans doute, car la probabilité d'obtenir une pierre très lumineuse est faible, les angles devant être parfaitement calculés pour obtenir l'éclat maximum. Ainsi, il faut concevoir en trois dimensions une centaine d'angles cohérents entre eux pour obtenir la pierre la plus lumineuse qui soit. L'étude de la technicité de la taille du diamant confirme qu'il n'a pu être le fruit que de calculs précis issus des lois de l'optique.

D'abord, le diamant présente une double symétrie impaire : non seulement il a une forme triangulaire (symétrie d'ordre 3), rare à l'époque, mais la rose à sept pétales formée par ses facettes à l'arrière lui confère une symétrie d'ordre 7. À l'époque (les diamants *Marin*, le *Régent*, etc.) et aujourd'hui encore, on taille de préférence les diamants selon une symétrie paire d'ordre 4, c'est-à-dire avec une section carrée ou rectangulaire, beaucoup plus efficace pour rendre la brillance, car le trajet des rayons lumineux dans le diamant est symétrique par rapport à des plans contenant l'axe du diamant. La symétrie impaire, en revanche, ne favorise pas une réflexion symétrique de la lumière dans le diamant et il faut des calculs complexes pour s'assurer que la lumière ne s'échappe pas d'un corps présentant cette géométrie.

Ensuite, la simulation infographique du modèle en plomb du diamant de Pittan montre que la brillance du diamant était

bien plus importante qu'on ne le pensait. En outre, la taille effectuée par Pittan n'est pas très éloignée des proportions recommandées aujourd'hui pour obtenir un diamant brillant, fondées sur de nombreuses études sur ordinateur. Par exemple, les lapidaires ont récemment recommandé que la dimension de la grande facette en avant (cavalée) soit comprise entre 53 et 59 pour cent de la largeur du diamant, avec une moyenne de 56 pour cent. La valeur pour le diamant bleu de Pittan est 55 pour cent. L'épaisseur de la couronne (les facettes qui entourent la facette supérieure) (trois millimètres, soit dix pour cent de la largeur de la gemme) est légèrement inférieure aux critères actuels (14,19 pour cent, soit 4,2 millimètres pour

cette gemme), mais l'erreur n'excède pas quatre pour cent – une précision exceptionnelle pour l'époque.

Ainsi, Pittan a trouvé le compromis qui lui permettait d'augmenter la brillance tout en profitant au maximum du diamant brut ramené par Tavernier et des découvertes récentes de l'optique. En d'autres termes, soit Pittan connaissait ces découvertes, soit il les appliqua de façon empirique en s'inspirant d'abaques publiées à partir de ces lois dans les milieux protestants cultivés dont il faisait partie, on discutait souvent de dernières découvertes scientifiques en provenance d'Europe du Nord, dont probablement les travaux de Descartes, Snell et Newton.

La double symétrie impaire constitue une innovation artistique majeure, mais complètement voire dangereuse : on ne peut pas revenir en arrière si le diamant a été mal taillé... surtout quand il s'agit du plus gros diamant du roi de France. Pourquoi Pittan s'est-il ainsi compliqué la tâche?

Le papillier semble avoir voulu ajouter une symbolique à son grand œuvre. Le diamant de Louis XIV était serti dans un bâton d'or. Il n'était pas rare que l'on recouvrait l'arrière d'un diamant d'une feuille d'or ou d'argent pour rehausser l'éclat de la gemme. Dans le cas du diamant bleu seule la rose centrale laisse passer la couleur dorée, car les angles de ses facettes sont inférieurs à l'angle critique du diamant, et les rayons de lumière qui arrivent sur elles – et donc sur l'or – reviennent vers l'observateur (voir la figure 1 et l'encadré page 58). Dans le bâton d'or la rose

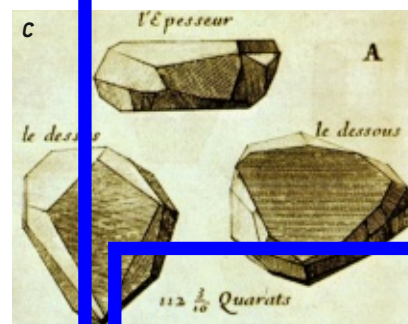
centrale devenait donc un soleil doré à sept branches, entouré de zones riches en lumière et couleurs (points vifs de lumière)

L'AUTEUR



François FARGES est professeur au Muséum national d'histoire naturelle (Paris) et à l'Université de Stanford (États-Unis).

Il est chargé de la conservation des collections nationales de minéralogie et de gemmologie, et membre honoraire de l'Institut universitaire de France.



3. LE DIAMANT DE TAVERNIER a été reconstitué numériquement (a et b, ici sur fond blanc) à l'aide de la description du voyageur (c) et du profil colorimétrique du diamant *Hope*. Son aspect dépend de l'éclairage : une chandelle lui donne une couleur grisée (a), tandis que la lumière du soleil le rend plus bleu (b).

et de zones sombres, fruits des interférences dues à la diffusion multiple de la lumière dans le diamant. De là à voir dans ce diamant la représentation du soleil royal entouré des sept planètes connues à l'époque (Mercure, Vénus, la Terre, la Lune, Jupiter et Saturne) au centre d'un Univers parsemé d'étoiles, il n'y a qu'un pas. Pittan aurait-il symbolisé la suprématie du Roi-Soleil ? Cela expliquerait le prix exorbitant de son travail.

Le catalogue du Muséum national d'histoire naturelle allait révéler un troisième secret. Le modèle en plomb y est daté de 1851 et répertorié en tant que « modèle d'un diamant remarquable par sa limpidité, appartenant à Mr Hoppe de Londres ». Le propriétaire en question ne peut être que Henri Philip Hope (1774-1839), premier propriétaire officiel du diamant bleu Hope. Le donateur est Charles Achard, un lapidaire parisien très connu dans les années 1700-1850, dont un des clients était...

Hope, selon d'autres archives du Muséum. Pourquoi un lapidaire qui n'a pas pu manipuler le diamant royal possédait-il néanmoins un moulage, des années après le vol ? Au moins un doute n'est possible : Achard savait que Hope avait possédé le diamant bleu de la couronne dérobée non retaillée. Le catalogue du Muséum mentionne au présent cette appartenance, ce qui confirme que l'information – bien que donnée au

DE LA TAILLE DU DIAMANT À SA BRILLANCE

Lorsqu'en 1669, à la demande de Louis XIV, le joaillier Pittan se lance dans la taille du diamant bleu, René Descartes et le physicien néerlandais Willem 't Hooft Snell ont énoncé, dans les années 1620-1630, les lois de la réfraction de la lumière et, en 1662, Pierre Fermat a déterminé la raison de la réfraction ; Isaac Newton, quant à lui, vient d'observer, sur les faces du jésuite Francesco Grimaldi, la décomposition de la lumière blanche dans un prisme en faisceaux de couleurs différentes. Il semble que Pittan ait inspiré – sans doute via des abaques – de ces tout derniers résultats de l'optique pour tailler le diamant.

Fermat a montré que la lumière se propage dans les corps par le chemin non pas le plus direct, mais le plus rapide. Cela explique pourquoi la lumière peut dévier en passant d'un milieu à un autre. Ce phénomène – la réfraction – est plus ou moins marqué selon l'indice des milieux entrant et sortant : plus l'indice du milieu sortant est grand devant celui du milieu entrant, plus la réfraction sera importante (loi de Snell-Descartes). C'est ce qui se passe pour la lumière qui passe de l'air à la pierre. L'indice de l'air est de 1 alors que celui du diamant est de 2,417, en moyenne.

Une conséquence de cette loi est que, quelle que soit l'angle d'inci-

dence de la lumière sur le diamant, l'angle de réfraction ne dépasse pas une valeur critique (pour le diamant, 26° par rapport à la verticale de la face taillée). De même, si la lumière arrivait vers le diamant arrive sur une facette avec un angle supérieur à la valeur critique, elle est réfléchie dans le diamant, comme si la facette était un miroir ; lorsque ce phénomène – nommé réflexion totale – se répète après la première réfraction, la lumière ne s'échappe pas du diamant. À l'opposé, si l'angle d'incidence est inférieur à l'angle critique, la lumière sort du diamant et se perd dans l'air. Ainsi, les facettes du diamant taillé sont combinées de telle manière que la lumière soit réfléchie à l'intérieur et ne puisse s'échapper que vers les observateurs. Par conséquent, le diamant apparaît très lumineux.

Le diamant disperse en outre la lumière, car son indice varie de 2,451 dans le bleu à 2,407 dans le rouge. Ainsi, la lumière blanche est décomposée (effet de prisme ou d'arc-en-ciel) dans le diamant, créant les fameux « feux du diamant ».

Grâce à ces propriétés physiques, le diamant fut vite l'apanage des grands dans la mesure où il était l'homme et de la science, on ne peut percevoir l'incroyable propriété optique qui caractérise le diamant : les

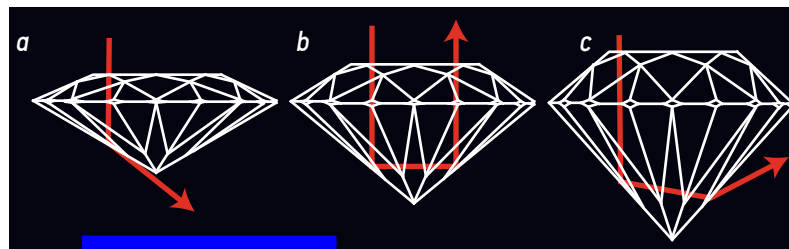
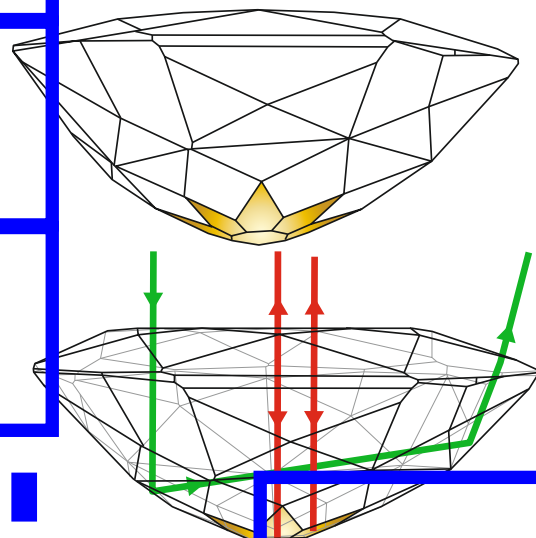
angles ont été choisis de telle sorte que la lumière qui arrive sur la face supérieure du diamant ne soit pas ceux dont la nature privilégie la croissance.

Les rois, en particulier les dynasties royales, avaient l'habitude de faire tailler les facettes des diamants bruts de telle sorte qu'ils soient très lumineux. Mais ces tailles étaient empiriques et on voulait garder les gemmes aussi grandes que possible, à

le prestige des héritiers du farouche amerlan (XIV^e-XVIII^e siècles). L'Occident a adopté une approche bien différente. Dès le XVI^e siècle, on a taillé les diamants de façon à augmenter leur éclat, quitte à perdre de la matière. Que préférer ?

La question demeure le dilemme quotidien de nombreux lapidaires.

Le diamant bleu était taillé de façon telle que tous les rayons arrivant sur la rose centrale (*en jaune*) perpendiculairement à la face supérieure étaient réfléchis selon le même chemin par la feuille d'or qui recouvrait la rose (*en rouge*), tandis qu'au mors de la rose, les rayons ressortaient par une face supérieure sans rencontrer l'or (*en vert*). C'est pourquoi, d'une part, l'aspect doré était concentré dans la rose et, d'autre part, le diamant devait briller remarquablement.



Influence de la taille sur la capture et le renvoi de la lumière : si le diamant est trop plat, la lumière le frappant perpendiculairement à la face supérieure le traverse sans se réfléchir (a) ; s'il est trop profond, elle se renvoie, mais sort par une face latérale (c). À la taille idéale, la lumière sort par la face supérieure, conférant son éclat maximal au diamant (b).

Muséum en 1850 – est antérieure à 1812, date d'apparition du diamant Hope.

L'étiquette signale que le diamant est « remarquable par sa limpidité », comme si Achard avait vu la gemme dans la collection de Hope. En fait, tout ce petit monde se connaissait puisque René-Just Haüy, conservateur de la collection de minéralogie au Muséum jusqu'en 1822, remercie non seulement « Mr Achard » dans son traité sur les pierres précieuses de 1817, mais aussi Hope pour sa lecture de l'ouvrage et... ses donations de gemmes au Muséum.

En 1810, date où le modèle en plomb a été répertorié au Muséum, Hope était décédé depuis 11 ans et ses neveux finissaient de se disputer son héritage, dont le Hope. Dans les actes du procès « Hope contre Hope », on s'aperçoit que l'oncle restait discret sur l'origine de ses gemmes, officiellement pour ne pas trop payer de taxes...

À quoi ressemblait le diamant de Tavernier ?

L'énigme du diamant Hope résolue, nous nous sommes intéressés au diamant tel qu'il avait été trouvé par Tavernier : quel était son aspect ? Pourquoi les Indomogholis avaient-ils cédé ce joyau ? S'agissait-il d'un diamant entier ou d'une fraction d'un plus gros cristal de diamant ? En reconstituant numériquement le diamant de Tavernier en trois dimensions et en recherchant les caractéristiques cristallographiques compatibles avec cette forme, non seulement nous avons répondu à ces questions, mais nous sommes remontés jusqu'à l'histoire de la croissance du diamant bleu dans le manteau terrestre.

Pour modéliser le diamant bleu de Tavernier nous avons combiné les informations fournies par celui-ci dans son livre de voyage, notamment la gravure présentant le diamant sous trois angles, et les données spectroscopiques du diamant Hope. Nous avons ainsi obtenu un diamant d'un bleu moyen, dont l'apparence variait beaucoup en fonction de la source d'éclairage (simulée en appliquant le spectre lumineux correspondant) : il paraissait beaucoup plus bleu à la lumière solaire – qu'utilisait Tavernier pour observer les gemmes – qu'à la chandelle – source avec laquelle les Indiens regardaient les diamants (voir la figure 3). Ces différences esthétiques pourraient expliquer pourquoi les Indiens n'ont pas perçu le potentiel de la pierre et l'ont vendue à Tavernier.

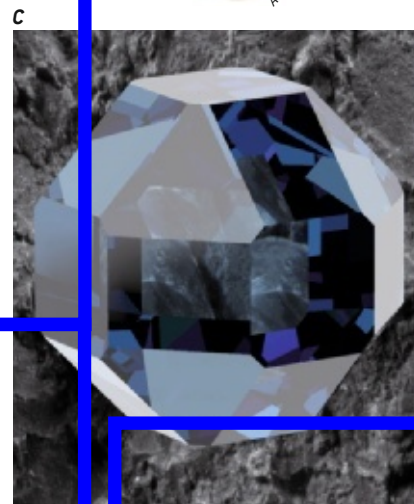
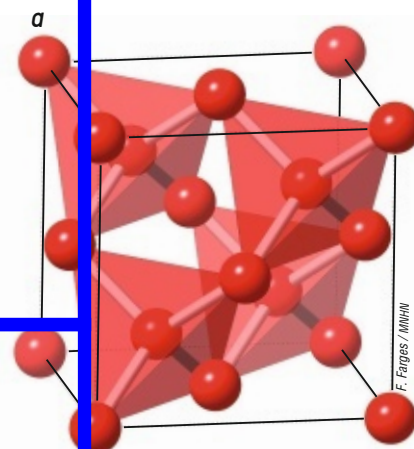
La modélisation de la croissance du diamant est quant à elle fondée sur les caractéristiques cristallographiques des diamants en général et des diamants bleus en particulier. Le diamant est un minéral de la famille des « natifs », c'est-à-dire composé essentiellement d'éléments chimiques purs, à l'instar de l'or ou du soufre. Incolore, le diamant est composé de carbone, comme Lavoisier l'a montré en 1793. Toutefois, des impuretés d'azote et de bore peuvent lui donner diverses couleurs (jaune, vert, rouge, bleu, violet, orange, brun, noir...).

Selon les gemmologues, la couleur bleue proviendrait ainsi d'impuretés de bore. À part ces traces de bore, les diamants des Indes sont souvent d'une très grande clarté et pureté : leur « eau » est remarquablement claire, c'est-à-dire qu'ils contiennent très peu d'impuretés (ou « crauda »). Les diamants de Golconde sont tellement purs et uniques, même de nos jours, que l'on décrit *de facto* certains diamants très purs comme « de Golconde » ou « de type Golconde ».

Le diamant cristallise dans le système cubique : la maille du cristal – son élément de base – forme un cube dont chaque sommet et le centre de chaque face sont occupés par un atome de carbone. Chaque cube est en outre constitué de quatre tétraèdres, chacun formé par quatre atomes de carbone (voir la figure 4). Par agrégation de nouveaux atomes de carbone autour du cube constitué par les premières mailles cristallisées, le diamant forme généralement un octaèdre : chaque sommet du cube initial, des faces apparaissent et se construisent au dépens de celles du cube, jusqu'à se rejoindre pour former un octaèdre.

Cet agencement compact des atomes de carbone confère au diamant une dureté exceptionnelle – la plus élevée des minéraux naturels. Comment de tels cristaux apparaissent-ils dans la nature ? Depuis la découverte des gisements de diamant d'Afrique du Sud en 1866, on a compris que même si l'on trouve des diamants dans des granites, ces diamants proviennent de roches massives du manteau supérieur de la Terre, les « kimberlites », qui se sont formées entre 140 et 230 kilomètres sous terre et sont brusquement remontées à la surface (voir l'encadré page 60).

De ces pierres aussi dures et denses ne se forme qu'à haute pression (4,5 à 6 gigapascals) et à haute température (1100-1400 °C), soit au-delà de 140 kilomètres de profondeur dans le manteau terrestre



4. UN DIAMANT est constitué d'atomes de carbone organisés en une structure cubique très compacte : le cube représentant la maille élémentaire du cristal comporte un atome à chaque sommet et au centre de chaque face, ainsi que quatre tétraèdres formés par des groupes de quatre atomes (a). En croisant cette structure produit généralement des diamants octaédriques, tel ce diamant d'Afrique du Sud (b). En recherchant dans le diamant de Tavernier simulé des angles caractéristiques d'un octaèdre en formation, l'équipe de l'auteur a déterminé la forme naturelle du diamant tel qu'il a cristallisé dans le manteau terrestre (c) : il n'avait pas achevé sa transformation en octaèdre et présentait donc un mélange des faces cubiques et octaédriques. Le diamant de Tavernier ne représentait qu'un tiers de ce diamant et les deux tiers restants ? Mystère...

✓ À NOTER

En décembre 2010, sur *France Culture*, *La marche des sciences* consacrera une émission au diamant bleu de la couverture. À écouter le jeudi de 14h à 15h ou sur le site : <http://www.franceculture.com>

Début 2011, la chaîne *Arte* consacrera une soirée *Thema* au diamant bleu, au cours de laquelle sera diffusé un docu-fiction intitulé *À la poursuite du diamant bleu*.

ou pendant un impact violent, tel celui d'une météorite sur la Terre ou au sein d'une supernova ou d'une naine blanche. L'étoile BPM 3709 du Centaure semble ainsi composée d'un noyau de diamant évalué à pas moins de dix millions de trillions de trillions de kilogrammes ! (Aujourd'hui, on fabrique des diamants de synthèse de dix carats pour l'industrie et la joaillerie, soit deux grammes, pour un brillant d'environ 13 millimètres de diamètre et 7,7 millimètres d'épaisseur.)

Un diamant trois fois plus gros à l'origine ?

Les facettes du diamant haut traduisent l'empilement des atomes de carbone et non pas des propriétés optiques (d'où le terme « diamant brillant » pour le diamant brut). En

considérant que le diamant avait cristallisé sous une forme intermédiaire entre le cube et l'octaèdre et en recherchant les angles caractéristiques de cette forme dans le diamant de Tavernier, nous sommes arrivés à la conclusion que le diamant avait été clivé en cours de sa croissance et son achat.

Plus précisément, la stabilité de chaque face du diamant de Tavernier a été calculée dans le cadre de la théorie de Bravais-Friedel-Donnay-Harker, du nom des cristallographes qui ont contribué à ce modèle de prédiction de la morphologie des cristaux ; cette théorie permet de déterminer les faces les plus stables et indique que seules ces faces sont conservées durant la cristallisation. Nous avons ainsi pu estimer la forme du cristal la plus stable : celle d'un octaèdre à faces saillantes (structure entre les deux formes de la figure 4) de poids

LES KIMBERLITES, SOURCES PROFONDES DU DIAMANT

La découverte d'un diamant en surface est presque du miracle, tant les conditions à réunir sont rares. Formés dans les profondeurs du manteau terrestre, les diamants sont charriés à la surface par les kimberlites, roches profondes à la minéralogie si originale que leurs origines précises font toujours débat.

Les kimberlites contiennent des silicates (moins de 45 pour cent) et sont riches en fluide du manteau terrestre, une liasse (H₂O et CO₂) et en potassium, ce qui les rend

elles sont principalement composées d'olivine, de phlogopite (un mica), de pyroxène (des silicates) et de grenats enrichis en magnésium et en chrome. Elles contiennent aussi des minéraux secondaires typiques, tels la richterite potassique, du spinelle chromifère, des ilménites magnésiennes et, parfois, du diamant.

tres de profondeur sous des « cratons ». Les cratons sont des zones continentales n'ayant pas connu de formation de montagnes depuis au moins un milliard d'années. Les kimberlites seraient donc la « racine » profonde de la kimberlite : issues de ces roches, les poches de magmas remontent et sous forme de gros « éjectas » kilométriques imprégnant les roches environnantes.

L'ascension de ces poches vers la surface est très rapide. Vers trois kilomètres de profondeur, les magmas dégazent violemment et font exploser la région où ils se trouvent. Le dégazage fluidifie le matériau composite (assemblage gaz-liquide-solide) qui les constitue, lequel remonte alors rapidement vers la surface (vitesses de remontées de l'ordre de 10 à 40 mètres par seconde). Se forment ainsi des cheminées apicales en forme de carotte de quelques kilomètres de diamètre, les « diatrèmes ». Les kimberlites véhiculent des « xénolithes », parfois rencontrés en profondeur ou durant l'ascension (« xénolithes »), parfois diamantifères.

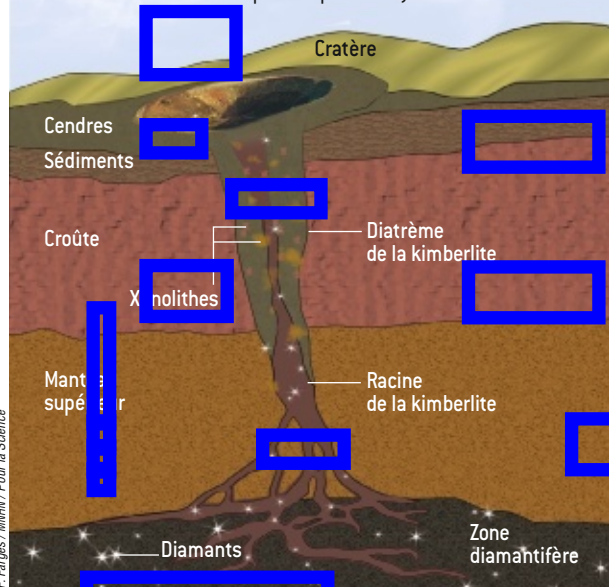
Quelque fois, la kimberlite forme des cratères lors d'éruptions cataclysmiques. Ces cratères peuvent s'étendre à des dizaines de kilomètres alentour. Plus tard, la kimberlite s'érodera plus facilement que

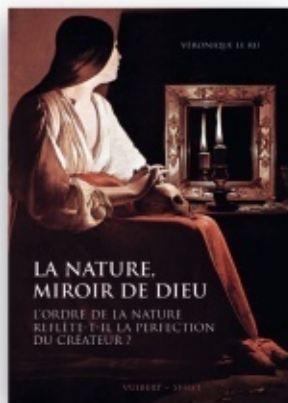
les roches qui l'entourent, car sa roche est tendre et altérable. Parfois, un cratère occupe l'emplacement supérieur de la cheminée. Dans d'autres cas, la kimberlite est enfouie de 10 à 100 mètres sous des sédiments. Les portions de kimberlite érodées par les intempéries sont emportées par les eaux de ruissellement vers les sédiments des fonds de rivières (comme en Inde ou au Brésil) ou de plages (Namibie).

Seules les kimberlites qui ont pris naissance dans des zones diamantifères du manteau terrestre contiennent des diamants. La datation des diamants montre qu'ils sont toujours plus anciens que les roches qui les véhiculent, ce qui suggère qu'ils ont été charriés par la roche kimberlitique après leur formation. Les diamants ne cristallisant pas à moins de 140 kilomètres de profondeur, seules les kimberlites qui se sont formées au-dessous ont pu en véhiculer. En outre, la remontée des kimberlites doit être rapide, sinon le diamant se transformerait en graphite et en CO₂, les variétés stables de carbone dans les zones superficielles de la Terre. La probabilité est donc faible de récupérer des dia-

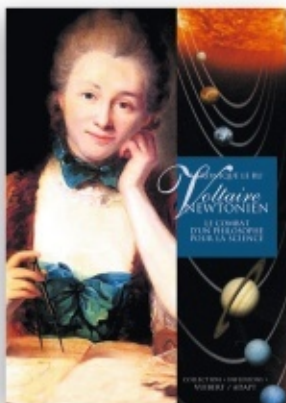
peut postuler que le diamant n'est pas aussi rare dans le manteau terrestre qu'en surface.

Coupe d'une kimberlite (l'échelle n'est pas respectée, la hauteur réelle est bien plus importante).





Véronique Le Ru
7-20644, 128 p., 15 €, février 2009



Véronique Le Ru
7-53741, 128 p., 15 €, mars 2005
Coédition ADAPT-SNES



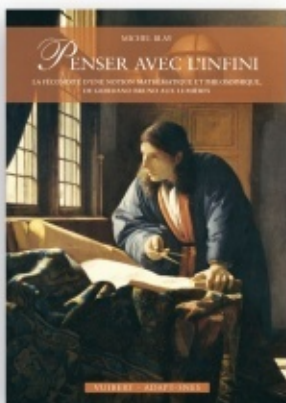
Florian Douam,
Louis-Marie Bobay
0-02201, 128 p., 13 €, octobre 2010
Collection « Va savoir ! »
Ouvrage tout en couleur



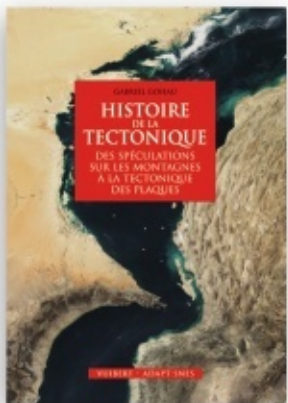
Laurent Loison
0-02300, 256 p., 29 €, août 2010



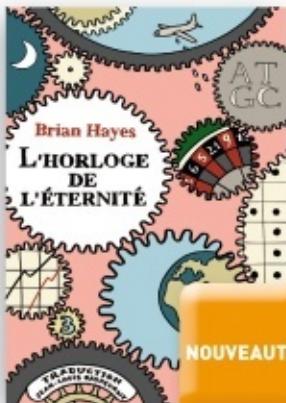
Georges Petavy
0-00245, 208 p., 22 €, avril 2010
Collection « Va savoir ! »



Michel Blay
0-01464, 144 p., 17 €, mai 2010
Collection « Inflexions »
Coédition ADAPT-SNES

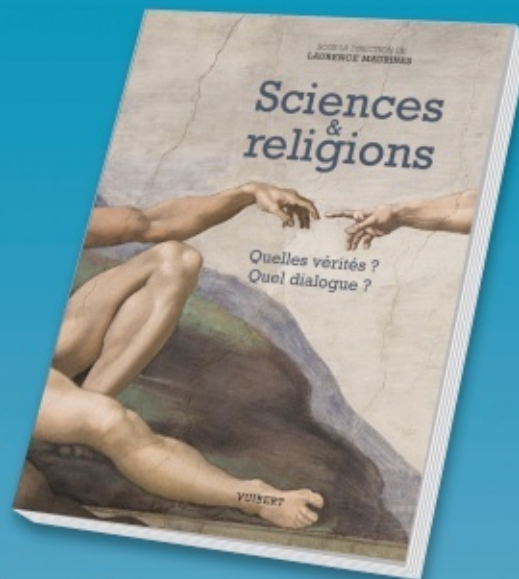


Gabriel Gohau
0-00122, 176 p., 22 €, juin 2010



Brian Hayes
0-01129, 240 p., 25 €, octobre 2010

Sciences 2010 VUIBERT



Laurence Maurines

Illustré en couleurs par Olivier Martin

0-01884, 400 p., 42 €, août 2010

Sciences & religions, Patrick Barbierousse, Sadek Beloucif, Alain Bernard, Michel Bitbol, Michel Blay, Laura Bossi, Rémi Brague, Sylvie Cadolle, Georges Chapouthier, Patrick Chaquin, Faouzia Charfi, Gilles Cohen-Tannoudji, Olivier de Dinechin, François Euvé, Philippe Huneman, Jean-Paul Jouary, Christian Kasmierczak, Étienne Klein, Rixon Krygier, Marc Lachèze-Rey, Marc le Maire, Laurence Maurines, Patrick Mérot, Michel Morange, Jean-Paul Morley, Claire Petitmengin, Nathalie Raybaud, Guy Samama et Odon Vallet.

«Quelle que soit notre philosophie ou notre obédience, nul d'entre nous n'est capable de programmer un ordinateur qui puisse définir le bien et le mal. Lorsque ce "quelque chose" que nous appelons la "conscience" apparaît, ses conséquences sont imprévisibles, avec un énorme pouvoir de faire et le bien et le mal».

Jean-Louis Basdevant,

«Le principe du chat» in *Le plus grand des hasards*

Entretiens réunis par Jean-François Dars et Anne Papillault, Belin



Véronique Le Ru

0-02423, 128 p., 16 €, octobre 2010
Collection « Inflexions »
Coédition ADAPT-SNES

www.Vuibert.fr



5. RECRÉATION MODERNE de la Toison d'or de Louis XV, dite « de la parure de couleur », avec, en son centre, le grand diamant bleu de Louis XIV. Supervisée par le haut-joaillier genevois Herbert Horowitz, cette récréation nécessita quatre années d'un patient et minutieux travail scientifique impliquant l'auteur et les meilleurs artisans (lapidaires, orfèvres, sertisseurs, ainsi que maroquiniers et relieurs pour l'écrin de l'insigne). Hauteur : 16 centimètres.

✓ SUR LE WEB

Retrouvez une simulation du diamant bleu en vidéo sur notre site Internet www.pourla-science.fr

Un site consacré à l'épopée du diamant bleu : www.lediamantbleu-lelivre.fr

✓ BIBLIOGRAPHIE

F. Farges et J. Piantanida, *Le diamant bleu* [roman historique], Michel Lafon, 2010.

F. Farges et M. L. *The French Blue and the Hope diamond: the discovery of a historical lead cast*, *Gems & Gemology Spring*, pp. 2-17, 2009.

F. Farges et M. L. *Deux découvertes majeures autour du diamant bleu de la couronne*, *Revue de gemmologie*, vol. 168, pp. 12-24, 2008.

R. Kurin, *The Diamond: the Legendary History of a Cursed Gem*, HarperCollins, 2006.

Les diamants, du cœur de la Terre au cœur du pouvoir, *Dossier Pour la Science*, n°35, 2002.

H. Bari et V. Sautter, *Diamants*, Muséum national d'histoire naturelle, 2001.

B. Morel, *Les joyaux de la couronne de France*, Fonds Mercurator, 1988.

J.-B. Tavernier, *Les six voyages de Jean-Baptiste Tavernier*, Clouzier, 1816.

environ 300 carats. En d'autres termes, le diamant de Tavernier n'était probablement que la partie centrale d'un cristal plus important qui a cristallisé dans le manteau terrestre il y a plus de 1,2 milliard d'années (âge de la mise en place des cheminées diamantifères d'Inde), et qui a été scindé en trois parties depuis.

Où sont passés les deux autres volumes qui entouraient le diamant de Tavernier ? Ont-ils été livrés lors de l'éruption qui a rapproché la gemme de la surface terrestre ? Ont-ils été récupérés par les Indo-Moghols lors de leurs explorations minières ? Sont-ils coincés dans la croûte terrestre ? Ou le cristal d'origine a-t-il été coupé en trois morceaux par un mineur indien et vendu à trois clients différents ? Plusieurs candidats sont possibles : un diamant bleu de 35 carats et de couleur similaire a été vendu au roi d'Espagne vers 1660 ; Marie-Antoinette aurait eu un diamant bleu de 5,6 carats ; la famille des ducs de Brunswick en possédait un de 13,5 carats en provenance d'Inde. Sans parler de *Terechenko*, un grand diamant bleu indien de 4 carats. Sont-ils issus du même cristal ? L'enquête scientifique n'a pas encore trouvée ici ses limites, mais les archives mogholes nous renseigneraient peut-être.

D'où provient la couleur bleue ?

Ainsi, le mytique diamant bleu de la couronne, le plus beau des joyaux de la couronne de France avec le *Régent*, a été retrouvé grâce à un modèle en plomb resté intact pendant 170 ans dans les réserves de minéralogie du Muséum national d'histoire naturelle, à Paris. C'est aussi grâce à ce modèle en plomb et à la description de Tavernier que nous avons pu retrouver les caractéristiques du diamant acheté par le voyageur, puis remonter au cristal tel qu'il s'est formé dans le manteau terrestre de Golconde, il y a plus de 1,2 milliard d'années, avant d'être projeté à la surface.

D'où venait ce modèle en plomb ? L'hypothèse la plus logique est qu'Achard connaissait le retailleur londonien (Jean Francillon selon l'historien Bernard Morel), car ils étaient tous deux des lapidaires français protestants. La fabrication d'un moule en plomb avant de retailler un diamant est une tradition londonienne bien documentée, utilisée notamment pour le *Régent*. Pourquoi Achard a-t-il donné ce modèle en plomb au Muséum de façon aussi discrète ? Nous n'en savons rien, sinon que le « secret



professionnel» des grands joailliers prévaudrait encore de nos jours. Une chose est sûre : de par ses qualités optiques du diamant décelées par simulation, la réplique en plomb a prouvé qu'elle était, bien plus que le *Hope*, la digne héritière du diamant bleu français.

L'enquête n'est pas terminée pour autant. Nous recalculons actuellement la couleur du diamant bleu à partir d'une structure de carbone dopée en bore. Les gemmologues supposent que le bore confère au diamant sa couleur bleu métallique, mais nous n'en avons aucune preuve formelle et directe. Au moyen de calculs fastidieux assistés par ordinateur, nous estimons que les longueurs d'onde sont absorbées par un diamant dopé en bore, afin de vérifier si le bore est la source de la couleur des diamants bleus. L'enquête historique se poursuit aussi, notamment sur les joailliers impliqués dans cette histoire : Pittan et Achard. Plusieurs documents ont été retrouvés, qui permettent de mieux cerner les personnalités de deux joailliers encensés en leur temps et aujourd'hui injustement tombés dans l'oubli.

NOUVELLE VERSION

SigmaPlot® 12



— DISPONIBLE POUR WINDOWS —



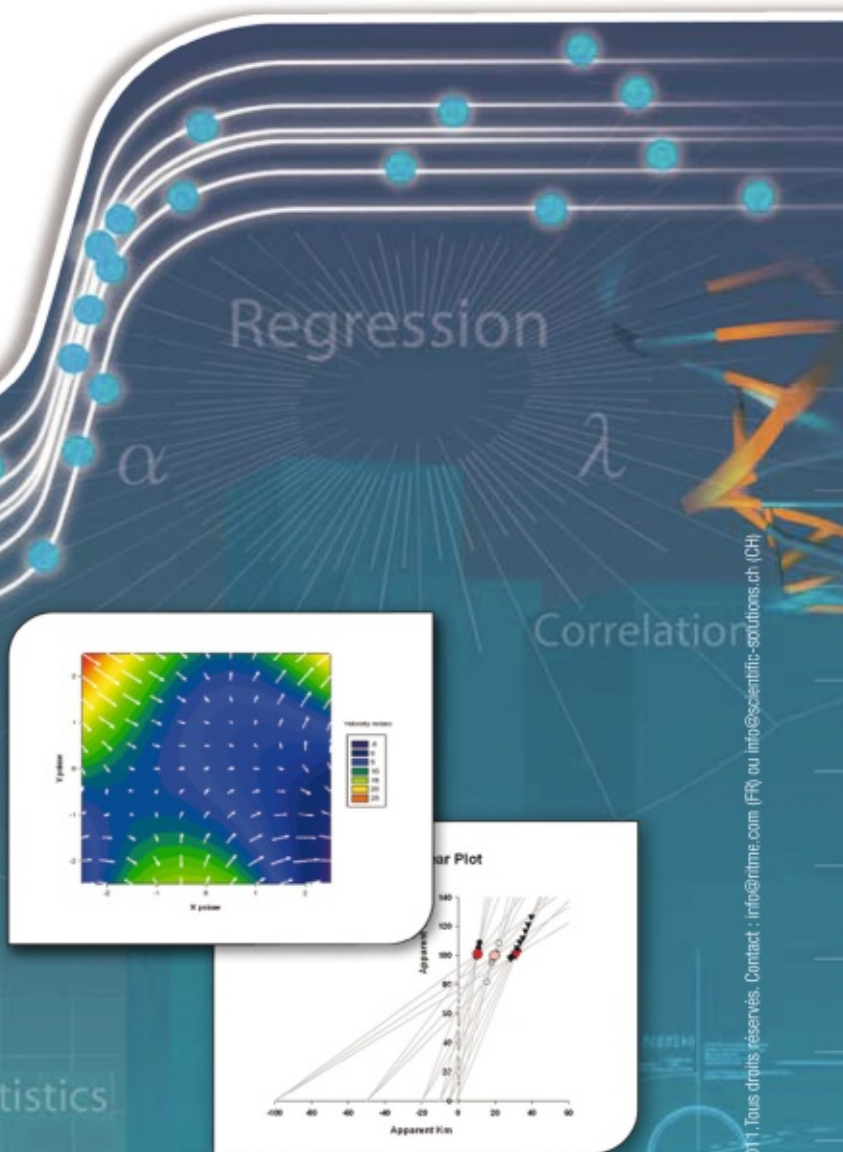
**Le logiciel d'analyse et de visualisation
de données scientifiques simple et performant**

SIGMAPLOT INTÈGRE MAINTENANT SIGMASTAT & LE MODULE ENZYME KINETICS

SigmaPlot offre de puissantes capacités graphiques, des outils d'édition performants, et la possibilité d'exporter aux formats EPS, TIF, JPEG, PDF, HTML pour publier vos travaux sur tous supports. Un large éventail de fonctions d'analyse : statistiques de base, régression, ajustement... ainsi que l'accès direct à SigmaStat vous permettent d'interpréter facilement vos données !

SigmaPlot & SigmaStat sont tous les deux parfaitement intégrés à Excel : vous pouvez utiliser les fonctions, les tableaux croisés dynamiques et les macros de MS Excel directement dans SigmaPlot & SigmaStat, et analyser votre feuille de travail Excel dans SigmaStat.

Module Enzyme Kinetics : maintenant intégré à SigmaPlot, il met à votre disposition plus de 40 équation-modèles pour l'analyse des réactions enzymatiques, de nombreux graphiques types vous permettant de déterminer le meilleur modèle d'inhibition.



SCIENTIFIC solutions

www.scientific-solutions.ch

Distribué en Suisse par Scientific Solutions SA

www.ritme.com

Distribué en France par Ritme Informatique



Des jeux vidéo plus réalistes



Henrik Wann Jensen et Tomas Akenine-Möller

Grâce à l'évolution conjointe des algorithmes et des composants matériels, l'informatique graphique crée des images de plus en plus proches de la réalité.

Depuis l'émergence, au début des années 1960, de l'informatique graphique à trois dimensions, ou 3D, les spécialistes du domaine rêvent de créer des univers virtuels dits photoréalistes, impossibles à distinguer du monde réel. Créateurs, architectes, éclairagistes, passionnés de jeux vidéo et du graphisme scientifique souhaitent que les cartes vidéo puissent afficher des scènes 3D interactives.

Les concepteurs et fabricants de matériels informatiques et d'algorithmes ont fait des progrès spectaculaires en la matière ; il suffit de regarder un adolescent s'adonnant aux jeux les plus récents pour s'en convaincre. Il reste néanmoins des défis de taille, à commencer par la tâche de calcul nécessaire pour produire de telles images. Des progrès ont été réalisés à l'aide d'algorithmes ingénieux, et les générations successives des processeurs graphiques ont permis d'organiser et réaliser les calculs lourds nécessaires à la synthèse d'images.

Pourtant, afficher des images photoréalistes est une tâche si difficile que la plupart des ordinateurs de bureau n'utilisent

qu'une minuscule fraction de leurs cycles de calcul pour effectuer les tâches de routine. Rien à voir avec l'écrasante tâche qui incombe aux applications 3D les plus avancées : le rendu d'une seule image peut demander plusieurs heures de calcul aux machines les plus rapides, afin par exemple de suivre le chemin de milliards de photons ou de diffusions de la lumière sous la surface d'objets translucides.

La quête du temps réel

Or les ordinateurs vidéo les plus performants d'aujourd'hui que les scènes 3D affichent à raison de 60 images par seconde au moins. Cette quête du temps réel est motivée non seulement par le désir d'avoir des scènes d'un bon réalisme, mais aussi par le besoin d'interagir avec elles. La norme télévisuelle de 29,97 images par seconde est suffisante pour un spectateur passif ; les applications en temps réel, tels les jeux et les simulateurs de vol, doivent fonctionner à la

vitesse des réflexes humains. Il s'agit de photoréalisme en temps réel.

En attendant que participants à cette entreprise de création de graphismes à rendu réaliste (l'un d'entre nous se consacre plus particulièrement à la recherche d'une plus grande vitesse, l'autre à l'élaboration d'un meilleur réalisme), nous passerons en revue les différents types de calculs requis, les dispositifs qui ont été proposés pour les alléger, et l'univers parallèle du développement de matériels capables de mener ces calculs.

Les matériels et les logiciels évoluent de conserve depuis plusieurs décennies. Le secteur du matériel, porté principalement par la soif de vitesse des joueurs vidéo, a produit des cartes graphiques d'une extraordinaire puissance. Les calculs ont été transférés des unités centrales (CPU, *Central Processing Units*) des ordinateurs aux processeurs graphiques (GPU, *Graphics Processing Units*) des cartes vidéo commerciales. Le bond des prouesses de calcul entraîne alors la création d'algorithmes capables d'accrocher le réalisme.



L'ESSENTIEL

✓ La puissance des cartes graphiques actuelles permet d'afficher des images de synthèse proches de la réalité à partir d'environnements virtuels en trois dimensions.

✓ Les jeux vidéo doivent manipuler de façon interactive un volume de données colossal et ne peuvent pour l'heure restituer des images parfaitement réalistes.

✓ Le rendu fluide et réaliste de scènes 3D demande des algorithmes qui réduisent le temps de calcul tout en créant les effets visuels typiques du monde réel.

Pour représenter la complexité visuelle des environnements virtuels 3D, les applications actuelles de graphisme en temps réel, les jeux par exemple, convertissent les descriptions des scènes en millions d'unités de construction nommées primitives géométriques : des points, des lignes et des polygones – souvent des triangles –, assemblés pour former des surfaces polygonales, c'est-à-dire des surfaces constituées de polygones.

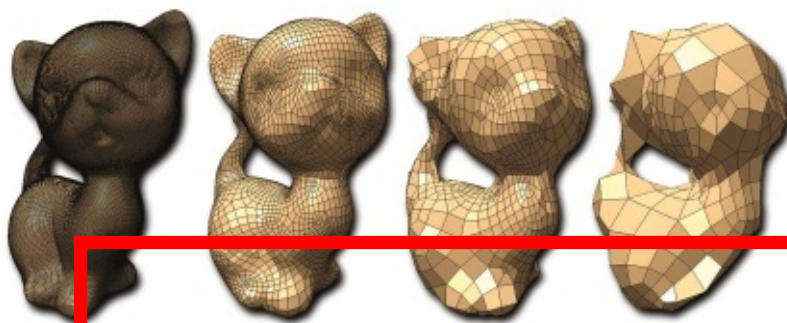
Les premiers jeux (comme *3D Monster Maze*, dont on voit une image à côté du titre) représentent les scènes à l'aide de quelques centaines de polygones : même si à l'époque déjà, interagir avec ces environnements pouvait être prenant, l'attrait des jeux ne devait pas grand-chose au réalisme.

Construire une scène

Pour produire des images plus réalistes, une première étape a consisté à accroître le nombre de polygones sur les modèles 3D des scènes. Il faut bien choisir l'équilibre entre le plus grand réalisme ainsi rendu possible et le temps de calcul alors nécessaire. Le concepteur doit toujours se demander jusqu'à quel point pousser le souci du détail. Aujourd'hui, les processeurs graphiques sont capables d'afficher des scènes 3D composées de plusieurs millions de polygones à un rythme de 60 images par seconde, le point de référence des joueurs vidéo.

Si la tendance se poursuit, nous pourrions nous attendre à brève échéance à

1. LA DEMANDE DES USAGERS, couplée à l'amélioration des algorithmes et des composants matériels, rapproche l'informatique graphique de l'un de ses objectifs ultimes : l'animation au rendu réaliste. À ce point de la technologie, le film d'animation 3D *Ratatouille*, des studios *Pixar*, a été produit par environ 850 ordinateurs équipés de près de 3 200 processeurs. Le temps moyen de calcul de chaque image était d'environ six heures : la projection se déroulant à 25 images par seconde. Chaque image était précalculée, mais il en va autrement pour les jeux vidéo, où une excellente qualité visuelle doit être conciliée avec la fluidité de l'animation, qui demande 60 images par seconde, calculées en temps réel. Les choses avancent en ce sens, comme on peut le voir avec le jeu interactif *Mirror's Edge* de la Société Electronic Arts, datant de 2008 (ci-contre). Ce jeu éblouissant parvient à afficher plus de 60 images par seconde sur des ordinateurs de bureau.



J. Daniels et al., *Journal of SIGGRAPH Asia*, vol. 27, pp. 1-9, 2008

2. POUR VISUALISER ET ANIMER DES MODÈLES 3D, et afficher rapidement les images résultantes, il faut combiner optimisation et approximation. Les algorithmes optimisent les calculs nécessaires, et des éléments de la scène 3D tels que les ombres, les réflexions et même la géométrie peuvent n'être qu'approximatifs, la précision étant sacrifiée au profit de la vitesse. Ainsi, avec la technique de rasterisation, qui crée un rendu de polygones correspondant au modèle 3D, le nombre de polygones peut être plus ou moins grand. Les deux modèles de chat du milieu permettraient un rendu beaucoup plus rapide que celui de gauche, mais la distance entre l'observateur et le chat est un peu plus grande, même si le nombre de polygones à utiliser est élevé, avec une perte de qualité réduite.

l'arrivée de matériels qui manipuleront des centaines de millions, voire des milliards, de polygones à une vitesse suffisante. L'un des fondateurs des studios d'animation Pixar, producteurs d'animations 3D allant de *Toy Story* à *Ratatouille*, affirmait que 80 millions de polygones seraient nécessaires pour le rendu réaliste d'une scène donnée. Il semble donc que le matériel sera bientôt au rendez-vous du photoréalisme en temps réel. Toutefois, ce dernier est loin de se résumer au nombre de polygones mis en œuvre.

Avec le matériel informatique et les logiciels actuels, le moyen le plus rapide d'afficher une scène 3D sur un ordinateur, c'est-à-dire de convertir les données géométriques 3D des objets – leurs coordonnées dans l'espace à trois dimensions – en une image formée de pixels, est la rasterisation, ou rendu de polygones, la technique utilisée par les jeux vidéo actuels.

À partir de la position de l'observateur, l'algorithme traite la scène 3D en détectant ses parties géométriques visibles et ses parties cachées (y compris les parties postérieures des objets faisant face à l'observateur). Ce qui n'est pas visible est écarté pour accélérer le calcul, puis l'algorithme détermine quels sont les sommets géométriques les plus proches de l'observateur. Les polygones formés par ces sommets sont projetés sur un écran virtuel constitué de pixels (voir la figure 3). La couleur de chaque pixel est alors définie par la couleur et les propriétés de surface (aspérités, éclat, etc.) assignées au polygone correspondant, ainsi que par l'éclairage de la scène. On fait

enfin disparaître de l'image les angles entre polygones contigus en prenant la moyenne des valeurs de leurs couleurs.

Ces ordres d'instructions logicielles nommées *shaders* (nuanceurs) qui déterminent la couleur et les propriétés de surface d'un polygone. En général, l'information sur la surface est fournie grâce à des « cartes de texture », images numériques plaquées sur l'objet 3D. Le placage de textures est un art en lui-même. Dans les chaînes de production des studios 3D, les artistes se spécialisent pour reproduire, par exemple, non seulement le relief d'un objet, mais aussi la rugosité de sa surface et le brillant de la

Ombres et lumière

Le placage de textures en relief, conçu par l'un des pionniers de l'infographie, l'Américain James Blinn, à la fin des années 1970, a représenté l'une des premières percées en la matière. Ce dernier a apporté de nombreuses contributions capitales à la production d'images convaincantes à partir de données 3D. Le placage de relief rend les détails de la microstructure de la surface sans altérer la géométrie globale. Il donne pour instruction à la carte graphique de manipuler l'éclairage local comme si la surface était bosselée, les bosses étant définies par les zones claires et sombres de la carte de texture.

Un environnement 3D est éclairé par des sources lumineuses virtuelles placées dans la scène. Les techniques de rasterisation utilisent quelques équations simples

pour calculer quelle quantité de lumière issue d'une source lumineuse donnée arrive sur chaque polygone, et quelle fraction est réfléchie vers l'observateur.

Les premiers rendus de scènes 3D avaient une apparence irréaliste caractéristique, parce qu'il leur manquait un aspect essentiel au réalisme visuel : les ombres. La rasterisation a résolu ce problème en utilisant une technique qui procède à un affichage en plusieurs phases, ou passes. Par exemple, avec l'algorithme de placage d'ombres, une première image est construite du point de vue de la source lumineuse pour déterminer les polygones éclairés. Lors d'une deuxième passe, du point de vue de la « caméra », c'est-à-dire de l'observateur – différent de celui de la source lumineuse –, le calcul de couleur réalisé pour chaque polygone interroge la carte des ombres pour indiquer si celui-ci est visible depuis la source

lumineuse ou s'il est dans l'ombre. La couleur du polygone est alors estimée pour prendre compte de l'ombre.

La rasterisation présente toutefois une faille indiscutable pour reproduire les réflexions et les réfractions de la lumière. Les réflexions sont les déviations de la lumière quand elle traverse un milieu transparent tel que l'eau ou le verre ; comme les ombres, elles contribuent beaucoup au réalisme. Pour diverses raisons, ces deux types d'effets optiques ne peuvent être calculés au moyen de la technique de « peinture de polygones », la stratégie centrale de la rasterisation. Plusieurs propositions scienti-

fiques ont tenté de contourner ce problème afin de donner l'impression d'effets miroirs ou de transparence, mais la méthode reste fondamentalement inadaptée à ces effets.

Il existe d'autres effets de lumière que la rasterisation ne parvient pas à reproduire. Dans les scènes réelles, les couleurs tendent à s'éteindre lorsque des surfaces diffuses sont éclairées par des réflexions multiples. Ainsi, dans une pièce blanche garnie d'un tapis rouge, le tapis projette une subtile lueur rouge sur les murs blancs. Ce phénomène ne peut être simulé par rasterisation. Il en est de même des caustiques, concentrations lumineuses produites sur des surfaces par des objets transparents ou qui réfléchissent la lumière, comme celles que l'on voit au fond d'une piscine ou tout près d'un verre d'eau posé sur la table.

Au-delà du phénomène que la rasterisation n'arrive pas à simuler, la diffusion de la lumière sous les surfaces est un développement récent particulièrement important

du photoréalisme. Quand la lumière traverse la surface d'un matériau réel, elle est diffusée, en partie vers l'intérieur, et en partie vers l'extérieur, selon un effet de translucidité. La qualité visuelle distinctive de la diffusion sous la surface des objets entre en jeu dans l'apparence, entre autres, de la peau humaine, et la difficulté à la reproduire avec exactitude explique le rendu peu convaincant des visages.

Aujourd'hui, pour diverses raisons, dont les limites de la rasterisation dans le traitement des effets de lumière complexes, beaucoup de spécialistes pensent que cette technique ne pourra pas concrétiser l'affichage photoréaliste des scènes 3D en temps réel. La solution est à rechercher en partie du côté du matériel. L'une des technologies clés du graphisme en temps réel repose sur des processeurs graphiques spécialisés capables de traiter et d'afficher rapidement quantités d'objets géométriques. Ces processeurs sont performants grâce à un haut degré de parallélisme : la tâche consistant à afficher une scène est divisée en tâches plus petites, traitées en parallèle par des unités de calcul spécialisées.

Programmer les processeurs

Pour cette raison, le graphisme peut être perçu comme un « trou noir » de puissance de calcul : plus vous injectez de la puissance pour répondre au problème, plus les consommateurs et les développeurs en demandent pour que leurs ordinateurs affichent des images toujours plus complexes. Les concepteurs des architectures matérielles, des processeurs centraux comme des processeurs graphiques, ont ces demandes du marché à l'esprit.

Depuis quelques années, on sait programmer les processeurs graphiques. Il y a dix ans, il s'agissait essentiellement d'unités à fonction fixe dont seuls certains paramètres étaient ajustables pour permettre quelques types de calculs différents. Cette rigidité limitait fortement les types d'effets graphiques possibles. Avec la flexibilité nouvelle des processeurs graphiques programmables, un programmeur peut choisir des modèles d'éclairage complexes pour tirer le maximum du matériel.

Le matériel programmable a également permis de trouver des astuces susceptibles de surmonter les limites inhérentes à la rasterisation. Par exemple, les chercheurs et les développeurs de jeux du monde entier,

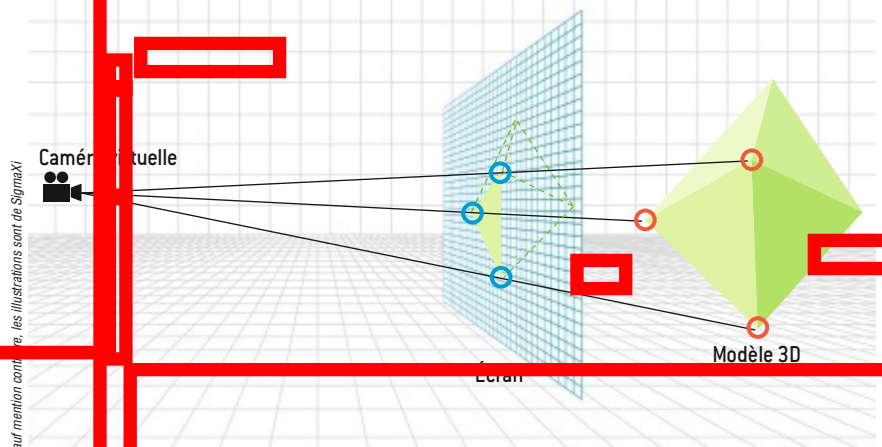
en quête de scénarios de jeux toujours plus réalistes, ont développé des algorithmes approximatifs à plusieurs passes qui imitent l'éclairement de couleur, les caustiques et la diffusion de la lumière sous les surfaces en implémentant la rasterisation dans des processeurs graphiques. Cependant, cette solution commence à se heurter à un mur. Ses résultats sont attrayants, pour ne pas dire époustouflants, et pourtant, pour les standards du rendu réaliste, ils ne sont pas convaincants.

En fait, afin d'obtenir un véritable photoréalisme, il faut changer la façon dont le traitement en temps réel gère la géométrie des scènes 3D et leur éclairage. La course est lancée pour développer du matériel capable de prendre en charge de tels algorithmes. L'un d'eux est le lancer de rayons.

Conceptuellement, le lancer de rayons et la rasterisation ne sont pas très différents : tous deux déterminent ce qui est rendu à chaque point le long d'un rayon. Le lancer de rayons diffère en ceci qu'il simule les rayons lumineux qui traversent une scène 3D, y compris les multiples nouveaux rayons nés de la réflexion de lumière par les éléments géométriques de la scène.

En faisant remonter les rayons lumineux jusqu'à leur source lumineuse, on peut rendre compte de façon assez naturelle des phénomènes physiques associés à la lumière, non seulement de la réflexion et la réfraction, mais également d'effets particuliers tels que les diffusions lumineuses multiples et les caustiques.

Le lancer de rayons est un algorithme élégant, relativement simple à programmer.



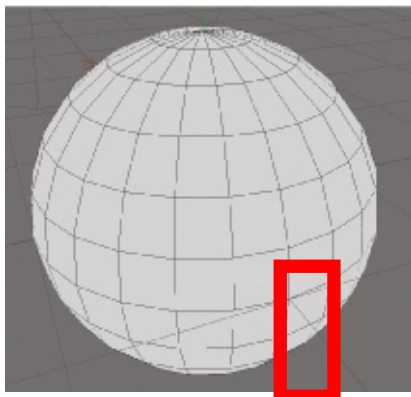
3. LES ALGORITHMES DE RASTERISATION affichent un modèle 3D d'une scène en projetant, depuis la caméra virtuelle qui détermine la prise de vue, des rayons sur les sommets géométriques (en rouge) de la scène. Ces sommets définissent des polygones qui sont alors associés aux pixels d'un écran virtuel (en bleu). L'apparence de surface assignée aux polygones du modèle est alors calculée et projetée sur l'écran pixelisé pour créer une image.

LES AUTEURS

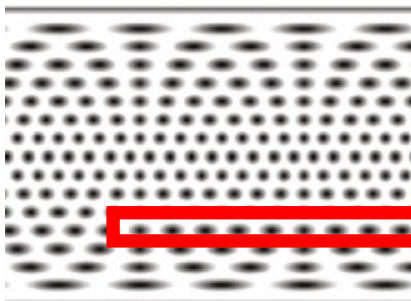


Henrik WANN JENSEN est professeur à l'Université de Californie à San Diego. Tomas AKENINE-MÖLLER est professeur à l'Université de Lund, en Suède, et collabore avec Intel.

© American Scientist



+



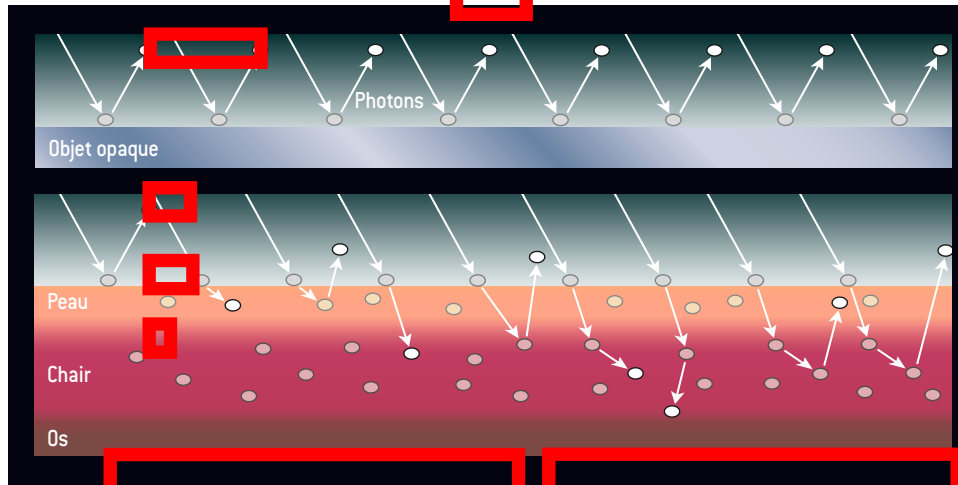
Carte de texture ou carte des bosses



Les zones claires et foncées de la carte des bosses sont converties au moment du rendu en information de hauteur.



4. LE PLACEMENT DE RELIEF à partir de textures est une technique efficace pour faire apparaître des détails fins de surface au moment du rendu. En assignant une texture à un modèle 3D (*en haut*), on donne des instructions d'ombrage à la carte graphique sous forme de zones claires et foncées. Cela indique quelles régions doivent projeter des ombres, comme si elles étaient légèrement surélevées ou abaissées par rapport à la surface réelle.



Ainsi, les instructions d'un simulateur de rayons opérationnel que Paul Heckbert, architecte graphique 3D pour le fournisseur de cartes graphiques NVIDIA, a codées, sont imprimables lisiblement sur une carte de visite. Le traitement naturel de la lumière par le lancer de rayons fait de ce dernier un candidat de choix pour remplacer la rasterisation.

Des millions de rayons

Les performances de vitesse de la rasterisation sont obtenues en déterminant les caractéristiques visibles d'un polygone, puis en passant au polygone suivant. Le lancer de rayons doit, lui, rendre compte d'une scène 3D entière dans laquelle les rayons lumineux rebondissent en tous sens. Ainsi, les algorithmes doivent traiter simultanément tous les polygones de la scène. Cela nécessite de définir une « structure accélératrice », c'est-à-dire une configuration des données qui optimise la capacité à déterminer si un rayon lumineux particulier atteint un polygone. Certains effets lumineux peuvent bénéficier de structures accélératrices supplémentaires. En effet, pour chaque étape des calculs de simulation et d'affichage, les concepteurs cherchent à optimiser les calculs pour rendre le processus plus rapide.

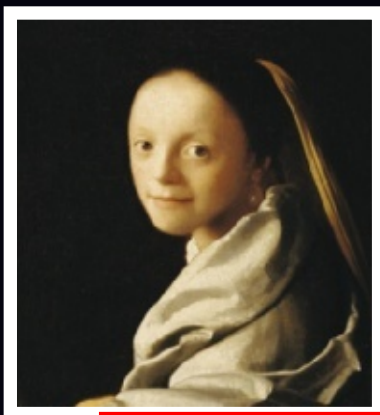
Comme l'algorithme de lancer de rayons suit la trajectoire de chaque rayon lumineux qui éclaire la scène, il peut être amené à tracer plusieurs millions de rayons. Si l'on incorpore des effets plus complexes, plusieurs dizaines de millions de rayons sont nécessaires. Il en résulte des images d'une grande beauté. Par exemple, contrairement à l'éclairage imparfait des méthodes

plus simples, les méthodes de simulation de l'éclairage, par lesquelles les environnements sont éclairés comme dans la réalité – non pas par une ou quelques sources lumineuses, mais par toutes les surfaces qui réfléchissent la lumière diffusée et la restituent à la scène – produisent des images d'un réalisme à couper le souffle.

Étant donné les qualités de vitesse des bonnes méthodes de rasterisation, et les énormes calculs nécessaires au lancer de rayons, il peut paraître judicieux d'associer les deux types d'algorithmes. Effectivement, les trois principaux fabricants de processeurs graphiques, *Intel*, *NVIDIA* et *AMD/ATI* – qui représentaient à eux trois près de 98 pour cent du marché en 2009 – travaillent sur des architectures où les processeurs seront programmés de façon à implémenter le lancer de rayons en complément de la rasterisation.

Ainsi, le plus gros fabricant mondial de microprocesseurs, *Intel*, s'est lancé dans le développement d'une nouvelle architecture nommée *Larrabee*, un « moteur de calcul multicœur » reposant sur la famille de processeurs centraux *x86*, que l'on trouve à la fois dans les PC et les Macintosh. L'architecture *Larrabee* a été qualifiée de processeur graphique généraliste, ce qui est le résultat du brouillage des frontières entre les processeurs graphiques et les processeurs centraux. Tout en prenant en charge des fonctions traditionnelles des processeurs graphiques, telle la rasterisation, les processeurs hybrides de type *Larrabee* peuvent être utilisés pour des tâches de type lancer de rayons et des calculs physiques avancés.

En décembre 2009, *Intel* a annoncé que le premier produit graphique reposant sur



5. DES SUTILÉTÉS VISUELLES

demandant une grande puissance de calcul peuvent être nécessaires pour un rendu réaliste. La lumière qui traverse une surface telle que la peau est diffusée, et l'éclairage de l'intérieur, créant un effet translucide. Un algorithme reproduit cet effet en propageant des rayons lumineux en suivant leurs chemins, d'après les propriétés matérielles assignées à l'objet 3D. Les peintres de la Renaissance répondaient au même défi du réalisme avec la technique du glacis : ils appliquaient des couches de pigments translucides pour capter et diffuser la lumière.

cette architecture ne sera pas, comme prévu, un produit grand public. Au lieu de cela, le matériel sera une plateforme de développement logiciel. *Intel* et d'autres concepteurs l'exploiteront pour explorer le potentiel des applications multicœur. C'est une étape classique du développement de l'informatique graphique : les souhaits des consommateurs entraînent la mise au point de matériels plus performants, et ce développement fait à son tour progresser les applications logicielles, tel le lancer de rayons en temps réel, qui peuvent être implantées dans les nouvelles architectures matérielles.

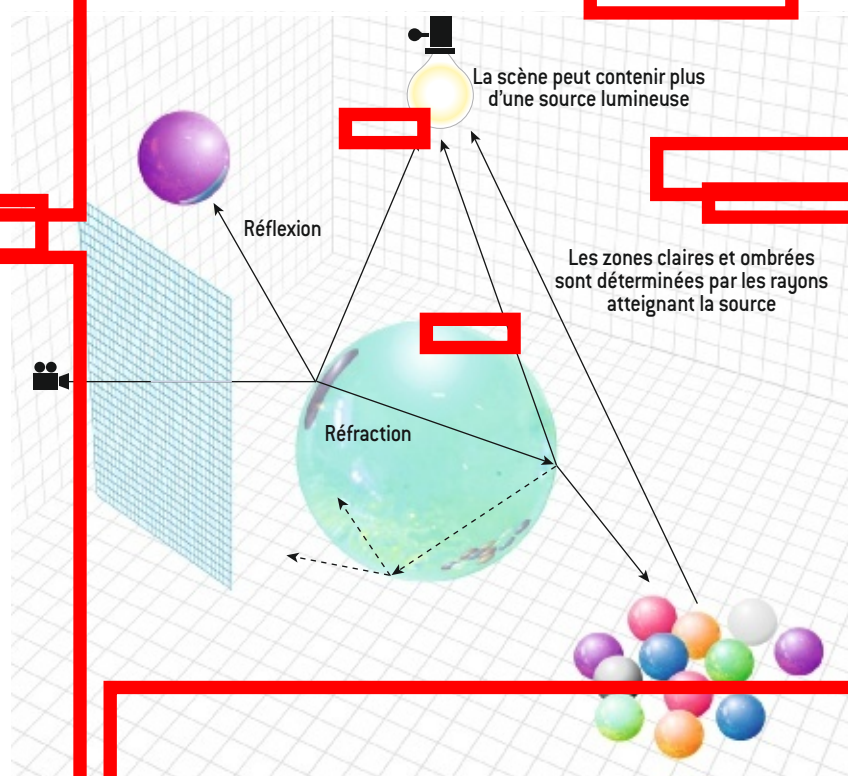
La roue de la réincarnation

Le passage de processeurs graphiques à fonction fixe aux processeurs programmables, et maintenant aux architectures aux fonctions fixes réduites, est le signe d'une évolution que Todd Myer et Ivan Sutherland, de l'institut de technologie du Massachusetts (MIT), ont nommée, en 1968, la « roue de la réincarnation » : on transfère une fonctionnalité de l'unité centrale à un matériel spécialisé susceptible d'améliorer les performances, après quoi ce périphérique évolue à son tour pour devenir de plus en plus gourmand en puissance de calcul. Les deux chercheurs écrivaient ainsi : « Nous avons tenté [de créer un processeur graphique] en partant d'un dispositif simple et en ajoutant des commandes et des caractéristiques dont nous sentions qu'elles renforceraient la puissance de la machine. Progressivement, le processeur est devenu plus complexe. Cela ne nous perturbait pas vraiment [à l'époque], après tout, l'informatique

elle-même est complexe. Finalement, le processeur graphique en est arrivé à ressembler à un ordinateur à part entière... »

Pour échapper à ce cycle de la réincarnation, T. Myer et I. Sutherland suggèrent que si une architecture a besoin d'augmenter sa puissance de calcul, on devrait lui ajouter au cœur du système, plutôt que de créer des unités matérielles spécialisées. C'est en un sens ce à quoi nous assistons avec l'émergence de processeurs multiples de cœurs multiples au sein des processeurs, et d'architectures adaptées qui, de plus en plus, prennent en charge un traitement en parallèle.

Où en sommes-nous donc ? Le matériel d'informatique graphique actuel est capable de traiter des dizaines de millions de rayons par seconde. Pour impressionnante qu'elle soit, la performance est encore loin de ce qu'exige un jeu vidéo moderne. Un affichage à 60 images par seconde en haute résolution, soit $1\,920 \times 1\,080$ pixels et 16 rayons par pixel pour tous les effets



6. DANS LE LANCER DE RAYONS, l'algorithme lance, à travers chaque pixel de l'image, un rayon lumineux depuis le point de vue de l'observateur (la caméra) vers la vue 3D, à l'inverse du cheminement normal des rayons lumineux. Le point d'intersection du rayon avec une unité géométrique de la scène définit l'objet concerné par le pixel traversé par ce rayon. Un avantage important du lancer de rayons par rapport à la rasterisation est sa capacité à représenter la réflexion et la réfraction. Pour cela, des rayons sont lancés depuis les points d'intersection et on suit leur trajectoire dans le reste de la scène 3D. Ces rayons peuvent être lancés en direction des sources de lumière pour déterminer la façon dont l'objet est éclairé. Pour une vue 3D très détaillée, des millions de rayons peuvent être nécessaires.

de lumière, nécessite deux milliards de rayons par seconde ($60 \times 1\,920 \times 1\,080 \times 16$), soit approximativement 100 fois plus que ce dont le matériel actuel est capable.

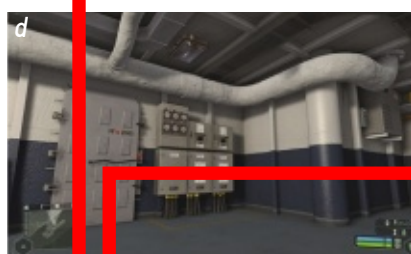
Pour relever ce défi, on peut augmenter la capacité de calcul du matériel. L'un des gros avantages du lancer de rayons est d'être un algorithme hautement parallèle, dans lequel chaque rayon peut être tracé indépendamment. Cela permet d'exploiter le fait que les processeurs graphiques peuvent travailler en parallèle ; là où 100 processeurs en parallèle ne parviennent pas à traiter un grand nombre de rayons assez vite, 1 000

Calculs parallèles

NVIDIA, AMD/ATI et Intel parient tous sur le calcul parallèle. Les derniers processeurs graphiques en date contiennent des centaines d'unités de calcul, chacune étant capable de tracer des rayons. L'architecture *Larrabee* d'Intel utilise une stratégie hybride dans laquelle de multiples processeurs dérivés du x86 utilisent un traitement vectoriel pour tracer simultanément des lots de rayons. Cette approche est difficile à programmer, et l'on ne sait pas encore si le lancer de rayons peut tirer parti de tout le potentiel du matériel, mais des travaux prometteurs ont été réalisés sur les processeurs centraux actuels.

Ne sous-estimons pas néanmoins le défi que cela représente. D'après la loi de Moore qui prédit les progrès de puissance des ordinateurs depuis 40 ans, les ordinateurs doublent leurs performances tous les 18 mois. Mais il faudra environ dix ans avant que les machines grand public soient capables de tracer les quelques milliards de rayons nécessaires pour donner un rendu réaliste aux configurations de jeux actuellement disponibles. Et dans dix ans, les exigences pour les jeux et le graphisme en temps réel en général pourraient avoir changé, appelant peut-être des résolutions plus grandes ou de nouveaux algorithmes.

Les scriptiques pourront soutenir, non sans raison, que le lancer de rayons en temps réel est une chimère qui restera à jamais hors de notre portée, les processeurs restant toujours trop lents. Et même si le matériel devient suffisamment rapide pour gérer 16 rayons par pixel dans une image à résolution maximale, cela ne suffira pas forcément pour obtenir tous les effets de lumière nécessaires à un rendu



7. DE NOMBREUX EFFETS DE RENDU

de scènes 3D nécessitent de procéder à un affichage en plusieurs passes, les informations de chaque passe étant combinées pour produire l'image finale. Un algorithme spécialisé, qui détermine l'information sur les ombres, donne une vision de la profondeur de la scène (a). Une deuxième passe donne la couleur diffuse sans les ombres (b). Les deux images sont combinées (c) et complétées par des informations sur l'éclairage telles que l'aspect brillant (la spécularité, d), ce qui améliore le réalisme.

réaliste. Sur cette base, on tend de plus en plus, comme nous l'avons déjà signalé, à une approche hybride combinant rasterisation et lancer de rayons.

Une telle association n'est pas une idée neuve en infographie. L'approche de base utilise la rasterisation pour décider quels polygones peuvent être vus sur l'écran, et se sert ensuite du lancer de rayons pour calculer l'éclairage. On peut mettre en œuvre cette méthode avec les processeurs graphiques actuels, en employant sélectivement le lancer de rayons pour ajouter réflexions et réfractions aux endroits stratégiques. Sans aucun doute, les générations à venir de l'infographie en temps réel pour les jeux adopteront cette approche aussi longtemps que le lancer de rayons pur dur restera trop gourmand en calcul pour le matériel disponible.

Un avenir hybride

Pour créer ses films 3D, Pixar utilise une technique hybride reposant sur l'algorithme REYES (*Render Everything You Ever Saw*, faite le rendu de tout ce que vous avez vu), une forme avancée de rasterisation. Cet algorithme produit des micropolygones : la géométrie de la scène est alors une mosaïque de triangles ou de quadrilatères de la taille d'un pixel. Des « cartes de déplacements » reposant sur cette mosaïque de micropolygones permettent de créer des effets géométriques complexes. Voisines des cartes de rugosité évoquées précédemment, elles reconstruisent des éléments géométriques localisés à la surface des objets, plutôt que de donner une impression de relief.

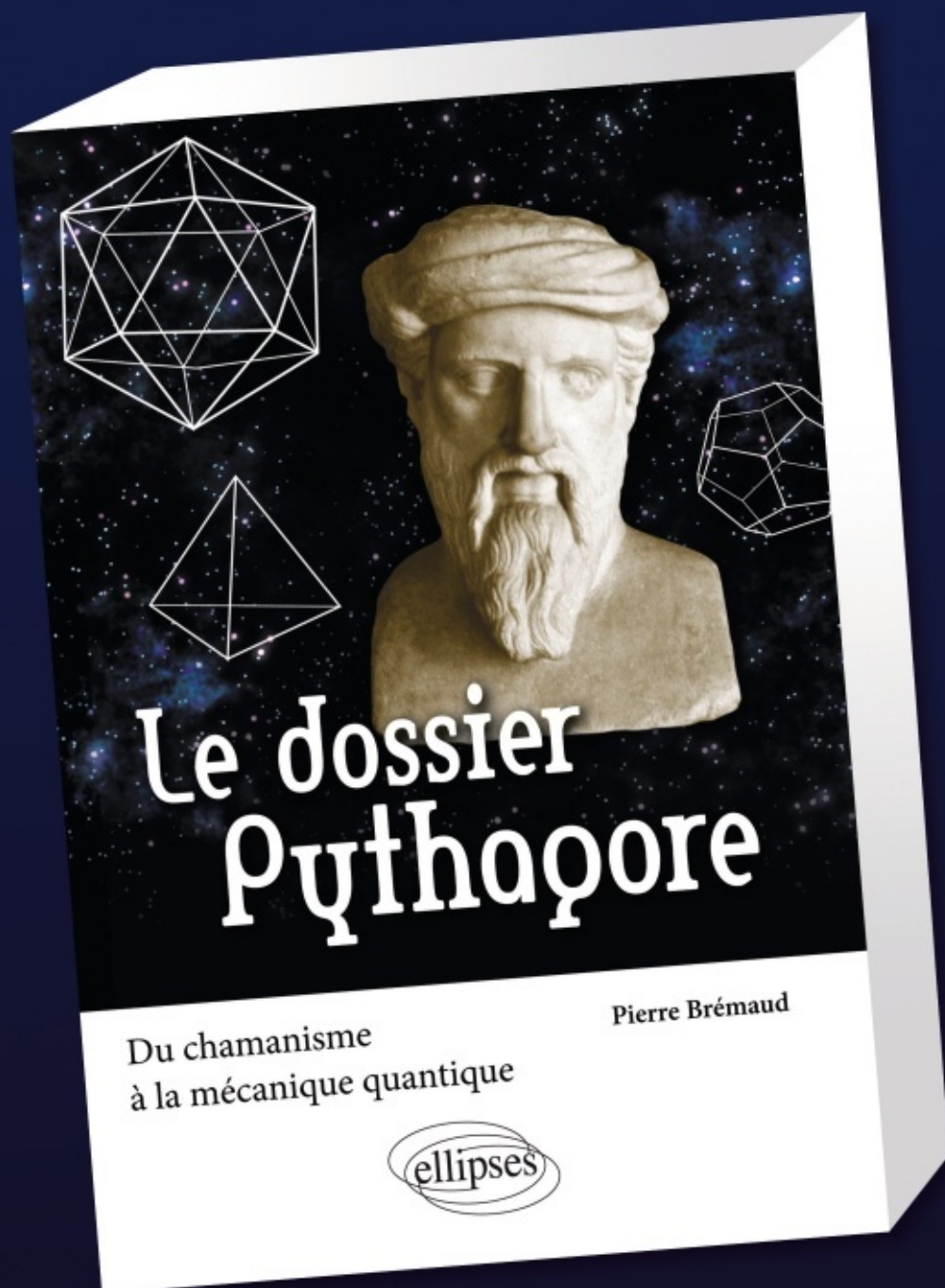
Puissante pour créer des détails tels que les pores de la peau humaine, l'approche par micropolygones peut produire une géométrie sensiblement plus complexe que ce que les algorithmes de lancer de rayons actuels sont capables de traiter. Si les jeux devaient utiliser ce type de rendu, la qualité visuelle pourrait être comparable à celle du film *Toy Story*.

Cependant, le rendu par micropolygones ne parvient pas à simuler les effets de lumière qui limitent la rasterisation. Pour remédier à cet inconvénient, les studios Pixar ont couplé le lancer de rayons au rendu par micropolygones. Le temps de calcul devient alors très important. Mais, contrairement au cas des jeux vidéo, exigeant un affichage en temps réel de



« Tout est Nombre »

Vient
de
paraître



Pythagore

Chamane charismatique
ou mathématicien aux
intuitions géniales ?

Pourquoi fut-il considéré
comme un dieu
de son vivant ?

Quelle fut la réelle
contribution des
pythagoriciens
aux mathématiques,
à la musique
et à l'astronomie ?

336 pages + 8 pages couleur

24 € / 978-2-7298-6088-2



32, rue **B**argue 75740 **P**aris cedex 15

www.editions-ellipses.fr

Une chaîne complexe à maîtriser

La construction d'une image réaliste à partir d'un environnement 3D nécessite de reproduire les phénomènes physiques des interactions entre la lumière et les objets. La compréhension de chaque phénomène permet de définir un modèle mathématique et d'en déduire un algorithme pour le reproduire le plus fidèlement possible. Avec cette méthodologie, on peut non seulement reproduire les phénomènes physiques, mais également les faire « fonctionner » pour les reproduire et les valider en les comparant à des mesures.

L'un des grands défis actuels concerne le calcul de tous les échanges lumineux possibles entre les objets eux-mêmes alors qu'ils se déplacent à 60 images par seconde. Les méthodes actuelles permettent un rendu réaliste, mais pour permettre un affichage suffisamment rapide, mais c'est au détriment de la qualité de la simulation.

Cependant, l'affichage lui-même n'est qu'une partie du processus de la synthèse d'images. La chaîne complète doit être minutieusement maîtrisée, avec des difficultés de mise en œuvre pour chaque partie : la construction de la forme d'objets 3D complexes (les outils de modélisation géométrique) ; l'animation pour les déplacer de façon réaliste : par exemple, il est difficile à comprendre, concevoir et programmer, de même que les interactions d'objets lorsqu'ils se heurtent, par exemple ; la définition des matériaux utilisés, avec éventuellement des effets de transparence, des réflexions lumineuses. Les calculs des interactions lumineuses et l'affichage de l'image correspondent à la partie la plus complexe de la chaîne.

Le jeu vidéo et le cinéma sont les applications les plus visibles de la synthèse d'images, mais d'autres domaines bénéficient de ces avan-

ces. Par exemple, les concepteurs dans les domaines de l'automobile ou de l'aéronautique exploitent ces outils pour obtenir des représentations 3D avant la construction effective. La publicité audiovisuelle, les simulateurs de conduite, de vol, l'architecture, l'archéologie, l'imagerie médicale constituent d'autres exemples de recherches actives dans le monde.

Si ces chercheurs s'intéressent à reproduire le plus fidèlement possible les phénomènes naturels ou créent des photographies d'environnements réels avec les méthodes de rendu à base d'images, d'autres proposent des systèmes de rendu par exemple destinés à produire un affichage de type « film », avec des effets d'aquaplastie, des effets de dessin animé, des effets d'aquaplastie, etc. L'informatique renouvelle alors les méthodes de l'art pictural.

Daniel Meneveau, Université de Poitiers, Département Signal, Image, Communication

60 images par seconde, les réalisateurs des films d'animation n'ont pas à se soucier du temps réel. Ils peuvent attendre un rendu de scène 3D : les images sont calculées à l'avance.

Il change facilement d'échelle en augmentant le nombre d'instructions par seconde, et on peut reproduire des effets de lumière complexes en traçant tout simplement un grand nombre de rayons.

Berner le joueur

Il existe une autre alternative au lancer de rayons : elle consiste à berner l'observateur. Après tout, la prochaine génération de jeux n'a peut-être pas besoin d'un éclairage et de réflexions d'une parfaite exactitude physique, comme c'est le cas actuellement. La communauté du graphisme en temps réel a créé maintes astuces pour produire de belles images. Par exemple, NVIDIA diffuse une démonstration en temps réel où un processeur graphique produit l'effet de translucidité de la peau humaine, c'est-à-dire montre la diffusion de la lumière à travers ce tissu. Des techniques de filtrage intelligent peuvent aussi produire des images réalistes difficiles à distinguer d'un affichage par lancer de rayons.

Cependant, les approches reposant sur des astuces ont leurs limites. Chacune est en général très spécialisée et tend à faire mauvais ménage avec d'autres. Par exemple, il faudrait un codage acrobatique pour simuler un éclairage indirect sur un visage humain avec une technique à effet de translucidité. C'est cela qui rend, au bout du compte, le lancer de rayons si attrayant.

Lors de l'édition 2009 de la conférence annuelle du SIGGRAPH (*Special Interest Group in Graphics and Interactive Techniques*), le rendez-vous majeur de la recherche en informatique graphique, son festival d'animation sur ordinateur a présenté une nouvelle session « Rendu en temps réel ». Parallèlement aux œuvres « pré-réglées » (films d'animation), qui constituent le plat de résistance de la conférence, les développeurs y réalisaient des démonstrations de leurs jeux et d'autres applications en temps réel. Par exemple, Intel, à l'aide de son architecture de processeurs central *Nehalem*, lancée fin 2008, a présenté un jeu utilisant la technique du lancer de rayons et affichant environ 10 images par seconde. Il figurait un fond marin visible à travers la surface scintillante d'un lagon.

Nul doute donc que la technologie progresse. Billy Zelnack, vétéran des jeux vidéo, déclarait il y a quelques années avec un mélange d'ironie et d'espoir : « Dans pas si longtemps, les ordinateurs seront rapides. » Ces mots restent valables. Nous pouvons ajouter, avec moins d'ambiguïté : « Dans pas si longtemps, le photoréalisme s'affichera en temps réel. »

✓ SUR LE WEB

<http://www.rayfig.fr>

<http://www.siggraph.org/>

<http://www.presence-pc.com/tests/raytracing-rasterisation-23129/8/>

<http://graphics.ucsd.edu/~henrik/>

✓ BIBLIOGRAPHIE

T. Akenine-Möller et al., *Real-Time Rendering*, 2^e éd., A.K. Peters, 2008.

B. Péroche et D. Bechmann, *Informatique graphique et rendu*, Hermès-Lavoisier, 2007.

R. Malgouyres, *Algorithmes pour la synthèse d'images et l'animation 3D*, 2^e éd., Dunod, 2005.

H. W. Jensen, *Realistic Image Synthesis Using Photon Mapping*, 2^e éd., A.K. Peters, 2005.

J. D. Foley, *Introduction à l'infographie*, Vuibert, 2000.



SOUTENEZ

REPORTERS SANS FRONTIÈRES

ACHETEZ LE NOUVEL ALBUM

100 PHOTOS DE
DAVID BURNETT
 POUR LA LIBERTÉ DE LA PRESSE

EN VENTE PARTOUT DÈS LE 9 DÉCEMBRE
9,90 € SEULEMENT

L'INFORMATION EST PRÉCIEUSE, PROTÉGEONS-LA ENSEMBLE

**REPORTERS
 SANS FRONTIÈRES**
 POUR LA LIBERTÉ DE LA PRESSE
www.rsf.org



avec le soutien de

presstalis

RELAY

Table 31.



FIG. 68.

Le retour des vaccins à ADN

Après plusieurs faux départs et échecs, une nouvelle génération de vaccins et de médicaments à base d'ADN nu est entrée dans la phase des essais cliniques.

Matthew Morrow et David Weiner

Il y a quelques années, des scientifiques des Instituts américains de la santé (NIH) testèrent deux nouveaux types de vaccins contre le virus de l'immunodéficience humaine (VIH), le sida. L'un d'eux était constitué d'anneaux d'ADN, des plasmides, dont chacun portait un gène codant une protéine du virus; le produit, qualifié de vaccin à ADN, contenait cinq gènes au total. Le second vaccin comprenait un adénovirus porteur d'un gène codant une protéine virale. Dans le premier cas, le vaccin devait conduire les propres cellules du receveur à produire cinq protéines du VIH pour qu'elles provoquent des réactions immunitaires contre le virus. Dans le second cas, l'adénovirus vecteur devait stimuler les cellules immunitaires tout en les dirigeant contre la protéine virale.

Les résultats des essais cliniques du vaccin à ADN furent négatifs, ce qui porta un grand coup à ceux qui croyaient à cette approche. Les personnes vaccinées réagirent faiblement contre les cinq protéines du virus, et ce pas du tout à l'immunodéficience.

Le vaccin immunitaire au second vaccin à base d'adénovirus modifié fut puissante. Pour les chercheurs et les sociétés pharmaceutiques, les adénovirus apparurent comme la meilleure solution pour que l'organisme produise des protéines vaccinales anti-VIH.

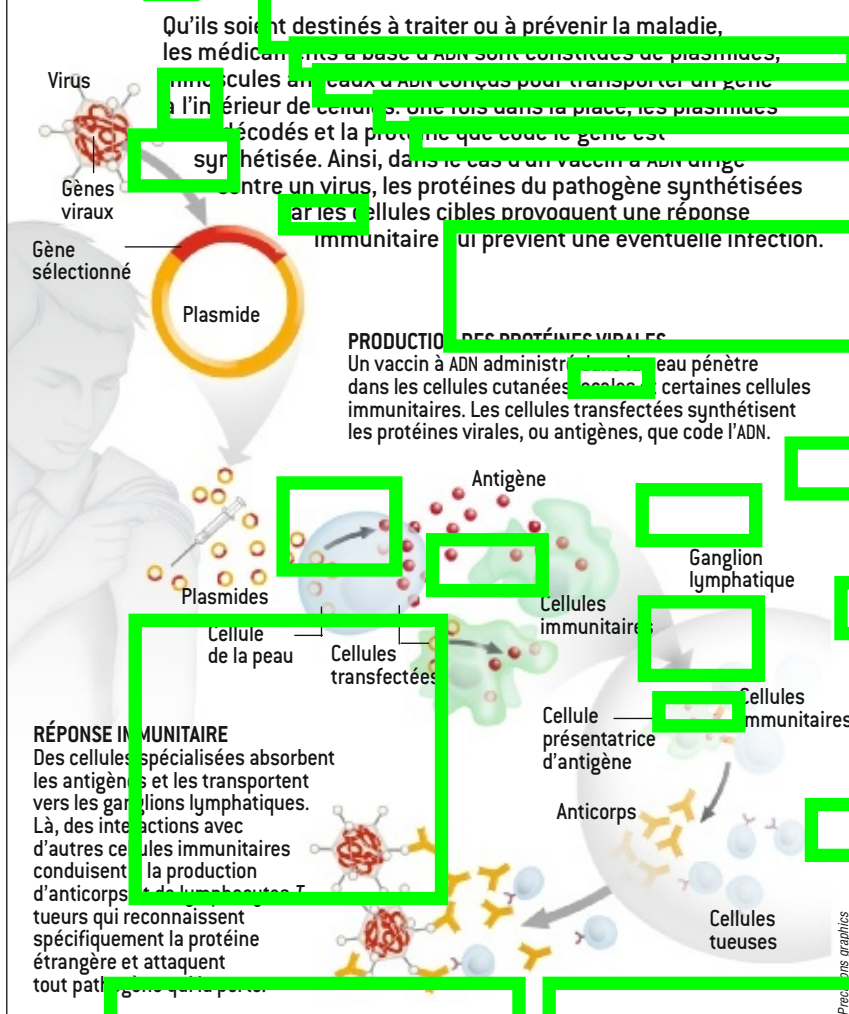
Cependant, convaincus que les vaccins à ADN restaient prometteurs, des scientifiques se sont remis au travail pour chercher des moyens de renforcer leur efficacité. Ces efforts commencent à payer. Une nouvelle génération de vaccins à base de plasmides a montré, dans des études réalisées chez l'homme et chez l'animal, une certaine efficacité tout en conservant la sécurité et d'autres bénéfices qui font l'attrait des vaccins à ADN. La même stratégie s'étend désormais à d'autres formes de thérapie immunitaire et à l'administration de médicaments. Les vaccins et thérapies à base d'ADN pourraient un jour permettre de lutter contre plusieurs maladies actuellement dépourvues de traitement efficace.

L'ESSENTIEL

- ✓ Les vaccins et thérapies à base d'ADN nu ont échoué lors des premiers essais cliniques.
- ✓ De nouvelles constructions génétiques et méthodes d'administration ont rendu le procédé plus efficace.
- ✓ Plusieurs essais réalisés chez l'animal et l'homme confirment que l'ADN nu peut faire partie de la panoplie des vaccins et thérapies à développer.

Stuart Bradshaw

COMMENT AGISSENT LES MÉDICAMENTS À BASE D'ADN



du plasmide, après avoir été synthétisée par les cellules, attire l'attention des sentinelles de l'immunité. Les plasmides peuvent donc être utilisés à plusieurs reprises chez la même personne pour apporter divers gènes, sans que l'on ait à craindre une immunité contre le vaccin lui-même.

Lors des premiers essais de vaccins à ADN, les faibles réponses immunitaires firent échouer le projet. Ces échecs provenaient vraisemblablement de ce que les plasmides n'entraient pas dans un nombre suffisant de cellules ; et lorsqu'ils y pénétraient, la cellule hôte ne produisait pas assez de protéines susceptibles de déclencher une réaction immunitaire.

Un concurrent pas si efficace

Cependant, l'approche concurrente des vecteurs adénoviraux a finalement rencontré un obstacle plus important. En 2007, le Laboratoire pharmaceutique Merck a lancé l'essai clinique STEP, une étude de grande ampleur d'un vaccin contre le VIH utilisant un vecteur adénoviral nommé AdHu5 pour transporter des gènes viraux. Quelque 3000 sujets, qui n'étaient pas porteurs du VIH, ont reçu le vaccin ou le placebo.

Alors que l'essai avançait, un signe inquiétant est apparu : les personnes vaccinées n'étaient pas mieux protégées que celles qui avaient reçu le placebo. Elles paraissaient même plus vulnérables à l'infection. Un décompte réalisé à mi-parcours de l'étude indiqua que 49 hommes sur les 914 du groupe vacciné étaient devenus séropositifs, alors que c'était le cas pour 33 hommes sur 922 dans le groupe placebo. Durant l'été 2009, l'essai STEP a alors été suspendu.

Les données sont toujours en cours d'analyse. Mais quelques éléments indiquent que le vecteur AdHu5 serait en cause. Chez les personnes présentant une immunité préexistante à l'adénovirus correspondant au vecteur – un banal virus de rhume –, le système immunitaire a pu attaquer le vaccin lui-même. On ne sait pas en revanche pourquoi les personnes vaccinées semblaient plus sensibles à l'infection par le VIH.

Durant les années précédant l'essai STEP, des chercheurs ont tenté d'apporter des solutions aux problèmes de la première génération des vaccins à plasmides. Leurs efforts visaient plus particulièrement à améliorer la pénétration des

Quant les vaccins à ADN commencèrent à faire parler d'eux, au début des années 1990, leur simplicité apparut immédiatement. Les principaux composants du vaccin sont des plasmides, c'est-à-dire des constructions d'ADN intégrant des gènes codant une ou plusieurs protéines d'un agent pathogène. Les cellules recevant ces plasmides produiraient ces protéines, mais ne contiendraient pas d'instructions pour fabriquer l'agent pathogène entier.

Lorsqu'un plasmide pénètre dans la cellule receveuse – dite cellule hôte, par un processus de transfection –, la machinerie moléculaire qui décode normalement l'ADN commence à lire le gène de l'agent pathogène qui y est inséré. Elle synthétise la protéine souhaitée, qui est reconnue comme étrangère par les cellules immunitaires, comme si l'organisme était infecté. L'organisme développe alors une réponse spécifique de

cet agent et il garde une mémoire à long terme, ce qui le rend capable de réagir plus fortement et plus vite contre la protéine étrangère en cas de nouvelle infection. La simple introduction d'un plasmide portant un gène pourrait ainsi protéger contre l'agent pathogène.

En plus de leur simplicité, les vaccins à ADN offrent en théorie plusieurs avantages par rapport aux vaccins classiques. Par exemple, pour élaborer un vaccin contre la grippe, il faut manipuler et cultiver des virus « vivants » et le processus de production demande au moins quatre à six mois. Le vaccin, une fois mis au point, doit être maintenu à basse température. Les vaccins à ADN sont plus faciles à produire et sont stables à température ambiante.

Autre avantage qui a été décisif pour remettre cette technologie en selle : le vaccin ne déclenche pas de réponse immunitaire ; seule la protéine codée par le gène

plasmides dans les cellules, à augmenter la production des protéines du vaccin et à accroître les réponses immunitaires grâce à des adjuvants.

De ces travaux sont issus de nouveaux modes d'administration des vaccins. Ils sont capables d'introduire les plasmides dans un nombre plus élevé de cellules cibles, y compris des cellules immunitaires. Par exemple, des patches transdermiques et d'autres systèmes sans aiguille, tels le *Gen Gun* et le *Bioject*, qui utilisent de l'air pressurisé pour injecter le vaccin, administrent les plasmides dans la peau, où se trouve une forte concentration de cellules immunitaires.

Ces méthodes forcent aussi physiquement les plasmides à pénétrer en plus grande quantité et dans un plus grand nombre de cellules que ne le ferait l'injection à l'aide d'une aiguille. Pour que des vaccins administrés dans un muscle ou dans la peau à l'aide d'une seringue obtiennent des résultats équivalents à ceux des dispositifs à air pressurisé, l'injection peut être suivie d'une électroporation : sous l'effet d'une série d'impulsions électriques, des pores s'ouvrent temporairement dans les membranes cellulaires, si bien que les plasmides entrent plus facilement dans les cellules cibles. L'électroporation peut augmenter jusqu'à 1 000 fois le nombre de plasmides pénétrant dans les cellules.

La renaissance de l'ADN

Les constructions génétiques à base de plasmides ont aussi été améliorées. On peut désormais faire en sorte que la cellule lise les instructions du gène de façon à les exécuter plus facilement. Dans le code génétique, les composants de base des protéines que sont les acides aminés sont définis par un ensemble de trois « lettres » dans l'ARN messager codé par l'ADN, formant un codon. Certains acides aminés sont déterminés par plusieurs codons synonymes, mais les cellules « préfèrent » en général l'un d'eux, ce qui veut dire qu'elles le traduisent plus efficacement que les autres pour l'intégrer dans la séquence de la protéine. L'astuce consiste donc à choisir les codons les plus favorables à la traduction, ce qui augmente la production de la protéine correspondante par la cellule. D'autres modifications de la séquence du gène rendent les ARN messagers transcrits

à partir d'un gène plus stables et précis, ce qui accélère la synthèse de la protéine réalisée à partir de ces ARN.

On peut aussi faire en sorte que la première séquence d'ARN traduite par la cellule pour fabriquer une protéine – la « séquence leader » – augmente la stabilité de cette dernière. Certaines séquences leaders peuvent marquer une protéine comme faisant partie de celles que la cellule doit sécréter dans le milieu extracellulaire ; ce marquage est souhaitable, car il permet aux cellules immunitaires de rencontrer les protéines étrangères à la fois à l'intérieur et à l'extérieur des cellules transfectées. Dans ces deux situations entraînant des réactions immunitaires légèrement différentes, leur combinaison augmente l'immunité globale produite par le vaccin.

LES AUTEURS



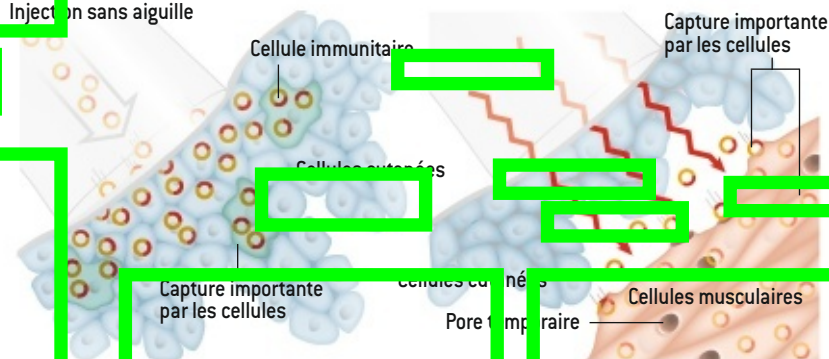
Matthew MORROW et David WEINER sont chercheurs à l'Université de Pennsylvanie. D. Weiner, professeur de médecine, y dirige le programme Thérapie génique des vaccins. Il est aussi consultant pour l'Administration américaine de l'alimentation et des médicaments (FDA) et pour des sociétés pharmaceutiques.

L'EFFET DE L'ADN RENFORCÉ

L'efficacité des vaccins et des thérapies à base d'ADN, sous forme de plasmides, a été améliorée par différentes méthodes. Elles ont accru le nombre de plasmides intégrés par les cellules, augmenté la production des protéines antigéniques et renforcé la réaction immunitaire.

UN MOYEN MEILLEUR D'ADMINISTRATION DES PLASMIDES
Injection sans aiguille

DISPOSITIF D'ELECTROPORATION



Des systèmes sans aiguille injectent le vaccin dans la peau, où sont concentrées des cellules immunitaires. En comparaison des injections, les plasmides sont plus nombreux à pénétrer dans les cellules immunitaires cutanées.

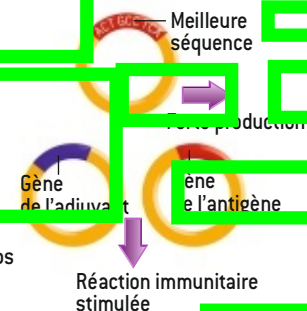
Une faible stimulation électrique, l'électroporation, accroît la quantité de plasmides qui entrent dans les cellules. En effet, chaque impulsion électrique ouvre brièvement des pores dans la membrane cellulaire, laissant passer des plasmides.

UNE CONCEPTION OPTIMISÉE DES PLASMIDES

Les constructions génétiques de production d'une protéine présentes sur un plasmide peuvent être conçues en utilisant différentes séquences de « lettres » de l'ADN. Le choix de l'une ou l'autre de ces séquences permet d'augmenter la quantité de protéine synthétisée.

UNE STIMULATION IMMUNITAIRE PLUS EFFICACE

La synthèse d'adjuvants, substances stimulant les cellules immunitaires, peut être codée par des gènes insérés dans les plasmides. Les adjuvants, fabriqués alors en même temps que les antigènes, renforcent les réponses immunitaires dirigées contre ces derniers.



✓ BIBLIOGRAPHIE

A. Abbott, Therapeutic HIV vaccines show promise, *Nature*, vol. 466, p. 539, 2010.

M. Ingolotti et al., DNA vaccines for targeting bacterial infections, *Expert Rev. Vaccines*, vol. 9, pp. 747-761, 2010.

M.A. Liu, Gene-based vaccines: Recent developments, *Curr. Opin. Mol. Ther.*, vol. 12, pp. 86-93, 2010.

F. Martinon et al., Persistent immune responses induced by a human immunodeficiency virus DNA vaccine delivered in association with electroporation in the skin of nonhuman primates, *Hum. Gene Ther.*, vol. 20, pp. 1291-130, 2009.

J. Rice et al., DNA vaccines: Precision tools for activating effective immunity against cancer, *Nature Review Cancer*, vol. 8, pp. 108-120, 2008.

Dernier perfectionnement, les adjuvants, généralement ajoutés aux vaccins usuels, pour stimuler le système immunitaire peuvent orienter la réaction immunitaire vers une forme plutôt qu'une autre. Par exemple, ils peuvent favoriser une plus grande production de lymphocytes T, qui recherchent et tuent les cellules infectées dans l'organisme, plutôt que la production de lymphocytes B qui libèrent les anticorps, bloquant l'entrée des agents pathogènes dans les cellules. Ainsi, le Vaxfectin augmente de 100 fois la quantité d'anticorps produits en réponse à un vaccin à ADN contre la grippe. Un autre adjuvant, *Resiquimod*, est utilisé pour déclencher une réaction immunitaire à base de lymphocytes T et d'anticorps.

Coder les adjuvants

Par ailleurs, au lieu d'ajouter des adjuvants à la formulation finale du vaccin, ce qui pose parfois un problème de stabilité, les concepts de vaccins à ADN peuvent incorporer directement le gène codant

les molécules d'adjuvant dans le plasmide du vaccin. Les cellules qui intègrent les plasmides fabriquent alors l'adjuvant, ainsi que les protéines du vaccin. Quand un adjuvant codé par un gène est ajouté à un vaccin à ADN, même lorsque les plasmides ont déjà été optimisés, il multiplie par cinq les réponses immunitaires.

Par ailleurs, à cause de leur origine bactérienne, les plasmides ont un pouvoir adjuvant intrinsèque. En effet, certaines séquences de l'ADN bactérien (séquences CpG) sont reconnues par l'organisme comme des signaux de danger, et leur reconnaissance provoque l'activation de mécanismes inflammatoires qui augmentent la puissance des réponses immunitaires.

Avec des plasmides optimisés et l'amélioration des modes d'administration, la technologie de l'ADN nu était prête à faire son retour au moment où l'essai STEP rencontrait l'échec, courant 2009. Qui plus est, l'approche des vaccins à ADN est devenue prometteuse au-delà de la vaccination classique, notamment parce qu'elle apporte des solutions thérapeutiques dans d'autres domaines.

Un grand nombre de traitements à base d'ADN sont plus avancés que les vaccins. À l'opposé des médicaments classiques, qui se présentent souvent sous forme de petites molécules, les thérapies à ADN apportent un gène pour traiter une maladie. Cependant, contrairement à la thérapie génique, le plasmide ne s'intègre pas de façon permanente dans le génome cellulaire du receveur, ni même ne persiste dans les cellules, ce qui évite des complications qui ont entravé les progrès des thérapies géniques reposant sur l'utilisation de rétrovirus (par exemple, parce qu'une séquence du vecteur s'intègre dans un gène important pour la cellule hôte, ou à proximité).

Comme souvent pour les nouvelles technologies, les premiers succès des thérapies à base de plasmides ont été obtenus chez les animaux. L'une d'elles, déjà autorisée aux États-Unis pour une utilisation chez le porc, vise à prévenir la mort du fœtus chez la truie. Administré à des truies gravides et sous électroporation, le plasmide pénètre dans les cellules de l'animal et code la production de l'hormone de libération de l'hormone de croissance, qui favorise la survie du fœtus en gestation. Ce traitement ne nécessite qu'une seule injection, ce qui est de bon augure pour les thérapies humaines.

VIH : la piste de l'ADN

Les bases de la vaccination par ADN ont apparues dans les années 1990-1992. Son étonnante simplicité technique a tout d'abord semblé suspecte, faisant s'interroger sur son innocuité biologique dans un contexte de prudence vis-à-vis des organismes génétiquement modifiés (OGM). Cette appréhension a rapidement disparu lorsque les chercheurs ont montré que les vaccins à ADN ne s'intègrent pas dans le génome des cellules et que leur durée de vie *in vivo* est limitée. Néanmoins, les premières expériences ont été particulièrement décevantes dans la mesure où les résultats encourageants obtenus chez la souris n'étaient pas reproduits chez l'homme. Comme l'indiquent M. Morro et D. Weiner, les premières études ont alors cherché à optimiser le vaccin.

Dans ce contexte, l'Union européenne a financé plusieurs

projets reposant sur cette stratégie, notamment destinés au développement de vaccins contre le VIH. En collaboration avec l'association finlandaise FIT Bio et l'Université de Tartu, en Estonie, nous avons participé à l'étude d'un vaccin à ADN particulièrement prometteur, dans le cadre du projet européen EPIVAC. En plus des améliorations décrites par M. Morro et D. Weiner, le plasmide optimisé comportait un gène lui permettant de faire passer la durée d'expression des anticorps vaccinaux de 3 jours à 12 jours. De plus, chez le macaque, ce vaccin à ADN, associé à une électroporation au niveau du site d'injection dans la peau, a stimulé une immunité à base de lymphocytes T

et auparavant d'une stabilité de plusieurs années, ce qui a été recherché pour limiter le

nombre de rappels de vaccinations nécessaires.

Nos recherches suggèrent que les cellules de Langerhans, sentinelles du système immunitaire localisées dans la peau et les muqueuses, jouent un rôle important dans l'efficacité potentielle de cette vaccination. Ce candidat vaccin est maintenant entré en phases cliniques, en particulier dans l'essai LIGHT, réalisé en France par l'Agence nationale de recherche sur le sida et les hépatites virales (ANRS) chez des volontaires sains, et en cours de validation en Afrique du Sud chez des patients infectés par le VIH.

Désiré Martinon
Roger Le Grand
Institut des maladies infectieuses et tropicales, DSV/CEA, Fontenay-aux-Roses, et Université Paris-Sud, Orsay.

★ musée du quai Branly

LÀ OÙ DIALOGUENT LES CULTURES

LA REVUE GRADHIVA★

EN LIBRAIRIE LE 24 NOVEMBRE 2010

La musique n'a pas d'auteur

★ musée du quai Branly

GRADHIVA

12

La musique n'a pas d'auteur Ethnographies du copyright

coordonné par Christine Guillebaud,
Victor A. Stoichita et Julien Mallet

À l'heure où la propriété intellectuelle fait l'objet d'un large débat en France, comment se cristallise-t-elle dans différentes sociétés du monde ?

Ce numéro, centré sur la musique, rappelle les conditions historiques d'émergence des notions d'œuvre et d'auteur et la difficulté soulevée par leur extension à d'autres cultures. Les études rassemblées ici sont des «ethnographies du copyright», au sens où chacune tente de suivre au plus près les principes vernaculaires de la propriété des idées musicales. Elles détaillent des situations de performance, des marchés conclus ou des mésententes, dans leurs spécificités culturelles, mais aussi dans leur confrontation aux principes et pratiques, désormais mondialisés, de la propriété intellectuelle.

Retrouvez les numéros précédents de GRADHIVA sur www.quaibranly.fr/gradhiva

DÉMONSTRER LE POTENTIEL DE L'ADN

Les vaccins à base d'ADN ont une large gamme de applications. Certains sont déjà autorisés chez les animaux. Le tableau ci-dessous résume les applications de pathologies virales en cours d'essais cliniques chez l'homme ou déjà commercialisées pour les animaux.

PRODUIT	PATHOLOGIE VISÉE DANS LES ESSAIS CLINIQUES	PATHOLOGIE VISÉE CHEZ LES ANIMAUX
Vaccins pour prévenir des maladies	■ Grippe (deux vaccins)	■ Virus du Nécrodermatite (cheval) ■ Virus de la leucémie hématoïdrique infectieuse (saumon d'élevage)
Traitements immunostimulants	■ Hépatite C ■ VIH ■ Tumeurs infectieuses ■ Papillomavirus humain ■ Cancer du pôle ■ Mélanome	■ Mélanome (chien)
Thérapies produisant des protéines indispensables	■ Insuffisance cardiaque congestive ■ Retard de croissance dû à l'immunité liée au chromosome X ■ Troubles circulatoires des membres (traumatisme) ■ Mélanome	■ Perte du fœtus (porc)

En bas : S. Schneisser, Photo Researchers; au milieu : J. Vavallin, Photo Researchers; en haut : J. Vavallin, Photo Researchers

Différents essais cliniques de thérapies à base d'ADN sont en cours (voir le tableau ci-dessus). L'un consiste à intégrer des gènes codant des facteurs de croissance, afin de mobiliser les cellules souches pour traiter l'insuffisance cardiaque congestive. Un autre utilise un plasmide qui code le facteur de croissance IGF-1; l'objectif est de traiter le retard de croissance chez les malades atteints d'immuno-déficience combinée sévère liée au chromosome X. Un troisième essai s'attaque à l'anémie critique des membres en apportant des facteurs de croissance de nouveaux vaisseaux sanguins, dans l'espoir d'éviter l'amputation.

Une catégorie différente de traitements, l'immunothérapie biologique à ADN, combine les meilleurs aspects des thérapies et des vaccins à ADN. Un gène porté par le plasmide introduit incite l'organisme à développer une réponse immunitaire contre une tumeur ou une infection virale chronique. L'un des premiers essais utilise de l'ADN codant des protéines virales afin de pousser les cellules immunitaires à attaquer les tumeurs dues aux papillomavirus humains (PVH). Les premiers résultats montrent que, chez la moitié des personnes traitées, les réponses des lymphocytes T visent les protéines des papillomavirus, et que plus de 90 pour cent produisent des quantités élevées d'anticorps. Un autre essai en cours vise à tester l'immunothérapie à base d'ADN contre le virus de l'hépatite C. Dans

les deux cas, les résultats préliminaires sont encourageants.

En immunothérapie, les applications vétérinaires sont là encore plus avancées que les études cliniques. Ainsi, une thérapie du mélanome avancé chez le chien multiplie par six

De la grippe au sida

Des dizaines d'essais cliniques de thérapies et de vaccins à base d'ADN ont été menés chez l'homme ces dix dernières années ou sont en cours. Des vaccins antigrippaux à base de plasmides apportent certains bénéfices que l'approche ADN a déjà permis de confirmer. Ainsi, celui que nous avons mis au point protège l'animal contre les souches communes du virus de la grippe et contre la grippe aviaire H5N1, mortelle, qui a infecté plusieurs centaines de personnes. Le vaccin entraîne une protection aussi large parce que ses plasmides contiennent des séquences dites consensus de gènes grippaux : les protéines virales qu'en résultent ressemblent à celles de nombreuses souches différentes du virus de la grippe. Ces vaccins pourraient permettre de prévenir à la fois la grippe saisonnière et les infections causées par des souches de virus émergentes, telles que le H5N1 depuis 1997 et H1N1 en 2009.

La souche pandémique H1N1 du virus de la grippe de 2009-2010 souligne qu'une nouvelle approche vaccinale est nécessaire.

Une version expérimentale d'un vaccin à ADN contre cette souche, produit par un laboratoire américain, *Vical*, a été réalisée en toute sécurité deux semaines en mai 2009. Elle avait été testée et autorisée à l'avance, un tel vaccin aurait pu être fabriqué en grandes quantités au moins deux mois avant que les vaccins standards soient disponibles. Elle fait l'objet depuis 2010 d'un essai clinique.

Des maladies pour lesquelles il n'existe pas d'autres solutions efficaces ont également rendu l'ADN dans la course au vaccin contre le VIH (voir l'encadré page 78). Un vaccin dénommé en essai clinique chez l'homme, *RV144*, contient trois gènes du virus, ainsi que des gènes codant des molécules d'adjuvants. Il est administré par électroporation.

Deux autres vaccins à plasmides sont testés chez l'homme pour amorcer la reconnaissance immunitaire des protéines du VIH, suivie d'une administration d'un autre type de vaccin pour amplifier la réaction immunitaire initiale. L'un, développé par la Société américaine *GeoVax*, renforce la réponse immunitaire déclenchée par le vaccin à ADN grâce au vecteur utilisé en vaccination expérimentale, nommé modification d'Ankara du virus de la vaccine. Le Centre de recherche sur les vaccins des Instituts américains de la santé teste maintenant un autre vaccin à ADN dirigé contre le VIH, avec l'un des deux vaccins à base d'adénovirus comme amplificateur.

Festival international de cinéma

Cinéma science

Un évènement CNRS

*30 novembre - 5 décembre 2010
Bordeaux, Aquitaine*

*Films de fiction suivis
de rencontres entre le public,
les cinéastes et les chercheurs*

Projections : théâtres Fémina et Trianon,
cinémas UGC et Mégarama

www.cnrs.fr/cinemascience

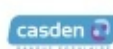
Pour accéder au programme
Cinémascience, scannez le code
avec votre téléphone (application
disponible sur <http://2d.bordeaux.fr>).



Manifestation organisée dans le cadre de l'Année France-Russie 2010



www.cnrs.fr



HISTOIRE DES SCIENCES

L'émergence de la question des ressources naturelles

En 1948, suite à la publication de deux ouvrages exposant les dangers d'une croissance irraisonnée, un large public, dans le monde entier, prend conscience de la complexité des questions environnementales.

Valérie HANSICAUD

L'année 1948 est marquée par la parution de deux livres qui deviennent vite des best-sellers. Leurs auteurs partagent un même objectif : alerter l'opinion publique sur la réduction des ressources naturelles et sur l'augmentation sans précédent de la population mondiale, la conjugaison de ces deux phénomènes mettant en danger l'avenir même de l'espèce humaine. Les thèmes développés dans ces deux livres sont similaires à ceux de nombreux ouvrages d'aujourd'hui et l'on peut y voir, à juste titre, les précurseurs du pessimisme environnemental moderne et du questionnement sur l'épuisement des ressources, sur leur utilisation durable et sur la décroissance.

Le succès est immense et international. *Road to Survival*, de l'écologue américain William Vogt (1902-1968), est traduit en français en 1950 sous le titre *La faim du monde* et connaît dix autres traductions. *Our Plundered Planet*, de l'administrateur de zoo américain Henry Fairfield Osborn Jr. (1887-1969), est réimprimé huit fois durant la seule année 1948 ; il est traduit en français en 1949 sous le titre de *Planète au pillage*, ainsi que dans 12 autres langues. Lu par 20 à 30 millions de personnes, ces livres demeurent les best-sellers des questions environnementales jusqu'à la parution, en 1962, de *Silent Spring* (*Printemps silencieux*) de la biologiste américaine Rachel Carson (1907-1964). Leur audience dépasse largement les cadres scientifiques habituels et suscite une abondante littérature de correspondances et de débats.

Pourtant, ces deux livres ne sont pas les créateurs d'une pensée environnementale nouvelle : depuis le début du XX^e siècle, de nombreux scientifiques (naturalistes, géologues ou géographes) et politiques américains s'inquiètent de l'avenir des ressources naturelles, dont l'exploitation, comme le gaspillage, croissent sans cesse. Toutefois, les études sont disparates,

éparses et peu diffusées dans la société. La grande force des deux livres est de les avoir réunies et d'avoir ainsi participé à la popularisation des idées écologistes. Qui étaient leurs auteurs ? Quels cheminements les ont conduits à écrire ces ouvrages ? Quels sont leurs messages et comment ont-ils été reçus ? Telles sont les questions que nous allons examiner ici.



Le grand-père d'Osborn Jr. était un magnat des chemins de fer et son père, Henry Fairfield Osborn (1857-1935), un paléontologiste réputé et un eugéniste convaincu. En 1935, Osborn Jr. abandonne sa carrière dans les affaires pour se consacrer à la vie de la Société zoologique de New York et à son jardin zoologique, situé dans le Bronx. Il poursuit ainsi l'œuvre de son père, l'un des créateurs de cette société, qui déclarait en 1919 : « En propageant l'amour des animaux nous avons fait des milliers, peut-être des millions, de nouveaux amis de la faune sauvage. Maintenant nous proposons de tous les unir dans une grande campagne pour la conservation. »

L'un administrateur, l'autre naturaliste

Alors que la Société zoologique subit les effets de la crise économique et connaît une baisse notable de ses effectifs, Osborn, le lui redonne un nouveau souffle. Il modernise ses installations en suivant l'exemple des zoos allemands, où l'on cherche à reconstituer

l'environnement naturel des animaux. L'institution avait été créée en 1895 pour la conservation de la faune sauvage américaine, notamment du bison. Avec Osborn, il ne s'agit plus seulement de protéger certaines espèces remarquables : les menaces sur l'environnement sont multiples et complexes et l'on doit y répondre par une approche globale s'appuyant sur une expertise scientifique approfondie.

En 1942, la Société se dote d'une division dédiée à la conservation des sols, de la faune et de la flore. Cette division conduit des études scientifiques sur les raisons du déclin de la faune en Alaska, l'impact des pesticides, les répercussions de l'éradication des petits mammifères sur les écosystèmes, etc.

Contrairement à Osborn, Vogt n'est pas un administrateur, mais un naturaliste de terrain, fréquente les ornithologues de New York, dont le biologiste et évolutionniste Ernst Mayr (1904-2005) ou l'auteur de guides de terrain Roger Tory Peterson (1908-1996). De 1935 à 1939, Vogt dirige la revue de la Société Audubon, *Bird-Lore*, qu'il oriente résolument

1. **UNE FEMME DU KANSAS** dévastée par la *dust bowl* en 1936 (*à gauche*). Due à l'exploitation intensive des sols et à la sécheresse, cette vaste érosion éolienne des grandes plaines américaines obligea nombre de paysans à tout abandonner pour fuir la famine. Les écologistes américains William Vogt et Henry Osborn Jr. reviennent sur ce désastre environnemental et ses conséquences de pratique plus récentes, telle l'utilisation massive du bétail, un insecticide purvisé tant sur les cultures que dans les maisons (*à droite sur une plage de New York en 1945*).



vers une perspective écologique moderne en sollicitant des auteurs tels le forestier et naturaliste Aldo Leopold (1886-1948), le zoologiste Paul Hester Errington (1902-1962) ou l'écologiste et écrivain Paul Bigelow Sears (1891-1991). Depuis quelques années, tous trois sont d'ardents défenseurs de la protection des écosystèmes dans leur ensemble : une espèce ne peut être préservée que si l'on protège tout son environnement, de son lieu de vie à ses prédateurs. Apparue au lendemain de la Première Guerre mondiale avec l'émergence de l'écologie, cette approche globale de l'environnement s'appuie sur les tout récents concepts de cette science : écosystème, communauté biotique (êtres vivants composant un écosystème), relations trophiques (proie-prédateur), etc. Elle est cependant peu diffusée. Dans la revue de Vogt, elle suscite même un certain découragement : certains lecteurs se plaignent de ce type d'articles, qu'ils jugent trop sérieux et trop sombres.

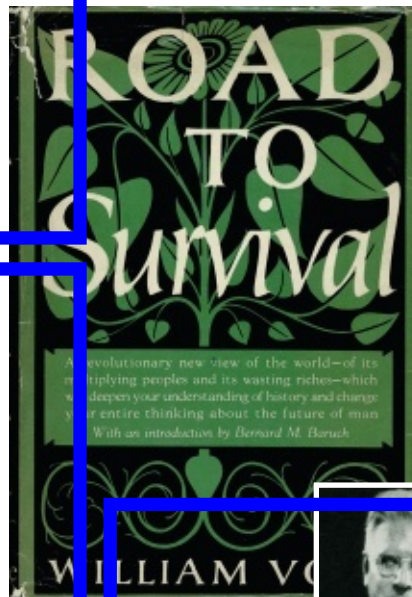
Un monde ravagé par l'homme

C'est durant son travail (1939-1942) pour la Compagnie administrative du guano péruvien que Vogt découvre les relations complexes entre l'environnement naturel et l'être humain. Durant les années 1840 à 1880, l'exploitation du guano – un puissant engrais à base de déjections d'oiseaux marins – a fait l'objet d'un commerce intensif et rentable. Au début du XX^e siècle, le Pérou, soucieux de pérenniser l'exploitation de cette ressource, a fait appel à des experts étrangers. Vogt, nourri en écologie animale des travaux du zoologiste britannique Charles Sutherland Elton (1900-1991) et en écologie pratique de ceux d'Aldo Leopold, apporte une nouvelle expertise plus globale : il établit notamment la relation entre les fluctuations des populations d'oiseaux et celles de leurs ressources en nourriture (les poissons) causées par le phénomène El Niño, courant côtier saisonnier au large du Pérou.

Les succès de la gestion avisée de cette ressource naturelle alimentent la réflexion de Vogt. À la fin de la Seconde Guerre mondiale, il prend

la direction du service « conservation » de la *Pan American Union* (aujourd'hui *Organisation des États américains*), puis celle du mouvement national de planning familial.

Bien que de cultures différentes, Vogt et Osborn partagent la même analyse (Vogt et Osborn fréquentent les mêmes milieux intellectuels et culturels new-yorkais, ce qui peut expliquer la similarité de leur engagement et de leur analyse). Chacun consacre ainsi de nombreuses pages de son livre à la



2. ROAD TO SURVIVAL (route pour la survie), le best-seller publié en 1948 par William Vogt (ci-contre), ornithologue, écologue et défenseur du contrôle des naissances, prit un ton beaucoup plus dramatique dans sa traduction française. Titré *La fin du monde*, il était accompagné du sous-titre : « Les populations augmentent. La terre s'épuise. Mangerons-nous demain ? »

dégradation des terres arables, qui conduit parfois à la désertification. La question n'est pas tout à fait nouvelle, car dans les années 1830, plusieurs scientifiques ont publié des comptes rendus particulièrement alarmants sur la situation en Afrique, à Madagascar et en Amérique... Il faut dire que le *dust bowl* américain a frappé les imaginations :

fruit de la mauvaise gestion du sol durant une longue période de sécheresse de 1930 à 1936, cette érosion aérienne de près de

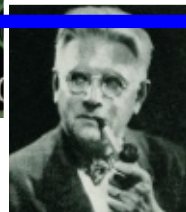
400 000 kilomètres carrés de terrain américain a entraîné famine et misère. Vogt et Osborn expliquent cette dégradation par les mêmes causes : surpopulation, manque de connaissances, imprévoyance, goût du lucre et de l'argent facilement gagné...

De même, les deux auteurs fournissent de nombreux exemples de l'imprudence humaine, telle l'introduction du lapin en Australie et en Nouvelle-Zélande au milieu du XIX^e siècle. Dix ans plus tard, ces rongeurs étaient déjà plusieurs centaines de milliers, abîmant les cultures et contribuant activement à la déforestation et à la désertification. Tous les moyens employés pour les éradiquer ont échoué, voire se sont soldés par des désastres écologiques, comme les introductions de prédateurs.

Ces exemples sont autant de preuves de l'impact de l'homme sur l'équilibre de la nature : « L'homme passe son temps à bouleverser cet équilibre en vue de ce qu'il considère comme une nécessité immédiate, sans prendre un instant en considération ce qui peut en résulter même dans un avenir assez proche, parfois aussi par ignorance et avidité », écrit Osborn. La notion d'équilibre naturel désigne ici non pas la conception d'une nature restée intacte depuis la création, car les auteurs reconnaissent l'évolution, mais l'état de l'environnement avant qu'il n'ait été perturbé par certaines activités humaines.

La différence de culture entre les deux auteurs est flagrante : Osborn n'emploie qu'une seule fois le mot écologie, alors que ce terme et ses dérivés font l'objet de nombreuses entrées dans l'index du livre de Vogt. Pour ce dernier, il s'agit de promouvoir une approche nouvelle : « Il nous faut une révolution, ou plus que Kropotkine donne à ce mot : un changement profond de nos idées fondamentales ». Pour y arriver, Vogt appelle à une union des sciences naturelles et des sciences humaines qui, seules, fourniront les outils nécessaires pour éduquer les jeunes générations aux meilleures utilisations possibles de la Terre.

En définitive, Vogt et Osborn affirment tous deux l'importance des connaissances et de la recherche scientifique, encore bien



insuffisant selon eux. Pour autant, ils ne croient pas à un progrès scientifique et technique sans fin ou sans frein. Ainsi, ils s'inquiètent de l'utilisation du DDT. Commercialisé aux États-Unis depuis quatre ans lors de la parution des deux ouvrages, en 1948, ce pesticide est présenté par ses fabricants comme un produit miracle, sans danger, la solution facile et économique pour anéantir les insectes. C'est précisément parce qu'il détruit tous les insectes sans distinction et qu'il est utilisé massivement et sans coordination que Vogt et Osborn craignent son impact sur l'environnement, par l'effondrement des relations trophiques. De fait, l'usage massif du DDT n'aura pas l'effet annoncé : les insectes ravageurs développeront vite des résistances, obligeant à multiplier les épandages.

Pour ou contre, le public se déchaine

La publication de *Road to Survival* et *Our Plundered Planet* déclenche de violentes réactions. La géographe Eva Germaine Rimington Taylor reproche à Vogt ses exagérations, son incohérence et son mépris pour les valeurs humaines. Elle signale ainsi que pour Vogt, les médecins sont des ennemis publics, car en éliminant des maladies, ils favorisent l'augmentation des populations qui vont dès lors souffrir d'autres maux. Pour l'historien James Claude Malin, il ne s'agit que d'une œuvre de propagande en faveur de la conservation, et certainement pas d'un ouvrage de science ou d'histoire.

De nombreuses critiques reprochent le pessimisme des deux ouvrages : ils « font frémir et créent de la peur, avec un minimum de suggestions quant à la façon dont nous pouvons nous sortir de ce dilemme qu'ils ont si bien représenté » souligne un membre de l'administration, ajoutant qu'il est psychologiquement mauvais de n'offrir aucun espoir. De fait, les deux auteurs sont pessimistes quant à l'avenir et leurs idées sont vite reliées à celles de Thomas Malthus (1766-1834). Vogt et Osborn partagent avec l'économiste britannique la conviction que le niveau de la population est limité par les moyens de subsistance ; et, inversement, que seuls les progrès des activités humaines



3. AU DÉBUT DU XX^e SIÈCLE, pour protéger les cerfs hémionides (ci-dessus peints par Louis Agassiz Fuertes, illustrateur américain de l'époque) du plateau de Kaibab, en Arizona, fut lancé un programme d'élimination systématique de leurs prédateurs. Les cerfs connurent alors un accroissement démographique sans précédent qui détruisit le milieu. L'absence de nourriture, leurs effectifs diminueront alors drastiquement. Aldo Leopold s'appuya sur ce désastre écologique pour défendre une protection globale du milieu. William Vogt et Henry Osborn s'y voyaient quant à eux un scénario possible pour l'humanité si elle ne contrôlait pas sa croissance démographique.

et, surtout, le contrôle de la fécondité, permettrait de contrebalancer le déséquilibre croissant entre populations à nourrir et ressources disponibles.

Certains analystes de l'époque leur reprochent de considérer que l'exploitation sans fin des ressources naturelles non renouvelables conduit à un désastre : les États-Unis et l'Europe n'ont-ils pas déjà vécu l'épuisement de certaines ressources tout en voyant leur niveau de vie augmenter ? Dans son livre, Vogt est arrivé au même constat, mais explique autrement la situation : pour augmenter leur niveau de vie, les États-Unis et l'Europe se sont comportés comme des « parasites », vidant les ressources des colonies à leur unique profit sans se soucier du lendemain. Bien plus radical qu'Osborn dans sa critique du capitalisme, Vogt souligne d'ailleurs à plusieurs reprises les dangers de la libre entreprise : si celle-ci s'exerce sans contrôle, elle finit par détruire les ressources naturelles.

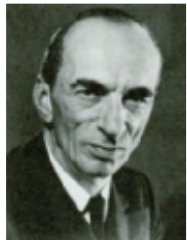
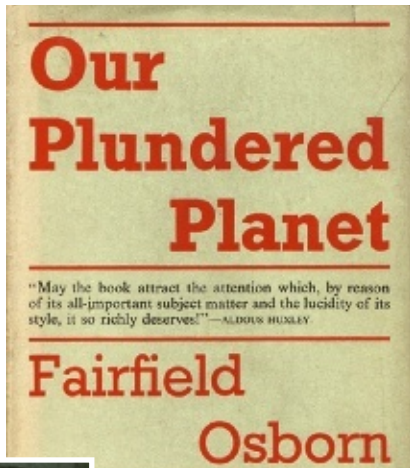
Unes analystes regrette aussi que Vogt et Osborn aient omis les développements récents et prometteurs de la génétique des végétaux et n'aient pas tenu compte

L'AUTEUR



Valérie CHANSIGAUD

historienne des sciences de l'environnement, étudie la découverte de la biodiversité et l'origine de sa protection.



4. HENRY FAIRFIELD OSBORN JR., directeur de la Société zoologique de New York (ci-contre), dédia son livre *Our Plundered Planet* (notre pla-

nète pillée) « à tous ceux qui s'intéressent à demain ». Là encore, la version française accentua le côté dramatique en traduisant cette dédicace par : « À tous ceux que l'avenir inquiète. »

✓ BIBLIOGRAPHIE

R. Carson, *L'été silencieux*, Wildproject, 2000.

H. F. Osborn Jr., *La planète au pillage*, 1955, 2000.

W. Vogt, *L'aim du monde*, Hachette, 1950.

Th. R. Weldon, *Preserving the Nation: The Conservation and Environmental Movements, 1870-2000*, Harlan Davidson Inc., 2007.

B. Kline, *First Along the River: A Brief History of the U.S. Environmental Movement*, Rowman & Littlefield, 2007.

du fait que les connaissances nouvelles, appliquées à l'échelle de la planète, devraient améliorer la production agricole et technique.

Les avis sont parfois diamétralement opposés. Au terme d'une critique féroce, l'économiste agricole Karl Brandt juge que « le best-seller de M. Vogt est l'œuvre d'un naturaliste qui a fait irruption dans les sciences sociales et qui est devenu fou furieux », alors que l'archéologue et historien sir John Linton Myres trouve l'ouvrage « bien informé, bien écrit, et solide dans ses arguments et recommandations » et souhaite « que ce livre sincère et franc [puisse] faire quelque chose pour sauver l'humanité ».

De nombreux spécialistes relèvent les erreurs commises par les auteurs. En France, le démographe Alfred Sauvy consacre un long article aux questions démographiques soulevées par Vogt sous un titre explicite : *Le « faux problème » de la population mondiale*. Sauvy souligne le compartimentage géographique des questions démographiques et l'extrication des problèmes posés.

Du progressisme à la décroissance

Plusieurs écologues de renom se penchent aussi sur ces deux ouvrages. Spécialiste de l'écologie végétale qui a étudié le phénomène du *dust bowl*, Sears exhorte ses collègues géologues à intervenir dans ce débat. Même son de cloche chez sir Frank Fraser Darling, pour qui il devient plus apparent que « l'agriculture doit être conduite avec une approche plus biologique que ce qui a été fait jusqu'à aujourd'hui. L'écologue doit descendre de son sommet olympique et mettre ses mains – et sa tête – dans la gadoue d'une ferme ». Elton remarque quant à lui que le livre de Vogt est tout à fait novateur, car il est le premier à aborder la question de l'augmentation de la population humaine au regard de l'écologie : il conclut avec l'espoir que l'ouvrage incitera les spécialistes de l'écologie animale à s'intéresser à ce sujet.

Vogt et Osborn sont des descendants du progressisme américain, courant réformiste apparu à la fin du XIX^e siècle. Issu des classes moyennes des villes, le progressisme lutte contre le gaspillage et la

corruption et considère qu'on peut toujours trouver la meilleure façon de résoudre un problème. C'est dans ce cadre qu'il faut replacer leur démarche. Ils ne cherchent pas à annoncer le fin du monde, mais à alerter sur l'altération de la qualité de vie des êtres humains qu'entraîneront la surpopulation et la destruction des ressources naturelles.

Ils insistent à plusieurs reprises les dimensions morales du progrès en ironisant sur le fait qu'un monde d'objets ne peut apporter seule le bonheur : « Rares sont les Américains qui ne sont pas convaincus que le *sum-mum bonum* est proportionnel au développement de l'appareillage », remarque Vogt. Il s'inquiète aussi de l'impact sur la santé mentale de l'élévation du niveau de vie aux États-Unis, qui possèdent « le taux de folie le plus élevé du monde entier ». De même, il stigmatise le gaspillage dont l'automobile est un parfait exemple. Cela n'est pas sans conséquence sur les choix politiques : « Quand se dresse la perspective de l'épuisement de nos ressources en essence, nous envoyons notre marine en Méditerranée... » Ici comme à de nombreuses reprises, les analyses des deux auteurs paraissent étonnamment modernes...

Si les livres de Vogt et de Osborn n'ont pas créé une pensée environnementale originale, ils ont fait prendre conscience à un très large public de la complexité et de la globalisation des problèmes qui se posent au monde au lendemain de la Seconde Guerre mondiale. La création en 1945 de l'Organisation des Nations unies, de l'Unesco et de la FAO (*Food and Agriculture Organization*) montre que ce changement d'échelle est perçu partout, que « la Terre devient toujours plus petite » et qu'il convient d'« envisager l'humanité entière comme une seule société à l'échelle mondiale », résume Osborn.

Ils ont un autre mérite : comme l'écrit en 1947 le sociologue Wilbert Ellis Moore, la question des ressources naturelles a d'abord été portée par des auteurs qui « ne s'intéressaient pas aux gens, mais aux oiseaux, aux abeilles, aux fleurs et à l'épaisseur de la terre arable ». C'est l'ampleur de ce débat mis en évidence par ces livres qui a incité d'autres spécialistes – démographes, géologues, sociologues, biochimistes, etc. – à y participer et à s'y intéresser.

Offre spéciale Noël

Pour la Science
12 numéros

1 an • 56 €

Et recevez en cadeau
le jeu de cartes astrofamily!



POUR LA
SCIENCE

Recevez chaque mois votre magazine en version papier et consultez sa version numérique
en format PDF sur www.pourlascience.fr

BULLETIN D'ABONNEMENT

À retourner accompagné de votre règlement à :
Service Abonnements • Pour la Science
8, rue Férou • 75278 Paris cedex 06

☐ Oui, je m'abonne à **Pour la Science** seul (12 n°s et leur version numérique)

1 an • **56 €** au lieu de ~~74,70 €~~ Participation aux frais de port : Europe (hors France métropolitaine) 12 € par an, autres pays 25 € par an.

☐ Oui, je m'abonne à **Pour la Science** version web (19 n°s)

1 an • **48 €**

☐ Oui, je m'abonne à **Pour la Science** (19 n°s et leur version numérique) + **les Dossiers** (4 n°s et leur version numérique)

1 an • **76 €** au lieu de ~~109,50 €~~ Participation aux frais de port : Europe (hors France métropolitaine) 16 € par an, autres pays 25 € par an.

☐ J'accepte de recevoir par e-mail des informations de Pour la Science

☐ J'accepte de recevoir des informations de nos partenaires commerciaux de Pour la Science

Mes coordonnées à remplir

Nom, prénom : _____

Adresse : _____

Code postal : _____

Pays : _____ Tél.* : _____

E-mail** : _____

Je règle par

☐ Chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ Carte bancaire

Nom de la carte : _____

Date d'expiration : _____

Code de sécurité*** : _____

Signature obligatoire



En application de l'article 27 de la loi du 6 janvier 1978, les informations ci-contre sont indispensables au traitement de votre commande. Elles peuvent donner lieu à l'exercice du droit d'accès et de rectification auprès de Pour la Science. Par notre intermédiaire, vous pouvez être amené à recevoir des propositions d'autres organismes. En cas de refus de votre part, il vous suffit de nous prévenir par simple courrier.

* prix en kiosque ** facultatif *** Merci d'inscrire les 3 chiffres figurant au dos de votre carte

LOGIQUE & CALCUL



Le plus célèbre des puzzles suggère de nouvelles variantes du jeu et d'intéressants problèmes de géométrie, que parfois seule la patience d'un ordinateur peut affronter.

Jean-Paul DELAHAYE

Le *Tangram* est sans doute le plus populaire des jeux géométriques. Tout le monde le connaît et y a joué au moins une fois. Sam Loyd, le célèbre amateur et inventeur de récréations mathématiques, en fait une présentation détaillée en 1903 dans un ouvrage intitulé *Le huitième livre de Tan* (« The Eighth Book of Tan ») où il propose plusieurs centaines de figures à réaliser avec les sept pièces du jeu... dont certaines sont impossibles à obtenir. Se prétendant bien informé, il donne des détails sur l'histoire du jeu :

« D'après le professeur Challenor, dont les manuscrits posthumes sont en ma possession, il existe en Chine sept livres de *Tangram* contenant chacun un millier de figures. Leur origine remonterait à il y a environ 4 000 ans. Ces livres sont si rares que le professeur Challenor, pendant les 40 ans qu'il a résidé en Chine, n'a réussi à voir des exemplaires complets que du premier et du septième, ainsi que quelques fragments du deuxième. Une portion de l'un des ouvrages, imprimés sur des feuilles d'or, a été retrouvée à Pékin par un soldat anglais qui l'acheta pour 300 livres à un collectionneur d'antiquités, et j'ai été aimablement autorisé à en reproduire certains motifs. »

Ces éléments d'histoire furent répétés avant que Martin Gardner fasse en 1974 une mise au point détaillée, où il explique que tout n'est qu'une affabulation malicieuse de Loyd. Le premier livre de motifs du jeu se trouve dans un livre de 1803

publié effectivement en Chine, dont le titre signifie « Collection de formes pour le jeu à sept pièces ».

Un jeu pas si ancien

Le nom *Tangram* n'apparaît qu'en 1848 dans un ouvrage de Thomas Hill, *Problèmes géométriques pour les jeunes* (*Geometrical Puzzle for the Youth*). Lewis Carroll et Edgar Poe en parlaient le jeu et l'on raconte que Napoléon en avait un *Tangram* à Sainte-Hélène. Le jeu est universel : on l'utilise dans les écoles et pour le plaisir. Des dizaines de fabricants en proposent toutes sortes de réalisations matérielles en bois ou en plastique. Vous avez probablement un *Tangram* chez vous.

Le terme serait construit à partir du mot *tan*, qui aurait signifié prostituée dans certaines régions en Chine, et désignerait *Le jeu des prostituées*. Une autre hypothèse évoque l'ancien mot anglais *Trangram* avec deux *r*, signifiant jouet compliqué, qui aurait été repris et déformé. Dans le dictionnaire *Webster* de 1913, on trouve par exemple la définition : « Trangram : something intricate, unrivied. »

Le jeu est utile pour la familiarisation des jeunes enfants avec les formes de base de la géométrie. Mais il est peu mathématique si l'on ne se donne comme but que la reproduction des silhouettes imprimées sur les fascicules accompagnant les boîtes de jeu. Il suscite aussi une multitude de questions de nature vraiment mathématique dont certaines sont difficiles, voire non résolues.

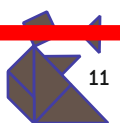
Commençons par les plus simples en nous limitant au jeu du *Tangram* classique avec ses sept pièces bien déterminées : deux petits triangles isocèles rectangles *t*, un carré *c*, un parallélogramme *p* et un autre triangle isocèle rectangle *t'*, chacune des trois pièces *c*, *p* et *t'* ayant été obtenue en accolant deux *t*, et enfin deux grands triangles isocèles rectangles *t''*, obtenus cette fois avec quatre *t* chacun. En tout, on a les sept pièces, parfois dénommées *tan*.

Si l'unité de longueur est le petit côté de *t*, alors son hypoténuse a pour longueur $\sqrt{2}$, le côté du carré *c* est 1, les côtés du parallélogramme *p* valent 1 et $\sqrt{2}$, ceux du triangle *t'* valent $\sqrt{2}$ et 2, et ceux de *t''* valent 2 et $2\sqrt{2}$.

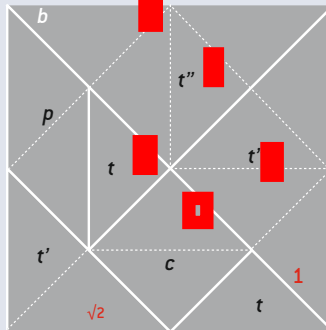
Trois catégories de motifs

Il est utile de classer les motifs donnés à faire aux joueurs en trois catégories. Il y a les motifs généraux auxquels on ne demande que d'être d'un seul tenant, d'utiliser chaque pièce une fois exactement et bien sûr d'être sans recouvrement. Tous les motifs de la figure 1e, sauf le motif 11 dont une pièce est détachée des autres, sont des motifs généraux.

Les motifs propres seront les motifs généraux auxquels on impose en plus d'avoir un périmètre topologiquement équivalent à un cercle. Cela revient à exiger que l'intérieur du motif soit d'un seul tenant et qu'il n'y ait pas de trou dans le motif.



11



Le *Tangram* (a) est composé de sept pièces : le petit isocèle rectangle t , le carré c , le parallélogramme p , le triangle isocèle rectangle t' , le triangle rectangle t'' , pièces qui sont toutes obtenues à partir d'un carré de côté 1. (b) La plus petite (en double exemplaire), le triangle rectangle t de côté 1 et $\sqrt{2}$.



Les motifs 1, 2, 33, 35, 36 sont des motifs propres (voir l'illustration ci-dessous). Le motif 10 n'est pas un motif propre, car il possède un trou, de même que le motif 40 qui en a deux. Les motifs 6, 7 et 8 ne sont pas des motifs propres pour une autre raison : deux pièces ne se touchent que par un point et non selon un segment.

La troisième catégorie de figures à réaliser est celle des *snug-motifs* : en anglais *snug* signifie « petit et bien arrangé ». Ils sont plus contraints et utilisent l'idée que chaque pièce est composée à partir d'un même petit triangle isocèle rectangle pris une, deux ou quatre fois. D'après la définition proposée par Ronald Read, les *snug-motifs* sont des motifs propres tels qu'en décomposant chaque pièce en triangles isocèles rectangles t , deux pièces ayant un segment en commun ont au moins un côté en commun pour deux de leurs triangles de base t (ce côté commun peut être le petit côté du triangle rectangle de base, ou son hypoténuse). On peut noter

donc pas si facile et qu'il publiât. Essayez de la trouver ou faites un programme pour cela (voir la solution en figure 3).

Dénombrements manquants

Les dénombrements des trois grandes catégories de motifs du *Tangram* sont très faciles ou très difficiles. Il est bien évident que les motifs généraux et les motifs propres sont en nombre infini. Le fait de pouvoir faire pivoter certains groupes de pièces, ou d'en faire glisser continûment, rend cette infinité non dénombrable (c'est-à-dire de la même sorte que l'infinité des nombres réels, et non pas de la sorte de celle des entiers). Les *snug-motifs* sont en nombre fini : à chaque fois qu'on ajoute une nouvelle pièce dans une construction, elle ne peut se placer qu'à un nombre fini d'endroits.

Cette idée de construction progressive permet de majorer le nombre de *snug-motifs*. Voici les étapes :

motif, et certaines suites ne donnent pas un motif véritable à cause du recouvrement des pièces ou de l'utilisation (dans le choix des 12 numéros) d'un côté qui n'est plus libre. Le nombre qu'on vient de calculer est donc une majoration très large.

La question du dénombrement exact des *snug-motifs* est si difficile qu'elle est restée irrésolue jusqu'en 2004, année où R. Read a établi, à l'aide d'un programme, qu'il y en a en tout 4 842 205. Ce dénombrement n'est resté peu diffusé. On ne le trouve pas mentionné dans *Wikipédia* (ni en français ni en anglais) et à ma connaissance, aucun site Internet ou livre ne le signale. Je ne pense pas non plus qu'il ait été vérifié.

Un dernier dénombrement difficile mériterait d'être étudié soigneusement. Pour éviter les malentendus, on peut considérer les motifs propres possédant la propriété que si deux des pièces ont un segment

en commun, alors ils ont aussi une extrémité en commun.

Ces motifs *bien positionnés* (en anglais on les nomme *fully matched*) sont plus



que cette règle impose des contraintes d'orientation fortes à chaque pièce : si le carré est placé horizontalement, alors tous les côtés de longueur 1 ou 2 seront horizontaux ou verticaux, et tous les autres côtés (de longueur $\sqrt{2}$ ou $2\sqrt{2}$) seront sur des droites diagonales (à 45 ou à 135 degrés). Les motifs 1, 2 et 5 sont des *snug-motifs*. En revanche, les motifs 35 et 36 ne sont pas des *snug-motifs*.

Quelques questions mathématiques sur ces formes sont présentées et résolues sur la figure 2.

Dans ses articles consacrés au *Tangram*, Martin Gardner posa la question du nombre de motifs propres pentagonaux. Il proposait une solution et un raisonnement pour la justifier. Malheureusement, son raisonnement comportait une petite erreur, ce qui provoqua l'arrivée dans son courrier d'une énorme quantité de lettres de lecteurs outragés. L'analyse de cette question est intéressante et conduit à la bonne réponse, qui n'est

— À chaque étape du montage d'un motif, on accole 2 (ou plus) des 30 côtés des pièces. Côté signifie ici côté d'un des triangles élémentaires t qui composent les pièces : ces côtés sont 30 en tout pour les sept pièces du *Tangram*. On suppose qu'on attribue un numéro de 1 à 30 à chacun de ces côtés.

— Il y a six étapes de montage pour un motif car une fois la première pièce posée, six fois de suite, on accole une des pièces restantes.

— La donnée de 12 nombres entre 1 et 30 détermine donc une construction possible au plus : les deux premiers nombres adjoignent les deux côtés qu'on accole en premier, les deux nombres suivants indiquent les deux côtés qu'on accole en second, etc.

On conclut qu'il existe au plus $30^{12} = 5,3 \times 10^{17}$ *snug-motifs*.

Bien sûr, plusieurs suites de 12 numéros différents peuvent aboutir au même

nombreux que les *snug-motifs*. Bien sûr, tout *snug-motif* est un motif bien positionné, mais l'inverse n'est pas vrai ; par exemple, le motif 3 (voir la figure 1e) n'est pas un *snug-motif* (car certaines pièces ont un segment commun sans que les côtés des t de base s'y joignent bien), mais est un motif bien positionné au sens indiqué plus haut.

On voit facilement que dès qu'une pièce d'un motif bien positionné est en place, les sommets des autres pièces ne peuvent plus occuper qu'un nombre fini de points du plan. Il en résulte que les motifs bien positionnés sont en nombre fini. *Wikipédia* indique qu'il en existerait 6,13 millions, mais ce nombre apparaît trop faible pour être compatible avec le nombre de *snug-motifs* calculé par R. Read, et aucun nombre plus précis n'est cité. Je n'ai pas réussi à savoir si ce résultat est une évaluation approximative ou le fruit d'un calcul exact reproduit incomplètement.

En considérant la possibilité de trous dans les motifs, ce qui permet certains

2. Enigmes à propos du *Tangram*

A. Quel est le nombre maximal de côtés d'un motif général ?

Tout dépend de ce qu'on va considérer comme un côté du motif.

Soit on considère qu'en posant le sommet d'une pièce sur le côté d'une autre pièce, le côté sur lequel on a posé la pièce continue de compter pour 1. Dans ce cas, la réponse est 23, comme on le verra plus tard. Soit on considère que le côté qui reçoit le sommet compte maintenant pour 2, en suivant la frontière du motif. On passera d'abord sur une partie du côté coupé, puis plus tard sur l'autre. Dans ce cas, la réponse est 29 ($23 + 6$), car six fois de suite, on crée un « côté ».



On constate (grâce au motif qu'on a effacé) que le nombre de 23 côtés qu'on a au départ avec les sept pièces du *Tangram*, n'y a en tout 30 « côtés », « côté » voulant dire ici « côté d'un

chien, et donc 18 est possible avec cette dernière forme. On ne peut pas faire mieux.

La réponse est 18. Voici le raisonnement assez subtil, dû à Ronald Read, qui le démontre.

Si on prend les sept pièces du *Tangram*, n'y a en tout 30 « côtés », « côté » voulant dire ici « côté d'un

chien, et donc 18 est possible avec cette dernière forme. On ne peut pas faire mieux.

La réponse est 18. Voici le raisonnement assez subtil, dû à Ronald Read, qui le démontre.

Si on prend les sept pièces du *Tangram*, n'y a en tout 30 « côtés », « côté » voulant dire ici « côté d'un

chien, et donc 18 est possible avec cette dernière forme. On ne peut pas faire mieux.

La réponse est 18. Voici le raisonnement assez subtil, dû à Ronald Read, qui le démontre.

Si on prend les sept pièces du *Tangram*, n'y a en tout 30 « côtés », « côté » voulant dire ici « côté d'un

chien, et donc 18 est possible avec cette dernière forme. On ne peut pas faire mieux.

La réponse est 18. Voici le raisonnement assez subtil, dû à Ronald Read, qui le démontre.

Si on prend les sept pièces du *Tangram*, n'y a en tout 30 « côtés », « côté » voulant dire ici « côté d'un

chien, et donc 18 est possible avec cette dernière forme. On ne peut pas faire mieux.

La réponse est 18. Voici le raisonnement assez subtil, dû à Ronald Read, qui le démontre.

Si on prend les sept pièces du *Tangram*, n'y a en tout 30 « côtés », « côté » voulant dire ici « côté d'un

chien, et donc 18 est possible avec cette dernière forme. On ne peut pas faire mieux.

La réponse est 18. Voici le raisonnement assez subtil, dû à Ronald Read, qui le démontre.

Si on prend les sept pièces du *Tangram*, n'y a en tout 30 « côtés », « côté » voulant dire ici « côté d'un

chien, et donc 18 est possible avec cette dernière forme. On ne peut pas faire mieux.

La réponse est 18. Voici le raisonnement assez subtil, dû à Ronald Read, qui le démontre.

Si on prend les sept pièces du *Tangram*, n'y a en tout 30 « côtés », « côté » voulant dire ici « côté d'un

chien, et donc 18 est possible avec cette dernière forme. On ne peut pas faire mieux.

La réponse est 18. Voici le raisonnement assez subtil, dû à Ronald Read, qui le démontre.

petit triangle isocèle rectangle t ». Les grands triangles isocèles rectangles t'' ont par exemple chacun un périmètre composé de six « côtés » en ce sens particulier. Quand on construit un snug-motif, chaque fois qu'on ajoute une pièce, on crée nécessairement deux de ces « côtés » au moins qui ne pourront donc plus être « côtés » du motif final. Pendant le montage du motif, on ne peut donc pas faire disparaître moins de 12 « côtés » (six fois de suite, on crée un « côté »).

Qu'on puisse obtenir est donc un motif à 18 « côtés » dans le sens particulier du motif qu'on a adopté ici.

Il est possible, comme le motif 3 du chien, de trouver un motif à 18 « côtés » dans le sens particulier de la démonstration sont chacun à 18 « côtés » dans le

Si on prend les sept pièces du *Tangram*, n'y a en tout 30 « côtés », « côté » voulant dire ici « côté d'un

chien, et donc 18 est possible avec cette dernière forme. On ne peut pas faire mieux.

La réponse est 18. Voici le raisonnement assez subtil, dû à Ronald Read, qui le démontre.

Si on prend les sept pièces du *Tangram*, n'y a en tout 30 « côtés », « côté » voulant dire ici « côté d'un

chien, et donc 18 est possible avec cette dernière forme. On ne peut pas faire mieux.

La réponse est 18. Voici le raisonnement assez subtil, dû à Ronald Read, qui le démontre.

Si on prend les sept pièces du *Tangram*, n'y a en tout 30 « côtés », « côté » voulant dire ici « côté d'un

chien, et donc 18 est possible avec cette dernière forme. On ne peut pas faire mieux.

La réponse est 18. Voici le raisonnement assez subtil, dû à Ronald Read, qui le démontre.

Si on prend les sept pièces du *Tangram*, n'y a en tout 30 « côtés », « côté » voulant dire ici « côté d'un

chien, et donc 18 est possible avec cette dernière forme. On ne peut pas faire mieux.

La réponse est 18. Voici le raisonnement assez subtil, dû à Ronald Read, qui le démontre.

Si on prend les sept pièces du *Tangram*, n'y a en tout 30 « côtés », « côté » voulant dire ici « côté d'un

chien, et donc 18 est possible avec cette dernière forme. On ne peut pas faire mieux.

La réponse est 18. Voici le raisonnement assez subtil, dû à Ronald Read, qui le démontre.

Si on prend les sept pièces du *Tangram*, n'y a en tout 30 « côtés », « côté » voulant dire ici « côté d'un

chien, et donc 18 est possible avec cette dernière forme. On ne peut pas faire mieux.

La réponse est 18. Voici le raisonnement assez subtil, dû à Ronald Read, qui le démontre.

Si on prend les sept pièces du *Tangram*, n'y a en tout 30 « côtés », « côté » voulant dire ici « côté d'un

chien, et donc 18 est possible avec cette dernière forme. On ne peut pas faire mieux.

La réponse est 18. Voici le raisonnement assez subtil, dû à Ronald Read, qui le démontre.

Si on prend les sept pièces du *Tangram*, n'y a en tout 30 « côtés », « côté » voulant dire ici « côté d'un

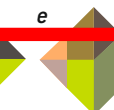
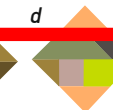
chien, et donc 18 est possible avec cette dernière forme. On ne peut pas faire mieux.

dessins intéressants, et pourquoi pas, de ne pas utiliser toutes les pièces, ou même de tolérer le recouvrement des pièces, il apparaît qu'une série de dénombrements concernant ce jeu pourtant universellement connu reste aujourd'hui non traitée. Quel lecteur de *Pour la Science* s'y attaquera ?

Les figures convexes

Philippe Moutou, dans une étude récente, s'est demandé s'il existait des jeux de pièces du même type que celles utilisées pour le *Tangram*, mais constituant de meilleurs jeux en un sens précis.

Dans un article publié en 1942, le Traing Wang démontre que parmi tous les motifs qu'on peut composer avec les pièces d'un *Tangram*, il y en a 13 exactement qui sont convexes (une figure est convexe si à chaque fois qu'on prend deux points A et B dans la figure, le segment AB est entièrement contenu dans la figure : un disque est convexe, un croissant ne l'est pas).



Les jeux de pièces que nous allons mettre en compétition avec le *Tangram* vont être tous ceux qui utilisent quelques pièces, chacune composée d'un ou plusieurs triangles isocèles rectangles t proprement accolés par leurs côtés (on nomme parfois ces figures *polyabolas*) et qui, au total, en comptent 16 (comme les sept pièces du

Tangram, composées en tout de 16 triangles t). On souhaite en effet que le carré soit faisable avec les pièces retenues, ce qui permettra de ranger facilement le jeu dans une boîte carrée, comme cela est possible pour le *Tangram*.

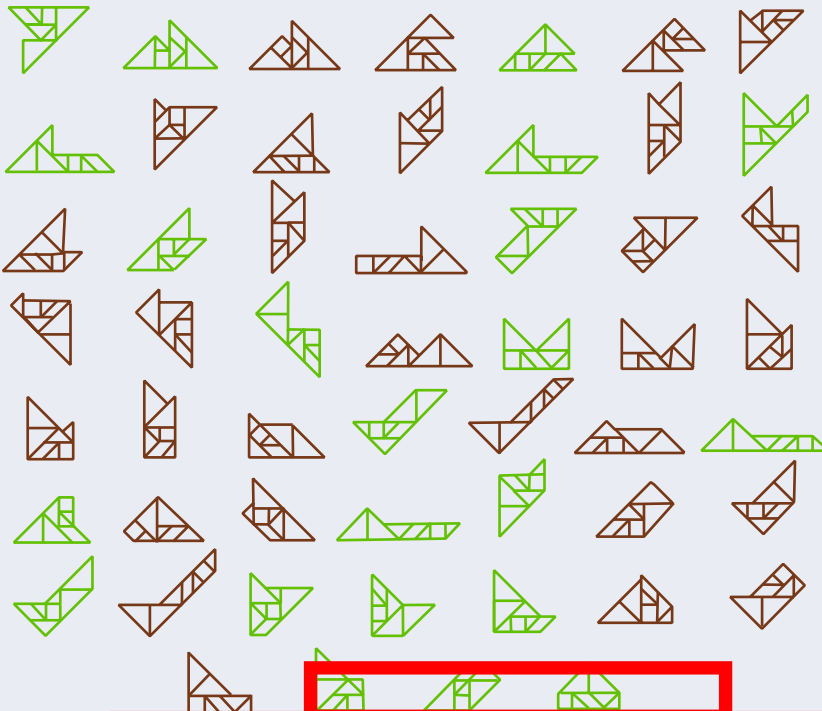
Dès 1942, Wang avait remarqué qu'avec 16 triangles isocèles rectangles, on construit non pas 13 formes convexes, mais 20. Le *Tangram* en oublie donc sept. Les sept pièces publiées sont remarquables : elles sont toutes convexes et ne laissent pas assez d'épaisseur pour les grands triangles isocèles rectangles t'' du *Tangram* (voir la figure 4).

Les jeux proposés par divers inventeurs et fabricants de jouets pour concurrencer le *Tangram* sont le *Regulus* (5 pièces, schéma a ci-contre), le *Puthagoras* (2 pièces, b), le *Revath* (7 pièces, c), le *Chie-no-ita* (7 pièces, d), le *Cocogram* (6 pièces, e) et le *Heptex* (7 pièces, f).

Chacun conçoit un certain nombre des 20 figures convexes possibles avec 20 triangles isocèles rectangles t . Le nombre de motifs convexes faisables

3. Les motifs pentagonaux de Martin Gardner

Parmi les 53 pentagones qu'on peut faire avec les sept pièces du *Tangram*, seuls 22 sont des snug-motifs (snug = étroit, serré). On peut vérifier que le *Tangram* engendrait effectivement 22 snug-motifs pentagonaux. Il a réussi à savoir de plus qu'il y a 200 snug-motifs hexagonaux, 1 245 snug-motifs heptagonaux, 6 392 snug-motifs octogonaux et 27 133 snug-motifs ennéagonaux.



4. LES MOTIFS CONVEXES

Les 13 figures convexes faisables avec les pièces du *Tangram* et les sept figures convexes supplémentaires obtenues avec 16 triangles isocèles rectangles.



donner les résultats suivants par ordre de succès : *Regulus* 7, *Pythagoras* 12, *Tangram* 13, *Revathi* 15, *Chie-no-ita* 16, *Cocogram* 16, *Heptex* 19.

Le *Tangram*, loin d'être le meilleur, se retrouve au milieu du classement, largement distancé par *Heptex* qui, bien que composé de sept pièces lui aussi, atteint presque le maximum avec 19 sur 20.

Le *Tangram* possède deux pièces en double. Nous dirons qu'il a deux pièces doublées. Si dans un jeu une pièce est présente trois fois, nous dirons de même qu'il y a deux pièces doublées. Avec cette terminologie, le nombre total de pièces d'un jeu est le nombre de pièces distinctes, additionné du nombre de pièces doublées.

Ph. Moutou a exploré ce paramètre pour savoir s'il était bon ou pas d'avoir beaucoup de pièces doublées. Si l'on prend sept pièces, composées au total de 16 triangles isocèles rectangles, alors le nombre de pièces doublées varie de 0 à 5 (car il y a 5 pièces doublées, c'est qu'une pièce unique est utilisée 7 fois, or 16 n'est pas divisible par 7, c'est impossible).

Voici le résultat : sans pièce doublée, on obtient au plus 15 formes convexes (avec le *Revathi*) ; avec une pièce doublée, on obtient au plus 16 formes convexes ; avec deux pièces doublées, on obtient au plus 19 formes convexes (*Heptex*) ; avec trois pièces doublées, on obtient au plus 19 formes convexes ; avec quatre pièces doublées, on obtient au plus 18 formes convexes ; avec cinq pièces doublées, on obtient au plus 15 formes convexes.

La conclusion est que pour avoir un jeu à sept pièces qui engendre beaucoup de formes convexes, il ne faut pas trop de pièces doublées, ni trop peu.

Un critère multiple de comparaison

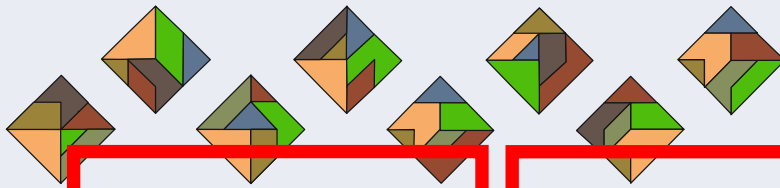
La comparaison de la qualité des jeux de pièces menée en ne prenant en compte que le nombre de formes convexes qu'ils reconstituent est un peu trop sommaire.

Ph. Moutou a donc concocté un indicateur plus compliqué, mais plus subtil, qu'il a nommé le score $S = 2N + 7 - D + F + C$,

5. Les huit TAO de Philippe Moutou

En utilisant les 16 triangles isocèles rectangles du jeu *Tangram*, Ph. Moutou a identifié huit puzzles de type *Tangram* meilleurs que ceux envisagés jusqu'à maintenant. Il les a appelés TAO (pour *Tangrams Assistés par Ordinateur*). Les 7 triangles du jeu.

L'indicateur qu'il utilise prend en compte le nombre de pièces (qui ne doit pas être trop grand), la variété des formes des pièces du jeu (qui doit être grande) et le nombre de formes convexes que les pièces engendrent.



où L est le nombre de longueurs différentes des côtés des pièces du jeu (plus L est grand, plus varié est le jeu, mieux c'est) ; A est le nombre d'angles différents dans les pièces du jeu (comme pour L , plus A est grand, mieux c'est) ; P est le nombre de pièces du jeu (pour que le jeu soit élégant et intéressant, il ne faut pas que P soit grand, d'où la présence d'un signe moins devant le P) ; D est le nombre de pièces en double (il est bon de les éviter, d'où le signe moins) ; F est le nombre de formes convexes qu'on peut reconstituer avec le jeu (nous souhaitons comme précédemment que F soit grand) ; C indique si on peut faire le carré : $C = 1$ si oui, $C = 0$ si non.

Bien sûr, ce coefficient aurait pu être conçu autrement, par exemple en accordant plus de poids à l'un des termes, disons F , et en le remplaçant par $2F$ dans la formule qui définit Z : $Z' = L + A - P - D + 2F + C$.

Aussi imparfait et discutable qu'il soit, le coefficient Z de Ph. Moutou est un bon moyen de comparaison et peut-être de découverte de nouveaux jeux intéressants. Ph. Moutou a calculé Z pour les jeux possibles ayant 16 triangles isocèles rectangles au total. Les résultats font ressortir les puzzles classiques déjà mentionnés qui se trouvent tous assez bien classés. Les valeurs de Z sont 12 pour *Tangram*, 10 pour *Pythagore*, 16 pour *Chien-pa-ta*, 17 pour *Heptex* et 17 pour *Revathi*. Plus intéressants encore, les résultats de l'évaluation de Z ont fait apparaître huit puzzles pas

sés inconnus jusqu'à présent et qui sont les gagnants avec un score Z de 19. Ph. Moutou a choisi de nommer TAO (pour *Tangram Assisté par Ordinateur*) ces puzzles (voir la figure 5).

Aller plus loin

En considérant un total de triangles de base plus grande on peut obtenir des valeurs de Z de plus en plus grandes. Il semble que Z puisse croître jusqu'à l'infini et c'est la conjecture au moment de Ph. Moutou. D'intéressants jeux, plus complexes que le *Tangram*, ont ainsi été découverts ; je vous invite à aller les voir sur son site Internet.

D'autres travaux se poursuivent pour perfectionner Z et prendre en compte la capacité d'un jeu de pièces à engendrer des figures symétriques, ou d'autres aspects d'un jeu de pièces.

Ces recherches, intéressantes, butent sur la difficulté de calculer le nombre de snug-motifs engendrés par un jeu, ou le nombre de motifs bien positionnés, nombres importants pour évaluer si un jeu est intéressant ou non. Les comparaisons des jeux de pièces différents basés sur le calcul de ces nombres difficiles à obtenir pourraient confirmer les résultats déjà obtenus en se fondant sur les motifs convexes, ou alors faire découvrir le *Tangram* ultime qui, pour 4 000 ans encore, occupera les esprits des écoliers et des amateurs de divertissements géométriques.

BIBLIOGRAPHIE

- Ph. Moutou, *Puzzles de la famille Tangram*, 2010 : <http://ph.moutou.free.fr/Mathadomicile/Puzzles/puzzles.html>
- R. C. Read, *The snug tangram number and some other contributions to the theory of mathematical trivia*, *Bull. Inst. Comb. Appl.* vol. 40, pp. 31-39, 2004.
- J. Slovic, *The Tao of Tangram*, Barnes & Noble, 2001.
- J. Botermans et al., *The World of Games: Their Origins and History, How to Play Them, and How to Make Them*, Facts on File, 1989.
- M. Gardner, *Mathematical Games*, *Scientific American*, pp. 187-191, septembre 1974.
- M. Gardner, *More on Tangrams*, *Scientific American*, pp. 187-191, septembre 1974.
- S. Loyd, *Sally's Book of Tangram Puzzles. The 8th Book of Tan*, 1901. Nouvelle édition, Dover Publications, 1968.
- F. T. Wang, *A Theorem on the Tangram*, *The American Mathematical Monthly*, vol. 49(9), pp. 596-599, 1942.

L'AUTEUR



Jean-Paul DELAHAYE est professeur à l'Université de Lille et chercheur au Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille (LIFL).

ART & SCIENCE

Les harenguiers de Delft

Dans sa Vue de Delft, Vermeer témoigne du refroidissement du climat européen au XVII^e siècle. L'une des conséquences du phénomène fut la migration des bancs de harengs vers la mer Baltique et les côtes hollandaises.

Loïc MAILLON

Le peintre hollandais Johannes Vermeer (1632-1675), 35 toiles nous sont parvenues (une 36^e, volée à Boston en 1990, n'a pas été retrouvée). La plupart représentent des intérieurs, mais deux sont des vues extérieures. Parmi elles, la *Vue de Delft* (voir page ci-contre), conservée au musée Mauritshuis, à La Haye, est sa seule représentation d'un grand espace. Qu'y voit-on ?

Pour peindre, l'artiste s'est installé à l'extérieur de la ville hollandaise de Delft (entre Rotterdam et La Haye), là où il vivait, au Sud, près du port fluvial. De l'autre côté du plan d'eau, on distingue deux portes (celle de Schiedam et celle de Rotterdam, aujourd'hui disparues), édifiées de part et d'autre de l'embouchure de l'Oude Kola, un canal qui rejoint la rivière Kola. L'absence de cloches dans le clocher de la Nouvelle Église, éclairée par le soleil, indique que le tableau a été peint avant leur installation en mai 1660.

Dans le port, plusieurs embarcations sont stationnées. Les bateaux quittaient Delft et y arrivaient *via* le canal de la Schie qui coule en direction du Sud vers Schiedam et Rotterdam, où les navires rejoignaient le Rhin. Au premier plan à gauche, une barge à passagers attend d'être balé par des chevaux vers des villes du Sud de la Hollande. D'autres bateaux se trouvent au pied des murs de la cité.

Plus étonnantes sont les deux barges à large fond amarrées côte à côte à droite du tableau, là où se trouvait le chantier naval de Delft. Les mâts arrière sont absents tandis que ceux de l'avant sont partiellement démontés, trahissant une période de ré-

paration des bâtiments. Pourquoi ces embarcations sont-elles inattendues ? Parce qu'il s'agit de harenguiers, des trois mâts destinés à la pêche en mer du Nord ! Ces bateaux sont une illustration du Petit Âge glaciaire, une période de refroidissement du climat qui a frappé l'Europe et le monde au moins depuis le milieu du XVI^e siècle jusqu'à la fin du XIX^e. Les dates ne font pas consensus.

Ces années, qui succéderent à l'optimum climatique médiéval, un réchauffe-

Grâce aux revenus de la pêche aux harengs, la Hollande put se consacrer au commerce maritime.

ment), correspondent à de longues séries d'hivers froids. D'ailleurs, le Petit Âge glaciaire est visible dans de nombreuses toiles d'artistes du Nord de l'Europe, tel Pieter Bruegel l'ancien, qui peignit son premier naufrage hivernal en 1565 : on y voit des chasseurs dans la neige et des individus évoluant sur la glace. Ce type de représentation était rare avant 1550.

Signe de ces temps glacés, Vermeer lui-même succomba aux plaisirs de la glisse en achetant, très cher, un char à voile à patins en 1660. Toutefois, le gel épargna les canaux hollandais les deux hivers suivants !

Plusieurs hypothèses ont été proposées pour expliquer ce refroidissement et sa durée. La première, fondée sur des travaux en stratigraphie, l'associe, notamment au début du XIX^e siècle, à l'éruption violente de plusieurs volcans, dont le Tambora, sur l'île de Sumatra, en Indonésie. Les cendres et les poussières auraient alors diminué le rayonnement solaire traversant l'atmosphère. Une autre hypothèse relie le Petit Âge glaciaire à l'activité solaire, celle-ci ayant été notablement ralentie durant une grande partie de cette période. Enfin, certains incriminent une anomalie du *Gulf Stream*, le courant qui traverse l'Atlantique et apporte de la chaleur vers l'Europe.

Quel est le rapport entre le Petit Âge glaciaire et les harengs ? Le refroidissement a entraîné une extension des glaces arctiques vers le Sud, se traduisant par de longues périodes de gel le long des côtes de la Norvège, pays qui dominait alors la pêche au hareng. En conséquence, les bancs de poissons ont migré vers la mer Baltique et se sont rapprochés des côtes de la Hollande. Les pêcheurs se sont adaptés à cette nouvelle activité, ce qui explique la présence des harenguiers dans le port de Delft au milieu du XVII^e siècle.

Selon un spécialiste de l'histoire du climat, la prospérité des Pays-Bas doit beaucoup à ce transfert halieutique. Grâce aux considérables revenus de la pêche au hareng, la Hollande put se consacrer à d'autres entreprises, notamment en investissant dans la navigation et dans le commerce maritime. On en voit d'ailleurs un témoignage sur la *Vue de Delft*.

Regards

En effet, le long toit qui court de la gauche du tableau jusqu'au clocher de la Vieille Église (dans l'ombre) est celui d'un vaste entrepôt, celui de l'Oost-Indisch Huis, c'est-à-dire la Maison des Indes orientales. Il s'agit du siège de la chambre de Delft de la Compagnie hollandaise des Indes orientales (*Verenigde Oostindische Compagnie*).

Cette compagnie fédérait six chambres régionales, comme celle de Delft, et employait des dizaines de milliers de Hollandais, dont trois cousins de Vermeer.

Cette première grande société par actions, créée en 1602, obligea les entreprises commerciales à fusionner en une unique organisation afin de profiter de l'essor du commerce avec l'Asie. L'idée était bonne, car en quelques années, la Compagnie régna sur le commerce et les échanges mondiaux, notamment avec les pays d'Asie et particulièrement la Chine.

Ces relations florissantes n'eurent pas à souffrir des dommages dus au Petit Âge glaciaire. Au contraire, dans l'Empire du Mi-

lieu, entre 1654 et 1676, des plantations chinoises de mandariniers et d'orangers séculaires succombèrent au gel.

Parmi les importations, la porcelaine chinoise, en particulier celle à motifs bleus sur fond blanc, eut beaucoup de succès. Cet engouement marqua le début d'une production locale : la réputée porcelaine de Delft.

T. Brook, *Le chapeau de Vermeer. Le XVII^e siècle à l'aube de la mondialisation*, Payot, 2010.



IDÉES DE PHYSIQUE

Le verre : attention, fragile !

Pour rendre le verre moins fragile ou le découper sans qu'il éclate, mieux vaut comprendre pourquoi et comment il se brise.

Jean-Michel COURTY et Edouard KIERLIK

S'il le saladier en acier que des mains maladroites ont fait tomber s'en tire par quelques bosses, le plat en verre ou en porcelaine se brisera en mille morceaux. Quelle injustice ! Pourquoi est-elle due ?

Le verre est un matériau dit fragile. Soumis à une contrainte mécanique, par exemple une compression ou une flexion, il se déforme d'abord élastiquement, c'est-à-dire qu'il retrouve sa forme initiale lorsque la contrainte cesse d'être appliquée. Ces déformations sont très faibles car le verre est très rigide.

Mais il se brise sans prévenir lorsque la contrainte augmente : combien de miroirs brisés pour avoir serré trop fortement les mâchoires de maintien !

Fragile ou ductile

Au contraire, les matériaux dits ductiles, tels les métaux, peuvent subir une importante déformation permanente, la déformation plastique, avant de se casser. Pourquoi ? La cohésion d'un métal est due à la mise en commun d'électrons entre les atomes ; ces électrons forment une « mer » où baignent les ions métalliques. Et cette mer d'électrons suit avec facilité le mouvement des ions, lesquels peuvent donc se réarranger.

En revanche, les verres usuels sont composés d'oxydes amorphes, telle la silice (SiO_2). La cohésion est assurée par des liaisons fortes, entre les atomes de silicium et

d'oxygène, qui forment un réseau de tétraèdres : il en résulte une structure très rigide où les atomes ne peuvent se déplacer les uns par rapport aux autres.

Sous l'effet d'une tension mécanique, la seule liberté du matériau réside dans l'allongement des liaisons, comme avec des ressorts, ce qui constitue une déformation élastique. Ces liaisons se rompent lorsque la distance entre les atomes concernés devient trop grande. Des calculs de mécanique quantique suggèrent qu'une liaison se

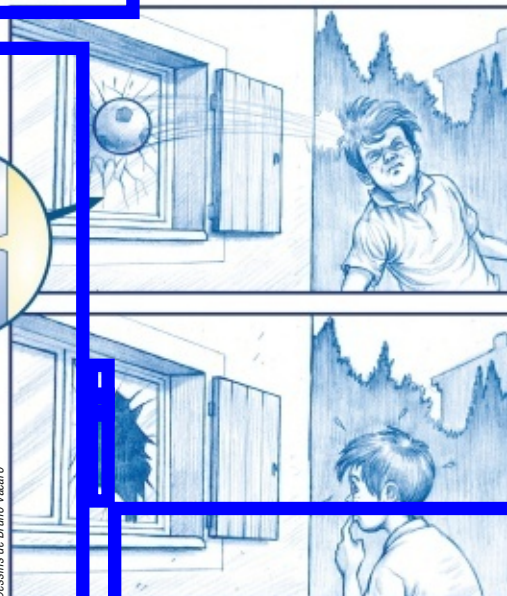
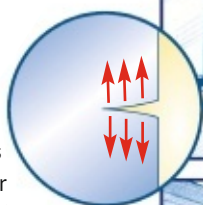
défile lorsque son allongement atteint 20 pour cent. Ce fait pratique, un matériau homogène se brise bien avant de s'allonger autant.

Pourquoi cette différence ? À cause des défauts, toujours présents à l'intérieur des matériaux ou sur leurs surfaces. Au-delà d'un certain seuil de contrainte, il peut devenir plus avantageux pour le matériau, du point de vue énergétique, d'accroître la taille des défauts (fissures, cavités, etc.) que de se déformer élastiquement.

À l'échelle microscopique, un défaut se traduit par une absence locale de cohésion de la matière. Pour que le matériau résiste à la contrainte, la force non exercée par ces liaisons absentes se reporte sur les liaisons qui bordent le défaut.

La contrainte est ainsi amplifiée à l'extrémité d'une fissure. En tête d'une fissure étroite, l'amplification est proportionnelle à la racine carrée du rapport de la profondeur de l'entaille sur le rayon de courbure au fond de la fissure. Avec une simple microfissure profonde de 0,1 millimètre et d'un rayon de courbure égal à 5 nanomètres, une pression exercée sera ainsi localement multipliée par 100 !

Dans le cas des métaux, une telle contrainte locale dépasse aisément la limite d'élasticité : le matériau se déforme irréversiblement en tête de fissure. Sur une certaine zone, ce qui diminue d'autant la contrainte. Comme cette zone de déformation plastique peut être assez étendue en raison de la mobilité des atomes, il faut appliquer de fortes contraintes pour que la fissure se propage.



Dessins de Bruno Vézaro

1. L'IMPACT DU BALLON SUR LA VITRE crée des fissures qui se propagent et font voler en éclats la vitre. La naissance d'une fissure est due à l'apparition de forces de tension trop intenses (flèches rouges). La vitre étant du verre qui a subi un recuit pour le rendre plus homogène et ainsi plus solide, les fissures, une fois nées, se propagent aisément et forment des éclats relativement grands.



2. L'ASSIETTE LÂCHÉE DES MAINS tombe par terre et se brise en une multitude de petits morceaux : elle était en verre trempé. La trempe accroît la solidité du verre en mettant sa surface en compression, mais elle fragilise son intérieur en y créant des tensions.

En revanche, dans un matériau comme le verre, il n'y a pas réorganisation des atomes et la contrainte amplifiée se reporte uniquement sur quelques atomes : au-delà d'un certain seuil, les liaisons atomiques se rompent et la fissure se propage alors par séparation des plans atomiques, en laissant des surfaces relativement lisses.

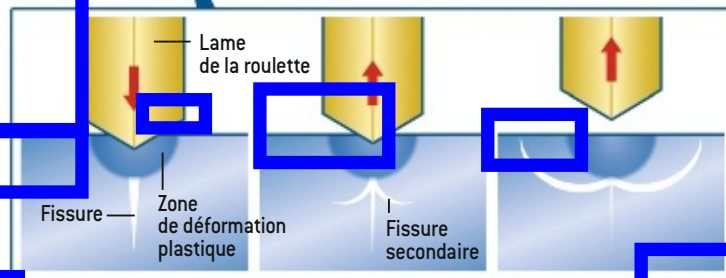
Recuit ou trempé ?

Puisque c'est en étirant que l'on ouvre les fissures, le verre casse toujours en tension. Il est en revanche très résistant à la compression ; ce n'est qu'avec de très importantes pressions que l'on atteint un régime plastique. Pour obtenir un verre plus solide, une première étape est d'éliminer les tensions internes. De telles tensions apparaissent spontanément lors du refroidissement (en général non homogène) du verre à partir de la température où on le travaille (vers 700°C pour le verre à vitre ordinaire). D'où la pratique du recuit, qui consiste à échauffer le verre à une température proche de son point de ramollissement : le matériau est alors assez mou pour que les tensions internes se relâchent.

Sans recuit, la moindre rayure au mauvais endroit (c'est à dire un endroit déjà

soumis à une tension interne) peut briser le verre localement. Le verre recuit, tel celui des vitres des fenêtres (voir la figure 1), est si homogène qu'une fissure, une fois ouverte, peut se propager sur toute la vitre et la briser tout d'un coup ! Évidemment, si l'on chauffe à nouveau le verre de façon non homogène, il redevient fragile : s'il y a des différences de température au sein du verre, des zones se dilatent plus que d'autres et des contraintes internes apparaîtront : la rupture brutale redevient possible. Pour éviter cela, on emploie du verre dont la dilatation thermique est faible, tel le pyrex, trois fois moins dilatable que le verre usuel.

Une autre technique, la trempe, accroît encore la solidité du verre. Le verre est chauffé comme pour le recuit, mais sa surface est ensuite refroidie rapidement par des jets d'air. Les couches externes se solidifient donc en premier et forment une espèce d'armature rigide. Lorsque l'intérieur se refroidit, il tend à se rétracter. Selon l'épaisseur du verre, cela se traduit par un léger amincissement sans conséquence. En revanche, dans les directions parallèles à la surface, le verre intérieur reste solide, les couches externes déjà solidifiées. Il demeure alors sous tension et met la surface en compression.



LES AUTEURS



Jean-Michel COURTY
et Édouard MERIK
sont professeurs de physique
à l'Université Pierre
et Marie Curie, à Paris.
Leur blog : <http://idphys.free.fr>

3. LA ROULETTE du vitrier, en appuyant sur la surface du verre, crée une toute petite zone de déformation plastique et juste au-dessous, une fissure. Lorsque la roulette est retirée, la fissure verticale s'amincit tandis qu'une fissure latérale en forme de moustaches s'ouvre et s'agrandit jusqu'à atteindre la surface. La découpe du verre n'est donc pas tout à fait nette.

✓ BIBLIOGRAPHIE

M. F. Ashby et D. R. H. Jones,
Matériaux, tomes 1 et 2,
Dunod, 2001.

B. Lawn et F. Wilshaw,
Indentation fracture:
principles and applications,
Journal of Materials Science,
vol. 10, pp. 1049-1081, 1975.

Retrouvez les articles de
J.-M. Courty et E. Kierlik sur
www.pourlascience.fr

Ainsi, en cas de petite rayure en surface, la compression préexistante fait qu'une tension plus forte est nécessaire pour l'ouvrir davantage. Le verre trempé est donc plus solide. Toutefois, dès qu'une fracture atteint la zone interne, qui est sous tension, l'effet est radical : le seuil de contrainte y étant plus faible, le verre se brise en de nombreux petits morceaux dont la taille est de l'ordre de l'épaisseur de la vitre (voir la figure 2). Mais cela évite de se retrouver avec de grands morceaux coupants et dangereux.

Une découpe pas nette

Comment, dans ces conditions, couper du verre de façon contrôlée ? L'artisan verrier commence par créer des amorces de fissures. Il peut rayer le verre avec un matériau plus dur, tel le diamant, mais l'entaille est

difficilement régulière et la coupure qui en résulte n'est pas nette. C'est pourquoi il préfère utiliser une roulette à lame en céramique, qui concentre la pression sur une très petite région et crée sous elle une tension dans la direction horizontale. Une fissure nette apparaît dans le cœur du verre. Ensuite, un simple choc (obtenu par exemple en tapotant le verre) élargit la fissure et la propage dans l'épaisseur de la vitre jusqu'à ce que le verre se brise de la façon désirée. Cela reste vrai même si l'entaille n'est pas rectiligne.

Malgré cette technique n'est pas sans défaut. La pression de la roulette crée de légères déformations plastiques qui sont à l'origine de fissures latérales lorsque la contrainte de la roulette disparaît (voir la figure 3). Il reste donc difficile d'obtenir une découpe bien nette ; une bonne finition exige alors de limer ou polir les bords du verre.

Et tout s'éclaire

france culture

La marche des sciences
14h/15h jeudi

avec Aurélie Luneau
en partenariat avec le magazine Pour la Science

franceculture.com

DREAM ON - Radio France / Christophe Abramowitz

LA SÉLECTION DE SCIENCE

POUR LA

Des livres à offrir ou à s'offrir

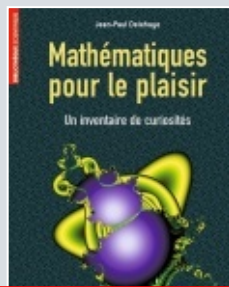


Peut-on parler de mathématiques, de religion, de politique dans un même ouvrage ? Oui, et c'est le défi qu'ont relevé le mathématicien Jean-Michel Kantor et l'historien des sciences Loren Graham, du MIT.

Dans ce livre, on découvre comment les mathématiciens de l'École de Moscou, inspirés par la secte hérétique orthodoxe de l'Adoration du Nom, finissent par croire à l'existence des infinis de la théorie des ensembles qu'avaient commencé à explorer les mathématiciens français.

Ce livre touchera même ceux que les mathématiques laissent indifférents, voire effrayant. Les auteurs éclairent les liens étroits entre la vie – avec ses plaisirs et ses drames – et l'œuvre de ces hommes et ces femmes qui ont marqué le XX^e siècle par leur créativité en mathématiques.

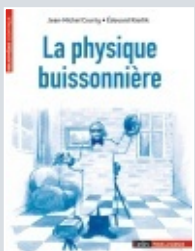
075107 • 288 pages • 24 euros



Les mathématiques sont faciles et s'y adonner est un plaisir. Les arts géométriques, les jeux de cartes, les jeux avec des dominos ou des damiers, la vie sociale et politique et ses subtiles stratégies, toutes ces activités sont mathématiques et souvent procurent des satisfactions... même à ceux qui déclament ne pas aimer les mathématiques et y être « nuls ».

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 y consacrer un peu d'attention et d'esprit ludique.

075104 • 208 pages • 25 euros



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.

Passionné de physique et curieux de sciences, Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik vous invitent à une promenade sur ces chemins de traverse dans un langage accessible, simple et imagé. Retrouvez les meilleures de leurs chroniques parues dans *Pour la Science*.

Avec eux, laissez-vous surprendre par un phénomène que vous avez déjà côtoyé sans même le remarquer. Suivez-les pour découvrir et comprendre cette physique du quotidien.

075105 • 160 pages • 22 euros



Ce livre est un recueil des articles que l'auteur a publiés dans la rubrique Art et pathologies du magazine Cerveau & Psycho.

Dans cet ouvrage, l'auteur s'interroge sur les liens cachés entre une œuvre d'art – une peinture, une sculpture, une composition musicale ou une œuvre littéraire – et une maladie de l'esprit que présentait son auteur.

Examinant divers chefs-d'œuvre avec un regard de psychologue, neurologue, voire psychiatre, Sebastian Dieguez analyse plus d'une vingtaine d'œuvres : Dostoïevski, Monet, De Chirico, Proust, Van Gogh, etc.

SCIENCE & GASTRONOMIE

Guérir le bon roi Henri

Comment éviter, notamment en se rinçant la bouche avec du lait, d'avoir l'haleine chargée quand on a mangé de l'ail.

Hervé This

Le bon roi Henri IV avait eu, dit-on, les lèvres frottées d'ail à la naissance et il en était devenu mandrin... mais les autocrates du pays d'Oïl redoutaient son haleine chargée. Bayaillac vengea-t-il ceux qu'il avait incommodés ? La question subsiste : comment éviter l'odeur puissante des mangeurs d'ail ?

L'abstention ne sied pas aux gourmands : l'ail et ses cousins, oignons, cives, échalotes, donnent du relief aux mets. D'où des prescriptions variées, du grain de café torréfié que l'on crache aux graines de cardamome, dont l'odeur est plus puissante, mais moins « vulgaire », masque l'effluve indésirable.

Une question similaire se pose aux dégustateurs d'huile, les homologues méditerranéens des sommeliers : comment se rincer la bouche entre deux huiles, afin de conserver un palais éveillé aux liquides proposés ?

Pour les deux cas, on peut invoquer la séparation simpliste du monde moléculaire en composés solubles dans l'eau et en composés solubles dans l'huile. Les molécules hydrosolubles qui donnent de la saveur se dissolvent dans la salive avant d'atteindre les papilles. Les molécules odorantes sont plutôt hydrophobes : elles se libèrent de la phase aqueuse, majoritaire dans l'aliment, et montent vers le nez, dans l'air.

Bien sûr, certaines molécules comme l'éthanol ont à la fois une odeur et une saveur. En outre, nombre de composés organiques se répartissent entre les deux phases. Toujours est-il que de nombreux composés sont plus solubles dans l'huile que dans l'eau, et l'on pourrait se demander pourquoi l'ail ne se rince à l'eau avant de se rincer par un bain

de bouche à l'huile. Et pourquoi ne pas consommer une émulsion, laquelle, composée de gouttes d'huile dispersées dans la phase aqueuse, aurait toutes les vertus nettoyantes ? Une belle idée suédoise, une somptueuse bœuf

avec du lait par Areerat Hansanugrum et Sheryl Berger, de l'Université de l'Ohio.

Dans l'ail, les principaux composés volatils sont des composés soufrés, qui ont pour noms allyl mercaptan, diallyl disulfure, méthyl mercaptan, allyl méthyl sulfure. Les trois premiers abondent dans l'haleine juste après la consommation d'ail cru, tandis que le dernier est prédominant trois heures après la consommation et est responsable de l'odeur persistante.

Des chimistes avaient montré que de nombreux fruits, légumes, champignons et boissons suppriment l'odeur alliée *in vitro* : la prune, le basilic, l'aubergine, certains bolets... Toutefois, ces denrées sont bien moins efficaces que le lait, qui réduit le niveau de diallyl disulfure de 95 pour cent et capte également d'autres composés soufrés efficacement. Ces études avaient montré que, *in vitro*, le rinçage à l'eau est intéressant. En effet, les composés soufrés ont une certaine solubilité dans l'eau. Le lait, écrémé ou non, est tout fois plus efficace.

De surcroît, le blanchiment de l'ail après broyage augmente fortement les concentrations en divers composés soufrés dans l'air surmontant les solutions formées, parce que le chauffage transforme les thiosulfonates (l'allyl, par exemple) en diallyl trisulfure, diallyl disulfure et allyl méthyl trisulfure.

Les chimistes américains ont cherché si les vertus « désoufrantes » du lait étaient

aussi valables *in vivo*. Les dégustateurs ont consommé, à raison de 3 grammes environ pour 200 millilitres d'eau, de l'ail blanchi (passé un temps précis dans l'eau bouillante) ou cru, broyé. Selon les tests, ils se rinçaient ensuite la bouche à l'eau ou au lait.

Les protéines et les sucres du lait pouvant interférer sur la libération des composés soufrés, l'ajout de ces substances à de l'ail broyé a été testé. L'ajout de caséinate de sodium, notamment, réduit notablement les concentrations en composés soufrés dans l'air qui monte le broyat d'ail : les biochimistes supposent un échange avec les résidus d'acides aminés soufrés de la protéine. En revanche, on comprend mal pour quoi il est plus efficace lorsqu'il est ingéré avec l'ail broyé, plutôt qu'après consommation de l'ail.

Dans le dernier numéro du *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, Elke Bloem et ses collègues de Braunschweig ouvrent une autre voie : ils étudient la formation de composés soufrés dans l'ail selon les conditions de culture. Ces agrochimistes ont montré que le climat d'engrais soufrés augmentait notablement cette concentration. La réduction des engrais pourrait donc aider les gourmets réfractaires à l'ail.



Hervé THIS dirige le Groupe INRA de gastronomie moléculaire au Laboratoire de chimie d'AgroParisTech. Il est aussi directeur scientifique de la Fondation Science & Culture Alimentaire (Acad. des sciences).



Retrouvez les articles de Hervé This sur www.pourlasience.fr



La sélection **POUR LA SCIENCE**

Spécial fêtes de fin d'année



PRIX LE GOÛT
DES SCIENCES 2010

Bâtir en terre Du grain de sable à l'architecture

Laetitia Fontaine et Romain Anger

Ce livre part à la découverte de l'exceptionnel patrimoine en terre, de la mythique Shibam au Yémen, la « Manhattan » du désert, jusqu'aux étranges habitations collectives des Hakkas en Chine, en passant par les réalisations des architectes contemporains. Les auteurs analysent également les propriétés physico-chimiques de la terre, véritable « béton naturel », grâce à des expériences simples et ludiques.

978-2-7011-5204-2 • 224 p. • 30,00 €



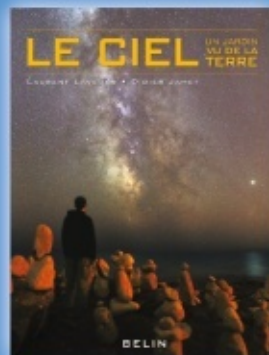
NOUVEAUTÉ

Islande Splendeurs et colères d'une île

Michel et Anne-Marie Detay

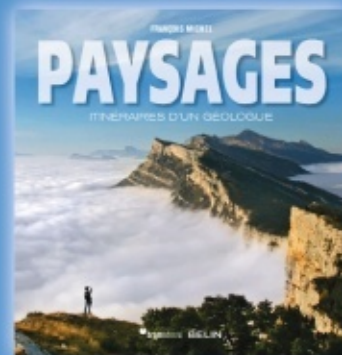
Les auteurs proposent dans cet ouvrage une balade en Islande à la découverte des manifestations naturelles propres à ce bout de terre, sans oublier la faune et la flore. Illustré de magnifiques photographies, il fournit de façon accessible des explications sur la géologie mystérieuse de cette autre île de beauté. Un voyage inoubliable.

978-2-7011-5762-7 • 208 p. • 29,00 €



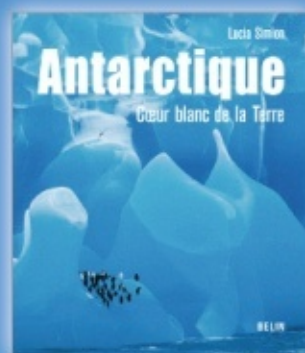
L. Laveder, D. Jamet

978-2-7011-4733-8 • 224 p. • 28,50 €



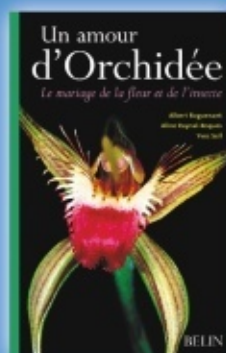
F. Michel

978-2-7011-4954-7 • 256 p. • 32,00 €



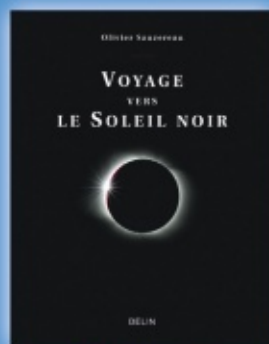
L. Simion

978-2-7011-4463-4 • 224 p. • 29,90 €



A. Roguenant, A. Raynal-Roques, Y. Sell

978-2-7011-4012-4 • 480 p. • 49,00 €



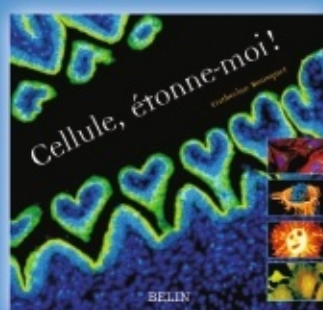
O. Sauzereau

978-2-7011-5121-2 • 128 p. • 29,00 €



V. Tardieu, L. Barnéoud

978-2-7011-4515-0 • 288 p. • 43,00 €



C. Bousquet

978-2-7011-4482-5 • 144 p. • 26,00 €

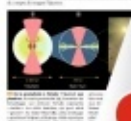


M.-O. Lafosse-Marin, M. Laguës

978-2-7011-4597-6 • 208 p. • 18,50 €

Feuilletez les premières
pages de notre sélection
de livres en exclusivité
et commandez en ligne
sur notre site

www.pourlascience.fr



→ MATHÉMATIQUES

Le beau livre des maths

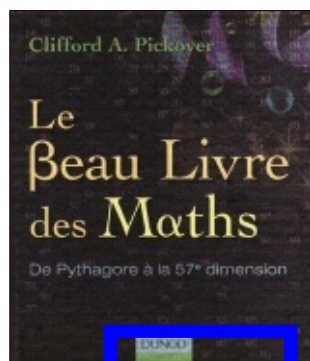
Clifford A. Pickover

Dunod, 2010
(528 pages, 27,90 euros).

Quand vous lisez ce livre, vous chercherez des yeux autour de vous les proches que vous avez eu quelques difficultés à convaincre de l'intérêt des mathématiques et de leur pouvoir ludique : vous savez que *Le beau livre des maths* pourrait les convaincre.

En quelque 250 doubles pages, le sujet d'une découverte mathématique est expliqué sur la page de gauche et une illustration s'y rapportant est composée sur la page de droite. Les sujets sont exposés par ordre chronologique, illustrant deux points de vue : certaines questions mathématiques traversent plusieurs siècles, notamment en théorie des nombres, et les inventions ou les solutions apparaissent souvent simultanément dans des cultures différentes, ce qui montrerait peut-être que les mathématiques sont découvertes et non inventées. Derniers jours, les communications sont si rapides que ces indépendances se font rares.

Les pages reflètent à merveille l'imagination des mathématiciens qui surprennent par leur inventivité inattendue. Lisez ainsi la *Résolution de l'holyhède* :



John Horton Conway conjectura qu'il existait un polyèdre où toutes les faces ont un trou, ce qui fut prouvé neuf ans plus tard. Lisez

Les nœuds ou la loi de Murphy, *Le théorème de Johnson*, *Le paradoxe de Parrot* et lisez aussi quelques sujets plus majestueux comme *Les nombres transcendants* et *L'axiome du choix de Zermelo*. Les doubles pages traitent de questions ouvertes, comme la *Conjecture abc*, montrant que les mathématiques sont une science vivante.

Il y a de petites imperfections de deux types. Certaines définitions sont difficilement compréhensibles, comme celle de la projection de Mercator (pourquoi ne pas dire que c'est la projection de la sphère sur un cylindre ?). Des sujets sont assez mal définis, comme la résolution annoncée de l'invitabilité de la partie nulle « axiomes » entre deux adversaires jouant parfaitement, alors qu'il s'agit des dames anglaises (checkers) sur un échiquier 8×8 avec leurs règles, et non des dames habituelles 10×10 telles que représentées sur la figure de la page de droite.

Mais qu'importe : l'extraordinaire variété des sujets abordés donne un magnifique panorama des mathématiques. Retranscrit-il les mathématiques dites importantes ? La question est souvent posée à propos de la vulgarisation. Disons qu'il serait bien difficile de définir ce que sont les mathématiques importantes : seuls les mathématiciens pourraient le dire et il est probable que la définition varierait selon leur centre d'intérêt. Il me semble que la plupart des domaines des mathématiques sont ici au moins présentés lors de leur création.

Le beau livre des maths est attractant comme un « coffee table book », mais il a l'intelligence des meilleurs livres scientifiques et

vous le dégusterez à petites gorgées de doubles pages.

→ ARCHÉOLOGIE

Roches de mémoire

Emmanuel Breteau

Errance, 2010
(224 pages, 39 euros).

Armes, parures, peaux et gravures humaines et domestiques, figures géométriques, symboles... ont été gravés à l'aube de la métallurgie, sur des roches de plein air, dans des vallées des Alpes françaises, italiennes et suisses. Ici, la technique de photographie en lumière rasante d'Emmanuel Breteau permet de saisir précisément, en noir et blanc, les détails du motif incisé et aussi leurs techniques de réalisation. Les illustrations sont précédées de notices d'archéologues et de chercheurs en art rupestre de ces zones montagneuses.

Semblables ou divers selon les sites, les signes ou les symboles sont apposés durant une période balayant la préhistoire, soit d'environ 2800 ans à quelques siècles avant notre ère. Dans une première période, les gravures sont toutes réalisées par martelage d'un outil souvent lithique ; elles proposent une lecture issue d'une simple juxtaposition des figures remplacée plus tard, par une animation de celles-ci mises en scènes narratives. À partir du 1^{er} siècle, les outils sont plus souvent métalliques, au profit des dessins, et les libellés deviennent plus fréquents.

Si le recensement de ces incisions est bien avancé, voire terminé pour la plupart des sites, leur interprétation demeure délicate, suscitant plus de questions que de



réponses. Le propos de cet ouvrage n'est pas de percer leur intention véritable, mais d'appréhender une culture millénaire fortement symbolisée. Car si les raisons de graver varient au cours des temps, il s'agit toujours de dédier un message, à des lieux de nature variée, ou à soi-même pour les plus récentes. Au-delà de l'appropriation d'un territoire, inciser la surface rocheuse est un acte intentionnel et émotif qui perdure continuellement, de l'époque médiévale jusqu'à la nôtre.

N'est-ce d'ailleurs pas troublant de retrouver, chez de nombreuses civilisations à l'aube de l'âge du métal, une même volonté d'entamer la roche par martelage, dans un lieu souvent très singulier de plein air, afin d'y inscrire un message, sous forme de signe, ou de symbole ? Et n'est-il pas surprenant que durant des siècles et jusqu'à nos jours, on poursuive cette tradition ?

Cet témoignage rupestre est un phénomène non seulement alpin mais mondial, et ne doit pas être négligé : il montre que l'humanité possède des racines communes.

→ Nathalie Magnien

Ethnologue, spécialiste des gravures historiques de la région du mont Bego

→ ORNITHOLOGIE

Le livre des oiseaux rares

Dominique Couzens

Delachaux, 2010
(240 pages, 29,95 euros).

Ce livre botanique fait découvrir, grâce à 50 portraits d'oiseaux, différentes situations d'urgence environnementale. Les cas proposés par l'auteur, journaliste et ornithologue, constituent un choix judicieux et autant de leçons d'écologie qui permettent de mieux apprécier la complexité et la diversité des situations. Il évoque ainsi la délicate situation des oiseaux insulaires tel le lori ultramarin, qui ne survit plus que sur un îlot de 23 kilomètres carrés, ou le grèbe de Taczanowski, circonscrit à un lac situé à 4088 mètres dans les Andes. Les menaces pesant sur ces oiseaux sont parfois insolites : ainsi, sur la petite île Gough, se joue un film d'horreur pour les jeunes albatros de Tristan attaqués par des souris domestiques 300 fois plus légères qu'eux.



La complexité des situations environnementales est bien montrée avec le méliphage régent, un oiseau commun des régions du Sud-Est de l'Australie. À partir des années 1940, les ornithologues notent son rapide et spectaculaire déclin et découvrent qu'un ensemble de menaces agissent en synergie : déforestation, perte d'habitat, pollution, concurrence avec d'autres espèces.

sélectif des arbres les plus vieux, concurrence d'autres espèces d'oiseaux aux exigences environnementales similaires... Aujourd'hui, grâce à la protection de son habitat et à l'élevage en captivité afin de renforcer les populations naturelles, les environnementalistes espèrent stopper la réduction des effectifs de ce méliphage.

L'auteur est cependant trahi par la structure même de son livre, par ailleurs richement illustré (dont de très utiles cartes), car chacune des espèces est traitée en quatre petites pages, donc souvent superficielles. Le lecteur apprend ainsi que le programme de protection de la brève de Gurney au Myanmar a échoué, mais il ne saura pas pourquoi. De plus, le style de l'auteur conduit parfois à des formulations ambiguës : « Sur les îles, l'évolution procède sans contrôle et, comme fascinée par son propre pouvoir de création, crée des espèces improbables... »

Ces quelques réserves mises à part, l'ouvrage constitue une tentative originale de vulgarisation d'un domaine complexe qui ravira tous les amateurs d'oiseaux.

→ **Valérie Chansigaud**

Historienne des sciences

→ GASTRONOMIE ET SANTÉ

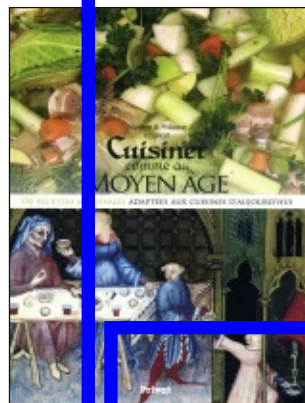
Cuisiner comme au Moyen Âge

Mylène et Philippe Pouillart

Privat, 2010
(144 pages, 25 euros).

Cuisiner comme au Moyen Âge. Pourquoi pas... mais pourquoi, au fait ? Pour avoir une idée des goûts du passé ? Pour découvrir des goûts oubliés ? Pour connaître un « art de vivre » différent de celui d'au-

jourd'hui ? Pourquoi pas. En réalité, les deux auteurs de ce livre ne posent pas véritablement la question et ils ont, en quelque sorte, étât de leur propre intérêt, qu'ils justifient par l'engouement pour la cuisine médiévale.



Leur livre – cartonné, beau papier, belles illustrations en couleurs – est divisé en deux parties : la première présente l'alimentation médiévale, les relations entre la cuisine et la médecine, les produits d'époque, leur utilisation culinaire, les régimes des diverses classes sociales ; la seconde propose des recettes, adaptées aux produits modernes. L'ouvrage n'est pas « universitaire » (les informations sont données sans référence, il n'est fait état ni de l'origine des recettes ni des raisons de leur adaptation)... ce qui conduit à penser que le public dispose d'un ouvrage de recettes de plus.

À quoi bon ? Pour apprendre de nouvelles techniques de cuisine ? La technique n'est généralement pas la question essentielle des livres de cuisine, et cet ouvrage n'y fait pas exception. Par exemple, dans cette recette de « concombre farci du jardin », les auteurs prescrivent d'évider les concombres pour enlever les pépins, de faire une farce en hachant ail, échalotes, basilic, persil, pain, vin, viandes, sel, poudre fine (un mélange d'épices), d'en farcir les concombres avant de

Brèves

MATHÉMATIQUES ET ARCHITECTURE

Jane Burry et Mark Burry

Actes Sud, 2010
(272 pages, 12 euros).

Le pavillon du *Water Cube* – la piscine olympique de Pékin –, le dôme à claire-voies fractales du futur Louvre d'Abou Dhabi, la salle de concert de Melbourne, optimisée pour l'acoustique et l'esthétique, la villa Möbius : telles sont quelques-unes des œuvres architecturales analysées dans ce bel ouvrage. Leur inspiration ? Les mathématiques, la géométrie non euclidienne, chaos, topologie... Leur alliance avec l'architecture repousse les limites du possible.

MAGNOLIA

et Roland Jancel

Privat, 2010

(128 pages, 5 euros).

Ces pages relatent l'histoire du réputé plus vieux arbre à fleurs du monde : le magnolia. Ses magnifiques illustrations révèlent que cette plante introduite en Europe à partir du Nouveau Monde sous les rois fut contemporaine des dinosaures. Les auteurs, dont l'un est à l'origine de l'installation à Nantes de la collection nationale de magnolias, consacrent

quelques pages aux nombreuses variétés d'Asie, puis évoquent les aspects paysagers des magnolias de jardin.

SCIENCES ET SCIENCE-FICTION

Ugo Bardi et al.

La Martinière, 2010

(234 pages, 12,90 euros).

La science-fiction accompagne la science depuis 500 ans, lui offrant en miroir idées inédites, réflexions philosophiques, analyses sociologiques. Ses auteurs et auteurs de science-fiction présentent ici ces réflexions dans un ouvrage remarquablement illustré.

Actuellement en kiosque



Les énergies fossiles ont un temps semblé ne jamais devoir se tarir. Aujourd'hui, la situation a évolué : les réserves s'épuisent et les rejets liés à cette consommation nuisent à l'environnement. Les énergies alternatives – celles du vent, du Soleil, de la mer, des profondeurs de la Terre – sont mobilisées. La transition énergétique a commencé.

Dossier Pour la Science
n° 69 • oct.- déc. 2010

En vente également sur
www.pourlascience.fr

cuire à 180°C pendant 35 minutes. En réalité, soit on sait déjà faire tout ces gestes, soit le texte est insuffisant... mais en réalité, la première hypothèse est la bonne. Le plus souvent, les livres de cuisine n'expliquent pas, supposant que l'on connaît déjà les gestes.

Est-ce pour l'art, alors ? Reconnaître un mets comme « bon », c'est *ipso facto* le considérer comme « beau à manger », apprécier des qualités esthétiques, chercher une patte, un style, et c'est peut-être là le critère d'après lequel il serait avisé de juger le présent ouvrage. Ce livre nous montre-t-il le style de la cuisine médiévale ? Les deux auteurs signalant qu'ils ont adapté les recettes, préconisé des outils de cuisine modernes, sélectionné les recettes sur la base d'un « lien positif avec la santé, selon les valeurs actuelles se référant à la qualité nutritionnelle des ingrédients ». Autrement dit, non, ce n'est pas le style médiéval que l'on entendra, mais une musique composée pour clavier et jouée au piano.

Terminons sur cette question de la santé qui intéresse les auteurs. Le préfacier signale le *Régime de santé* de l'école de Salerne, « qui produisait des conseils d'hygiène de vie pleins de bon sens », où l'abbesse Hildegarde de Bingen (1098-1163) aurait « quelque chose à nous apprendre en terme de diététique ». Pourtant nos aïeux mouraient le plus souvent jeunes, sans aucune idée rationnelle de la diététique, réduits à un « je me sens bien » ou à un « je me sens mal » qui est du dernier sommaire. Je crois que le Moyen Âge n'a pas grand chose à nous apprendre en matière de santé, lui qui se fondait sur la théorie des humeurs, qui faisait usage de cinabre (le sulfure de mercure) pour faire des pâtes de poisson, et dont le feu déposait des benzopyrènes cancérigènes.

Cuisinons donc « comme » au Moyen Âge, mais sans espoir d'y trouver une sagesse diététique que l'empirisme était bien en peine de donner. Continuons-nous à cuisiner, mais prenons simplement les recettes données ici pour ce qu'elles sont : l'occasion de tester des goûts nouveaux inspirés de sources inhabituelles. Nous dirons implicitement (ou explicitement) à nos convives « j'ai pris soin de toi au point d'aller chercher ailleurs, et loin dans le temps, des mets que j'ai ensuite réalisés. »

→ ART & SCIENCE

Trompe-l'œil

Gilles Mermot
et Yves Paccalet

La Merisnière, 2010.
(192 pages, 35 euros).

Au yeux du scientifique, la nature est ingénieuse, surprenante, fascinante. Aux yeux du photographe et du poète, elle est encore plus mystérieuse et magnifique. Là où le scientifique, objectif et cartésien, se limiterait à s'extasier devant les processus élaborés menant au mimétisme, à la convergence évolutive, aux sélections naturelle et sexuelle ou aux structures fractales, Goethe écrit que la fleur est une feuille folle d'amour. L'ouvrage de Gilles Mermot et Yves Paccalet s'attache à l'image de la nature : ingénieuse, surprenant, fascinant, mystérieux et magnifique.

Cet ouvrage éblouissant se conjugue en cinq thématiques. Débute la nature usurpatrice, imitant la manière, textures improbables



et éclairage décalés. Vient ensuite un jeu de correspondance entre minérales et végétales, dont une même autre, ou le contraire. Puis la nature continue à nous mettre de la poudre aux yeux, pour aussitôt nous mettre le doigt dans l'œil, en exhibant des espèces aux corps peints de faces humaines et pupilles d'araignées. Suit une nature joueuse, qui présente son délirant portège d'espèces schizoéphrènes, au verso de leur recto. Enfin, en une étonnante accapuration de l'infiniment grand, inflorescences et accrétoires invertébrés vous démontrent que la beauté se décline à toutes les échelles.

Le photographe a visiblement le coup d'œil et les yeux aux bouts des doigts. Le philosophe, écrivain et naturaliste nous ouvre les yeux sur cette beauté poétique, mais garde l'œil sur le côté naturaliste, fournissant de nombreuses informations et explications pour chaque espèce photographiée.

Ce livre est captivant, vous pouvez fermer les yeux fermés. Mais les ouvrir tout grand ensuite, car il vous tapera dedans. Et puis non, ne croyez pas, ne croyez pas de vos propres yeux. Si vous pensez pouvoir les croire, eux.

→ Franck Courchamp

Laboratoire Ecologie systématique et évolution, Université Paris-Sud

Retrouvez plus d'actualités et toutes les références sur

www.pourlascience.fr