J. O. 2012 : ne pas disqualifier les femmes ayant trop de testostérone !

POUR LA SCIENCE

Août 2012 - n° 418 | www.pourlascience.fr

Édition française de Scientific American

Épaves pour l'archéologie navale

Les bateaux oubliés du XVIIIe siècle

Les antineutrinos

Des mouchards pour estimer la radioactivité terrestre

Lions d'Afrique et d'Asie

Quand ils peuplaient le monde

Émeraudes, saphirs et autres gemmes

Ce qu'ils révèlent sur les profondeurs de la Terre

M 02687 - 418 - F: 6,20 €

Allemagne : 9,30 € - Belgique : 7,20 € - Canada /S : 10,95 CAD - Grèce /S : 7,60 € -Guadeloupe/St Martin /S : 7,30 € - Guyane /S : 7,30 € - Italie : 7,20 € - Luxembourg : 7,20 €
Maroc : 60 MAD - Martinique /S : 7,30 € - Nlle Calédonie Wallis /S : 980 XPF - Polynésie Française /S : 980 XPF - Portugal : 7,20 € - Réunion /A : 9,30 € - Suisse : 12 CHF.

La preuve par 5

Ritme, **distributeur de logiciels scientifiques**, fait peau neuve et vous présente sa nouvelle approche avec un positionnement fort sur le service client.

Être leader implique une véritable dimension de service et de conseil que Ritme a déployée depuis de nombreuses années avec pour vocation de faciliter votre métier.

1 **Faciliter l'accès à une offre logiciel** toujours plus riche, par une sélection exhaustive et un sourcing de professionnel.

2 **Faciliter le choix** de la solution la plus appropriée à vos besoins.

3 **Faciliter la prise en main et l'utilisation** de vos logiciels pour en tirer tous les bénéfices.

4 **Faciliter le retour sur investissement** par un accompagnement et une traçabilité de vos acquisitions.

5 **Faciliter notre relation** en étant réactifs et disponibles. Le site web et notre équipe sont là pour vous.

Cette approche innovante du service alliée à une expertise de distributeur spécialisé confère à Ritme une dimension incontournable dans de nombreux secteurs d'activité.

Conception & Réalisation Easycom Solutions® - www.easycomsolutions.eu - N° Azur 0 811 85 92 92

Découvrez dès maintenant notre nouveau site internet

www.ritme.com

RITME

NOTRE MÉTIER : FACILITER LE VÔTRE

Ritme, distributeur officiel en France des logiciels Origin, Endnote, Stata, Nvivo...

POUR LA SCIENCE
www.pourlascience.fr

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

Groupe POUR LA SCIENCE
Directrice de la rédaction : Françoise Pétry
Pour la Science
Rédacteur en chef : Maurice Mashaal
Rédacteurs : François Savatier, Marie-Neige Cordonnier, Philippe Ribeau-Gésippe, Guillaume Jacquemont, Sean Bailly
Dossiers Pour la Science
Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin
Cerveau & Psycho
Rédactrice en chef : Françoise Pétry
Rédacteur : Sébastien Bohler
L'Essentiel Cerveau & Psycho
Rédactrice : Bénédicte Salthun-Lassalle
Directrice artistique : Céline Lapert
Secrétariat de rédaction/Maquette : Annie Tacquenet, Sylvie Sobelman, Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy
Site Internet : Philippe Ribeau-Gésippe assisté de Yoan Bassinet
Marketing : Élise Abib
Direction financière : Anne Gusdorf
Direction du personnel : Marc Laumet
Fabrication : Jérôme Jalabert assisté de Marianne Sigogne
Presse et communication : Susan Mackie
Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé
Conseillers scientifiques : Philippe Boulanger et Hervé This
Ont également participé à ce numéro : Stefano Biagetti, Pierre Chevet, Silvana Condemi, François Forget, Alain Lecavelier des Étangs, Brigitte Onteniente, Christophe Pichon, David Quéré, Cédric Simonet, Daniel Tacquenet, Bernard Thierry, Michel Zelvelder.

PUBLICITÉ France
Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin (jf.guillotin@pourlascience.fr), assisté de Nada Mellouk-Raja
Tél. : 01 55 42 84 28 ou 01 55 42 84 97 • Fax : 01 43 25 18 29

SERVICE ABONNEMENTS
Ginette 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 livres ou de magazines :
0805 655 255 (numéro vert)

DIFFUSION DE POUR LA SCIENCE
Contact kiosques : À juste titres ; Benjamin Boutonnet
Tel : 04 88 15 12 41
Canada : Edipresse, 945, avenue Beaumont, Montréal, Québec, H3N 1W3 Canada.
Suisse : Servidis, Chemin des châlets, 1979 Chavannes - 2 - Bogis
Belgique : La Casterman, 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 Mirsky, 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).

OJD PRESSE PAYANTE Diffusion Certifiée 2011

Moteur de recherche

« L'imagination ne pare plus rien de ce qu'on possède. [...] Il n'y a rien de beau que ce qui n'est pas. »
Jean-Jacques Rousseau, *Julie ou La Nouvelle Héloïse* (1761)

Cette réflexion de Rousseau s'applique notamment aux chercheurs qui se passionnent pour leur objet d'étude, le trouvant « beau », tant qu'ils ne l'ont pas décodé, décrypté, décrit, catalogué. C'est-à-dire aussi longtemps que ce sujet laisse place à l'hypothèse qu'il faut valider, à l'expérience envisagée pour confirmer ou infirmer une étape intermédiaire, à la confrontation avec les résultats d'autres équipes. Bref, il est beau car il laisse libre cours à l'imagination.

Et l'imagination est à l'œuvre chez le physicien qui tente de détecter des particules quasi indétectables pour comprendre d'où vient la chaleur produite au cœur de la Terre *(voir Des neutrinos pour sonder l'intérieur de la Terre, page 42)*. Ou encore chez les spécialistes des [illegible] ancêtres disparus, et envisageant diverses façons de retrouver quels continents ils peuplaient *(voir Les voyages du lion, page 50)*.

L'imagination se nourrit du désir de comprendre.

C'est bien sûr aussi le moteur des chasseurs d'épaves, non pas ceux qui espèrent retrouver quelque trésor au fond des mers, mais les archéologues qui examinent, décrivent, répertorient les restes des navires ayant fait naufrage. Ces archéologues plongeurs laissent tout en place en perturbant le moins possible les vestiges qu'ils découvrent, mais remontent en surface autant de dessins, mesures ou photographies que possible. Ensuite, la recherche continue à terre, consistant à réécrire l'histoire de ces navires oubliés des siècles passés, en s'aidant des textes *(voir le dossier Chercheurs d'histoires englouties, page 19)*.

Moteur psychologique des chercheurs – comme de tout un chacun –, l'imagination se nourrit du désir de posséder ou de comprendre. Selon Rousseau, l'attrait de l'objet désiré faiblit quand il n'est plus hors de portée, mais le chercheur n'a pas à s'inquiéter : chaque étape du processus jamais achevé de la recherche suscite de nouvelles questions qui laisseront son imagination s'exprimer.

SOMMAIRE

1 PHOTO

4 BLOC-NOTES
Didier Nordon

Actualités

6 Les produits laitiers artificiels vieux de 7 000 ans

7 Les neurones à partir de la peau

9 Le moustique, un as du vol sous la pluie

10 Comment peser un dinosaure ?

... et bien d'autres sujets

13 ON EN REPARLE

Opinions

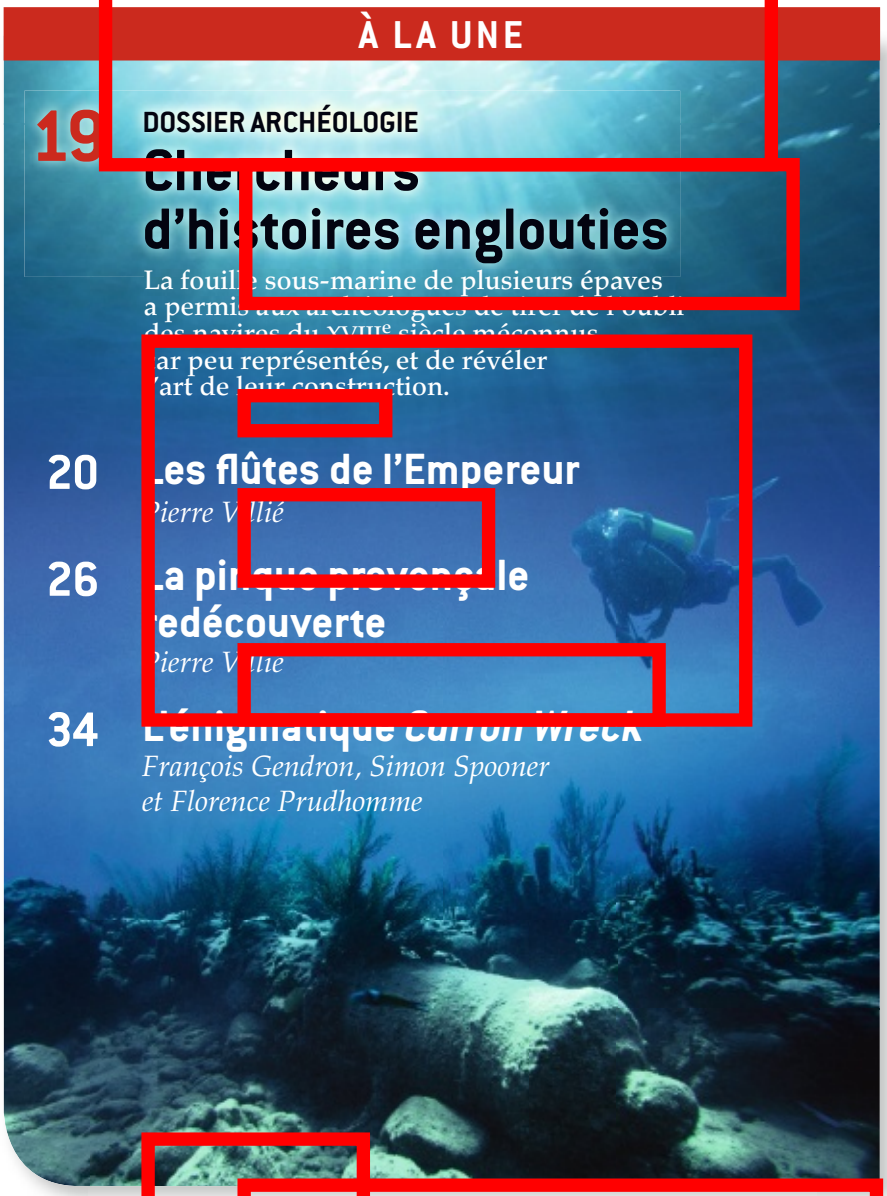
14 POINT DE VUE
Jeux Olympiques : une redéfinition inappropriée de l'athlète féminine
Anaïs Bohuon

15 DÉVELOPPEMENT DURABLE
Barrages : ces petits qui protègent les grands
Jean Albergelt

18 VRAI OU FAUX
Un événement cosmique survenu il y a 10 milliards d'années est-il à 10 milliards d'années-lumière ?
Alain Riazuelo

Ce numéro comporte deux encarts d'abonnement brochés sur la totalité du tirage, une offre d'abonnement *Pour la Science* p. 12 et une sélection de livres *Pour la Science*/Belin en p. 76.
En couverture : © Joe McBride/CORBIS

À LA UNE



19 DOSSIER ARCHÉOLOGIE
Chercheurs d'histoires englouties
La fouille sous-marine de plusieurs épaves a permis aux archéologues de tirer de l'oubli des navires du XVIIIe siècle méconnus, par peu représentés, et de révéler l'art de leur construction.

20 **Les flûtes de l'Empereur**
Pierre Villié

26 **La pirogue provençale redécouverte**
Pierre Vaute

34 **L'énigmatique *Carron Wreck***
François Gendron, Simon Spooner et Florence Prudhomme

42 PHYSIQUE
Des neutrinos pour sonder l'intérieur de la Terre
William McDonough, John Learned et Stephen Dye

Ces particules passe-muraille sont devenues un outil pour sonder les profondeurs de la Terre et comprendre comment notre planète produit de la chaleur. Elles seraient aussi utiles pour surveiller les centrales nucléaires.

© Pour la Science - n° 418 - Août 2012

50 ARCHÉOZOOLOGIE
Les voyages du lion
Annik Schnitzler

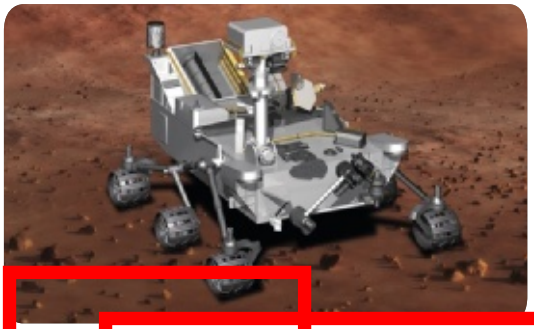
Grâce à une organisation sociale élaborée et à une fécondité soutenue, le lion a conquis presque tous les continents. Sa première sortie d'Afrique date de plusieurs centaines de milliers d'années.

58 MINÉRALOGIE
La géologie des gemmes
Lee Groat et Gaston Giuliani

Diamant, rubis, saphir, émeraude, topaze, jade... Les gemmes sont autant d'indices qui renseignent les géologues sur les conditions régnant dans les profondeurs de la Terre.

66 PLANÉTOLOGIE
Déchiffrer la planète rouge
John Grotzinger et Ashwin Vasavada

Le 6 août à 7 h 31, heure de Paris, le robot *Curiosity* de la NASA se posera sur Mars et entamera pour la première fois la recherche directe de traces d'un environnement propice à la vie.



70 NEUROSCIENCES
Le cerveau stressé
Amy Arnsten, Carolyn Mazure et Rajita Sinha

Les circuits neuronaux assurant le contrôle de soi sont perturbés par un stress, même modéré. Dès lors, les émotions et les désirs prennent les commandes...

Regards

78 HISTOIRE DES SCIENCES
Charles Knight, voyageur temporel
Richard Milner

Au tournant du XXe siècle, l'artiste naturaliste américain a immortalisé les derniers représentants d'espèces menacées et mis en scène des animaux disparus.

82 LOGIQUE & CALCUL
Combiner des pertes pour gagner
Jean-Paul Delahaye

L'idée que, en associant plusieurs jeux défavorables, on puisse en obtenir un favorable est choquante. Les exemples de telles situations sont pourtant nombreux et variés.

88 ART & SCIENCE
Turner et le Soleil, vu de près !
Loïc Mangin

90 IDÉES DE PHYSIQUE
Pourquoi le ciel n'est pas bleu
Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

93 SCIENCE & GASTRONOMIE
Du vin avec la salade ? Hérésie !
Hervé This

94 À LIRE

Rendez-vous sur

SCIENCE.fr

Le site de référence de l'actualité scientifique internationale

- **Toute l'actualité des sciences en un clic**
  - Des actualités quotidiennes
  - Des articles en libre accès
  - Votre magazine numérique en ligne
  - Plus de 8 ans d'archives*
- **Des services exclusifs**
  - Les réactions aux articles**
  - Des offres d'emploi scientifiques
  - Des newsletters**
  - Un espace abonnement

* Service payant. Si vous êtes abonné(e), les numéros compris dans votre abonnement sont offerts.
** En créant votre compte.

BLOC-NOTES

de **Didier Nordon**

NI TROP NI TROP PEU

Lorsqu'un sportif accumule les victoires, sa suprématie systématique paraît louche, et des soupçons de dopage naissent contre lui. Lorsqu'un inconnu remporte une victoire inattendue sur des adversaires réputés meilleurs, son triomphe paraît louche, et des soupçons de dopage naissent contre lui.

Ainsi, gagner trop souvent et gagner trop rarement sont deux façons d'attirer la suspicion. La réputation d'un sportif, en tant que fonction du nombre de ses victoires, pose donc un intéressant problème d'optimisation. Pour connaître la gloire, il doit gagner suffisamment de compétitions mais, pour que cette gloire soit sans tache, il ne doit pas en gagner trop. Question : quel est l'optimum ?

CHRONIQUE JAVANAISE

Été, mon[illegible] de réviser les langues étrangères.

Traduire en hébreu : « C'est de l'hébreu pour moi. »

Traduire en chinois : « Il est toujours à chinoiser, si bien que discuter avec lui est un supplice chinois. »

Traduire en turc : « Cet homme, fort comme un Turc, est devenu notre tête de Turc le jour où nous l'avons surpris à boire un café turc alors qu'il nettoyait des toilettes à la turque. »

Traduire en polonais : « J'étais soûl comme un Polonais. »

Traduire en espagnol : « Le rêve d'un château en Espagne, où recevoir mes amis. Quant à la conversation, ce sera l'auberge espagnole : ils ne trouveront que ce qu'ils apporteront, car je parle comme une vache espagnole. »

Traduire en argot portugais : « T'as les portugaises ensablées, ou quoi ? »

Traduire en grec moderne : « La commission d'hygiène ayant renvoyé aux calendes grecques sa décision sur les yaourts à la grecque, des producteurs en colère l'ont conspuée en lui criant d'aller se faire voir chez les Grecs. »

Puisqu'il ne faut pas négliger les langues mortes, traduire la phrase précédente en grec ancien.

Enfin, traduire en javanais : « Avil favait baveau avujeuxeuxydeu'hui. »

STATISTIQUES PSYCHOLOGIQUES

Une entreprise en difficulté envisageait de diminuer les salaires de 20 pour cent. À un journaliste venu enquêter sur la situation, un employé a décrit les conséquences dramatiques d'une telle décision : « Ma femme travaille dans la même entreprise, donc ça nous ferait une diminution de 40 pour cent. » Cette réplique est restée célèbre comme exemple d'« analphabétisme scientifique ». Pourtant, elle est loin d'être absurde.

Du point de vue arithmétique, la chute de revenu du couple est deux fois plus grande si la diminution frappe les deux membres plutôt qu'un seul (je suppose, ce qui est une autre histoire, que la femme et le mari ont le même salaire). Et 40 n'est-il pas le double de 20 ?

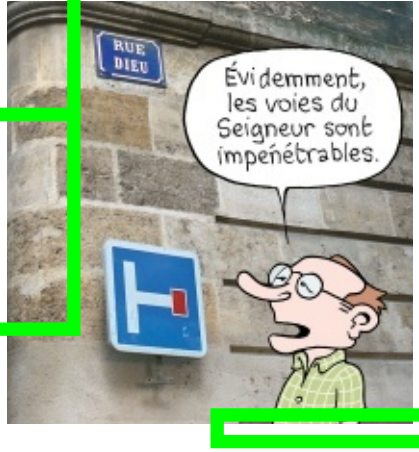
Quant aux finances, si le couple a des revenus modestes, une diminution de 20 pour cent est une catastrophe qui a de quoi l'affoler. Elle peut le faire basculer dans l'insolvabilité, et entraîner des effets cumulés au terme desquels il aura perdu beaucoup plus que 20 pour cent.

Même si cette réaction en chaîne est finalement évitée, pronostiquer que les revenus du couple diminueraient de 40 pour cent est une phrase avec son anxiété du moment. Assurer qu'ils ne diminueraient « que » de 20 pour cent est correct d'un point de vue formel, mais laisse échapper un élément essentiel, impossible à quantifier : le vécu subjectif. Le public fait parfois preuve d'analphabétisme scientifique, mais les modélisations scientifiques font parfois preuve d'analphabétisme psychologique.

SENS NON INTERDITS

Allange (Manche) existe une rue de la chaussée. À Bordeaux, une rue des impasses. À Paris, un passage de la ruelle. À Lyon, une montée de la grande côte. Il y a en France, des rues de la descente et des rues de la montée ; comme ce ne sont pas les mêmes, c'est que les rues qui descendent ne sont pas à confondre avec celles qui montent. À Bruxelles, se trouve une avenue du boulevard – ce dont on déduit qu'un boulevard de l'autre se trouve à Sellexurb. Montreux se permet d'offrir aux regards innocents une place indiquant la « rue du quai ». Si j'étais maire, je veillerais à ce que, dans ma ville, l'ancien hôtel moderne soit établi dans l'ancienne rue neuve, et à ce que le théâtre de l'impasse soit sis impasse du théâtre. Mais je ne m'inspirerais pas de Paris : le musée du vin y est situé rue des eaux !

Les rues ne pratiquent pas seulement le jeu de renvois mutuels. Il leur arrive de sortir des horizons terrestres : rue d'enfer à Metz, rue du purgatoire et rue de toutes âmes à Genève, rue du paradis et rue de Dieu à Paris, rue Dieu me garde à Fouras (Charente-Maritime), rue du Père éternel à Auray (Morbihan). Ces rues étant bien



© Pour la Science - n° 418 - Août 2012

réelles, les entités dont elles portent les noms ne peuvent qu'être, elles aussi, bien réelles. Je ne dis pas que la déduction que j'opère là soit très solide, mais elle est fondée sur l'observation d'éléments objectifs. Et, en matière de métaphysique, les éléments objectifs sont rares… Alors, tous sont bons à prendre !

AVRIL EN AOÛT

Selon une étude récente de psychosociologie, les hommes seraient plus fumistes que les femmes : ils sont plus nombreux à manifester le sentiment du travail accompli dans des cas où, en réalité, ils l'ont saboté. À en croire les auteurs de l'étude, cette différence a une conséquence majeure dans notre société : leur je-m'en-foutisme aide les hommes à supplanter les femmes dans les hiérarchies. Voici en quoi. Les décisions prises par le détenteur d'un poste élevé lui échappent, parce qu'elles touchent un nombre excessif de gens. Il ne peut pas prévoir tous leurs effets, ni même les évaluer après coup. Il doit donc, sous peine de paralysie, trancher au sabre sans être trop regardant sur les conséquences de ses choix. Cependant, son rôle de haut responsable lui impose de n'éprouver aucune réticence à clamer, démonstration à l'appui, qu'il a fait au mieux à tout point de vue. Dans cet exercice d'esbroufe, les hommes, moins scrupuleux, sont plus à l'aise.

La revue *Entregenre* conclut l'article où elle rend compte de cette étude par une injonction dont nous lui laissons la responsabilité : « Bluffez autant que les hommes, Mesdames, et vous réussirez aussi bien qu'eux ! » ■

138e congrès des sociétés historiques et scientifiques
Rennes
Université Rennes 2 • Campus de Villejean • 22-27 avril 2013

Se nourrir
pratiques et stratégies alimentaires

Le congrès des sociétés historiques et scientifiques se tient chaque année dans une grande ville universitaire. Trait d'union entre la recherche académique et la recherche associative, cette manifestation scientifique – lieu de rencontre privilégié des membres des sociétés savantes – est largement ouverte aux enseignants, aux étudiants, aux élèves des grandes écoles et aux membres des centres de recherche. Elle permet également aux jeunes chercheurs de faire leurs premières communications sous la direction de personnalités scientifiques de premier plan.
Le congrès de Rennes se déroulera du 22 au 27 avril 2013, dans les locaux du Campus de Villejean de l'université Rennes 2, sur le thème « Se nourrir. Pratiques et stratégies alimentaires ».

Pour tout contact
Comité des travaux historiques et scientifiques
138e congrès
110, rue de Grenelle, 75357
Paris cedex 07
tél. : 33 (0) 1 55 95 89 64
fax : 33 (0) 1 55 95 89 66
congres@cths.fr
www.cths.fr

Mission archéologique italienne au Sahara - Univ. de Rome Sapienza

Sur cette peinture rupestre du Sud-Ouest libyen (dont le tracé est représenté ci-dessus), des éleveurs sahariens ont disposé des pots – probablement à lait – près de leur troupeau. De nombreuses peintures similaires suggèrent une exploitation laitière dans la région, mais leur datation précise est impossible. L'analyse de dépôts graisseux sur des tessons de poteries a apporté une preuve plus tangible et précise l'ancienneté de cette activité, qui serait pratiquée depuis au moins 7 000 ans.

Archéologie

Des produits laitiers africains vieux de 7 000 ans

Des traces de lait fermenté ont été mises en évidence sur des poteries libyennes du Ve millénaire avant notre ère. Ce sont les premières preuves d'une exploitation laitière dans l'Afrique préhistorique.

Les Nord-Africains manipulaient peut-être déjà du lait il y a 7 000 ans. C'est ce qu'ont découvert Julie Dunne, de l'Université de Bristol, en Grande-Bretagne, et des collègues de plusieurs pays en analysant la composition des dépôts graisseux de 81 tessons de poteries du Tadrart Acacus dans le Sahara libyen.

En déterminant par spectrométrie de masse la composition moléculaire des gras de ces dépôts, les archéologues ont identifié 29 tessons portant des graisses animales. Parmi eux, 22 dataient de 6 000 à 7 000 ans. En comparant les proportions isotopiques du carbone des graisses de ces tessons avec celles de produits laitiers locaux, ils ont estimé qu'au moins la moitié provenaient d'aliments à base de lait frais, et que les animaux laitiers avaient brouté des plantes variées. À l'époque, la région était verte et fertile.

Cette découverte est importante à plus d'un titre dans le débat sur l'ancienneté de l'exploitation du lait, explique Marie Balasse, chercheuse du CNRS au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris. Alors que l'on connaît depuis plusieurs années les débuts de l'exploitation laitière en Anatolie (il y a 9 000 ans) et en Europe (il y a 8 000 ans), l'étude n'avait pu être menée en Afrique, car les restes d'animaux d'élevage sont rares. Or c'est en étudiant les ossements d'un troupeau que l'on détermine si l'élevage était laitier ou non (en analysant la proportion de jeunes mâles tués et de vieilles bêtes). De belles peintures rupestres sahariennes montrent des scènes de traite, mais leur datation est problématique. La présente étude est la première à mettre en évidence une exploitation laitière en Afrique préhistorique.

Elle expliquerait aussi comment à cette époque, malgré une faible tolérance au lactose (le sucre du lait), les populations nord-africaines ont pu consommer du lait: les produits laitiers sont plus faciles à digérer que le lait frais. Enfin, ces travaux aideront peut-être à comprendre l'expansion de la tolérance au lactose dans le monde, indique M. Balasse. Aujourd'hui, contrairement aux autres mammifères, nombre d'humains – principalement en Europe et dans les populations pastorales d'Afrique – conservent à l'âge adulte la capacité à digérer le lactose, et donc le lait. On suppose que cela est dû en partie à l'ancienneté de la pratique de la consommation laitière. Plusieurs mutations, apparues en divers endroits, notamment en Afrique de l'Est il y a 3 000 à 7 000 ans, et plus tôt en Europe, seraient responsables de cette tolérance. Elle aurait représenté un tel avantage évolutif qu'elles se seraient répandues en quelques milliers d'années en plusieurs endroits. La forte tolérance subsaharienne actuelle serait-elle arrivée par le Sahara ?

→ Marie-Neige Cordonnier

J. Dunne et al., Nature, vol. 486,

© Pour la Science - n° 418 - Août 2012

Astronomie

La collision avec Andromède se confirme

Pendant près d'un siècle, le destin de la Voie lactée et de sa voisine, la galaxie d'Andromède (également connue sous le nom M31), a fait débat. Vont-elles entrer en collision, ou seulement se croiser ? Roeland van der Marel et son équipe de la NASA ont enfin tranché cette question.

De façon générale, les galaxies s'éloignent les unes des autres, car l'Univers est en expansion. Mais pour les groupes de galaxies proches, l'attraction gravitationnelle surpasse l'expansion et finit par les faire entrer en collision. La galaxie d'Andromède se rapproche de nous à 430 000 kilomètres par heure ; toutefois, les incertitudes sur sa direction ne permettaient pas de prédire sa trajectoire avec assez de précision. R. van der Marel et ses collègues ont utilisé les observations du télescope spatial *Hubble* pour mesurer précisément le mouvement de certaines étoiles de la galaxie d'Andromède entre 2003 et 2010. Ils ont ainsi pu déterminer la trajectoire de M31 par rapport à celle de notre : la galaxie d'Andromède fonce bien sur nous.

NASA/ESA/ STScI, Z. Levay, R. van der Marel, T. Hallas, A. Mellinger

Vue d'artiste du ciel dans 3 à 4 milliards d'années : la galaxie d'Andromède (*à gauche*) entre en collision avec la Voie lactée, et commence à tordre le disque de celle-ci.

➜ Sean Bailly

Biologie cellulaire

Des neurones à partir de la peau

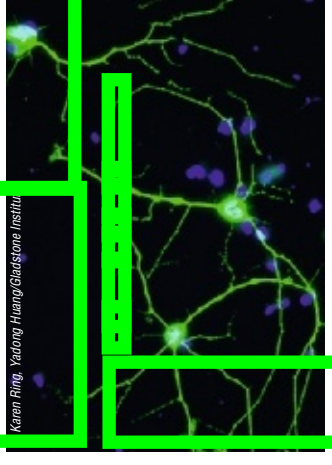
Une cellule de peau et un neurone possèdent la même information génétique, mais elle n'est pas lue de la même façon. On sait aujourd'hui agir sur cette lecture, notamment à l'aide de facteurs de transcription, des protéines qui se fixent sur l'ADN et régulent sa transcription en ARN. Grâce à un seul de ces facteurs, Yadong Huang et Karen Ring, de l'Université de Californie à San Francisco, et leurs collègues ont réussi à obtenir des réseaux de neurones à partir de cellules de peau (des fibroblastes) de souris et d'humains.

Pour transformer les fibroblastes en d'autres cellules, on les place dans un milieu de culture adapté, qui recrée l'environnement physico-chimique des cellules qu'on cherche à obtenir, et on provoque la surexpression des facteurs de transcription responsables de la différenciation visée.

Cette dernière opération consiste à faire produire en masse ces facteurs de transcription par la cellule. L'équipe de Y. Huang n'en a utilisé qu'un seul, nommé Sox2. D'autres équipes avaient également obtenu des neurones, mais elles avaient fait appel à un nombre bien plus important de facteurs de transcription.

En quelques jours, les fibroblastes se sont transformés en cellules souches neurales. Celles-ci se sont divisées, engendrant de nouvelles cellules souches et plusieurs types de neurones. En moins d'un mois, ces neurones se sont associés en réseaux.

Pour vérifier que les cellules reprogrammées ne risquaient pas de dégénérer en cellules cancéreuses, K. Ring les a greffées dans le cerveau d'une souris. Elles s'y sont intégrées sans causer de tumeur. Ces cellules seront peut-être utiles dans la lutte contre les maladies neurodégénératives, telles celles d'Alzheimer et de Parkinson : elles permettront de tester les médicaments élaborés.



Karen Ring, Yadong Huang/Gladstone Institutes

Ces neurones sont issus de la transformation de cellules de peau, ou fibroblastes.

➜ Guillaume Jacquemont

K. Ring et al., Cell Stem Cell, en ligne, 7 juin 2012

En bref

TOMATES SANS GOÛT

Pourquoi les tomates de culture intensive n'ont-elles pas de goût ? Des chercheurs américains ont montré que cela résulte de la sélection de variétés dont les fruits mûrissent au même moment. Or il existe une région du génome qui est impliquée dans ce mûrissement uniforme et qui code deux protéines favorisant la production de sucres et autres agents de saveur et de couleur des tomates. Quand on sélectionne le mûrissement uniforme, on réduit la production de ces protéines et, du coup, la saveur du fruit.

DES TÉRABITS TORSADÉS

Des communications optiques à l'air libre à plus de 2,5 térabits par seconde : Jian Wang et ses collègues, en Californie, ont démontré que des faisceaux laser à lumière torsadée constituent une voie possible pour augmenter la capacité des canaux de communication. Dans les faisceaux de lumière torsadée, apparus dans les années 1990, le front d'onde de l'onde lumineuse est de forme hélicoïdale, ce qui confère au faisceau un moment cinétique orbital. Cette grandeur peut servir aux transmissions de signaux ou à leur multiplexage.

GUERRE DES MÂLES

Des chercheurs autrichiens ont mis en évidence une stratégie radicale adoptée par certaines fourmis mâles de l'espèce *Cardiocondyla obscurior* pour surmonter la concurrence : ces mâles éliminent leurs congénères dès leur sortie du cocon, où se déroule la métamorphose de la larve. Ils détectent à l'odeur les cocons abritant des concurrents, puis attaquent ces derniers ou les marquent chimiquement afin qu'ils soient tués par les ouvrières.

Écologie

Une bombe à moutarde

Lorsque la moutarde vous monte au nez, une réaction chimique est responsable de vos ennuis : la mastication met en contact des glucosinolates (des sucres associés à du soufre) et une enzyme, la myrosinase, dont la réaction libère des composés piquants et amers. Michal Samuni-Blank, du Technion en Israël, et ses collègues ont montré qu'un réséda commun (*Ochradenus baccatus*) du désert du Negueb, en Israël, dont les baies sont consommées par de nombreux vertébrés, profiterait de cette « bombe à moutarde » pour disperser ses semences. Lorsque le fruit est mâché, les glucosinolates, contenus dans la pulpe, et la myrosinase, concentrée dans les graines, entrent en contact et leur réaction libère des substances toxiques. En filmant des rongeurs *Acomys cahirinus*, les biologistes ont observé que l'animal consomme le fruit, mais crache les graines, lesquelles germent alors mieux que celles restées dans le fruit.

Un rongeur *Acomys cahirinus* en train de recracher les graines du réséda *Ochradenus baccatus*.

Michal Samuni-Blank, Technion-Israël

En revanche, si la myrosinase est [illegible] les graines. Ainsi, alertés par les premiers signaux de la bombe à moutarde, ces animaux adaptent leur comportement et passent de prédateurs à disséminateurs.

➜ M.-N. C.

M. Samuni-Blank et al., Current Biology, vol. 22, 14 juin 2012

Astrophysique

Une planète part en fumée

Le satellite *Kepler* utilise la méthode du transit pour découvrir des exoplanètes : le passage d'une planète devant son étoile s'accompagne d'une baisse de luminosité mesurable. L'atténuation est périodique et d'amplitude constante. Ce n'est cependant pas le cas de l'étoile KIC 12557548 : l'atténuation de la luminosité est irrégulière. Pour l'expliquer, Saul Rappaport du MIT et ses collègues suggèrent que la planète à l'origine du transit serait dix fois plus légère que la Terre et perdrait de grandes quantités de poussière, qui formeraient l'équivalent d'une queue de comète.

Selon cette hypothèse, les grains de poussière en suspension dans l'atmosphère sont emportés par du gaz qui échappe du faible champ de pesanteur de la planète. La poussière est alors soumise à la pression de radiation de l'étoile et aux forces de Coriolis, qui modèlent le nuage en une forme similaire [illegible]

Les physiciens estiment que la petite de poussière et de gaz confère à cette planète une durée de vie relativement courte, de l'ordre de 200 millions d'années.

➜ S. B.

S. Rappaport et al., The Astrophysical Journal, 10 juin 2012

Nanotechnologies

Des chaînes de nanocubes auto-assemblées

Andrew Tao et ses collègues, de l'Université de Californie à San Diego, ont mis au point un nouveau procédé de fabrication de structures nanométriques : des nanocubes recouverts de polymères s'assemblent spontanément en différentes configurations selon les conditions de préparation et la nature des polymères.

Des nanocubes d'argent de 80 nanomètres de côté sont placés dans un substrat de polymères. Ils peuvent se mouvoir, s'assembler et former des chaînes au sein du substrat si ce dernier est chauffé ou soumis à un solvant gazeux qui [illegible] polymères. Les cubes se lient entre eux par deux faces, par deux arêtes ou une arête et une face.

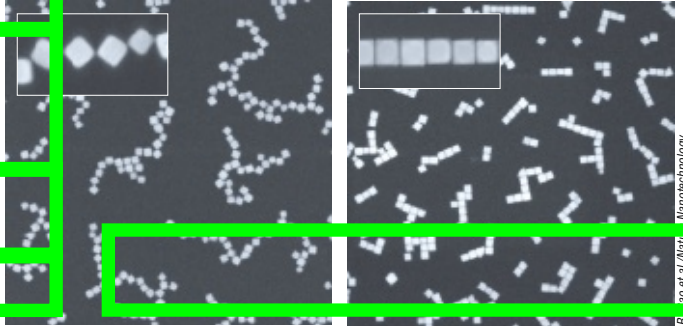
La disposition adoptée n'est pas aléatoire, mais résulte de la compétition entre deux phénomènes : les forces de van der Waals, qui attirent les cubes l'un vers l'autre, et la compressibilité des polymères fixés à leur surface, qui ne peut dépasser une certaine limite. Les chercheurs ont établi que l'utilisation de polymères courts favorise la configuration face-face, alors que de longues molécules conduisent à des assemblages de nanocubes par leurs arêtes.

Après un traitement par un solvant, la configuration privilégiée est le contact arête-arête. Ce n'est cependant pas la situation d'équilibre la plus stable dans le cas de polymères courts. Ainsi, pour les petites chaînes de polyéthylène glycol, 69 pour cent des contacts sont arête-arête ou arête-face. Une étape supplémentaire de chauffage permet de basculer vers la configuration face-face pour plus de 90 pour cent des nanocubes.

Ces assemblages pourraient servir à moduler les propriétés optiques de certaines surfaces. Lorsqu'un nanocube est éclairé par de la lumière, des modes plasmoniques, des oscillations d'électrons, apparaissent en surface, qui sont à l'origine d'un champ électrique dans l'espace entre deux nanocubes. Les propriétés de ce champ, qui dépendent de la forme de la jonction entre les éléments d'argent, déterminent les propriétés optiques de la chaîne de nanocubes. Ainsi, l'assemblage de type arête-arête diffuse de façon privilégiée la lumière à une longueur d'onde comprise entre 760 et 895 nanomètres en fonction de la taille des éléments, alors que les éléments en configuration face-face réfléchissent un spectre lumineux plus large.

➜ S. B.

B. Gao et al., Nature Nanotechnology, en ligne, 10 juin 2012



B. Gao et al./Nat. Nanotechnology

Images prises au microscope électronique à balayage de deux films contenant deux configurations d'assemblage des nanocubes : arête-arête *(à gauche)* et face-face *(à droite)*. Chaque cube mesure 80 nanomètres de côté.

© Pour la Science - n° 418 - Août 2012

Biophysique

Le moustique, un as du vol sous la pluie

Voler sous la pluie est plus que périlleux pour un moustique. Imaginez : la masse qu'il reçoit lorsqu'une goutte le percute équivaut à celle qu'un homme ressentirait si… une orque femelle s'écrasait sur lui. Pourtant, le moustique s'en sort bien, tant qu'il n'est pas trop proche du sol. Comment ? En étudiant [illegible] une fraction de seconde, ont montré Andrew Dickerson et ses collègues de l'Institut de technologie de Géorgie, aux États-Unis.

En analysant à l'aide d'une caméra ultrarapide la trajectoire de moustiques *Anopheles* sous une pluie artificielle, ils ont observé que les gouttes percutaient plus souvent les ailes et les pattes que le corps du moustique. Dans ce cas, l'eau glisse sur ces membres très hydrophobes ; l'insecte tangue ou tourne sur lui-même selon le point d'impact, puis reprend sa route en une dizaine de millisecondes. En revanche, quand une goutte percute le corps du moustique, l'insecte, solidaire de la goutte, adopte sa trajectoire pendant quelques millisecondes, tombant ainsi de 5 à 20 fois sa taille, puis se libère et reprend son vol.

La goutte est peu freinée dans sa course et à peine déformée ; l'insecte est si léger que la quantité de mouvement de la goutte est peu diminuée. En retour, la force de l'impact est tolérable pour le moustique en vol, dont l'exosquelette est assez résistant pour supporter l'accélération que lui impose la goutte : [illegible] fois l'accélération de la pesanteur, soit dix fois plus que celle subie par un pilote d'essai ! Reçue au sol, la même goutte écraserait le moustique…

Comment le moustique se désolidarise-t-il de la goutte ? La question n'est pas élucidée, mais les longues ailes et pattes hydrophobes pourraient jouer un rôle important. Le moustique essaye-t-il par ailleurs d'éviter les gouttes ? L'histoire ne le dit pas…

→ M.-N. C.

A. Dickerson et al., PNAS, en ligne le 4 juin 2012

.fr En vidéo sur www.pourlascience.fr

A. Dickerson et al., PNAS, 2012

Début de l'impact d'une goutte de trois millimètres de diamètre sur un anophèle.

En bref

LA TECHNIQUE DU GUÉPARD

Avec un record de 105 kilomètres par heure, le guépard court deux fois plus vite que le lévrier. Des chercheurs anglais ont analysé sa technique, en le filmant et en enterrant des capteurs de force sous une piste de course. Sa foulée serait plus ample et plus rapide que celle du lévrier, et le contact de la patte avec le sol plus long : en répartissant mieux dans le temps la charge supportée par ses jambes, il exercerait globalement une pression plus intense sur le sol.

GANGS EN ÉQUATIONS

Des travaux de criminologues américains suggèrent que les territoires des gangs urbains obéissent aux mêmes équations (dites de Lotka-Volterra) qui décrivent les populations de lions, de chimpanzés ou d'abeilles. Les chercheurs ont utilisé le modèle proie-prédateur, qui décrit la dynamique de populations en compétition pour des ressources, pour calculer les territoires des gangs de Los Angeles. Ils ont ensuite montré que les violences recensées se produisent sur les frontières des territoires ainsi déterminés.

Astrophysique

Pénurie d'azote dans les nuages interstellaires

L'azote est présent dans l'atmosphère essentiellement sous forme moléculaire (N_2). En est-il de même dans l'espace ? Les travaux de deux équipes bordelaises indiquent que dans les nuages interstellaires denses, l'azote moléculaire serait près de cinq fois moins abondant qu'on ne le pensait auparavant. En revanche, l'ammoniac (NH_3) pourrait être plus abondant.

Dans les nuages moléculaires, denses, froids et peu ionisés, la chimie de l'azote, en particulier, est dominée par des réactions entre espèces neutres. La formation d'azote moléculaire suit deux voies.

La première met en jeu deux réactions successives :

(1) N + OH ⟶ NO + H, puis

(2) N + NO ⟶ N_2 + O.

La seconde [illegible] réactions :

(3) N + CH ⟶ CN + H, puis

(4) N + CN ⟶ N_2 + C.

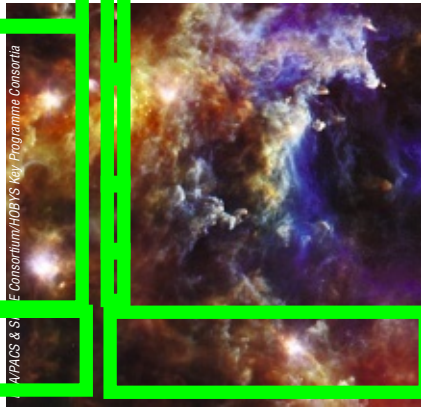
Kevin Hickson et ses collègues de l'Institut des sciences moléculaires de Bordeaux ont montré dans une expérience que la réaction (4) est [illegible] qu'attendu à très basse température (ils l'avaient déjà montré pour les réactions (1) et (2)).

Valentine Wakelam et ses collègues du Laboratoire d'astrophysique de Bordeaux, ont ensuite utilisé ce résultat pour simuler la formation d'azote moléculaire dans les nuages interstellaires denses. Ils ont constaté que celle-ci est beaucoup moins efficace que prévu, seulement 10 à 20 pour cent de l'azote se retrouve sous forme moléculaire, contre 60 à 70 pour cent dans les simulations précédentes.

Dans ce modèle, au lieu de former de l'azote moléculaire en phase gazeuse, les atomes d'azote se fixent à la surface des grains de poussière, où ils interagissent avec l'hydrogène ionisé pour former de l'ammoniac. Ce processus permettrait ainsi de représenter le principal réservoir d'azote dans les nuages interstellaires.

→ Philippe Ribeau-Gésippe

V. Wakelam et al., K. Hickson et al., PNAS, 11 juin 2012



SPIRE/PACS & SPIRE Consortium/HOBYS Key Programme Consortia

Le nuage moléculaire de la Rosette, observé par le télescope spatial infrarouge *Herschel*.

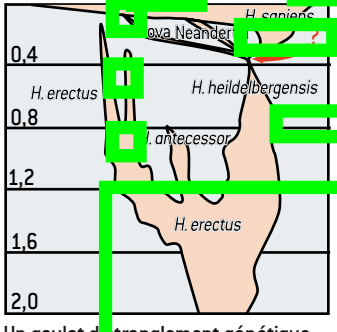
En bref

MÉTÉO EXOPLANÉTAIRE

La météo varie aussi sur les exoplanètes. Alain Lecavelier des Etangs, de l'Institut d'astrophysique de Paris, et ses collègues ont observé deux fois l'exoplanète HD 189733b avec le télescope spatial *Hubble*. « Normale » en avril 2010, elle était accompagnée 16 mois plus tard d'un gigantesque nuage d'hydrogène : la planète perdrait plus de 1 000 tonnes de gaz par seconde ! Une tempête stellaire survenue peu avant est sans doute à l'origine de cette variation météorologique.

DOPAMINE ET SOMMEIL

Le passage de l'éveil au sommeil est déclenché par la mélatonine, une hormone produite par la glande pinéale, située dans le cerveau. La mélatonine est synthétisée lorsqu'une autre hormone, la noradrénaline, se lie à des récepteurs cellulaires spécifiques. Des chercheurs espagnols ont montré que la dopamine, un neurotransmetteur, interagit avec ces récepteurs et inhibe les effets de la noradrénaline. Elle entrave ainsi la synthèse de la mélatonine, et donc le passage de l'éveil au sommeil.



Un goulot d'étranglement génétique se serait produit il y a plus de 200 000 ans, avant que l'homme moderne, celui de Néandertal et celui de Denisova aient divergé. *(chiffres en millions d'années)*.

Paléontologie

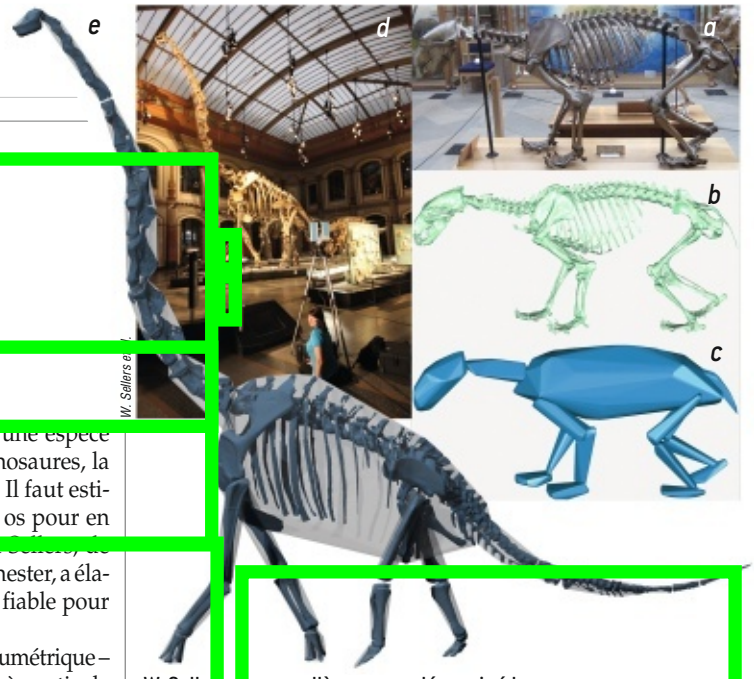
Comment peser un dinosaure ?

Mesurer la masse d'un animal d'une espèce actuelle est simple. Pour les dinosaures, la tâche est bien plus compliquée. Il faut estimer le volume de l'animal à partir des os pour en déduire sa masse. L'équipe de William Sellers, de la Faculté des sciences du vivant à Manchester, a élaboré une méthode rapide et semble-t-il fiable pour peser ces espèces disparues.

Une méthode standard – l'analyse volumétrique – permet d'estimer la masse d'un animal à partir de son squelette. Elle requiert une étude minutieuse de la forme de chaque os pour évaluer le volume de l'animal, qui est ensuite multiplié par une densité corporelle moyenne pour obtenir la masse. Cette méthode donne de bons résultats, mais est très lente.

W. Sellers et ses collègues proposent une nouvelle technique. On commence par faire un relevé tridimensionnel de la forme du squelette au moyen d'un faisceau laser. On obtient un nuage de points modélisant l'ensemble des os. Les points sont classés selon différentes zones du corps, puis un algorithme détermine l'enveloppe convexe – sans creux – minimale nécessaire pour recouvrir les os de chaque partie. On obtient ainsi une estimation du volume de l'animal.

Les zoologistes ont testé leur méthode sur 14 espèces de grands mammifères actuels (l'ours polaire, la girafe, l'éléphant, etc.). Ils ont constaté que cette méthode sous-estime la masse réelle de l'animal de 21 pour cent. Ils ont alors appliqué cette technique à un brachiosaure *(Giraffatitan brancai)* dont le squelette est conservé au Muséum d'histoire naturelle de Berlin. En corrigeant la valeur de 21 pour cent, ils trouvent que la masse de ce dinosaure était de l'ordre de 23 200 tonnes, un résultat très proche de la dernière estimation par la méthode volumétrique, qui était de 23,337 tonnes.



W. Sellers et ses collègues ont déterminé la masse d'un ours polaire (et d'autres animaux) à partir de son squelette *(a)*, modélisé en trois dimensions *(b)* pour reconstituer approximativement son volume *(c)*. Ils ont appliqué cette méthode pour calculer la masse du brachiosaure conservé au Muséum d'histoire naturelle de Berlin (*d* et *e*).

→ S. B.

W. I. Sellers et al., Biology Letters, en ligne le 6 juin 2012

Paléogénétique

L'humanité issue d'un goulot d'étranglement

L'homme moderne, *Homo sapiens*, a deux cousins : l'homme de Neandertal et celui de Denisova. Selon Xiaoxia Wang, de l'Université de Californie, et ses collègues, la neutralisation de deux gènes chez ces trois espèces signerait distinctement un goulot d'étranglement génétique apparu il y a plus de 200 000 ans et dû à des maladies infectieuses.

Les deux gènes en question codent des lectines de type immunoglobuline, aussi connues sous l'acronyme SIGLEC (de l'anglais *Sialic acid recognizing Ig-like lectins*). Ces lectines constituent une famille de récepteurs transmembranaires ayant un rôle immunitaire important, puisqu'elles fixent de nombreux agents pathogènes. Pour cette raison, elles sont aussi la cible de multiples pathogènes (agents de la grippe, de la rage, du [illegible]), qui s'y fixent pour adhérer aux tissus des voies respiratoires, du tube digestif et des appareils urinaire et génital.

L'équipe de X. Wang a remarqué que les récepteurs SIGLEC13, SIGLEC17 qui existent chez les chimpanzés, ont été supprimés au cours de l'évolution chez les ascendants communs des hommes modernes, de Neandertal et de Denisova. Le gène codant SIGLEC13 a disparu, tandis que celui codant SIGLEC17 est devenu inactif. Ce changement génétique, probablement dû à la pression de sélection exercée par des maladies infectieuses, serait postérieur à notre plus récent ancêtre commun avec les chimpanzés, et antérieur au plus récent ancêtre commun des trois espèces humaines. Il s'est produit, selon les calculs des chercheurs, il y a plus de 200 000 ans, juste avant l'apparition de la lignée humaine moderne, à une époque où le nombre de femmes reproductrices passe pour avoir été inférieur à 10 000. En comparaison de la réduction de diversité génétique qui en a résulté, la peste noire de 1347 [illegible] qui a réduit de moitié la population des Amériques après 1492 semble anodins.

→ François Savatier

Xiaoxia Wang et al., PNAS, en ligne le 4 juin 2012

© Pour la Science - n° 418 - Août 2012

Astrophysique

Expulsion d'un trou noir

Lors d'une collision de deux galaxies, que deviennent les trous noirs supermassifs situés au centre de chacune d'elles ? Ils forment un système binaire, puis ils fusionnent, créant alors un trou noir au centre de la nouvelle galaxie. Parfois, lors de la fusion, l'émission asymétrique d'ondes gravitationnelles peut donner une impulsion suffisamment grande pour expulser le trou noir. Dans ce cas, le centre de la galaxie ne serait plus une source intense de rayons X. En revanche, le trou noir emporterait une grande quantité de matière accélérée, qui émettrait des rayons X. Ce scénario théorique restait à être observé. Francesca Civano, du Centre d'astrophysique Harvard-Smithsonian, et ses collègues ont étudié le cas de la galaxie CID-42, distante de quatre milliards d'années-lumière, dont le trou noir supermassif semble avoir été [illegible] de la galaxie de 1 300 kilomètres par seconde. Des observations du télescope spatial à rayons X *Chandra* indiquant que cet élément éjecté est une source de rayons X, comme le prévoit la théorie.

➔ S. B.

The Astrophysical Journal Letters, 10 juin 2012

Génétique

Bonobo : un génome proche

Une équipe internationale conduite par Kay Prüfer, de l'Institut Max Planck d'anthropologie de Leipzig, en Allemagne, a séquencé le génome du bonobo (*Pan paniscus*). Il se distingue de celui de l'homme de 1,3 pour cent. Il faut désormais considérer le bonobo comme aussi proche de l'homme que le chimpanzé. De surcroît, le génome du bonobo est très similaire à celui du chimpanzé (99,6 pour cent d'homologie). Les analyses suggèrent que l'homme aurait divergé des deux autres primates il y a entre cinq et sept millions d'années. L'ancêtre des chimpanzés et celui des bonobos se seraient eux-mêmes séparés il y a deux millions d'années, peut-être lors de la formation du fleuve Congo. Une hypothèse confortée par la répartition géographique des singes : les bonobos vivent exclusivement au Sud du fleuve dans des habitats [illegible] au Nord et à l'Est du fleuve et les forêts équatoriales d'Afrique de l'Ouest.

➔ S. B.

Nature, 13 juin 2012

Archéologie

Maraboutages dans Le Mans gallo-romain

Vous [illegible]-on déjà distribué un tract du genre « Professeur Sory résout tous vos problèmes, même désespérés. Amour, fidélité entre époux... » ? Cela aurait pu vous arriver il y a 1 800 ans à Vindinum (Le Mans) dans le quartier des Jacobins. La fouille préventive qu'y mène l'équipe de Pierre Cherel, de l'Inrap, a mis au jour un site gallo-romain où, autour d'un étang artificiel, se pratiquait une magie populaire.

Ce lieu se trouvait dans un quartier très fréquenté proche du théâtre antique. Outre un bassin artificiel de 1 300 mètres carrés entouré par un mur, il comprend un bâtiment carré de trois mètres de côté. Les archéologues y ont retrouvé de nombreuses offrandes : 287 pièces de monnaies des IIe siècles et, dans la vase du plan d'eau, 400 autres monnaies, environ 200 objets en plomb, bronze, argent et or – bagues, fibules et autres parures.

Mais plus banale est la découverte de tablettes de défixion, c'est-à-dire de formules d'envoûtement inscrites sur une feuille de plomb, ensuite pliée et jetée dans le plan d'eau. Cela confirme une fois de plus que dans les villes de l'Antiquité, des magiciens comparables aux marabouts d'aujourd'hui tenaient commerce d'envoûtements et de désenvoûtements. Sur les tablettes de défixion des thermes de l'ancienne Aquae Sulis (Bath, en Angleterre), par exemple, la formule de l'un de ces spécialistes voue au malheur les voleurs osant dérober… les blanchisseurs ! Celles que l'on vient de retrouver à Vindinum ont ceci de particulier qu'elles sont rédigées dans un langage indéchiffrable. À moins que le Professeur Sory ne nous les décode ?

➔ F. S.

Hervé Paitier, INRAP

Gilles Corvella, INRAP

Un fragment d'une des tablettes de défixion trouvées au Mans *(à gauche)*. Parmi les offrandes retrouvées : une bague en or, une fibule en forme de lapin.

DERNIÈRE minute ...

PRÉCIEUX DÉCHETS ÉLECTRONIQUES

Selon des experts récemment réunis lors d'une conférence à Accra, au Ghana, les déchets électroniques (ordinateurs, téléphones, consoles, etc.) sont 30 à 50 fois plus riches en métaux précieux que les minerais naturels. Plus de 7 500 tonnes d'argent et 320 tonnes d'or entrent chaque année dans la fabrication des appareils électroniques, ce qui représente près de 20 milliards d'euros. Mais moins de 15 pour cent de ces précieux métaux sont récupérés…

ANTARCTIQUE : RÉCHAUFFEMENT AMORTI

Il neige peu pendant les grands froids, de sorte que le réchauffement climatique devrait accroître les chutes de neige en Antarctique. Grâce à des simulations et à des relevés satellitaires effectués lors d'étés chauds, des chercheurs du CNRS ont montré que cela compenserait la baisse de l'albédo [illegible] attendue du fait d'autres phénomènes physiques. Le centre du continent se réchaufferait alors moins que prévu.

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

OPTEZ POUR L'ABONNEMENT 100% NUMÉRIQUE

Pour la Science 12 n° numériques/an

3,75 € par mois seulement !

+ En cadeau le CD *Einstein et les révolutions quantiques*

De la relativité à la physique quantique, Alain Aspect – physicien français et membre de l'Académie des sciences – raconte deux révolutions scientifiques majeures qui continuent de bouleverser notre vision du monde.

CD audio de 75 minutes – Collection « L'Académie raconte les sciences » édité par De Vive Voix – Mars 2013 – Valeur : 9,90 €

Votre magazine sur ordinateur, tablette, smartphone

BULLETIN D'ABONNEMENT

POUR LA SCIENCE

À retourner accompagné de votre règlement dans une enveloppe non affranchie à : Service Abonnements Pour la Science – Libre réponse 50502 – 75281 Paris cedex 06

❶ Ma formule :

❑ **Oui, je m'abonne à l'offre 100 % numérique** pour **3,75 €** par mois ou **45 €** pour 1 an. En cadeau, je reçois le CD ***Einstein et les révolutions quantiques***. J'accède aux versions numériques de *Pour la Science*, soit 12 numéros par an, en créant mon compte sur www.pourlascience.fr.
J'indique ci-dessous un e-mail valide pour recevoir mon numéro d'abonné et activer mon compte.

Mon e-mail (à remplir en majuscule – Obligatoire pour activer mon abonnement numérique)

| | | |

Retour sur des sujets déjà traités dans nos colonnes

LE LAC PAVIN, MONDE ÉTRANGE

Profond de 92 mètres, le lac Pavin, en Auvergne, est le seul lac de France dont les eaux profondes, anaérobies, ne se mélangent pas avec les eaux de surface. En 2010, Télesphore Sime-Ngando et ses collègues de l'Université Blaise Pascal à Clermont-Ferrand nous présentaient ce lac de cratère et les extraordinaires communautés d'archées méthanogènes qui y vivent (voir « Les bactéries du lac Pavin », *Pour la Science*, janvier 2010, http://bit.ly/PLS387_Ngando).

Dans une nouvelle étude (*The ISME Journal*, 30 mai 2012), T. Sime-Ngando et ses collègues se sont intéressés pour la première fois aux virus qui infectent ces archées dans les 40 premiers centimètres au fond du lac, correspondant à quelque 130 ans de sédimentation. La plupart des particules virales découvertes sont de morphologie tête-queue (phages), ce qui est habituel dans les communautés benthiques (d'eau profonde) ; d'autres, de formes plus atypiques (citron, bâtonnet, filament, etc.), sont des parasites des archées que l'on connaissait jusque-là seulement dans les milieux très chauds (fumeurs noirs) ou hypersalins (lagunes salées), mais pas dans l'eau douce tempérée. Les chercheurs ont aussi trouvé de nouvelles formes, tels ces virus cubiques qui n'avaient jamais été observés dans la nature. Il faudra prendre en compte ces communautés virales : elles infectent les archées méthanogènes et, de ce fait, pourraient influer sur la production de méthane, un puissant gaz à effet de serre.

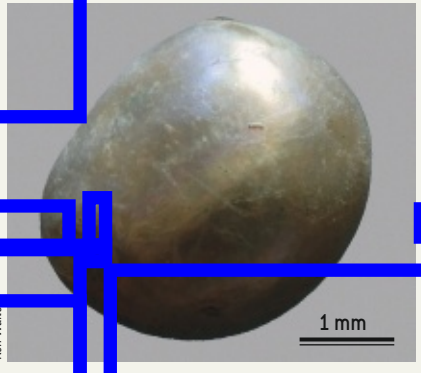
DES LACS DE MÉTHANE TROPICAUX SUR TITAN

La plus grande lune de Saturne, Titan, a des nuages, de la pluie et des lacs, mais à base de méthane et non pas d'eau. Sushil Atreya l'expliquait en 2007 et indiquait que l'on hésitait à attribuer au méthane une source biologique ou géologique (voir « Le méthane, signe de vie sur Mars et Titan », *Pour la Science*, juin 2007, http://bit.ly/PLS356_Atreya). Or Caitlin Griffith, de l'Université d'Arizona, et des collègues viennent de mettre en évidence la présence probable de lacs tropicaux sur Titan (*Nature*, 14 juin 2012). Les nuages empêchent normalement la prise d'images de la surface de Titan ; mais au sein d'étroites fenêtres spectrales dans le domaine infrarouge, l'atmosphère de cette lune est suffisamment transparente pour que le spectromètre de la sonde spatiale *Cassini* puisse cartographier la surface. Les chercheurs ont ainsi relevé une région sombre mesurant environ 60 sur 40 kilomètres, qui avait déjà été repérée en 2004. L'étude des transferts du rayonnement sur cette surface indique qu'il s'agit d'un lac de méthane liquide qui ne disparaît pas pendant la saison sèche tropicale, quand les pluies de méthane sont absentes. Les chercheurs ont aussi identifié quatre autres zones similaires, sans doute également des lacs tropicaux de méthane.

Comme les lacs d'oasis du Sahara, que l'évaporation assécherait si les aquifères ne les alimentaient, le méthane des lacs titaniens est probablement d'origine souterraine. Par ailleurs, comme les ultraviolets décomposent le méthane atmosphérique en 10 à 100 millions d'années, les calculs indiquent qu'une production constante de 0,6 gramme de méthane par mètre carré et par an est nécessaire pour expliquer la météorologie à base de méthane de Titan, et notamment ses lacs tropicaux. Cette production de méthane est-elle due à un regain d'activité géologique de Titan ? Et ce regain éventuel est-il lié au refroidissement de cette lune de Saturne et à la lente évolution de son orbite, comme des planétologues l'ont suggéré ? D'autres observations seront nécessaires pour répondre à ces questions.

UN ORIENT DES PLUS ANCIENS

Le lustre et l'orient, c'est-à-dire les façons dont une perle réfléchit et diffuse la lumière, mesurent sa qualité, indiquait Christian Milet (voir « Les perles, de l'huître au bijou », *Pour la Science*, janvier 2008, http://bit.ly/PLS363_Milet). De quel orient et de quel lustre sont les très anciennes perles que Vincent Charpentier et son équipe du Laboratoire Archéo-



Ken Walde

l'Université de Nanterre, viennent de découvrir dans l'émirat d'Oumm al Qaïwaïn ? Même si certaines d'entre elles ont conservé un beau lustre, les chercheurs n'ont pas mesuré ces propriétés optiques ; au lieu de cela, ils les ont datées au radiocarbone, découvrant ainsi une perle pêchée il y a 7 500 ans (*Arabian Archaeology and Epigraphy*, mai 2012).

Alors que l'on pensait que la pêche à l'huître perlière avait commencé il y a 5 000 ans au Japon, il s'avère qu'elle se pratiquait déjà 2 500 ans plus tôt dans les dangereux récifs de la côte arabe du golfe Persique. La nacre des huîtres perlières était essentielle aux gens de la région : c'est à partir des grandes valves de l'espèce *Pinctada margaritifera* qu'ils façonnaient les hameçons dont ils se servaient pour capturer petits et grands poissons (des thons !). Peut-on imaginer que c'est par la recherche de cette matière première vitale pour eux qu'étaient les valves d'huîtres que les hommes néolithiques d'Oumm al Qaïwaïn en sont venus à connaître les perles d'huître ? Si c'est le cas, l'immense industrie perlière d'aujourd'hui aurait pour origine une minuscule industrie néolithique vouée aux hameçons…

François Savatier

POINT DE VUE

Jeux Olympiques : une redéfinition inappropriée de l'athlète féminine

Seules les femmes produisant une quantité d'hormones mâles inférieure à celles enregistrées chez les hommes pourront participer aux jeux Olympiques de Londres. Au nom de quoi ?

Anaïs B[illegible]

Pour les jeux Olympiques de Londres, en juillet 2012, la commission exécutive du Comité international olympique (CIO) a prévu une nouvelle réglementation. Elle a décidé de définir les conditions d'admissibilité des athlètes féminines présentant une production excessive d'hormones androgènes, en particulier de testostérone, ou hyperandrogénie. La législation sportive condamne déjà depuis plusieurs dizaines d'années le dopage aux hormones, c'est-à-dire l'utilisation d'hormones exogènes pour augmenter ses capacités physiques. Cette fois cependant, la réglementation envisagée concerne non pas le dopage aux hormones, mais la quantité d'hormones produites par le corps (hormones endogènes).

C'est l'exclusion de Caster Semenya, coureuse sud-africaine du 800 mètres, qui a suscité la prise de conscience dont sont issus les nouveaux règlements. Cette athlète a remporté la finale du 800 mètres féminin en 2009 aux championnats du monde d'athlétisme de Berlin. Elle a défrayé la chronique, non seulement à cause du rythme qu'elle impose, mais également parce que des « doutes visuels » ont été émis quant à son appartenance au genre féminin. Suite à sa victoire, la championne a subi des tests qui ont entraîné sa suspension jusqu'à ce qu'une commission d'experts statue sur son cas. Les examens pratiqués ont confirmé qu'elle était de sexe féminin, mais qu'elle présentait une hyperandrogénie qui lui avantageait par rapport à ses concurrentes.

Ainsi, selon l'un des premiers principes de cette nouvelle réglementation, « une personne reconnue en droit comme étant de sexe féminin devrait être habilitée à concourir dans des compétitions féminines pour autant que ses niveaux d'androgènes soient inférieurs aux valeurs enregistrées chez les hommes [...] ou, s'ils se situent dans la fourchette en question, que sa résistance aux androgènes soit telle qu'elle n'en retire aucun avantage pour la compétition. » En d'autres termes, si elle produit trop d'androgènes, ceux-ci ne doivent pas augmenter sa masse musculaire – et par conséquent ses performances – par rapport à la moyenne féminine.

A-T-ON JAMAIS ENVISAGÉ qu'un homme qui produirait « trop » de testostérone soit interdit de compétition ?

Toute athlète qui ne serait pas autorisée à concourir devra être informée des conditions à remplir pour être à nouveau admissible. Celles qui ne parviendraient pas à se conformer à l'un des éléments de la procédure ou refuseraient de s'y soumettre ne seront pas admises à participer. Ce même texte précise enfin que les nouvelles dispositions visent à respecter l'esprit de la classification hommes/femmes tout en garantissant l'équité et l'intégrité des compétitions féminines.

Si ce projet entre en vigueur, les femmes présentant une hyperandrogénie auront à corriger leur production d'androgènes en en réduisant artificiellement les concentrations sanguines (par traitement aux hormones féminines ou par chirurgie, si la personne présente des testicules intra-abdominaux) pour participer aux jeux Olympiques de Londres. Autrement dit, encore au XXIe siècle, l'activité physique et sportive des femmes ne doit pas brouiller la stricte séparation des sexes par les performances, les records et les morphologies.

Depuis 1966, des tests de féminité, transformés aussi depuis quelques années « contrôles de genre », ont été imposés aux sportives afin d'empêcher les hommes de concourir chez les femmes et de calmer les soupçons quant au sexe de certaines sportives. Leur suppression, depuis les jeux Olympiques de Sydney en 2000, a été toute symbolique, car ils restent utilisables en cas de « soupçons visuels » : la volonté de contrôler le sexe des athlètes féminines n'a pas quitté les instances dirigeantes. Et à nouveau, les sportives risquent d'être sommées aux jeux Olympiques de Londres de faire la preuve de leur « sexe » pour être inscrites aux compétitions, et c'est la production d'hormones sexuelles qui sera au centre des préoccupations.

Or la testostérone est un marqueur peu fiable. Les concentrations moyennes de testostérone dans le sang sont certes nettement différentes chez l'homme et la femme. Cependant, elles varient notablement selon les jours, la période de la vie, le statut social et, surtout, l'intensité de la pratique sportive

© Pour la Science - n° 418 - Août 2012

de chacun·e). La testostérone n'est d'ailleurs pas la « molécule de l'athlétisme ». En atteste le fait que les femmes dont les tissus musculaires sont peu sensibles à la testostérone sont actuellement surreprésentées chez les athlètes de haut niveau.

Enfin, le nouveau règlement manque de transparence. Quels types d'expertises et de preuves sont mis en place ? Et quelles seront les concentrations d'androgènes limites à ne pas dépasser pour une femme ? En outre, a-t-on jamais envisagé qu'un homme qui produirait « trop » de testostérone, ou plus que ses concurrents, soit interdit de compétition tant qu'il n'a pas suivi un traitement visant à ramener sa production à un niveau moyen acceptable ? Dès lors, pourquoi la concentration hormonale naturelle de certaines athlètes féminines devrait-elle être artificiellement diminuée ?

Pour légitimer ces nouvelles réglementations, les dirigeants sportifs se cachent depuis longtemps derrière l'argument de la protection de la santé des athlètes féminines. Or les traitements prévus afin de réguler les concentrations hormonales des athlètes féminines peuvent avoir des conséquences néfastes pour la santé des athlètes, tels maux de tête, fatigue et nausées…

Ainsi, au-delà d'un certain seuil, la sécrétion de testostérone des organismes féminins bouscule l'ordre sexué historiquement et médicalement défini. Certes, la prise de testostérone (dopage) par les athlètes menace l'équité essentielle à la logique de la compétition. Mais les athlètes peuvent parfois produire plus de testostérone que la moyenne, et bénéficier en conséquence d'une supériorité physique ; cette « inégalité » n'est-elle pas aussi « naturelle », par exemple, que le rythme cardiaque plus lent de bien des coureurs d'exception ou que la faible production d'acide lactique de certains nageurs ? Il existe des avantages et des inconvénients innés que le classement par sexe, taille, âge, etc., ne suffit pas à niveler. Au nom de quoi pénaliser une différence « naturelle » et pas l'autre ? Toutes ces interrogations semblent oublier que l'égalité génétique n'existe pas.

Anaïs BOHUON est maître de conférences à l'UFR STAPS de l'Université Paris-Sud 11.

A. Bohuon, **Le test de féminité dans les compétitions sportives : une histoire classée X ?**, Éditions iXe, 2012.

K. Karkazis *et al.*, **Out of bounds ? A critique of the new policies on hyperandrogenism in elite female athletes**, *The Am. J. of Bioethics*, vol. 12, n° 7, pp. 3-16, 2012.

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

DÉVELOPPEMENT DURABLE

Barrages : ces petits qui protègent les grands

La construction de petits barrages permet de créer de multiples oasis artificielles dans les régions arides, et limite l'envasement des grands barrages en aval.

Jean ALBERGEL

Barrage des Trois-Gorges, en Chine, sur le fleuve Yangtse : 185 mètres de hauteur, 2,3 kilomètres de longueur, réservoir d'eau de 39,3 milliards de mètres cubes. Barrage d'Itaipu, entre le Brésil et le Paraguay, sur la rivière Paraná : 196 mètres de hauteur, 7,9 kilomètres de longueur, réservoir de 29 milliards de mètres cubes ; sa construction a nécessité une quantité de fer et d'acier 380 fois supérieure à celle de la tour Eiffel. L'heure serait-elle au gigantisme pour les ouvrages hydrauliques ?

En partie seulement. À côté de ces géants se développent de « petits barrages », c'est-à-dire des barrages dont la hauteur de digue est inférieure à 15 mètres, selon la classification de la Commission internationale des grands barrages. Dotés d'un réservoir de quelques dizaines de milliers à un million de mètres cubes, ils sont un élément clef de l'aménagement des cours d'eau.

Les petits barrages sont utilisés depuis l'Antiquité. Les Égyptiens en auraient construit dès le III^e millénaire avant notre ère. En Syrie, un barrage édifié sous le règne de Sethi 1^er (1319-1304 avant notre ère) est toujours en service ; haut de six mètres et long de 2 000 mètres, il est situé près de Homs, sur l'oued Nahr El Asi (les oueds sont des cours d'eau très irréguliers, alternant entre crues et assèchement). Nombre de ces ouvrages ont été bâtis par les civilisations mésopotamienne, chinoise, romaine… Plus récemment, ils se sont multipliés en Europe et dans le reste du monde respectivement au début et dans la seconde moitié du XX^e siècle. On en compte aujourd'hui plus de 700 000.

Les petits barrages créent de multiples oasis artificielles, réparties sur le territoire et précieuses sous des climats arides ou semi-arides. Depuis les années 1970, les pays d'Afrique du Nord et du Moyen-Orient se sont lancés dans de grands programmes de construction de ces barrages. En Tunisie, par exemple, plus d'un millier d'entre eux ont été réalisés dans les années 1990. Leur construction est relativement bon marché : de l'ordre de [illegible] (en comparaison, le barrage des Trois-Gorges

a coûté plus de 20 milliards d'euros). Cela s'explique par leur petite taille et par leur conception simple : en terre ou en béton, ils sont équipés d'un déversoir rustique, parfois d'une vanne de fond.

Leurs réserves d'eau servent à l'irrigation, la pêche, la recharge des nappes phréatiques (l'eau s'infiltre en partie dans le sol) et au bétail. Elles constituent aussi des refuges pour de nombreuses espèces végétales et animales, notamment d'oiseaux. Des centres de loisir se développent parfois autour des lacs créés. En revanche, les petits barrages sont souvent peu adaptés à la production d'électricité, qui nécessite une forte pente en raison du faible volume d'eau s'écoulant par le déversoir.

Certains d'entre eux sont utilisés pour l'approvisionnement en eau potable. L'eau doit être traitée et sa qualité contrôlée. En effet, la pollution et la prolifération de cyanobactéries, communes dans ce type d'environnement, sont nocives : au Brésil, une telle prolifération a entraîné la mort de 75 personnes en 1996. En outre, les réservoirs favorisent parfois la transmission de maladies, en abritant de nombreux insectes vecteurs.

Les impacts négatifs des petits barrages, sur les plans environnemental et social, sont bien inférieurs à ceux des grands, qui nécessitent le déplacement de populations. Leur principal inconvénient est le risque d'inondation qu'ils font courir aux territoires situés en aval. En effet, les digues se rompent bien plus souvent que celles des grands barrages, car les contraintes maximales imposées par les normes de sécurité sont moins exigeantes : par exemple, les petits barrages sont dimensionnés pour résister aux crues décennales ou cinquantenales, tandis qu'un grand supporte les plus grandes crues décamillénales, survenant en moyenne tous les dix mille ans). En moyenne, quelques dizaines de petits barrages s'effondrent dans le monde chaque année. Des inondations importantes peuvent en résulter, notamment si une série de petits barrages subit des ruptures de digue en cascade.

Notons que même si les impacts et le coût des petits barrages sont limités, nombre d'experts dénoncent un manque de rigueur fréquent dans leur construction. Les coûts sont ainsi sous-évalués, les impacts environnementaux et sociaux mal cernés, les paramètres hydrologiques calculés avec une précision insuffisante.

Tout aménagement, ce sont les sites de construction et le débit du cours d'eau qui imposent les dimensions d'un barrage, mais

L'ENVASEMENT DES RÉSERVOIRS des barrages causerait la perte de un pourcent du volume d'eau disponible dans le monde par an.

on peut choisir entre plusieurs petits et un plus grand en choisissant correctement les sites. En bref, faut-il privilégier les grands ou les petits barrages ? Ils sont complémentaires. Les petits barrages préservent de l'envasement les réservoirs des grands, en retenant les sédiments. Les sites où un grand barrage est protégé par plusieurs petits en amont sont assez fréquents. C'est le cas par exemple pour le plus grand barrage du Maroc, celui d'Al Wahda, d'une hauteur de 88 mètres.

Toutes catégories de barrages confondues, l'envasement des réservoirs causerait la perte de un pour cent du volume d'eau disponible dans le monde chaque année. Récupérer cette quantité d'eau d'une autre façon – par exemple en dessalant de l'eau de mer et en l'acheminant par des camions citernes – coûterait quelque 130 milliards d'euros. Bien sûr, les petits barrages sont aussi victimes de l'envasement, mais lorsque leur réservoir est comblé, il suffit de les abandonner et d'en construire d'autres un peu plus loin – une méthode difficilement envisageable pour les grands barrages, tels ceux des Trois-Gorges !

Jean ALBERGEL est chercheur à l'Institut pour la recherche et le développement (IRD).

Collectif, *L'eau au cœur de la science*, [illegible] éditions, 2012.

J. Albergel *et al.*, ***Petits barrages et lacs collinaires, aménagements originaux de conservation des eaux et de protection des infrastructures aval,*** *Science et changements planétaires / Sécheresse*, vol. 15, n° 1, pp. 78-86, 2004.

© Pour la Science - n° 418 - Août 2012

CASDEN, la banque de l'Éducation, de la Recherche et de la Culture

Solidarité

Proximité

Engagement

Confiance

casden

BANQUE POPULAIRE

Humaine et contemporaine

notre identité reflète nos valeurs

Un réseau de Chargées de Relation Enseignement Supérieur et Recherche à votre disposition

■ Coordonnées disponibles sur www.casden.fr

VRAI OU FAUX

Un événement cosmique survenu il y a 10 milliards d'années est-il à 10 milliards d'années-lumière ?

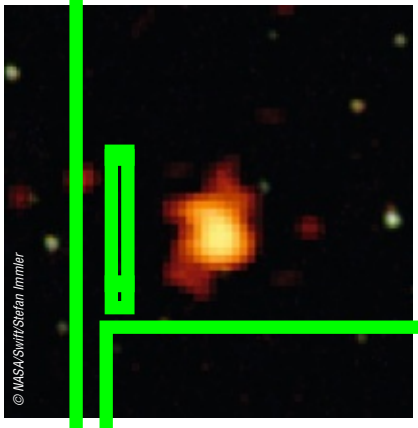
Non. Entre le moment où l'événement cosmique s'est produit et le moment où sa lumière arrive sur Terre, les longueurs ont augmenté du fait de l'expansion de l'Univers. Le lieu d'émission s'est donc éloigné.

Alain RIAZUELO

Regarder loin, c'est regarder dans le passé : cette phrase, bien connue des astronomes, signifie que le rayonnement d'un objet lointain ne nous parvient pas instantanément. Dès lors, la lumière que l'on reçoit a été émise il y a un certain temps et nous renseigne sur l'état passé de l'objet observé. Examinons le lien entre l'ancienneté d'un événement, en années, et son éloignement, en années-lumière (rappelons qu'une année-lumière est la distance parcourue par la lumière en une année, à raison de 300 000 kilomètres par seconde).

Dans un Univers en expansion, toutes les distances augmentent, à l'instar des distances séparant des taches sur un ballon que l'on gonfle. C'est aussi vrai pour les longueurs d'onde. Depuis les années 1990, on sait que l'expansion accélère. Pour l'expliquer, on a postulé l'existence d'une « énergie sombre », dont on ignore la nature et qui emplirait l'Univers.

Comment estime-t-on l'âge et l'éloignement d'un événement cosmologique observé aujourd'hui ? Prenons l'exemple du sursaut gamma GRB 080916C (les sursauts gamma sont de soudaines bouffées de rayons gamma, causées par exemple par la mort violente d'une étoile massive, et qui durent d'une fraction de seconde à quelques minutes). On connaît les longueurs d'onde du rayonnement émis. On mesure le décalage vers le rouge de la lumière reçue (le *redshift*, noté z), c'est-à-dire l'allongement de la longueur d'onde. On en déduit dans quelle mesure les distances se sont étirées entre l'époque du sursaut gamma et son observation. Au moment du sursaut GRB 080916C, par exemple, les distances étaient 5,25 fois plus petites qu'aujourd'hui.



LE SURSAUT GAMMA GRB 080916C est survenu il y a 12,2 milliards d'années. Aujourd'hui, l'endroit où il s'est produit est éloigné de 24,37 milliards d'années-lumière.

On connaît par ailleurs l'histoire de l'expansion de l'Univers, principalement grâce à l'étude du fond diffus cosmologique (un rayonnement micro-onde observé dans toutes les directions). On dispose ainsi de deux données : l'allongement des distances depuis le sursaut gamma (grâce au décalage vers le rouge) et la fonction décrivant l'allongement des distances au cours du temps. On en déduit l'époque d'émission du rayonnement observé. Ainsi, le sursaut gamma GRB 080916C s'est produit il y a 12,2 milliards d'années, quand l'Univers était âgé de 1,45 milliard d'années. À cette époque, notre Galaxie n'existait pas encore.

Or l'« éloignement temporel » est souvent converti de façon abusive en distance, par simple multiplication de cette valeur par celle de la vitesse de la lumière. En d'autres termes, l'ancienneté, exprimée en milliards d'années, est transformée en distance, exprimée en milliards d'années-lumière, soit 12,2 milliards d'années-lumière dans notre exemple...

Pourtant, du fait de l'expansion de l'Univers, les distances ont considérablement augmenté entre l'époque du sursaut gamma et aujourd'hui. Si la lumière a effectivement parcouru 12,2 milliards d'années-lumière depuis son émission, ce chiffre ne correspond ni à la distance (inférieure) qui séparait alors le lieu du sursaut de celui où naîtrait plus tard notre Galaxie, ni à la distance (supérieure) qui sépare aujourd'hui le lieu du sursaut de notre Galaxie. Les calculs indiquent que ces deux distances sont respectivement de 4,65 et 24,37 milliards d'années-lumière. Chacune de ces trois distances (4,65, 12,2 et 24,37 milliards d'années-lumière) est exacte, pourvu que l'on précise ce qu'elle représente.

Alain RIAZUELO est astrophysicien à l'Institut d'astrophysique de Paris.

© Pour la Science - n° 418 - Août 2012

Chercheurs d'histoires englouties

Les flûtes de l'Empereur *par Pierre Villié, page 20* • **La pinque provençale redécouverte** *par Pierre Villié, page 26* • **L'énigmatique Carron Wreck** *par François Gendron, Simon Spooner et Florence Prudhomme, page 34*

L'époque moderne, c'est-à-dire la période allant de 1492 à 1789, a eu sa marine, qui était à voile. L'archéologie subaquatique de cette marine commence sans doute en 1836, quand deux Britanniques, les frères Deane, explorent l'épave du *Mary Rose*, naufragé en 1545. Ils la dessinent et exposent quelques canons. Leur objectif est cependant avant tout de démontrer l'efficacité de leur technique de récupération du matériel perdu en mer. Quatre ans plus tard, Augustin Sale fait paraître le premier ouvrage traitant d'archéologie navale, mais en se fondant sur l'iconographie et les textes anciens. Cette démarche suscite l'intérêt des érudits et des chercheurs, qui vont ensuite rechercher en situation des éléments archéologiques. Puis, avec l'invention du scaphandre autonome, les fouilles se multiplient, mais se résument à [illegible] sor : on ne plonge pas encore pour le bois, c'est-à-dire pour restituer les architectures et les techniques navales du passé !

Tout a changé aujourd'hui, puisque les plongeurs sont devenus de véritables archéologues ou les archéologues des plongeurs. Ainsi, Pierre Villié et ses collègues plongent depuis 30 ans pour découvrir des épaves anciennes et restituer ensuite leur forme originelle. Loin de s'intéresser seulement aux forteresses flottantes, ils se sont aussi penchés sur les chasse-marée et autres navires de transport sans prestige mais qui assuraient le commerce et l'intendance. Humbles navires, ces pinques méditerranéennes et autres flûtes militaires françaises ont été très peu représentées, alors qu'elles ont sillonné de très nombreuses mers. Après avoir retrouvé et fouillé certains de ces navires, l'auteur a patiemment établi leurs plans et pu ainsi restituer les savoir-faire que se transmettaient les charpentiers de marine de génération en génération.

Quant à François Gendron, Simon Spooner et Florence Prudhomme, ils cherchent avant tout à restituer la vocation des navires. Malgré leur expérience, l'identité d'un navire retrouvé près d'une plage de la République dominicaine les a longtemps déconcertés : dotée d'une coque américaine et de canons écossais, il était équipé de matériel militaire français… La fouille des archives leur a heureusement livré son histoire, achevée par le combat mené par un équipage français qui, plutôt que de livrer des secrets à l'ennemi anglais, a détruit son navire.

© Pour la Science - n° 418 - Août 2012

Les flûtes de l'Empereur

Pierre Villié

Les cargos des marines royales et impériales descendent d'un type de vaisseau hollandais répandu, mais méconnu : la flûte. La fouille de quatre flûtes françaises coulées par les Anglais a mis un terme à cette ignorance.

L'ESSENTIEL

- Les flûtes sont un type de navire [illegible] d'origine hollandaise.
- De formes rondes, elles étaient dessinées pour optimiser le volume de charge [illegible] minimiser [illegible] du pont.
- Très utilisées comme navires de transport par la marine royale, puis la marine impériale, elles ont été [illegible] et coulées dans toutes les mers de France.
- La fouille de quatre flûtes françaises a révélé nombre de leurs caractéristiques oubliées.

© Yves Reymond

Le hasard fait [illegible]. Jamais je n'avais pensé consacrer des dizaines d'années aux flûtes quand, en ce jour de début des années 1980, j'ai plongé pour la première fois sur l'épave de *La Girafe* par 20 mètres de fond. Cette corvette de 1809 fut perdue à la bataille de Sagone, qui eut lieu en 1811 entre les marines anglaise et napoléonienne. Sur le fond rien n'évoque un navire. Un herbier dense, des canons presque informes, deux dalles concrétionnaires que j'identifie comme étant le lest du bâtiment. Pas de mâts qui se dressent, pas de figure de proue à moitié ensablée, pas de monticules… L'épave est plate. Nous sommes très éloignés de l'image que se fait le profane d'une épave historique. Seules dépassent du sable des masses ferreuses. Le bois a été dévoré, et il faut beaucoup de perspicacité pour déceler la présence d'un bateau de 40 mètres embarquant 100 hommes et armé de 20 canons d'une tonne chacun.

Toutefois, pour moi, la réalité est là : cette épave me donne la possibilité d'analyser, de découper, de mesurer une coque de grand voilier ou du moins ce qu'il en [illegible] doute vais-je pouvoir confirmer ou au contraire remettre en cause les standards issus des ouvrages du XVIIIe siècle, mais jamais vérifiés sur un vestige grandeur nature.

Un vaste champ exploratoire s'offre à moi. Je suis en effet persuadé que les charpentiers ne construisaient pas comme le voudrait la théorie maintes et maintes fois reprise. Ces hypothèses tirées des textes passent pour un acquis irréfutable, ce qui pousse les autorités archéologiques à interdire tout projet visant à étudier la seule structure des navires. Je me doute alors que je vais consacrer ma vie à l'étude des coques de la période allant de 1700 à 1820. Leur fascinante histoire va me faire parcourir le monde, rencontrer des gens extraordinaires et me guider au fil des ans.

Quand je fais ma première demande de fouille en bonne et due forme, j'ai 26 ans. Je suis alors le plus jeune titulaire d'une autorisation de fouille. Dans les cartons des archives de la marine nationale, j'apprends que la corvette *La Girafe* est devenue la flûte *La Girafe*, un navire de charge, sorte de cargo ravitailleur d'escadre que

© Pour la Science - n° 418 - Août 2012

les marins de la fin du XVIIIe désignent sous l'appellation « de transport ». La documentation s'amoncelle, je connais vite tout du commandant de *La Girafe* et de la bataille où elle a disparu, mais, s'agissant de construction navale, rien de plus que les fondamentaux.

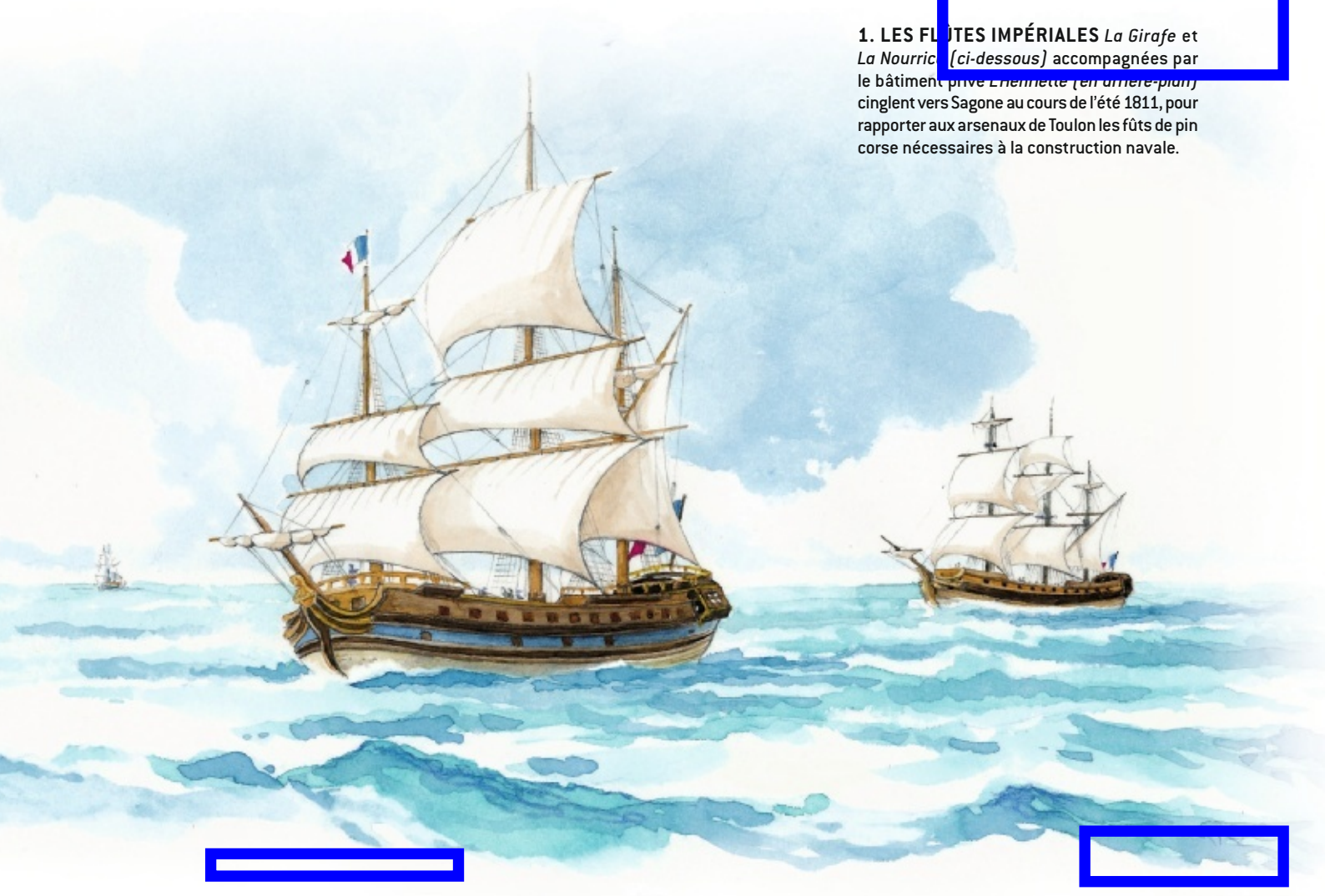
La flûte ou *fluit* en néerlandais est à l'origine un bâtiment bien différent de *La Girafe*. Il est haut sur l'eau et sa coque est très renflée par rapport au pont. Le terme *flûte* provient indéniablement de sa forme allongée, car il ne respecte pas les règles de construction héritées du Moyen Âge, qui imposaient que la longueur d'un navire soit égale à trois fois sa largeur. La flûte rompt avec ce principe puisque sa longueur compte quatre à cinq largeurs. L'objectif est de faire rentrer du fret et donc de favoriser la capacité de charge. Les armateurs des Provinces Unies (les Pays-Bas) du XVIIe siècle ont inventé un nouveau genre de bateau, qui va faire école et se transformer pendant 200 ans, ce qui le rapprochera des standards employés pour les vaisseaux, frégates et corvettes, en un mot pour la construction des navires militaires. Le terme *flûte* finira même par être donné à des vaisseaux à bord desquels on réduit l'artillerie pour favoriser la charge [illegible]

Une coque de flûte

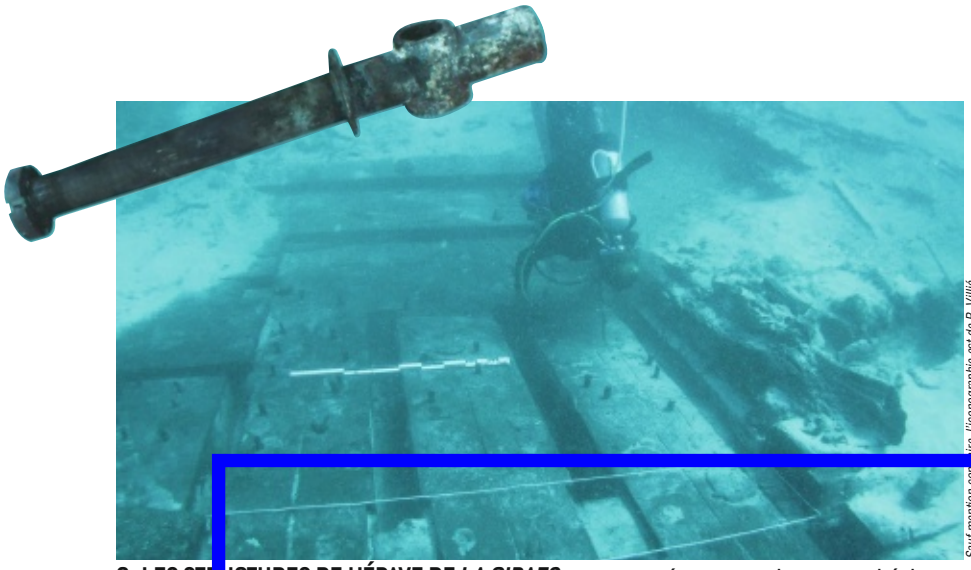
C'est pourquoi étudier une coque de flûte des années 1790-1820 équivaut à travailler sur une frégate de la même période. Les techniques de charpente sont les mêmes, ainsi que les essences mises en œuvre. Seuls les plans de formes des coques diffèrent, puisque les frégates sont plus effilées que les flûtes commerciales.

Revenons à cette époque où je débute. Un simple intitulé, tel que « Étude d'une coque du premier Empire », suffisait alors à obtenir une autorisation de fouille, tandis qu'aujourd'hui, il faut rédiger un plan de prévention, avoir des plongeurs répondant à des critères techniques stricts, établir une problématique de plusieurs dizaines de pages…

L'autorisation en main, j'entreprends d'abord de mesurer et de photographier tout ce qu'il est possible de fixer en images et en chiffres. Cette démarche quelque peu extrême me donnait l'impression de combler mes lacunes en construction navale. Le moindre bois sorti du sable est dessiné avec la plus grande rigueur, démarche que je continue à pratiquer aujourd'hui. Au terme de deux campagnes de quatre semaines avec l'aide d'aînés, les plans, les dessins des détails et les clichés réalisés sont soumis aux sommités de l'art de l'époque. Parmi les trouvailles, des marques de couleurs au fer rouge sur les bois, quelques boucles et boutons d'uniformes, et surtout un remarquable robinet de cuivre en bronze (le premier jamais découvert). Seul le directeur du Musée de la marine de Paris reconnaît l'intérêt de cette pièce, les seuls exemplaires connus



1. LES FLÛTES IMPÉRIALES *La Girafe* et *La Nourrice (ci-dessous)* accompagnées par le bâtiment privé *L'Henriette (en arrière-plan)* cinglent vers Sagone au cours de l'été 1811, pour rapporter aux arsenaux de Toulon les fûts de pin corse nécessaires à la construction navale.



Sauf mention contraire, l'iconographie est de P. Villié

2. LES STRUCTURES DE L'ÉPAVE DE *LA GIRAFE* sont mesurées par un plongeur archéologue, afin de reconstituer les formes appliquées par les charpentiers. Ainsi, les espacements entre gournables (de grosses chevilles de chêne) ont pu être mesurés. Un robinet de coque en bronze a été mis au jour *(en haut à gauche)* : ce dispositif, qui servait à faire entrer de l'eau de mer pour nettoyer la cale, n'avait encore jamais été retrouvé dans une épave.

se trouvait en Irlande. Quant aux dessins et photographies de charpente que nous publions alors, ils ne suscitent que peu d'attention, à l'exception d'un détail qui me surprend : situés autour du pied du grand mât, les logements des quatre crépines, c'est-à-dire des quatre ouvertures aspirantes des pompes, sont carrés alors que la norme qu'indiquent les multiples maquettes dites d'arsenal est ronde *(voir la figure 6)*. Ce détail est alors l'élément qui me confirme qu'il y a un intérêt à s'occuper de cette marine soi-disant bien connue, mais qui ne l'est pas.

À l'époque, je m'intéresse à la marine des grands voiliers dans sa globalité et pas encore spécifiquement aux flûtes. En 1989, après un travail d'archives de plusieurs mois à la recherche d'un projet, l'épave du *Ça Ira* est découverte par 15 mètres de fond dans le golfe de Saint-Florent en Corse. C'est un vaisseau de 80 canons construit à Brest en 1781, qui, avec ses 65 mètres de long et 900 hommes d'équipage, surclasse notre flûte longue de 45 mètres seulement. Avec de petits moyens et toujours la même passion, je motive quelques plongeurs en quête d'aventure.

Comme sur la fouille de *La Girafe*, tout est noté, enregistré et, si besoin, découpé. La grande différence est que je sais désormais mieux ce que je cherche. Pour la première fois, je conduis une étude planifiée orientée vers des cibles sélectionnées. Parmi nos réussites, notons la dépose d'un assemblage de deux tronçons de quille et de deux membrures de charpente, de 760 millimètres de large et de 360 millimètres d'épaisseur. Tout cela pour visualiser et vérifier le nombre et la taille des clous et des gournables (chevilles). Nous avons alors la surprise de constater qu'il y a deux fois moins de gournables que prévu. La charpente ayant pratiquement disparu, comme dans le cas de *La Girafe*, il ne reste que des empreintes qu'il faut brosser et mesurer. Dans une telle situation, les plongeurs se retrouvent face à une sorte de « négatif de vaisseau », qui livre des informations [illegible]

Le bois prépondérant en construction navale

Qu'en est-il ressort-il ? La fouille du *Ça Ira* fait la démonstration qu'à la fin du XVIIIe siècle, les charpentiers de marine suivent à la lettre les instructions des ingénieurs, tant en ce qui concerne les proportions des pièces, que leur assemblage et la réalisation de la carène (la partie immergée de la coque) et de ses protections. Il est par ailleurs évident que l'utilisation du bois est alors prépondérante dans la réalisation des navires : très peu d'éléments sont métalliques. La publication de ces résultats, dans les deux ans qui suivent la fouille, se termine sur ce commentaire : « L'information capitale apportée par le *Ça Ira* est la mise en évidence du respect comptable de la répartition des clous et gournables (chevilles), preuve qu'à la fin du XVIIIe siècle tout est en place pour l'ère industrielle, que les esprits sont pénétrés d'un concept de production régie par des règles, des normes, voulant aboutir à une rentabilité maximale. L'improvisation, le sens personnel n'ont plus leur place. »

Ces mots vont alors interpréter ces quelques lignes comme étant un aveu de l'inutilité de fouiller les coques du XVIIIe siècle. C'est faire abstraction des nouveautés exhumées, de la couverture des œuvres vives (la partie immergée de la coque) par des plaques de cuivre ou les ouvrages de récolte des eaux usées dans les fonds les plus inaccessibles du navire. Une multitude de points nouveaux, mais qui n'est pas conforme à ce que l'on pensait établi !

Mais peu importe, je suis déjà reparti sur une autre épave *(voir* La pinque provençale redécouverte *page 26)*. J'y suis dans un autre monde : les bois sont de bien plus petites dimensions et le chantier, qui va devenir une référence, ne dure que… sept ans. Cependant l'idée d'établir des comparaisons entre navires de même type, de même nation et de même époque ne cesse de prendre de l'ampleur dans ma démarche. Encore faut-il découvrir l'élément unique qui conduit à une archéologie de constat et non d'étude.

Il ne faut donc une épave bien conservée (n'ayant pas brûlé !) et peu profonde pour permettre des plongées non limitées par les paliers de décompression. La taille des bois étant un handicap, les vaisseaux sont exclus de cette approche. L'idéal serait une unité de 40 mètres, telle une corvette, une petite frégate ou une flûte. Mes dossiers en comportent, de sorte qu'en même temps que nous menons ces fouilles sur nos chantiers, nous réalisons des prospections, qui restent toutes infructueuses.

Je suis pourtant que je dois continuer à regarder sur le terrain comment les navires étaient vraiment construits ! Il suffit de prendre les plans des ingénieurs de Louis XVI et de Napoléon pour comprendre pourquoi. Ces plans au 1/36e ou au 1/48e ne montrent guère que la vue en élévation d'un flanc de coque, deux demi-vues depuis les extrémités, un éventuel tracé de ponts, et donnent quelques mensurations telles les longueur et largeur du maître couple, c'est-à-dire du couple central situé au niveau du grand mât. Il s'agit davantage de dessins servant à obtenir l'approbation d'un ministre, que de plans au sens actuel du terme. Les hommes de chantier, eux, n'utilisent pas de plans, mais une série de valeurs référencées. La standardi-

© Pour la Science - n° 418 - Août 2012

disation arrive par la géométrie, qui fait son œuvre dans la réalisation normée de modèles bien connus des charpentiers, mais peu par la réalisation de plans… Élaborée à la fin du XVII[e] siècle, la méthode de traçage en vraie grandeur est officialisée en 1765 et se perpétuera jusqu'aux années 1820. Ce n'est qu'à la fin de l'Empire, dans les années 1810, que sont apparus des dessins de détails, mais ils sont rarissimes. Tous ces constats me confortent dans l'idée que la marine de guerre française de la période 1780-1820 est sous-documentée, et certainement mal connue.

Au début des années 2000, les seules épaves exploitables pour arriver à mes fins sont *La Girafe* (une flûte) et le *Ça Ira* (un vaisseau). C'est bien trop restreint pour répondre à la problématique, surtout que ce sont des navires de types différents. La démarche que je veux mener semble dans l'impasse, mais, brusquement tout change : l'association d'archéologie sous-marine *Pasub* nous appelle en renfort pour fouiller un incompréhensible entre-lacs dans l'Anse de la Barque en Guadeloupe. Là, sous à peine trois mètres d'eau, cinq épaves sont mêlées…

Nous sommes invités en raison de notre expérience archéologique des flûtes, et, de fait, en deux jours, nous reconnaissons la présence de deux exemplaires de ce type de bâtiment. Il s'agit de *La Loire* et de *La Seine*, deux flûtes acculées par les Anglais au fond de l'Anse, et qui se sont sabordées, après avoir accompli leur mission : transporter depuis la métropole de l'argent et des troupes pour renforcer celles qui étaient stationnées en Guadeloupe. Ces deux bâtiments venaient tout juste d'être construits à Nantes par le chantier privé Crucy en 1810. Ce sont donc des bateaux neufs qui se livrent à notre observation ! Pour autant, leur destruction par le feu a laissé peu de vestiges de la structure : un bout de coque préservé sous les boulets, un morceau de charpente… Mais cette fois tout est en place : enfin, nous avons la possibilité de travailler sur trois épaves de même type et de même nationalité. Qui plus est, ces bâtiments sont originaires de la façade atlantique alors que *La Girafe* avait été construite sur la Méditerranée. Les différences marquantes sont-elles décelables ?

La Loire et *La Seine* livrent l'improbable : le mât d'artimon (le mât arrière) est fiché directement dans la carlingue, ce qui semble une aberration étant donné les pratiques connues de la marine française ; au lieu de cela, en effet, il devrait reposer sur une structure dédiée à ce rôle, implantée sur le premier pont… L'absence de puits à boulet en avant du grand mât est aussi contraire à ce qui semblait l'habitude. Est-ce parce qu'il s'agit d'une mission de transport ? En revanche, les quatre pompes ont des crépines bien rondes comme le veut l'usage, autour du grand mât *(voir la figure 6)*. Le système de fixation très compact du mât ne répond pas non plus au principe de construction « à la française » connu, puisqu'il est réduit à sa plus simple expression. Souhait d'alléger l'ensemble ? Nécessité de faire de la place pour le transport ?

Ces questions font resurgir les souvenirs de ce que nous avons observé sur *La Girafe* : à Sagone, les marques laissées dans les concrétions correspondent parfaitement

L'AUTEUR

Pierre VILLIÉ est archéologue sous-marin. Il préside *Tech Sub*, une association de plongeurs spécialisés en archéologie subaquatique.

BIBLIOGRAPHIE

François de Chapman, **Traité de la construction des vaisseaux**, 1764.

C. Romme, **Description de l'art de la mâture**, 1778.

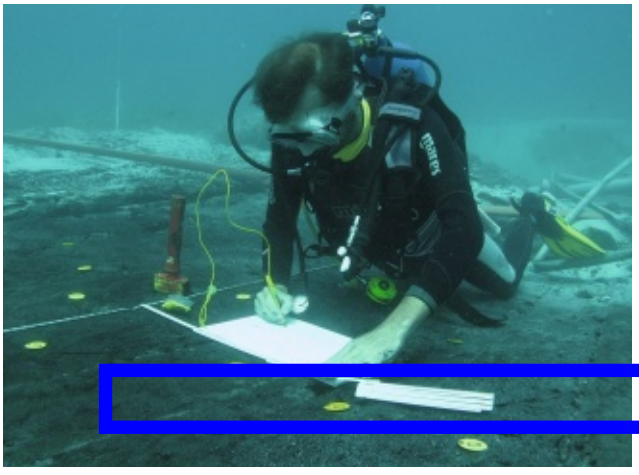
Bigot du Clairbois, **Essai géométrique et pratique sur l'architecture navale**, 1776.

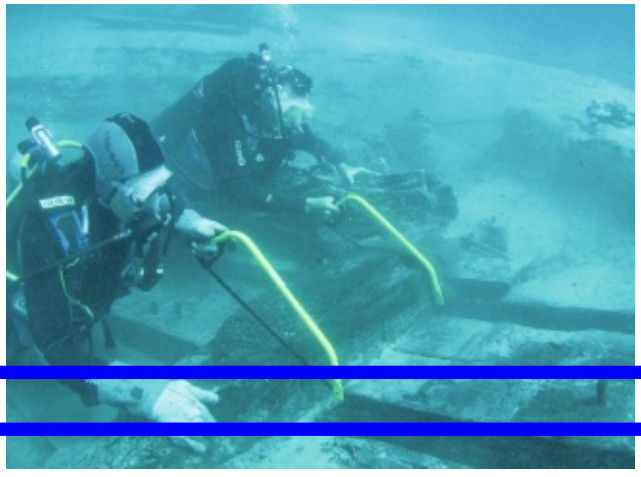
Du Maitz de Goimpy, **Traité sur la construction des vaisseaux**, 1776.

Léonhard Euler, **Traité complet de la construction et de la manœuvre des vaisseaux**, 1773.

Duranti de Lironcourt, **Instruction élémentaire et raisonnée sur la construction des vaisseaux**, 1771.

Duhamel du Monceau, **Éléments de l'architecture navale**, 1752.



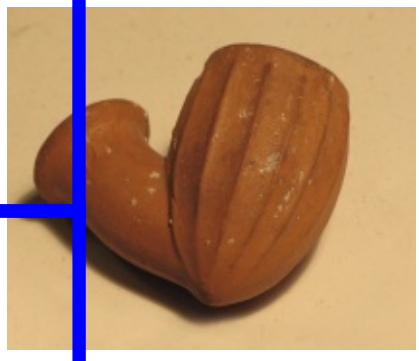


3. L'ANALYSE DE *LA NOURRICE* a nécessité de nombreux relevés des détails repérés sur les structures *(à gauche)*. La dépose des pièces n'est pas systématique, mais résulte de la nécessité d'observer un détail sous-jacent. On ne peut éviter que la pièce retirée soit détruite *(à droite)*.

à l'ouvrage qui est ici préservé des tarets, des mollusques xylophages. Comme sur *La Girafe*, il semble qu'il n'y avait pas de puits à boulets à bord. Lors de la dernière campagne, nous faisons une autre constatation étonnante : la présence de sortes de fausses varangues (liaisons transversales entre couples) faites de deux pièces. Est-ce anecdotique ou s'agit-il d'un point important ?

Toutes ces questions n'avanceront qu'après la découverte de *La Nourrice*, une autre flûte française construite à Bayonne en 1790, qui, comme *La Girafe*, fut volontairement incendiée par son équipage, pendant la bataille de Sagone. Désormais, ma méthode de recherche est en place : notre échantillonnage compte quatre flûtes françaises. La dernière attend depuis 1811 par seulement huit mètres de fond, mais sous un bon mètre de sable.

Durant quatre ans, l'épave est ouverte en suivant un plan précis établi à l'avance. C'est que le ministère de la Culture s'entoure désormais de précautions : plus question de remonter en surface des pièces de mobilier périssables ; interdiction de casser une concrétion sous l'eau, avant de l'avoir passée à la radio, puis obtenu une autorisation ; le maintien du matériel de bord sur site est devenu une préoccupation première… À juste titre, tant il est vrai que depuis plus de 50 ans les remontées d'objets se sont faites sans précaution, tandis que des opérations prestigieuses menées par l'État ont largement alimenté les musées. Dès lors, que faire des chaussures, poulies, maillets et autres équipements ne manquant pas sur les épaves ? Il faut les dessiner, les photographier, puis les réenfouir. Cela ne nous trouble guère, car la chasse au trésor n'a jamais été notre motivation.



4. CES ARTEFACTS comprennent de gros clous en cuivre, un goulot de bouteille, des os et toutes sortes de tessons typiques de ce que produit la fouille d'une épave ancienne. Pour autant, la méfiance doit rester de mise : un fourneau de pipe en terre cuite *(en haut)* trouvé à proximité de l'épave remonte… aux années 1910.

La Nourrice apporte une avalanche de renseignements. Il n'y a toujours pas de puits à boulets, mais, ici, l'emplanture du grand mât est conforme aux dispositions connues. Quand la carlingue de misaine, c'est-à-dire le système de fixation du mât de misaine, apparaît, c'est plus que nous ne pouvions l'espérer : tout est là, comme le décrivent les textes. Sauf que les proportions sont à revoir. Personne n'avait encore observé de carlingue de misaine de flûte militaire… Quasi religieusement, les membres de l'équipe viennent admirer ce que le temps nous a légué. Le spectacle de ce système technique ancien intact nous impressionne. Puis l'un des plongeurs s'avance avec un pied-de-biche et une massette, et dans un claquement métallique, le démontage commence.

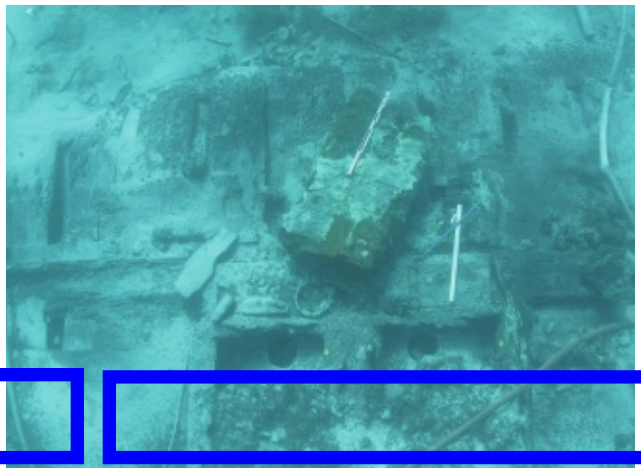
Si l'archéologie sur épave nécessite de prélever certaines pièces, elle évite de les détruire : en fin de campagne, les éléments sont, autant que faire se peut, remis en place sans que cela n'empêche une irrémédiable altération. Nous mesurons donc chaque acte, et évitons les déposes inutiles. Quand la décision de scier une pièce est prise *(voir la figure 3)*, c'est seulement parce que le renseignement recherché ne peut être obtenu autrement. Le cas se produit régulièrement car comment faire pour visualiser un assemblage ou prélever un échantillon de la couche d'interface ?

Nous avons été confrontés à une telle expérience en 2010, quand, après avoir démonté une partie du plancher de cale (le vaigrage), il est apparu que le procédé de construction des membres nous était totalement inconnu ! Il n'y avait pas de demi-varangue en applique sur chaque varangue. Cette nouveauté confirmait des observations que nous avions déjà faites ailleurs sans comprendre le procédé. Ainsi, sur l'une des épaves de l'Anse à la Barque nous avions déjà constaté l'absence répétée de demi-varangues sur les fonds acculées (mises en V) de l'extrémité arrière.

Autre aspect intéressant : deux tuyaux de plomb de 50 millimètres de diamètre apparaissent lorsque nous fouillons

5. L'UN DES CANONS DE *LA LOIRE* OU DE *LA SEINE* repose sur le fond. Les deux flûtes construites à Nantes par le chantier Crucy, acculées par les Anglais dans l'Anse à la Barque en Guadeloupe, ont explosé et brûlé. Leurs épaves ont été découvertes par hasard en 2000 à la suite du passage dévastateur du cyclone Lenny, qui entraîna l'exploration du fond de l'Anse.

© Pour la Science - n° 418 - Août 2012



6. CETTE CHAUSSURE DE MARIN PLEINE DE SABLE *(à gauche)* a été abandonnée à bord lors du sabordage de *La Nourrice* par son équipage. L'emplanture (point de raccordement) du grand mât de *La Nourrice* répond aux principes de la construction à la française *(à droite)*. On aperçoit à l'avant les dropines des pompes, c'est-à-dire les ouvertures par lesquelles entrait l'eau à évacuer.

l'avant de la flûte. La chose peut sembler anodine au non-initié, mais il s'agit en fait du premier témoignage de l'adaptation du système Truscott dans la marine française. L'eau, si nécessaire aux équipages, était en effet stockée dans une soute située à l'avant du navire. Une barrique pleine pouvant peser de 800 kilogrammes à une tonne, la nécessité de déplacer ces barriques, voire de les remonter pour les soutirer, entraînait des accidents (de mains ou de membres écrasés).

En 1805, le lieutenant Truscott de la *Royal Navy* a l'idée d'installer dans le volume du premier pont une pompe à bras sur le mât de misaine. Enfin, on peut puiser l'eau des barriques stockées dans les soutes, ce qui soulage un peu la vie des marins. Du reste, quelques années plus tard, on installera tout un réseau de canalisations pour distribuer l'eau dans les navires. Et voilà que nous retrouvons une adaptation du système de Truscott sur notre flûte de 1809… preuve que l'espionnage et le transfert de technologies allaient vite, même entre nations ennemies. Rien de neuf sous le soleil…

La chance semble redoubler quand j'annonce à notre petite équipe l'existence de l'épave de *La Caravane*, naufragée en 1817 en Martinique. Il s'agit de la sœur de *La Girafe*, construite sur le même chantier et en même temps ! Il serait donc impensable de ne pas aller pour porter notre échantillon à cinq navires de la même classe et de la même nationalité, ce qui ne s'est jamais vu en archéologie navale.

À la fin de l'hiver 2012, nous tentons une première visite de *La Caravane*, mais en vain. Traversé de courants violents, le site du naufrage est extrêmement dangereux. Malheureusement, comme nous finançons nous-mêmes nos recherches, nous ne pouvons rester sur place assez longtemps pour attendre des conditions plus favorables. Le temps où la seule présence d'une épave constituait un motif d'intérêt pour les instances de l'archéologie française est révolu, de sorte que nous sommes pour le moment obligés de reporter le sondage du site.

Pourtant, la démonstration faite avec les flûtes *La Loire*, *La Seine*, *La Girafe*, *La Nourrice* et même *La Caravane* (dont nous savons au moins que son épave existe) confirme assez l'intérêt des études comparatives ciblées par époque et nationalité. Ces études ont d'ores et déjà montré des disparités entre les plans faisant référence aux grands traités du XVIIIe siècle, puis repris par les contemporains, et ce que l'on constate sur place.

Pas d'évolution entre 1780 et 1820 ?

De fait, la plupart des publications concernent la marine de la guerre de l'Indépendance des États-Unis (1775-1783), dont les bateaux ont été construits dans les années 1760-1770. Puis il y a un vide entre 1780 et 1820. Deux générations se sont-elles succédé sans rien écrire ? Faudrait-il envisager qu'architectes et constructeurs aient vécu sur la lancée de l'architecte naval Jacques-Noël Sané (1740-1831) qui a conçu l'essentiel de la marine française de la guerre de l'Indépendance d'Amérique ? Quoi qu'il en soit, la situation a évolué pendant cette période, et les disparités observées entre les bâtiments nous semblent trouver leur origine, d'une part, dans l'innovation et, d'autre part, dans la prise de conscience de la corrosion électrolytique qui se produit entre le cuivre et le fer dans l'eau de mer.

Ainsi, *La Nourrice*, construite entre 1789 et 1790, conserve les traits de la marine de l'Ancien Régime, avec ses emplantures classiques. Le fer y est utilisé pour les liaisons importantes, telles celles de la quille avec les couples. Or on constate que, sur *La Girafe* comme sur *La Loire* et *La Seine*, ces éléments sont remplacés par du bronze. La mutation des procédés de construction navale en bois durant le dernier quart du XVIIIe et le début du XIXe siècles est aujourd'hui avérée. À notre avis, elle résulte d'une course sans fin aux armements.

La marine n'a jamais cessé d'évoluer et elle continuera à le faire ; après les constatations faites dans le cas des flûtes, on peut affirmer que la transposition de la marine de Louis XV à celle de Napoléon Bonaparte, sous prétexte qu'il s'agit toujours de marine à voile, est infondée. Il faut réécrire le chapitre manquant et nous avons commencé. Pour ce faire, il faudra fouiller encore des épaves, et aller les traquer là où elles se trouvent, sous les rouleaux d'une barrière de corail, au fond d'un golfe corse, dans une baie aux eaux troubles… Aujourd'hui, l'archéologie navale de l'Ancien Régime et de l'Empire est à peine défrichée ; nous espérons que ce front de recherche continuera à progresser. ■

La pinque provençale redécouverte

Pierre Villié

Le cargo de la Méditerranée européenne aux XVI[e] et XVIII[e] siècles était passé à la trappe de l'histoire. Une fouille sous-marine et une enquête dans les bibliothèques ont restitué les principes essentiels de sa construction.

© Pour la Science - n° 418 - Août 2012

Trois [illegible] site. Le dégagement des innombrables petits galets de basalte qui servaient de l[illegible]st va pouvoir commencer. Nous tendons d[illegible]s cordeaux en travers du monticule qui signale la présence de l'épave. Grâce à c[illegible] quadrillage, nous pourrons implanter [illegible]es aspirateurs à sédiments dans un couloir perpendiculaire à l'axe du gisement. Il s'agit de pratiquer une ouverture depu[illegible]s chaque bord afin de rendre perceptible la conservation de la coque. Or il s'avèrera que le site est très intéressant : de toute évidence, nous avons affaire à un bateau de charge. Les couples – ces pièces fixées à la quille et qui donnent sa forme à la coque – sortant du sable en sont le premier indice, car ils sont de simple épaisseur. Les dimensions du monticule – 18 × 6 mètres – font penser à une pinque.

Un bateau de charge

Une pinque ? Ces bateaux de charge furent les plus utilisés en Méditerranée occidentale du XVII[e] au XVIII[e] siècle. Pour autant, les pinques ont été oubliées au point qu'il nous a fallu mener une passionnante [illegible] sous l'eau et dans les profondeurs des archives pour en restituer la structure. C'est cette aventure archéologique que nous racontons ici.

D'autres chantiers nous avaient habitués au silence des profondeurs, de sorte que cette fouille menée devant une plage de la ville corse de Saint-Florent est atypique : à trois mètres de profondeur seulement, nous travaillons entourés de poissons tournant autour de nous dans le bruit conjugué du jet d'eau déplaçant les galets et des pierres heurtant le tube d'éjection. Tandis que les graviers s'accumulent hors du périmètre de la fouille, la tâche nous paraît vite monotone. Toutefois, nous savons que nous devons rester vigilants, car lors du naufrage de la pinque et des semaines qui ont suivi, le matériel de bord a pu se déplacer, ce qui rend probable la découverte d'objets enfouis : nous savons la vieille habitude des marins consistant à cacher leurs valeurs et monnaies dans le lest. Notre épave, qui est incontestablement du XVIII[e] siècle, est sans doute un bateau de moins de 30 mètres. Sa construction semble caractéristique de la tradition méditerranéenne,

L'ESSENTIEL

- Après la Renaissance et jusqu'à la fin du XVIII[e] siècle, le [illegible] a été le principal navire commercial en Méditerranée.
- Sa banalité explique que les principes de sa construction n'aient pas été archivés.
- Pour restituer le plan d'une pinque, les archéologues ont fouillé et analysé les restes de la coque d'un bâtiment qui s'est abîmé en Corse en 1769.
- Il en ressort que les charpentiers méditerranéens ne travaillaient pas sur plans mais suivaient en perpétuant des usages familiaux immémoriaux.

Yves Reymond

UNE PINQUE RENTRE AU PORT de Marseille au XVIII[e] siècle. D'où venait ce caboteur ? De Sicile ou de Turquie ? Il transportait en tout [illegible] qui s'échangeaient autour de la Méditerranée.

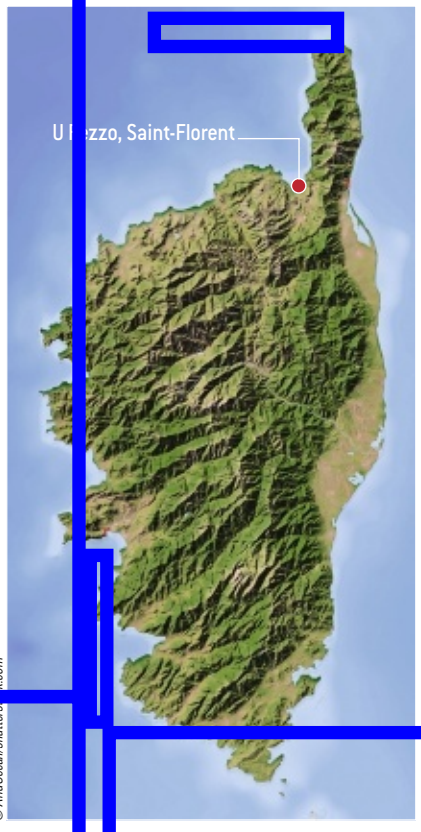
ce qui nous fait penser qu'il s'agit d'un navire de commerce. De fait, un fourneau de pipe, une roue (ou réa) de poulie et quelques tessons de poterie apparaissent vite. Puis c'est une planche. Ensuite, cela s'accélère et nous découvrons un barreaudage (une sorte de grille à barreaux) plat semblable à celui d'un lit de bébé. Délicatement, l'artefact est isolé de la pierraille. Il s'agit bien d'une pièce du mobilier de bord, mais inattendue : une cage à poules !

Le propre de l'archéologie subaquatique est de restituer des objets en matière organique bien conservés. C'est le cas de notre cage. Son bois porte encore les marques laissées par le menuisier. L'événement capte l'équipe de fouille. Nous réalisons les clichés d'usage et les premières prises de mesures, puis les cailloux qui encombrent la cage sont extraits un à un. Au milieu de cette pierraille, une mangeoire taillée dans un bloc de calcaire blanc apparaît ; puis c'est la partie supérieure d'un crâne de gallinacé. Petit drame dans le drame du naufrage, l'équipage s'est sauvé sans sauver sa poule…

Quelques mois plus tard, le crâne est montré à l'archéozoologue Jean-Denis Vigne, du Muséum d'histoire naturelle à Paris. Il s'avère que nous avons tiré de sa tombe marine une poule de race naine. Pour conserver de la viande, il était alors préférable de disposer d'animaux vivants à abattre en fonction des nécessités.

Ainsi, à seulement trois mètres de fond et face à une plage estivale surpeuplée, nous venons de tirer du fond un trésor : une cage à poules, qui est la première jamais trouvée sur une épave. Cela illustre dans le cas de la marine de commerce ce que l'on savait déjà pour la marine de guerre : sur les grands vaisseaux et les frégates, des centaines de volailles étaient embarquées et mises en cage sur la dunette (château de poupe), que ce soit pour mieux nourrir les officiers ou pour guérir les malades. Par chance, 154 tonnes de lest ont préservé des agressions des plongeurs sportifs ces restes d'un naufrage datant de plus de 250 ans.

D'ordinaire, la mise au jour d'un fusil, d'une poignée de sabre ou de tout autre objet guerrier est davantage remarquée que celle d'un ustensile du quotidien des marins. Mais ce n'est pas le cas pour l'archéologue sous-marin, pour qui ramener à la surface une écuelle, une marmite en terre, un quart de vin, une louche en cuivre, une pièce de vêtement est comme remonter dans le temps.



© AridOcean/shutterstock.com

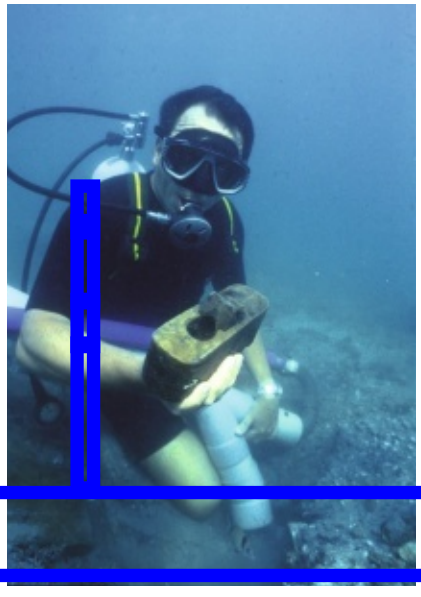
2. LES DANGEREUSES CÔTES CORSES sont entourées d'épaves. La pinque étudiée par l'auteur et ses collègues a sombré près de la côte, au lieu-dit U Pezzo, qui se trouve aujourd'hui aux abords de la ville de Saint-Florent. Située sous les fenêtres d'un centre de plongée face à une plage surpeuplée l'été, et au milieu des mouillages de bateaux de plaisance, l'épave repose par trois mètres de fond.

Un navire de travail, pas fait pour durer

Les navires de commerce sont d'un grand intérêt archéologique : essentiels dans la vie économique, ils sont méconnus. Examinons pourquoi. Ils sont tout d'abord très peu représentés, tant on préfère peindre un vaisseau de 110 canons plutôt qu'un banal chasse-marée. Les peintres hollandais de la Renaissance furent les premiers à représenter des bateaux de travail pour eux-mêmes.

En France, la restitution sur toile de la marine de commerce ne s'institua qu'avec la famille Roux. Cette lignée de peintres marseillais, dont l'activité dura de 1770 à 1875, exécutait les commandes des capitaines et armateurs privés, fiers de leur navire. Avant les Roux, les bâtiments de commerce et autres bâtiments de moindre importance qu'une frégate ne figurent sur les toiles qu'en arrière-plan. L'origine de ce manque d'intérêt tient à ce qu'un navire de travail apparaît comme un « consommable », un bien qui, de préférence, doit être amorti au premier voyage. De fait, sa durée de vie n'est en moyenne que de 15 ans, voire moins si le bois est médiocre.

Il en va tout autrement pour les navires de guerre. Leur construction est toujours un investissement lourd, qui met parfois à contribution toute une contrée.



© Pierre Villié. Toute autre mention concernant l'iconographie est de Pierre Villié.

3. CETTE CAGE À POULES *(à gauche)* contenait encore, au moment du naufrage, l'un des oiseaux que l'équipage avait emportés dans ses provisions. Comme le rabot du charpentier de bord *(à droite)*, elle a fini sous le sable de la plage où s'est abîmé le navire par une nuit de tempête.

© Pour la Science - n° 418 - Août 2012

Leur remise en état périodique est donc très soigneuse et va jusqu'à la déconstruction et la reconstruction complète par réemploi des pièces de charpente initiales. De fait, il en résulte un navire entièrement nouveau. L'attention portée à la marine de guerre aurait normalement dû inciter à conserver les savoir-faire ancestraux des charpentiers de marine, mais l'arrivée, au XVII[e] siècle, de la rationalisation des constructions des navires de guerre va l'empêcher. C'est sous Colbert (1619-1683) que la construction navale militaire commence à être codifiée en France. Il s'agit alors de faire en sorte que les unités constituant une flotte de combat naviguent de conserve, puisque la tactique la plus utilisée consiste à disposer les vaisseaux en lignes qui se croisent, afin de canonner au mieux les navires adverses… Les frégates restant en arrière pour assister les vaisseaux atteints par les tirs ennemis.

Dès lors, on cherche à parer aux effets de l'improvisation en construction navale. Les États lancent des études sur les formes et les poids souhaitables des coques. Les mathématiques commencent à y jouer un rôle, de sorte que les maîtres de hache traditionnels deviennent des ingénieurs qui appliquent des normes et font régresser les règles empiriques héritées des générations précédentes.

Ce processus se traduit par la fixation de méthodes rationalisées de construction. Chez les Anglais, Anthony Deanes publie sa *Doctrine of Naval Architecture* (Théorie de l'architecture navale) dès 1670. En France, la première école d'ingénieurs navals est créée en 1741 à Paris. Henri Duhamel du Monceau, son directeur, est un botaniste et un agronome que rien n'a préparé à cette fonction. Ce sont ses études sur le bois de marine et les moyens de lutter contre les tarets (des mollusques xylophages), qui l'ont fait nommer inspecteur général de la marine. Intitulé *Éléments d'architecture navale*, son ouvrage de 1752 est certainement un repère essentiel. Il y mentionne cependant que très timidement la question des calculs hydrostatiques ou de résistance de matériaux, sans jamais écrire la moindre formule. Il s'agit alors davantage de faire état de méthodes de traçage, de respect de dimensions et de comparaison des propriétés d'une marine à une autre.

Il est toutefois certain que les constructeurs ne peuvent désormais plus improviser la réalisation d'une coque, dont les aménagements deviennent parfaitement ordonnés. L'évolution la plus marquante en ce sens est la standardisation de la réalisation des couples (les pièces de bois symétriques joignant la quille aux bords), qui seront désormais espacés de façon normalisée afin d'obtenir une membrure capable de mieux résister non seulement aux boulets, mais aussi aux échouages à marée basse. On nomme construction double plan cette technique, et elle va se retrouver à

■ L'AUTEUR

Pierre VILLE, archéologue sous-marin, est le président de *Tech Sub*, une association de plongeurs spécialisés en archéologie subaquatique.

■ BIBLIOGRAPHIE

N. C. Romme, **L'art de la Marine**, 1788.

Ouvrage collectif, **Encyclopédie méthodique**, marine, 1783-87.

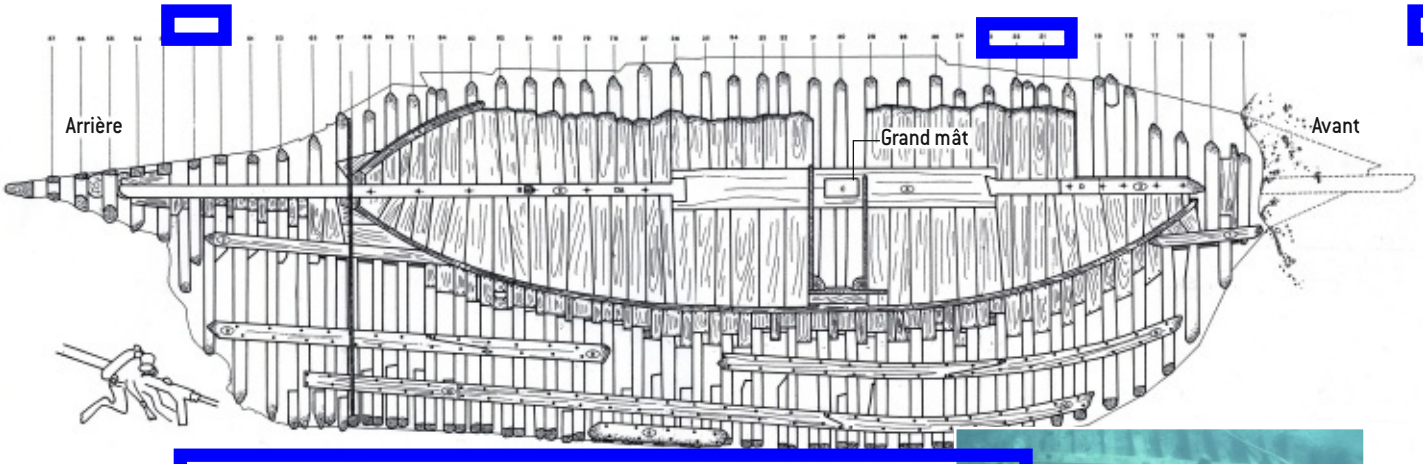
François de Chapman, **Traité de la construction des vaisseaux**, 1791.

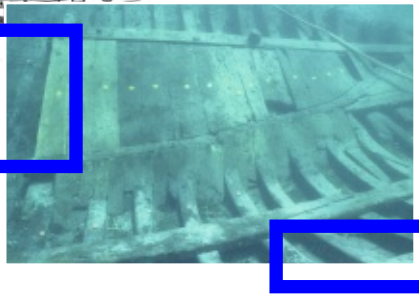
N. C. Romme, **Description de l'art de la mâture**, 1778.

Vial du Clairbois, **Essai géométrique et pratique sur l'architecture navale**, 177[illegible].

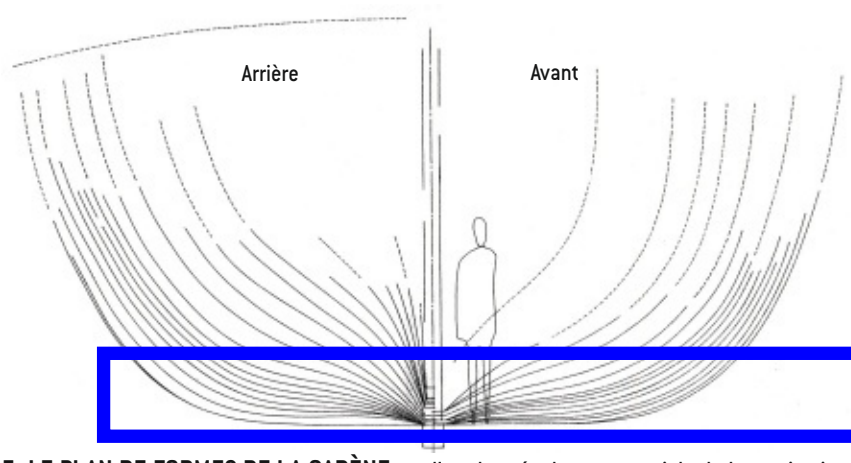
Leonhard Euler, **Théorie complète de la construction et de la manœuvre des vaisseaux**, 1773.

Duhamel du Monceau, **Éléments de l'architecture navale**, 1752.

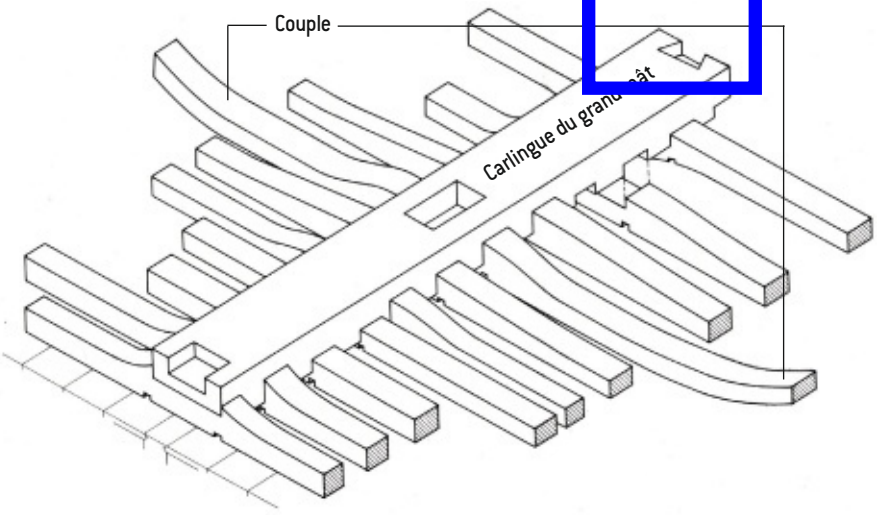




4. LE RELEVÉ EXHAUSTIF de la partie de la coque de la pinque *(ci-dessus)* protégée par les sédiments depuis le naufrage a été l'une des priorités des fouilleurs. Dans le cas du *Saint-Étienne*, il a d'abord fallu déplacer à l'aide d'aspirateurs à sédiments tous les graviers qui recouvraient l'épave *(à droite après aspiration)* tout en prenant garde à ne laisser passer aucun des objets de bois [illegible] naufrage.



5. LE PLAN DE FORMES DE LA CARÈNE est l'un des résultats essentiels de la restitution d'une architecture de pinque. Il traduit les savoir-faire transmis de génération en génération par les charpentiers de marine pour former un type de carène : celui de la pinque.



6. LE REPÉRAGE DE CHAQUE ÉLÉMENT est essentiel à la compréhension de la carène, aussi bien lorsqu'un élément est en liaison avec l'ensemble de la charpente que lorsqu'il est démonté.

quelques variantes près dans toutes les marines européennes. Imperceptiblement, la fonction de constructeur se différencie de celle du concepteur de navire, qui deviendra par la suite architecte naval.

Si cette évolution marque la marine de guerre, dans la marine de commerce, les constructeurs sont libres et mettent en œuvre des concepts hérités de leurs prédécesseurs familiaux le plus souvent. Leur objectif est de construire à moindre coût une enveloppe ayant des qualités répondant aux attentes de l'armateur. Il faudra donc attendre le milieu du XIXe siècle pour qu'apparaissent les premiers ouvrages traitant de la construction et de la remise en état des bâtiments commerciaux. Alors que se passait-il sur les chantiers privés avant les années 1800 ? Seule l'archéologie navale subaquatique le plus souvent, peut fournir des réponses. Pour la pratiquer, il faut trouver des épaves et surtout les identifier.

C'est ce que nous avons fait à Saint-Florent. Fouiller était certes une première étape vers la connaissance du navire. La fouille nous a permis de mettre en relief ses traits caractéristiques afin d'en établir un portrait-robot. Toutefois, nous avons très vite cherché à identifier le bâtiment. Lors des premières plongées sur le site, très peu d'éléments pouvaient nous guider. Seuls quelques tessons de céramique verte et des balles de plomb éparses nous ont orientés : nous avons pensé à un créneau temporel compris entre 1770 et 1850.

Fouilles en archives

C'est là que les recherches de l'historien paléographe Guy Méria ont donné une nouvelle dimension à nos travaux. G. Méria a étudié les Serval de Saint-Florent, une famille de notables, dont un des aïeux fut notaire. Conservés à Gênes, deux de ses actes décrivent une perte de biens due au naufrage d'une pinque venue de Marseille dans la nuit du 30 au 31 janvier 1769. C'est ainsi que nous avons appris qu'il s'agissait du *Saint-Étienne*, une pinque commandée par un certain Bernard Sian, qui apportait au Régiment royal italien de la farine de seigle et de blé, du foin en ballots, des couvertures et de l'habillement. Levé sous Louis XIV, ce régiment recruté au Piémont avait été envoyé en Corse pour «raisonner» les patriotes de Pascal Paoli qui tentaient de conquérir par la force l'indépendance de leur île.

© Pour la Science - n° 418 - Août 2012

En janvier 1769, la guerre de Corse touche à sa fin : elle s'achève le 9 mai quand la bataille de Ponte Novu (ou Ponte Nuovo) est perdue par les patriotes corses s'opposant à la progression vers Corte des régiments royaux. À la suite de cette bataille, le roi de France anoblit nombre de familles corses, dont les Bonaparte, ce qui ne sera pas sans conséquences, puisque Napoléon naît le 15 août suivant à Ajaccio…

Lorsque nous prenons conscience de ce contexte, nous fouillons déjà depuis deux étés. Nous entreprenons aussitôt des recherches à Toulon et à Marseille pour en savoir plus sur le *Saint-Étienne*. En vain. Il va falloir se limiter aux précieuses informations de G. Méria. Toutefois, le Musée de la marine, à Paris, possède la maquette de *La Fileuse*, une pinque corsaire basée à Marseille. Nous l'étudions ainsi que la planche de l'album de l'ouvrage *Souvenirs de marine conservés*, de l'amiral Pâris, qui montre une pinque génoise de vers 1800.

Ensuite, pendant huit ans, nous étudions la coque et ses abords. Chaque année, une partie du lest est déplacée, puis remise en place. Chaque élément de charpente est étiqueté, dessiné, photographié. Les travaux sont réalisés par tranches de coque de sept mètres, de sorte que l'équipe ne verra jamais la coque entièrement débarrassée de son lest. Tout autour, un quadrillage de repérage (ou carroyage) recouvre quelque 600 mètres carrés. Le moindre indice est relevé. Nous découvrons sur l'arrière une multitude de morceaux de feuilles de plomb, qu'il reste impossible aujourd'hui de rattacher à un quelconque élément du bateau. Peut-être s'agit-il d'une matière première destinée à être fondue pour produire des balles ?

Un rocher triangulaire situé sur l'avant nous intrigue. Nous réalisons qu'il s'agit en fait du contenu de la soute du maître d'équipage. C'est un agglomérat de ferrailles, de verre et de céramique. Nous le laissons tel quel sur le fond, car nous sommes là avant tout pour étudier la coque. Une première surprise survient quand le vaigrage – le plancher de fond de cale – est mis au jour. Les planches (ou vaigres) ne sont pas disposées dans l'axe de la quille, mais perpendiculairement à lui. C'est la première fois que l'on observe pareille orientation, mais elle nous apparaît sensée, car elle donne accès aux recoins les plus profonds, ce qui facilite la circulation des eaux d'infiltration vers les deux pompes situées au pied du grand mât. On évite ainsi d'avoir à déplacer tout le lest pour que l'eau puisse circuler sans obstacles.

Nous constatons également que les galets ne sont pas les seuls composants du lest, lequel contient une couche de sable de 20 centimètres d'épaisseur intercalée entre galets et vaigrage. Or les lests de sable avaient été prohibés de la marine royale par Colbert afin d'éviter le pourrissement. Ainsi, un siècle après la décision du ministre de Louis XIV, ils restaient en usage dans la marine privée.

Lors d'un sondage en limite de coque en face externe, nous découvrons une pellicule ocre jaune. La campagne se termine, de sorte que nous ne pouvons guère poursuivre, mais il s'agit d'un indice irréfutable de l'emploi d'un courroi (enduit) de protection de carène. Un détail notable, puisque les carènes sont peintes en blanc d'ordinaire sur les coques des maquettes…

Un courroi ocre jaune !

Ce courroi est un mélange de résine, d'huile de poisson, de jaunes d'œufs, entre autres composants, le tout en des proportions gardées secrètes. Un trait parfaitement marqué indique la limite de flottaison. Dans le relevé de charpente, le moindre clou est noté, tandis que sont précisées les inclinaisons des broches métalliques, ainsi que leur section. Tout est minutieusement consigné.

La faible profondeur du site nous permet des plongées de trois heures, voire davantage. Mais il ne faut pas négliger de mettre au net les relevés, de reprendre des cotes avant de démonter une pièce, opération irréversible… À ce stade de la fouille, il suffit de noter les observations, de faire quelques dessins de détail et d'effectuer des relevés. La visibilité n'est jamais inférieure à trois mètres. Tout avance suivant le calendrier de fouille prévu, pourvu que l'on procède avec méthode et sans précipitation. Pour autant, quand la houle se renforce, le creux formé par l'épave vidée du lest piège tout ce qui se trouve sur le sable. Il faut alors lutter contre l'envahissement.

Une fois le plan d'ensemble réalisé et chaque élément numéroté, nous déposons le vaigrage afin d'étudier précisément l'agencement de ses constituants (ou membres). C'est indispensable, mais destructeur, ce que nous nous efforçons de limiter en remettant en place les principaux bois.

Glossaire

■ VAIGRAGE
Ensemble des planches ou vaigres, fixées sur les membrures et qui recouvrent l'intérieur de la coque.

■ BORDÉ
Ensemble des planches fixées sur les membrures dans la longueur du navire et qui constituent le revêtement extérieur de la coque.

■ MEMBRURES
Ensemble des membres ou couples, ce sont les pièces de bois transversales et profilées d'un navire qui reposent sur la quille sur laquelle sont fixés les bordés. Elles soutiennent aussi les barrots de pont.

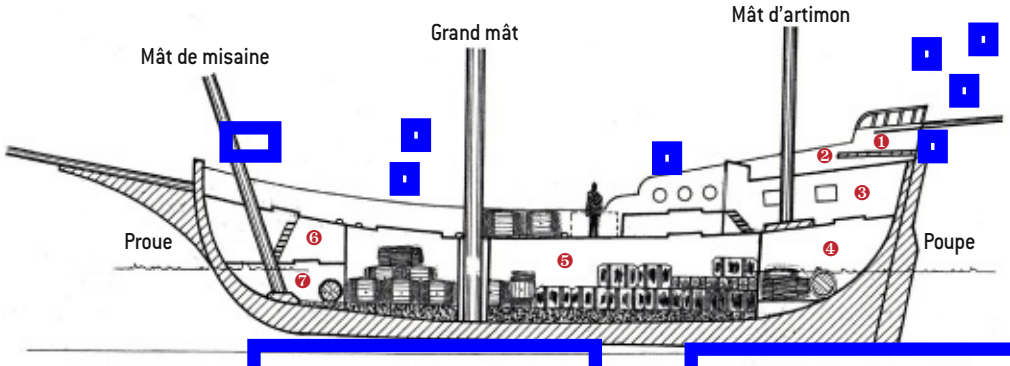
■ VARANGUE
Pièce de bois d'un membre qui se pose en premier sur la quille et perpendiculairement à l'axe du navire.

■ BARROT
Poutre ou poutrelle transversale à l'axe du navire qui se fixe entre les membrures et soutient le pont.

■ CARLINGUE
Pièce de charpente parallèle à la quille. Elle est composée de 3 ou 4 pièces de bois successives et plaque les membrures par leur milieu contre la quille.

Tout mesurer sous l'eau

La prise de mesure sous l'eau est un art particulier. Comme à terre, elle suppose d'installer d'abord un système de référence. Avant de déposer la moindre pièce de bois, il faut la positionner sur un plan d'ensemble et en relever les parties visibles. Cette phase primordiale est confiée à deux équipes qui font les mêmes relevés, puis la mise au net des croquis est faite en commun. Il n'est pas rare que certaines cotes soient reprises plusieurs fois. Par la suite, les pièces de bois sont amenées à terre pour compléter les observations.



Le résultat final

✔ **Cette coupe longitudinale reconstituée du *Saint-Étienne* *(ci-dessus)* rappelle bien la pinque d'une gravure du peintre Baujean à la fin du XVIII^e^ siècle *(ci-dessous)*. La dunette *(1)* accueillait la barre *(2)*, voisinait avec le logement du capitaine *(3)* et surmontait la soute où le capitaine stockait les produits de son commerce *(4)*. L'essentiel de la cargaison se groupait dans la cale autour du grand mât et des pompes *(5)*. Les matelots logeaient à l'avant *(6)*, où le maître d'équipage (bosco) disposait d'une réserve *(7)*, et où se trouvait aussi la cale à eau et à provisions. Pour l'ensemble, c'était un bateau simple, robuste, peu manœuvrant, mais apte à affronter toutes les mers.**

La dépose du vaigrage révèle une construction de type méditerranéen dite « à simple plan ». Nous identifions le maître couple, c'est-à-dire le couple quasi central, dont l'ouverture est la plus large. La carlingue, c'est-à-dire la pièce de bois qui surmonte la quille à l'intérieur de la coque, est massive. Le tronçon de carlingue surmontant la quille au niveau du grand mât *(voir la figure 6)* est pourvu en son centre d'une mortaise destinée à recevoir le pied de mât. Il s'agit d'une pièce unique de tradition latine, telles celles que l'on retrouve sur les galères. Pour réaliser une telle pièce d'un seul tenant, il a fallu que les charpentiers disposent d'un chêne de très d'un mètre de diamètre…

Plus notre étude avance, et plus les opérations deviennent délicates. Ainsi, la restitution des formes de carène oblige à relever chaque couple en situation, puis à relever sa courbure exacte à terre. Relevé de courbure, relevé d'assemblages, relevé des clous, tout est détaillé *(voir la figure 5)*. Finalement, notre plan révèle que le *Saint-Étienne* était un bateau large et à fond plat qui ne ressemblait ni à la *Fileuse* ni à la pinque génoise représentée par l'amiral Pâris. C'était un bâtiment d'environ 23 mètres de longueur et 6,50 mètres de maître couple avec un creux moyen de trois mètres.

L'épave nous apprend aussi que le bordage est fait de plusieurs couches : d'abord une coque primaire en chêne, recouverte d'une couche de feutre collée au chêne et enfin d'un bordé en sapin cloué sur le bordage en chêne. Le courroi est ensuite appliqué à la brosse. Pareille composition du bordage était connue, mais n'avait jamais été observée sur une épave. Elle est révélatrice d'une navigation vers les mers chaudes, puisque dans les mers tropicales, la protection des coques de bois est cruciale. Ainsi, l'épave du *Mauritius*, une flûte perdue en 1608 sur les côtes du Gabon et fouillée en 1988, avait permis de visualiser pour la première fois un doublage de bois résineux, mais avec une interface en plomb. Le *Saint-Étienne* confirme que le même principe est toujours appliqué 160 ans plus tard, même s'il a été amélioré par un étendage de feutre réputé d'une grande efficacité contre les tarets. Le bordage du *Saint-Étienne* implique aussi une probable utilisation des pinques hors de Méditerranée. Étant donné les réseaux économiques de l'époque, des navigations occasionnelles jusqu'au Sénégal sont envisageables, mais nous n'avons pu le confirmer.

Couples flottants

L'épave du *Saint-Étienne* surprend aussi parce que tous les couples ne sont pas fixés à la quille ! Pour un esprit rationnel formaté par la charpente de marine occidentale, chaque couple doit être fixé à la quille afin que la coque soit rigide. Le *Saint-Étienne* nous fait reconsidérer cette idée, qui ne s'applique pas toujours en Méditerranée. Outre des pinques, la marine de commerce méditerranéenne du XVII^e^ siècle comprend de grandes barques pontées (les caboteurs par excellence), des chébecs (petits bateaux fins hispano-arabes à trois mâts et à voiles latines), des polacres (bâtiments mal définis, mais proches des pinques). Ces bateaux se sont développés, puis ont évolué hors des grands courants présents dans les pays du Nord de l'Europe, qui dès le XVI^e^ siècle, imposent leurs techniques de construction en lançant des expéditions commerciales au long cours.

Quant aux négociants méditerranéens, ils semblent s'être limités à commercer avec d'autres riverains de leur mer. Les pinques de Marseille étaient principalement utilisées pour le transfert de l'huile de palme de l'Afrique vers les savonneries marseillaises. Ils ont donc continué à faire caboter leurs « cargos » construits suivant les savoir-faire traditionnels, même si parfois des techniques étrangères se sont imposées. Le *Saint-Étienne* est l'illustration de cette situation. Sa construction confirme la transmission jusqu'à la fin du XVIII^e^ siècle d'usages immémoriaux. L'un des plus marquants est sans doute l'usage persistant de couples flottants : cette technique de construction était déjà en usage durant l'Antiquité…

© Pour la Science - n° 418 - août 2012

ACTUELLEMENT EN KIOSQUE

et sur www.pourlascience.fr/editionsnumeriques

Dossier Pour la Science n° 76

Les Néandertaliens étaient bien plus proches des hommes modernes qu'on ne l'imaginait. Plusieurs comportements montrent qu'ils ont participé à l'émergence des cultures : ils enterraient leurs morts, préparaient des pigments décoratifs, fabriquaient des bijoux en coquillages... Les Néandertaliens sont un maillon essentiel d'une longue histoire, dont les civilisations modernes ne sont que le prolongement.

Parution de juillet / septembre 2012 – Prix : 6,95 €

Cerveau & Psycho n° 52

Face au bruit et à une agitation ininterrompue, chacun aspire à retrouver calme et sérénité. La méditation, une façon de se recentrer sur ses émotions et ses sensations, permet d'y parvenir. Elle améliore le bien-être psychique et la santé, ainsi que la concentration et l'attention des enfants.

En plus de ce dossier, retrouvez les incontournables de *Cerveau & Psycho*, par exemple la critique psychologique du film *Les Aventures de Tintin*.

Parution de juillet / août 2012 – Prix : 6,95 €

Format classique ou pocket

L'Essentiel Cerveau & Psycho n° 10

Un stress de courte durée peut être favorable, car il stimule les fonctions cognitives. En revanche, s'il se prolonge, il a des conséquences négatives sur la santé psychique et physique. C'est aussi le cas de l'anxiété, une réaction inadaptée du cerveau qui anticipe l'imminence d'un danger qui n'existe pas. Aujourd'hui, des thérapies permettent de s'affranchir des diverses formes d'anxiété.

Parution de mai / juillet 2012 – Prix : 6,95 €

Dès le 10 août 2012, retrouvez en kiosque le prochain numéro de l'*Essentiel Cerveau & Psycho* « Donner l'envie d'apprendre »

Format classique ou pocket

POUR LA SCIENCE

L'énigmatique

À quelques mètres d'une plage dominicaine, se trouve l'épave d'une corvette chargée de matériel militaire français, à la coque américaine et dont les canons sont écossais... Une fois reconstruit, ce puzzle a révélé la carrière épique d'un petit bâtiment militaire de la fin du XVIIIe siècle.

François Gendron, Simon Spooner et Florence Prudhomme

Novembre 2008, Buen Hombre. Face à la plage de ce village de pêcheurs du Nord de la République dominicaine, un bien étrange naufrage s'est produit à la fin du XVIIIe siècle. Avec nos amis dominicains, nous clôturons notre troisième campagne sur place, et sommes perplexes. Comment expliquer cette découverte d'un navire de coque américaine, armé de canons écossais, mais plein de boutons d'uniformes français ? Pourtant, après un long cheminement, nous avons résolu cette énigme. Voici comment.

D'emblée, nous nommons notre épave le *Carron Wreck*, c'est-à-dire «l'épave Carron». La mention *Carron and Co* est en effet toujours lisible sur les tourillons, c'est-à-dire sur les deux moignons d'axes de ses huit canons en fonte, qui ont été fondus en 1778 à Falkirk en Écosse par *Carron*. À part cela, nous savons l'épave connue depuis les années 1970, quand des pêcheurs de Buen Hombre l'ont signalée. Malheureusement, ces découvreurs avaient remonté le safran du gouvernail pour récupérer les feuilles de cuivre qui le recouvraient, de sorte que nous n'avons de cette pièce essentielle que trois morceaux de bois brûlés. Ce pillage n'a rien d'étonnant tant l'accès à l'épave est facile.

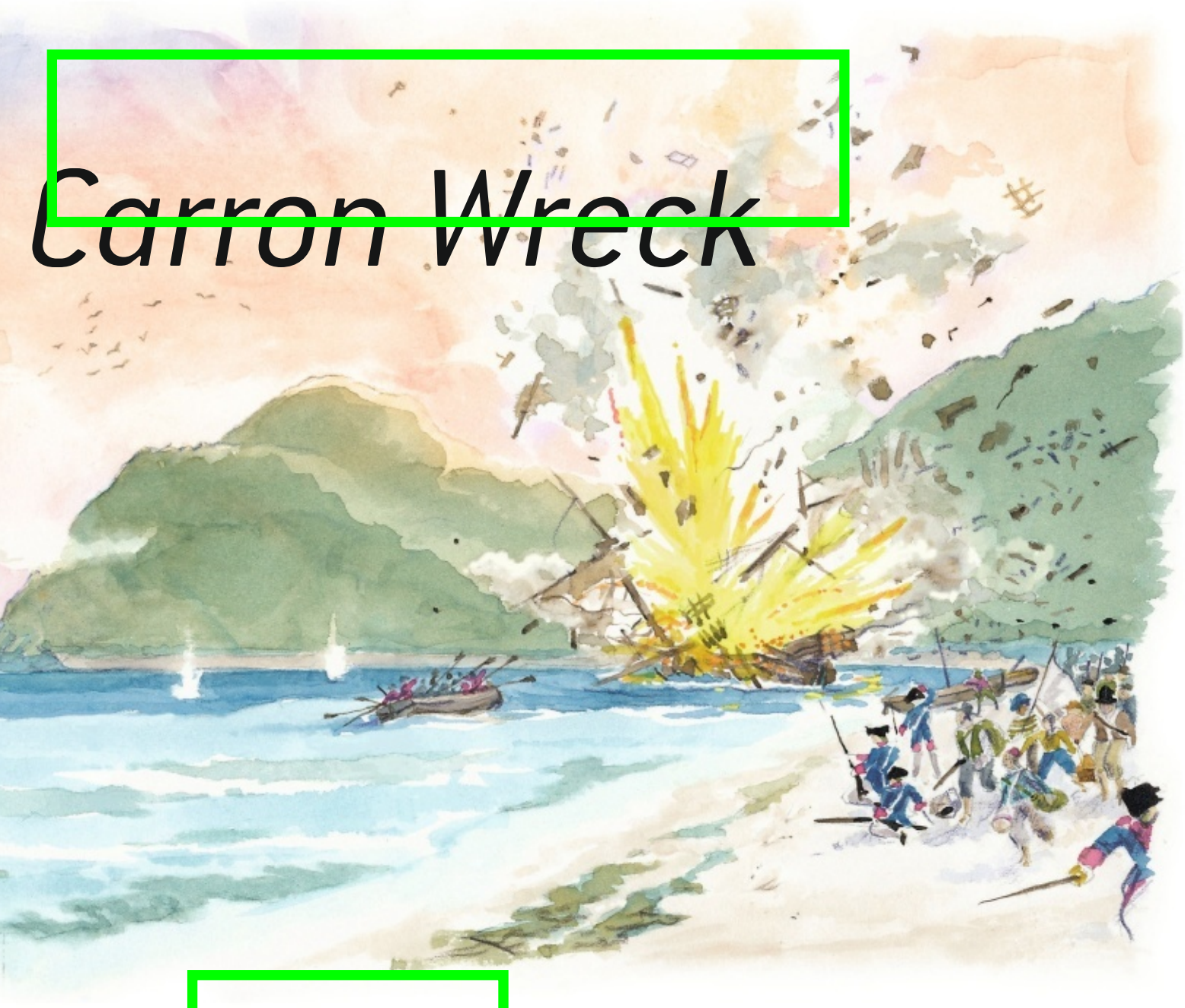
Premières plongées

Le *Carron Wreck* repose tout près de la plage de Buen Hombre. Le profil de cette plage, située au fond d'une anse, se prolonge et s'élargit vers la pleine mer par un chenal naturel qui coupe la barrière récifale. Certains jours, la visibilité peut être faible sur le site, car un ruisseau issu des collines proches se jette dans l'anse. De fait, nous constatons lors des fouilles que l'épave est couverte d'un mélange de sable, de boue, de branches et d'arbustes déposés par les crues hivernales de ce cours d'eau. Lors des tempêtes, le sable de la baie s'accumule aussi sur l'épave. Ces conditions impliquent que très peu de photographies de l'épave ont pu être réalisées *(voir l'encadré page 36)*, et expliquent qu'il nous soit souvent arrivé de découvrir les surfaces excavées la veille rebouchées le lendemain par la marée. Nous aurions pu pallier cette difficulté en construisant un barrage autour du site, mais cela nous aurait fait sortir du budget.

C'est en 1996 qu'un amateur local conduit la première opération archéologique sur le *Carron Wreck* : utilisant un détecteur de métaux, il localise trois canons et

© Pour la Science - n° 418 - Août 2012

Carron Wreck



fer et une ancre, qui sont aujourd'hui en lieu sûr. Ensuite, c'est lors de la mission archéologique que nous avons réalisée en 1998-1999 sur l'épave du *Casimir*, localisé dans la mer de la côte nord-dominicaine, que l'un d'entre nous (S. Spooner) va chercher les vestiges du gouvernail à Buen Hombre. L'étude de ces éléments ayant échappé au feu révèle une fabrication rudimentaire. À même le bois est fixée de la grosse toile de jute recouverte de poix ou de goudron, et une feuille de cuivre superficielle y est maintenue par un cloutage irrégulier. En septembre 2000, notre équipe teste de nouveaux systèmes électroniques de détection à Buen Hombre. Parce que nous avions constaté que les autres sites dominicains où nous avions travaillé avaient été pillés, nous décidons de dégager le *Carron Wreck* pour en

Illustration : Yves Reymond

1. BUEN HOMBRE est une plage tropicale où se jette un ruisseau descendant des collines. L'épave nommée *Carron Wreck* est située à l'extrémité de la plage face au bâtiment visible. Découverte dans les années 1970, elle a été déjà visitée et pillée à plusieurs reprises, mais une épaisse couche de sédiments et de sable en protège la plus grande partie. La fouille a été compliquée par la très faible visibilité due aux sédiments amenés par le ruisseau et par le fait que les fouilleurs devaient à reboucher chaque jour les excavations pratiquées la veille.

évaluer l'état. Malgré la mauvaise visibilité due à la boue mise en suspension, nous parvenons à dégager jusque sous l'étrave la partie avant de la coque, et exhumons le brion (partie de la coque située entre l'étrave et la quille) et la carlingue (pièce longitudinale fixant les couples sur la quille). Les vestiges de ces œuvres-vives (pièces immergées) montrent que la coque a été doublée d'une épaisse couche de feuilles de cuivre fixées par des clous de bronze. Ainsi, la coque était protégée des tarets navals, ces mollusques des mers chaudes ayant une forme de vers qui creusent des galeries dans le bois.

Au contact de l'eau de mer, le cuivre s'oxyde en un vert-de-gris toxique (chlorure de cuivre), ce qui empêche la fixation des tarets. Apparue en Angleterre, cette technique fut rapportée en France par des espions et adoptée peu avant la guerre de l'Indépendance des États-Unis (1776-1783). Toutefois, dans sa première forme, elle n'était pas parfaite : il fallut remédier aux effets de l'électrolyse que provoquait le rapprochement du cuivre du revêtement avec le fer des clous et des broches d'assemblage de la coque. La mise au point d'un bronze (alliage de cuivre et d'étain) assez dur rendit possible de renoncer au fer dans les œuvres-vives – les parties immergées des navires – à partir de 1786.

À l'issue de la campagne de 2000, la portion du *Carron Wreck* dégagée mesure huit mètres sur dix et cinq mètres de profondeur ; elle s'étend de la quille au sommet du lest. Cinq nouveaux canons ont été découverts à l'avant de la pile de ballast près de la proue. Sont-ils arrivés là à la faveur du processus de désagrégation de l'épave, ou étaient-ils en batterie sur le pont au moment du naufrage ? Le dégagement livre aussi le bloc de bois où est fiché le mât de misaine (ou massif d'emplanture). Il s'avère broché sur le vaigrage (parquet de fond de cale) à travers la coque, point qui contribue grandement à notre compréhension de l'architecture du bâtiment. Profitant d'une meilleure visibilité, nous inspectons toute la longueur du flanc bâbord afin de nous en faire une idée d'ensemble, découvrant ainsi le lest constitué de galets et de balles de mousquet en plomb et fer. Il est si concrétionné qu'il a moulé la forme intérieure de la coque disparue. Il est aussi incliné de 20 degrés vers tribord : la gîte du bateau lorsqu'il a coulé ?

Nous constatons que la distance entre le lest et la bouche du canon 1, le plus proche de la plage, est de 15,6 mètres. Avons-nous là une indication du fait que le navire était long d'un peu plus de 30 mètres ? Mais une tempête approche. Nous nous dépêchons de réenfouir l'épave pour la préserver du ressac, ce qui nous empêche de rechercher la cause du naufrage.

L'élaboration du plan

Alors que nous sommes de retour en Europe, commence le long travail de dessin consistant à reporter sur le papier les centaines de mesures prises et reprises sous l'eau. Le plan obtenu comporte l'emplacement et la forme de chaque pièce, ainsi que la position des canons. Il nous livre enfin une vision intégrale du *Carron Wreck*. Il s'agit d'un navire militaire de belle facture.

C'est passionnant, car les grands voiliers militaires étaient les réalisations techniques les plus élaborées de leur époque. Ces cathédrales des mers qu'étaient les vaisseaux, les frégates et autres corvettes étaient conçues pour accueillir et faire travailler des centaines d'hommes tout en résistant aux tempêtes et aux combats les plus acharnés. La vie à bord était minutieusement réglée, car les risques y étaient permanents : chutes depuis la mâture, maladies de promiscuité, blessures de combat, etc. Nous sommes également ravis de pouvoir étudier une coque, c'est-à-dire le reflet des savoir-faire ancestraux des charpentiers de marine, mais aussi celui des progrès techniques, car, même entre deux coques de classe équivalente, des différences sont toujours perceptibles.

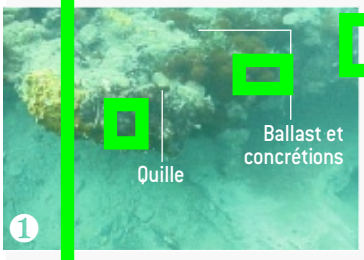
Par ailleurs, la fouille a livré quelques objets, rares, mais qui ont tous un sens. Nous les classons en trois catégories : les appareaux du navire (équipements), tels les crochets d'arrimage des canons, les poulies, etc. ; les objets personnels de l'équipage, tels des boutons, des dominos, etc. ; les objets commerciaux, tels les

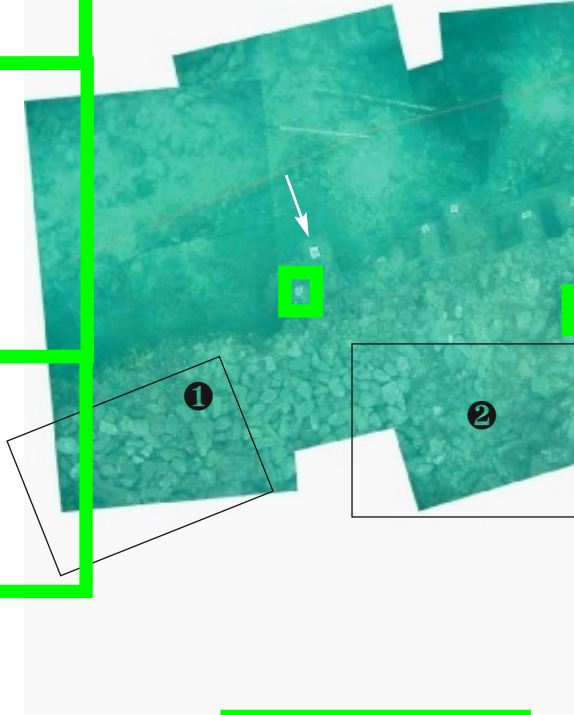
Le *Carron Wreck* a été reconstitué à partir de photographies prises pendant les rares jours où il était visible. Le reste du temps, les sédiments apportés par un ruisseau dévalant des collines et se jetant dans la mer empêchaient d'en avoir une vue nette et complète.

Sur la série de clichés montrée ci-contre, on distingue ainsi le « squelette » bâbord du navire, notamment une partie de sa membrure (*1*), des couples (*la flèche en repère un*) implantés dans la quille auxquels sont fixés les bordages formant la coque.

Sur la vue d'ensemble qui résulte de cet assemblage d'images, quelques gros plans ont été isolés. Il s'agit du ballast mêlé à des concrétions qui ont moulé l'intérieur de la coque disparue (*1*), de l'amas de balles de plomb et de galets, qui constituait le lest (*2*), du canon *Carron* (*3*), ou encore de l'emplanture du mât de misaine (le mât avant) dans le massif de bois où il était fiché (*4*).

Les chiffres visibles sur l'assemblage de clichés repèrent l'emplacement des structures et artefacts sur le *Carron Wreck*. Sauf les canons et autres gros objets, ils ne sont pas faciles à distinguer et à identifier, et l'étaient encore moins pour les archéologues dans un nuage de sédiments en suspension !





© Pour la Science - n° 418 - Août 2012

lingots d'or des galions. Leur étude précise est importante, car elle aide à établir la nationalité du navire et éventuellement à dater sa période d'activité. Nous supposons avoir affaire à un navire militaire, car nous n'avons pas découvert d'objets commerciaux, mais peut-être ont-ils été stockés à l'arrière de l'épave, non fouillé… De plus, les difficiles conditions de fouille font que bâbord est mieux documenté que tribord…

Que constatons-nous ? Ce qui reste de la coque se présente sous la forme d'un ensemble quille-varangues-carlingue assemblé à l'aide de broches de fer. L'une de ces broches de quille, brisée, émerge de la quille là où la carlingue et le vaigrage ont disparu. Sa hauteur totale du dessous de la quille jusqu'au-dessus de la carlingue devait être d'environ 1,5 mètre, indice qui nous permet de dire que ce système d'assemblage est postérieur à 1760. À cela s'ajoute la présence d'un double bordé

de cuivre, un cuivre qui, pour sa part, est une référence à la période transitoire 1760-1780, au cours de laquelle on découvre les effets électrolytiques néfastes des contacts du cuivre et du fer. De fait, les broches de quille du *Carron Wreck* sont un cas d'école en matière de la corrosion due à des phénomènes électrolytiques.

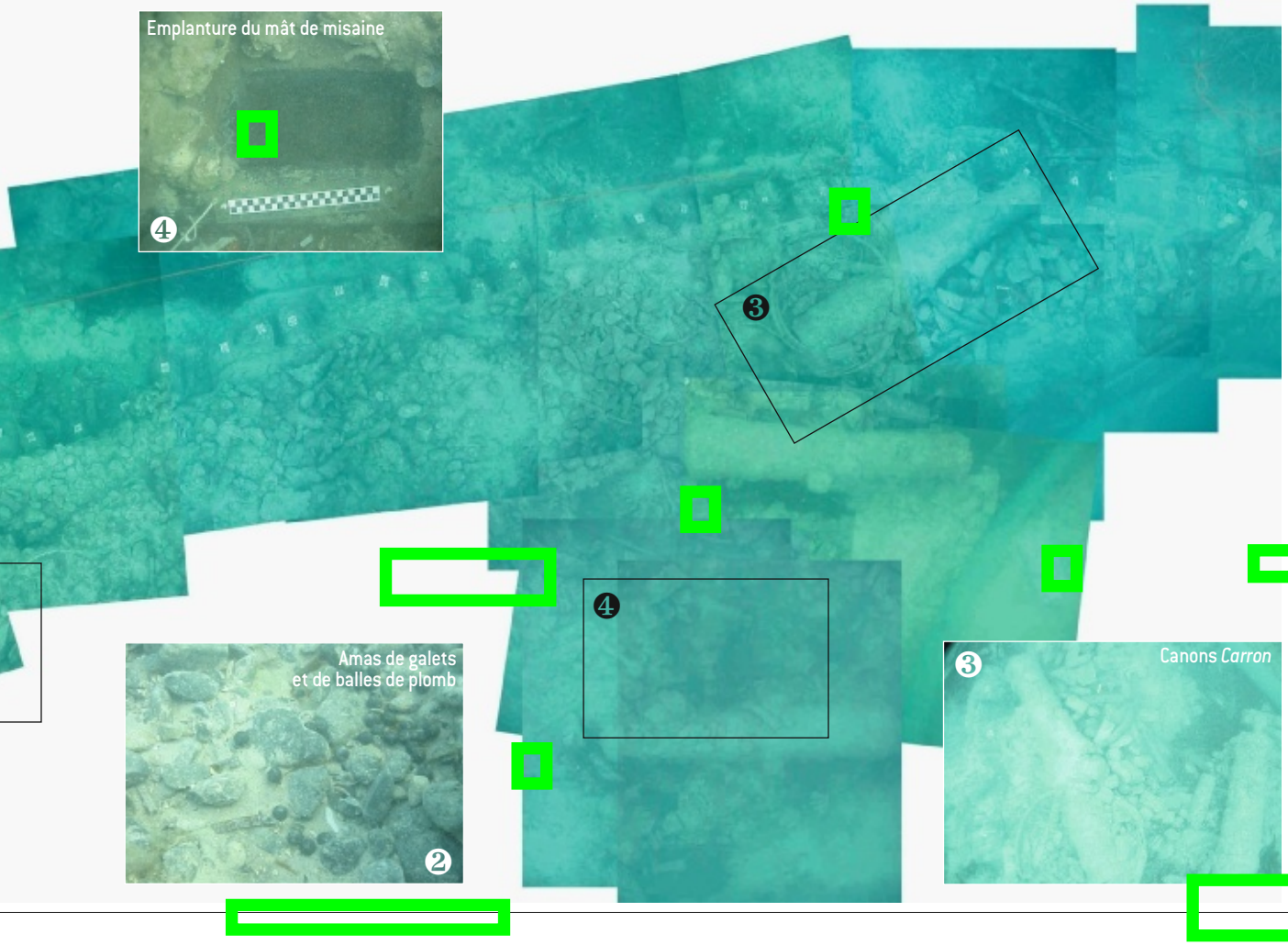
Courant 2004, les recherches que S. Spoerry a réalisées sur la construction du *Carron Wreck* éliminent de nombreuses pistes, mais retiennent celle d'un prototype de frégate américaine de classe Raleigh. Cette frégate fut construite en 1776 sur le chantier naval Rodman à Portsmouth dans le New Hampshire aux États-Unis sous la direction de John Landon. Cette date coïncide avec les inscriptions relevées sur les canons remontés en 1996. On y lit « Carron » avec, dessous, la date 1778. Ces canons font donc probablement partie du dernier lot fondu par les forges écossaises *Carron and Co* avant la généralisation de la

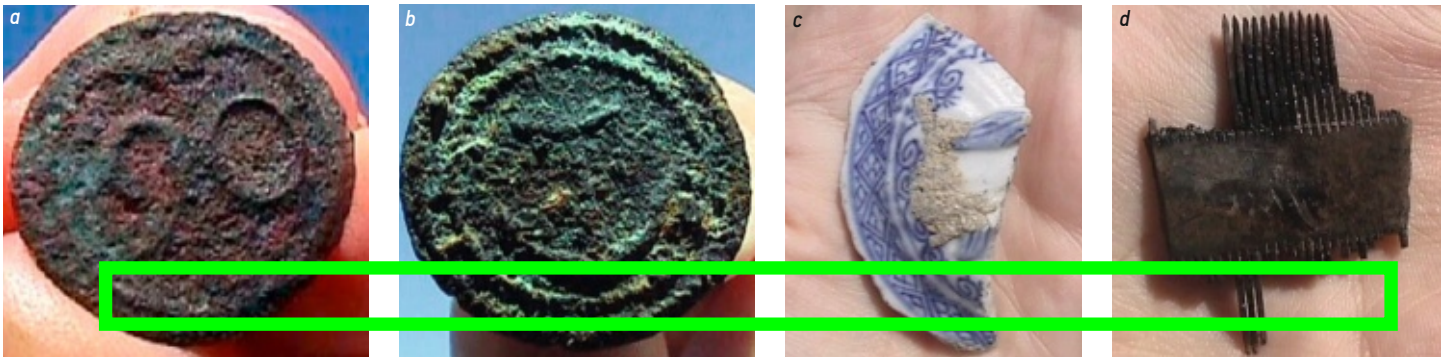
L'ESSENTIEL

- De nombreuses épaves se trouvent au patrimoine des côtes dominicaines.
- À quelques mètres d'une plage, l'une d'elles, mêlant caractéristiques françaises, britanniques et américaines.
- Une fouille partielle suivie d'une longue enquête dans les archives a livré le nom de ce patrimoine militaire français.
- Son histoire rocambolesque et sa longue guerrière expliquent les étonnantes constatations qu'y ont faites les archéologues.

Sauf mention contraire, l'iconographie est de F. GEndron, ADMAT

LES PHOTOGRAPHIES DU *CARRON WRECK*





2. LES ARTEFACTS TROUVÉS SUR L'ÉPAVE sont des boutons d'uniforme (un bouton du régiment de Dillon, *a*, et un bouton du Corps royal de la marine française, *b*), à un robinet peut-être fixé à un tonneau *(e)*, en passant par les restes de la vaisselle du chevalier de l'Espine *(c)* et un pei-

caronade à partir de 1779 en Angleterre et de 1795 en France. *Carron and Co* a en effet ensuite été mobilisée pour équiper toute la marine anglaise avec ce type de canon court qu'il avait inventé.

Nous en sommes donc à penser que le *Carron Wreck* est un navire militaire construit sur la côte Est des États-Unis d'Amérique vers 1780, mais équipé de canons fondus en Écosse en 1778, quand l'étude des munitions et des boutons d'uniformes complique encore la situation. Le *Carron Wreck* recèle peu de boulets de canons, mais les fouilles livrent en revanche plusieurs de ces charges de mitraille, que l'on nomme des « grappes de raisin ». Utilisées par de nombreuses marines, ces munitions étaient des armes antipersonnel destinées à contrer les abordages.

Apparues à la fin du XVII^e^ siècle, elles marquent une étape dans la guerre maritime, puisqu'elles visent à tuer ou estropier l'homme et non plus à endommager la machine (comme le faisaient les boulets des canons). Elles ouvrent la voie à des surenchères destructrices qui iront croissant jusqu'à la bataille de Trafalgar (1805). Les grappes de raisin sont constituées d'un sachet en toile légère contenant une vingtaine de grosses billes de fer solidement ligaturées autour d'une tige fixée au centre d'un disque au calibre du canon. Elles ressemblent donc à une grappe de raisin, d'où leur nom. La mise à feu consume la ligature et le tissu, tandis que l'explosion propulse le disque, la tige et les billes qui se dispersent en gerbes sur l'ennemi.

En vertu du règlement de 1765 des magasins de la marine royale anglaise, le disque et la tige doivent être en fer. Or ceux que nous avons découverts sur le *Carron Wreck* sont tous en bois. De plus, la périphérie de ces disques est marquée d'une profonde encoche permettant d'accueillir une corde goudronnée. Son rôle est de permettre l'enfoncement en force des munitions dans le canon de façon à mieux comprimer les gaz de combustion lors du tir. Quant à la hauteur des tiges, elle ne coïncide pas non plus avec le règlement anglais de 1765 : toutes mesurent 30 centimètres alors qu'elles devraient en mesurer 17. Enfin, le diamètre des billes de fer correspond à celui des règlements français…

Nous sommes donc étonnés, mais obligés de conclure avoir affaire à des grappes de raisin de calibre 9 de fabrication française. C'est d'autant plus étonnant que ce calibre n'était guère populaire dans la marine française, où on lui préférait le 8 ou le 12 livres. Ces chiffres correspondent au poids en livres des munitions, et les canons étaient nommés d'après le poids des boulets qu'ils propulsaient. Les munitions de neuf livres françaises se rencontrent en fait plutôt sur les navires anglais capturés. Ultime détail d'importance, certaines de ces grappes de raisin ont un disque de 12 centimètres de diamètre, alors que le diamètre de l'âme des canons de 9 livres est de 10 centimètres, ce qui suggère la présence de canons d'un calibre plus important sous

Précieux boutons

En outre, le puzzle du *Carron Wreck* est compliqué par la découverte de boutons militaires français. Le matériel militaire d'époque moderne (de 1492 à 1792) mis au jour en contexte archéologique est un bon marqueur chronologique, puisqu'il est normalisé par des règlements militaires. À partir du XVI^e^ siècle, l'uniforme des soldats et des officiers ne sont plus le fruit du goût ou de l'originalité individuelle, mais de décisions édictées. C'est pourquoi nous avons vite attribué l'un des boutons au Corps royal de la marine française de la période 1772-1789.

Leur description réglementaire est formulée ainsi : « blancs, de métal massif, à queue, timbrés d'une ancre ». Ce modèle de bouton était porté par les régiments d'infanterie au service des colonies de l'Amérique, c'est-à-dire par les régiments du Cap, du Port-au-Prince, de la Martinique et de la Guadeloupe, créés par l'ordonnance royale du 18 août 1772. En cuivre, le second bouton est timbré du chiffre 90. Il provient de l'uniforme d'un soldat du régiment de Dillon (un régiment privé irlandais mis au service du roi de France par la famille irlandaise Dillon). Le règlement militaire du 31 mai 1776 décide en effet de timbrer avec des numéros les boutons des régiments de ligne. Chronologiquement, ces dates nous situent à la charnière entre la fin du règne de Louis XV et le début de celui de son petit-fils, Louis XVI, ce qui limite les recherches en archives à celles du règne de ce souverain après 1774.

Nous supposons donc avoir affaire à un navire de guerre construit aux États-Unis entre 1775 et 1780, armé de canons écossais et capturé par les Français. Aussi étonnante que puisse paraître cette histoire, les archives vont nous donner raison, mais en révélant une histoire encore plus compliquée. Après plusieurs fausses pistes et quelques déconvenues, grâce à la perspicacité de l'une d'entre nous (F. Prudhomme) nous avons retrouvé en juin 2006 l'histoire du brick *Le Dragon*.

L'historien de la marine française Alain Demerliac a rédigé à son propos la notice suivante : « Pris aux Anglais. Armé au Croisic en 1781. En 1782 attaqué

© Pour la Science - n° 418 - Août 2012

gne antipo x (d) faisant sans doute partie des effets pers nnels d'un marin.

par une d vision anglaise, s'échoua sur la côte de Montechristo à St-Domingue, incendié par son équipage pour lui éviter d'être capturé, explosa. Armé de 16 canons, monté pa cinq officiers et 96 hommes. » La piste semble bonne, pourvu que l'on considère que Montechristo est une mauvaise gra hie de Monte Cristi, la seule grande vi e de la région située 25 kilomètres à l'Ouest de Buen Hombre.

Quelles furent les aventures maritimes du *Dragon* ? Elles se déroulent au temps de la guerre de l'Indépendance des États-Unis. Louis XVI envoie un corps expéditionnaire français soutenir les insurgés américains dans leur marche vers l'indépendance. L'autre objectif de cette opération militaire est de prendre une revanche sur les Anglais, le Traité de Paris de 1763 nous ayant valu de perdre, entre autres, le Canada, le Bassin des Grands Lacs et la rive gauche du Mississippi. Rapidement, le conflit déborde du continent nord-américain et des engagements navals se produisent entre Français et Anglais dans la Manche et l'Atlantique.

Ainsi, le 12 août 1781, la frégate *La Friponne* capture le brick corsaire anglais *Le Dragon*. Conduit au Croisic et bien qu'en mauvais état, le brick est acheté 9 438 livres par le roi, puis transféré à Lorient pour être radoubé et transformé en corvette brigantine. On lui ajoute un mât et on le perce de 20 sabords, mais le cuivre en plaque manque pour pouvoir le doubler. Une lettre du 20 février 1782 décrit ses caractéristiques : « Son pont est uni et sans coupée : elle a 16 canons de 4 et 4 obusiers du calibre de 6 ; elle peut monter 12 pierriers. Son équipage doit être de 120 personnes tout compris. Elle contiendra alors pour 2 mois de vivres, ou peut-être 2 mois et demi tout au plus. Sa longueur absolue est de 69 pieds (22,41 mètres), soit 2/3 pieds (7,66 mètres) et son creux de 8,8 pieds (2,85 mètres). »

Le 1er avril 1782, *Le Dragon* est prêt à faire voile sous les ordres de M. le chevalier de l'Espine, marquis du Puy (1759-1822), qui veille sur elle depuis Le Croisic. Son équipage est complété par 15 soldats du bataillon auxiliaire des colonies, régiment dont les boutons d'uniforme sont timbrés d'une ancre. La première mission du *Dragon* consiste à escorter des bâtiments de commerce vers Brest. À l'époque, une corvette est considérée comme un navire rapide destiné à porter des ordres et des lettres, de sorte que le 5 avril, de l'Espine reçoit ordre de rejoindre au plus vite Philadelphie pour porter des dépêches et des paquets au général Rochambeau (1725-1807), à l'ambassadeur de France de La Luzerne (1741-1791) ainsi qu'au Congrès américain.

Une voie d'eau et une coque

Toutefois, peu de jours après avoir appareillé de Lorient, on s'est aperçu d'une voie d'eau peu considérable dans les commencements qui commençait à notre passage aux Açores à nous donner douze pouces d'eau par heure (32,5 centimètres) ». Le 4 mai, les vents qui portaient jusque-là *le Dragon* vers l'Amérique tournent et deviennent si violents que le chevalier de l'Espine est obligé de fuir, gouvernant Est-Nord-Est et Nord-Est. Mais la mer devient si forte que l'après-midi le bâtiment est engagé par une lame qui le recouvre et l'empêche de se relever. La situation est désespérée et pour éviter de couler, de l'Espine fait jeter par-dessus bord les poids les moins utiles, 4 canons, 6 pierriers, la drisse, les avirons de galère, etc. La voie d'eau en cale augmente encore et l'oblige finalement à rallier Boston plutôt que Philadelphie.

Le 6 mai, la corvette est désarmée afin que ses fonds soient examinés. Les dégâts sont considérables. *Le Dragon* étant hors d'état de naviguer, le 22 juin 1782, M. de Letombe, consul général de France, et M. Joseph Barck, constructeur de navire, signent un agrément afin de construire une nouvelle coque. Deux mois et demi plus tard, le 10 septembre 1782, la corvette du roi *Le Dragon*, pourvue de sa coque américaine tout neuve, appareille de Boston pour la France. Elle arrive à Lorient le 1er octobre 1782, en ayant capturé le 24 septembre un bâtiment de commerce anglais

LES AUTEURS

Simon SPOONER, archéologue, a fondé le Groupe d'archéologie sous-marine anglo-danoise ADMAT.

François GENDRON, archéologue, travaille au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris.

Florence PRUDHOMME, archéologue, est la secrétaire générale d'ADMAT-France.

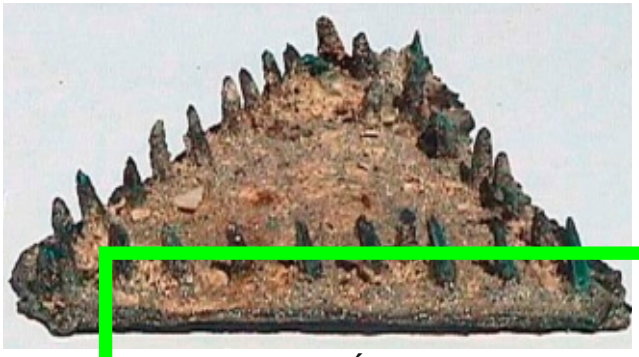
BIBLIOGRAPHIE

S. Spooner et F. Gendron, **L'épave du parfumeur**, *Pour la Science*, n° 362, décembre 2007.

S. Spooner, **ShipWreck Taphonomy : A Study of Four Historic Wreck Formation Processes on the North Coast of the Dominican Republic from 1690 - 1829**, Thèse de l'University de Bristol, ADMAT Publications, Londres, 2004.

A. Demerliac, **La Marine de Louis XVI : nomenclature des navires français de 1774 à 1792**, Omega, Nice, 1996.

Archives de la marine consultées :
– Caran, Série Marine B/4/266, **Campagnes, 1782-84 Antilles, Amérique du Nord.**
– **Lettre de M. de Bellecombe.**
– **Le rapport naufrage du Dragon.**



3. CETTE PLAQUE DE CUIVRE CLOUTÉE DE BRONZE *(à gauche)* est l'un des éléments du revêtement de cuivre du bateau. À la fin du XVIIIe siècle, on commence à recouvrir les coques de protection contre les tarets, ces mollusques bivalves à corps allongés en forme de vers, que les navires ramènent dans leurs bagages des mers chaudes. Ces tarets percent des trous dans des navires en bois, y creusant des galeries pouvant mesurer plusieurs dizaines de centimètres. L'une des pièces de bois du *Carron Wreck* en est aujourd'hui infestée *(à droite)*.

de 500 tonneaux de la flotte de la Jamaïque chargée de sucre et de rhum. De l'Espine, ayant testé les qualités de son navire lors de la traversée, demande instamment à ce qu'il soit doublé de cuivre. Nous n'avons pas retrouvé de documents l'attestant, mais pensons que ce doublage fut posé entre le moment où il est arrivé à Brest et celui où il est reparti pour Saint-Domingue.

Nous sommes quelques semaines avant la signature du traité de paix devant mettre fin aux hostilités entre la France et l'Angleterre et les échanges de courriers secrets avec les colonies s'intensifient. Le 11 décembre 1782, de l'Espine reçoit ordre de conduire à Saint-Domingue le chevalier de Courrejolles (1736-1827), capitaine du génie, chargé de paquets importants de la Cour pour le gouverneur. La traversée se déroule sans encombre. De l'Espine serre la terre au plus près, afin de ne pas être aperçu par les croiseurs ennemis tout en profitant des vents de terre.

Mais, le soir, il est repéré par la goélette anglaise *HMS Dorkin* et une frégate qui, durant toute la nuit, font des signaux lumineux. De l'Espine rapporte les ruses qu'il employa pour échapper à l'ennemi : « Le 22 (janvier 1783) à la pointe du jour me trouvant entre la pointe Isabellique et celle de La Grange à environ une lieue de la première, j'ai eu connaissance de dix-huit voiles à peu de distance sous le vent à moi, la plupart vaisseaux de guerre formant une espèce de chaîne de la Pointe Isabellique à la Pointe de La Grange. Toute l'escadre a serré le vent dès qu'ils m'ont aperçu pour me couper sous la Pointe de La Grange que je cherchais à gagner. » Il s'agit de l'escadre de l'amiral Samuel Hood (1724-1816), qui referme son piège.

Le chevalier de l'Espine est face à un dilemme : d'un côté la barrière récifale, de l'autre 18 vaisseaux rangés en ordre de bataille et des lettres secrètes dont l'ennemi ne doit pas s'emparer. « Je vis qu'il était absolument nécessaire de tenter un coup hardi et je ne perdis pas même l'espoir de sauver le bâtiment. Si je pouvais pénétrer au-dedans des récifs ainsi que j'en formai le projet, imaginant qu'il pouvait dans toute cette longueur se trouver un endroit où cela fut praticable. Deux vaisseaux, l'un par notre gauche, l'autre par notre arrière, un troisième à peu près par notre travers un peu de l'avant à nous et marchant mieux ce qui par conséquent m'ôtait tout espoir. Tous les trois à portée de canon, nous tiraient cependant coup sur coup. Je fis monter un homme de confiance sur la hune de misaine pour voir si l'on découvrirait un endroit où la mer ne brisât point pour tenter d'y traverser et en effet après avoir couru bien des risques, nous parvînmes en dedans des roches. »

Se saborder peut-être, se rendre, non !

Pour se mettre hors de portée des canons ennemis et attendre le départ des vaisseaux anglais, de l'Espine fait franchir le second rang de récif à sa corvette et mouille à une encablure de la terre. Mais les Anglais mettent alors les canots à la mer pour tracer une route aux vaisseaux à travers les récifs. Dès lors, il faut sauver l'équipage et les missives, et pour cela, il ne reste plus qu'une solution : le sabordage : « Dès l'instant que j'avais vu les premiers vaisseaux en dedans des rochers m'apercevant qu'il n'y avait plus d'espoir de sauver le bâtiment j'avais coupé mon câble et [...] m'étais mis à la côte bien résolu d'empêcher le bâtiment de tomber au pouvoir de l'ennemi [...]. Après avoir mis tout mon équipage à terre avec toutes les armes portatives et n'ayant gardé à bord que quelques hommes des plus braves et des plus déterminés, j'ai fait d'abord pointer les canons de retraite pour écarter les chaloupes ennemies qui s'imaginant que le bâtiment était abandonné venaient déjà en prendre possession et j'ai fait ensuite disposer les artifices et mettre le feu après quoi je me suis transporté à terre où nous avons entendu sauter en l'air le bâtiment qui nous a couverts de ses débris. » Le navire détruit, la bataille prend fin. Les Anglais regagnent leurs bords et l'équipage du *Dragon* se rend ensuite à Monte Cristi, puis au Cap-Français. De Courrejolles peut y remettre ses précieux paquets au Gouverneur.

L'esprit du chevalier de l'Espine fut récompensé : Louis XVI lui accordera 2000 livres pour le dédommager de la perte de « ses provisions de tables et de ses effets par le naufrage de cette corvette après des manœuvres honorables pour la sauver devant des forces très supérieures ». Il n'aura manqué que deux semaines, et *Le Dragon* aurait pu continuer à voguer sur l'Atlantique : le 4 février 1783, soit deux semaines après son sabordage le 22 janvier 1783, un armistice mettant fin aux hostilités est signé entre les États-Unis et l'Angleterre. Dès lors, la corvette *Le Dragon* du chevalier de l'Espine restera dans l'histoire comme le dernier bateau français perdu lors de la guerre de l'Indépendance des États-Unis. Quant à nous, nous avons été ainsi à reconstruire l'histoire de l'épave *Carron Wreck*, qui gît près de Saint-Domingue et qui n'est autre que celle de ce même *Dragon*.

© Pour la Science - n° 418 - Août 2012

Rendez-vous sur

POUR LA SCIENCE .fr

Le site de référence de l'actualité scientifique internationale

- Retrouvez gratuitement les actualités scientifiques quotidiennes.
- Nouveau ! Écoutez nos entretiens audio ou téléchargez-les.
- Recevez nos lettres d'information et réagissez aux articles en vous inscrivant sur www.pourlascience.fr/newsletters
- Consultez les archives de tous nos magazines depuis 2004.
- Accédez aux numéros numériques compris dans votre abonnement en créant votre compte.
- Suivez notre actualité en direct :

http://www.pourlascience.fr/rss

http://twitter.com/pourlascience

http://www.pourlascience.fr/pls-facebook

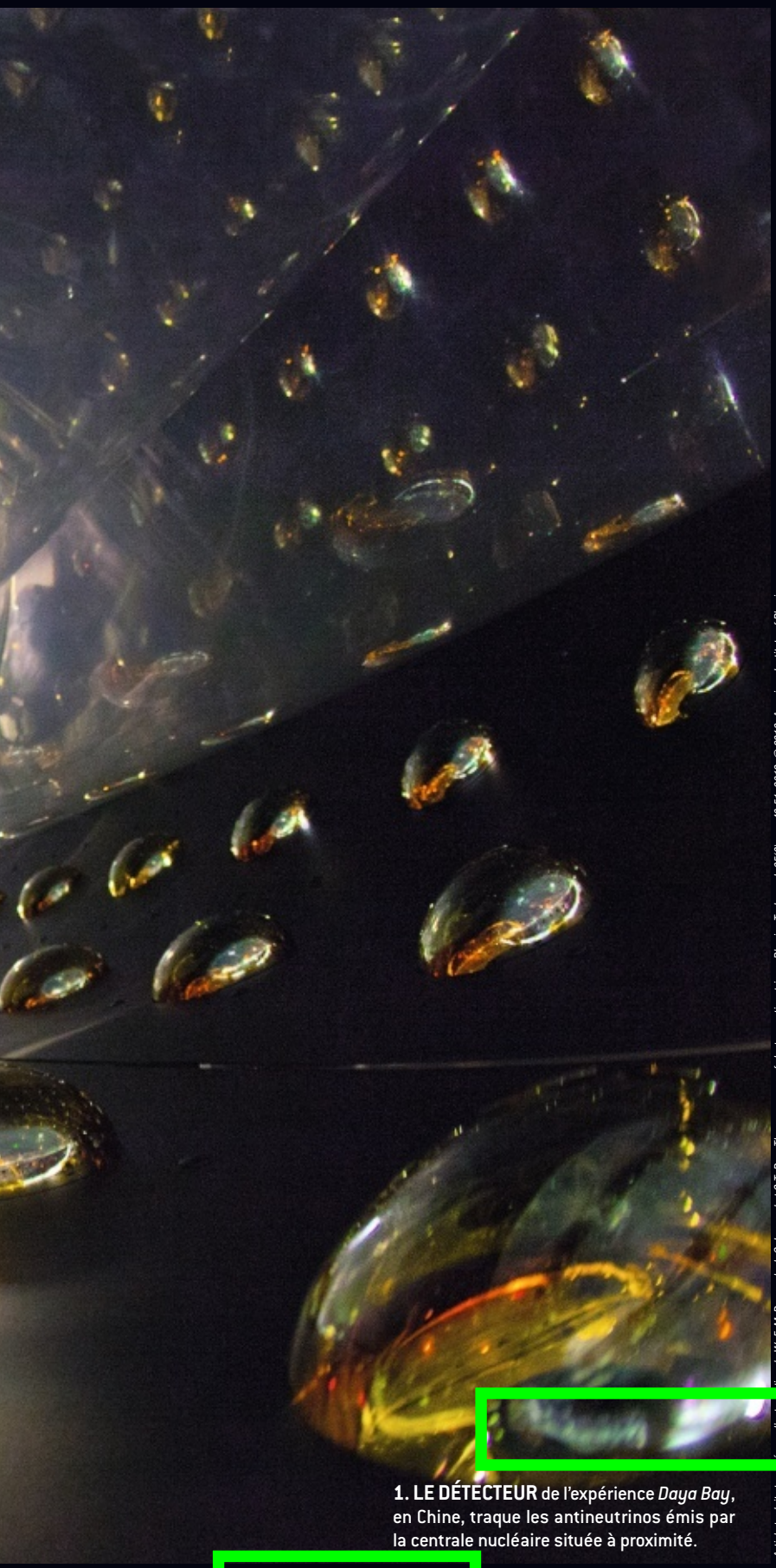
À très bientôt sur www.pourlascience.fr !

Des neutrinos pour sonder l'intérieur de la Terre

William McDonough, John Learned et Stephen Dye

Ces particules passe-muraille sont devenues un outil pour sonder les profondeurs de la Terre et comprendre comment notre planète produit de la chaleur. Elles seraient aussi utiles pour surveiller les centrales nucléaires.

© Pour la Science - n° 418 - Août 2012



1. LE DÉTECTEUR de l'expérience *Daya Bay*, en Chine, traque les antineutrinos émis par la centrale nucléaire située à proximité.

Article traduit et publié avec l'autorisation de W. F. McDonough, J. G. Learned et S. T. Dye. The many uses of electron antineutrinos, Physics Today, vol. 65(3), pp. 46-51, 2012. © 2012, American Institute of Physics.

Les n[illegible] sont les particules les plus discrètes que l'on connaisse. Ils interagissent très peu avec la matière et les détecter est un défi. Pourquoi intéressent-ils tant les physiciens ? Parce que leurs propriétés fondamentales sont encore imparfaitement cernées ; mais aussi parce qu'en considérant un type de ces particules – les antineutrinos électroniques – produit par la radioactivité bêta, les physiciens et géophysiciens ont imaginé diverses applications hors du champ de la physique des particules.

Ainsi, depuis quelques années, ces antineutrinos livrent des indices sur l'origine de la Terre et son histoire thermique. En outre, ils fournissent des renseignements sur l'évolution du combustible dans les réacteurs nucléaires et devraient livrer de nouveaux indices sur la production des éléments lourds dans les supernovae.

Deux gros détecteurs d'antineutrinos électroniques, pesant près de 1 000 tonnes, épient en continu l'intérieur de la Terre pour aider les géologues à déterminer l'abondance de l'uranium et du thorium et leur distribution dans les entrailles de la Terre. Ce sont les principaux éléments radioactifs producteurs de chaleur de la planète. Un troisième gros détecteur les rejoindra bientôt. Ces détecteurs, ainsi que d'autres beaucoup plus petits, peuvent aussi surveiller les réacteurs nucléaires partout dans le monde *(voir la figure 1)*. La prochaine génération de détecteurs, encore plus gros, servira dans plusieurs domaines (la physique des astroparticules, la géologie, les études de réacteurs et la physique des particules élémentaires).

Les trois types de neutrinos – on les qualifie de « saveurs » électronique, muonique et tauique – sont insensibles à l'interaction électromagnétique et à l'interaction forte, deux des trois interactions fondamentales du modèle standard de la physique des particules. Autrement dit, ils ne sont sensibles qu'à l'interaction faible. Ils sont au moins un million de fois plus légers que l'électron. Leur probabilité d'interaction est très faible, ce qui rend les neutrinos difficiles à détecter. Malgré ces obstacles, ces particules permettent de scruter les entrailles des étoiles ou de notre planète.

Les neutrinos restent un sujet central pour la recherche fondamentale en physique des particules. Les scientifiques ont encore à en étudier des propriétés telles que leurs masses ou leurs oscillations

– cette capacité des neutrinos de changer spontanément et périodiquement de saveur au fil du temps. Nous nous intéresserons ici surtout à leur utilisation en géologie et dans le domaine de la sûreté nucléaire.

L'existence des neutrinos a été postulée en 1930 par le physicien autrichien Wolfgang Pauli, afin que la conservation de la quantité de mouvement dans les désintégrations bêta soit conservée. Pauli supposa que la réaction de transformation d'un neutron en proton s'accompagnait non seulement de l'émission d'un électron, mais aussi de l'émission d'une autre particule inconnue à l'époque, le neutrino, sans masse et indétectable, excepté sous forme de quantité de mouvement manquante *(voir l'encadré ci-dessous)*. Mais en 1956, les physiciens américains Frederick Reines et Clyde Cowan et leurs collègues ont réalisé la première observation d'antineutrinos électroniques, au moyen d'un détecteur placé à une dizaine de mètres d'un réacteur nucléaire de la centrale nucléaire de Savannah River, aux États-Unis.

Dix ans plus tard, le physicien et chimiste américain Raymond Davis mit au point un détecteur installé dans les profondeurs de la mine Homestake de Lead, dans le Dakota du Sud, et a observé pour la première fois des neutrinos électroniques

L'ESSENTIEL

- Les neutrinos interagissent peu avec la matière, mais leur production en grand nombre permet de détecter quelques-uns.
- Les géoneutrinos, produits par les éléments radioactifs du manteau et de la croûte terrestres, révèlent la contribution de la radioactivité à la chaleur produite par la planète.
- Les réacteurs nucléaires peuvent être surveillés à distance en étudiant les antineutrinos qu'ils produisent.

Page précédente : Lawrence Berkeley National Laboratory, Roy Kaltschmidt, photographe

en provenance du Soleil. Mais il n'en a détecté que le tiers environ de ce qui était attendu d'après les modèles solaires, qui estiment l'énergie produite par notre étoile, le nombre de réactions de fusion en jeu et le flux de neutrinos électroniques émis.

Ce déficit était la première indication d'un phénomène aujourd'hui attesté par de nombreuses expériences : l'oscillation des neutrinos. Une partie de ces particules venant du Soleil changeaient de saveur lors de leur trajet, mais l'expérience de Davis n'était pas conçue pour détecter deux autres types de neutrinos (les neutrinos muoniques et tauiques).

Des oscillations de la saveur

À partir de 2002, le détecteur KamLAND *(Kamioka Liquid AntiNeutrino Detector)*, installé dans la mine de zinc de Kamioka, au Japon, a surveillé les émissions d'antineutrinos de dizaines de réacteurs situés à des distances diverses. Comme pour les neutrinos solaires, les physiciens ont mis en évidence que les antineutrinos électroniques changeaient de saveur.

Dans le formalisme mathématique de la physique des particules, le phénomène d'oscillation des neutrinos ne peut se comprendre que si les neutrinos sont

NEUTRINOS, ANTINEUTRINOS ET DÉSINTÉGRATION BÊTA

Le modèle standard de la physique des particules inclut trois types de neutrinos associés aux trois leptons chargés – l'électron, le muon et le tau. Ces six particules ne sont pas sensibles à l'interaction forte. Les neutrinos [illegible] charge électrique et donc pas d'interaction électromagnétique.

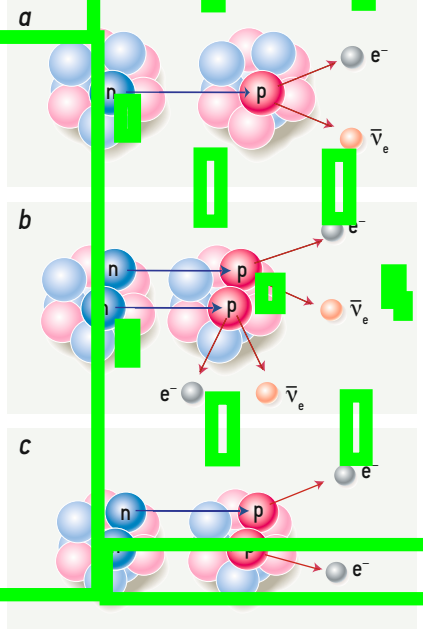
On définit un « nombre leptonique » L, qui vaut $+1$ pour les leptons, -1 pour les antileptons et 0 pour toutes les autres particules. Dans toute réaction entre particules, le nombre leptonique est conservé : la somme des nombres [illegible] particules qui réagissent est égale à la somme de ceux des particules produites.

Ainsi, dans la désintégration bêta *(a)*, un neutron ($L = 0$) se transforme en proton ($L = 0$) avec l'émission d'un électron ($L = +1$) et d'un antineutrino ($L = -1$). Cette réaction est courante pour de nombreux isotopes riches [illegible] rée de vie longue sont par exemple l'uranium, le thorium et le potassium.

Dans les réactions stellaires de fusion, la réaction opposée se produit : les protons deviennent des neutrons quand les [illegible] ches entiers, fusionnent. Ainsi, les étoiles produisent surtout des neutrinos.

la nature de l'antiparticule du neutrino. Si l'antineutrino est une particule distincte, le neutrino est un « fermion de Dirac ». Si le neutrino est sa propre antiparticule, on parle de « fermion de Majorana ».

Pour déterminer la nature de la particule, les physiciens cherchent à observer deux désintégrations bêta simultanées *(b)*. Dans la plupart des cas, il y a émission de deux électrons et deux antineutrinos. Si le neutrino est un fermion de Majorana, l'antineutrino émis par un neutron peut être absorbé par [illegible] ron puisqu'il est aussi un neutrino. De nombreuses expériences cherchent à observer la double désintégration bêta [illegible] émission de neutrino *(c)*, qui prouverait que l'on a affaire à des fermions de Majorana.



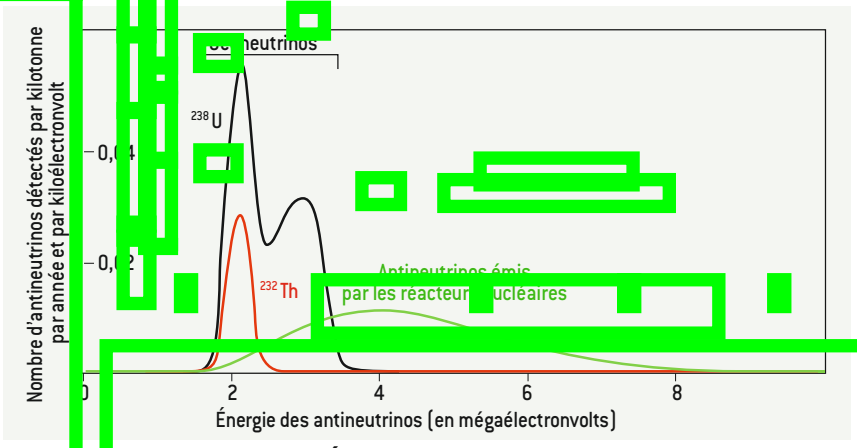
n = neutron ; p = proton ; e^- = électron ; $\bar{\nu}_e$ = antineutrino électronique

Pour la Science

© Pour la Science - n° 418 - Août 2012

des particules mettant en jeu trois masses différentes (on ignore la valeur précise de ces masses aujourd'hui).

L'expérience KamLAND a été conçue pour étudier la physique fondamentale des antineutrinos électroniques, émis par des réacteurs situés à des distances variées avec des énergies pouvant atteindre huit mégaélectronvolts. Dans le détecteur, les antineutrinos incidents interagissent avec des protons (noyaux d'hydrogène) au sein d'une kilotonne de scintillateur liquide, selon la réaction : antineutrino électronique + proton → positron + neutron. La production d'un positron et d'un neutron se traduit par l'émission de photons, captés et amplifiés par des milliers de photomultiplicateurs entourant le scintillateur. L'énergie de l'antineutrino doit être supérieure à 1,8 mégaélectronvolt pour que la réaction ait lieu.



2. LE NOMBRE D'ANTINEUTRINOS ÉLECTRONIQUES détectés par kilotonne de scintillateur en fonction de l'énergie de la particule dépend de la source d'émission. Le seuil à 1,8 mégaélectronvolt correspond à l'énergie minimale nécessaire pour la réaction de désintégration bêta inverse. Au-dessus de 3,5 mégaélectronvolts, le spectre attendu est dominé par les géoneutrinos, issus des chaînes de désintégration de l'uranium 238 et du thorium 232 de la croûte et du manteau terrestres. Le spectre des antineutrinos provenant des réacteurs nucléaires culmine autour de quatre mégaélectronvolts, énergie à laquelle l'amplitude du spectre des géoneutrinos est négligeable. Il est ainsi possible de faire la distinction entre les sources naturelles et les réacteurs.

Garder un œil sur les réacteurs

Les futures générations de détecteurs – comme l'expérience *Nucifer* développée par des laboratoires français – pourront surveiller le fonctionnement des réacteurs nucléaires et participer au contrôle de la non-prolifération d'armes nucléaires. Au début du cycle du combustible nucléaire, les barres de combustible produisent du plutonium de qualité militaire en plus de nombreux autres isotopes radioactifs. Dans les réacteurs nucléaires non suspects, les barres de combustible sont utilisées jusqu'à ce qu'elles soient fortement (mais pas complètement) appauvries en matériau fissile, en général en 18 mois environ. Une utilisation clandestine des réacteurs pour produire de l'armement nucléaire à base de plutonium serait facile à repérer, le réacteur subissant des arrêts anormalement fréquents pour changer les barres.

Quatre isotopes contribuent au flux d'antineutrinos issus d'un réacteur. Pour KamLAND, ces particules ont une énergie détectable moyenne d'environ quatre mégaélectronvolts. En revanche, le spectre des antineutrinos issus des désintégrations bêta des isotopes à longue durée de vie naturellement présents en abondance dans la croûte et le manteau terrestres culmine à 3,3 mégaélectronvolts *(voir la figure 2)*.

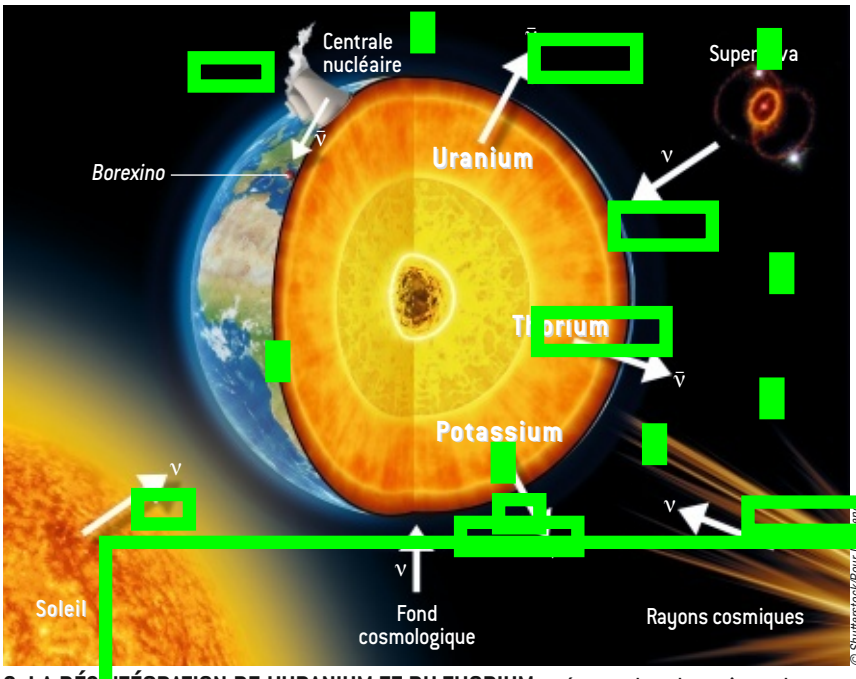
KamLAND peut étudier ces « géoneutrinos » (antineutrinos produits par la Terre) suivant le même principe que les antineutrinos électroniques issus des centrales nucléaires, mais le détecteur n'a pas été conçu pour ce type d'observations. En fait, l'implantation délibérée de KamLAND au milieu de plusieurs dizaines de réacteurs crée un bruit de fond gênant pour la recherche des géoneutrinos. La collaboration internationale a rapporté la première détection de géoneutrinos en 2005, mais avec un bruit de fond important des réacteurs. Plus récemment, les physiciens ont observé une centaine d'événements de géoneutrinos avec un bruit de fond réduit, grâce aux améliorations apportées au détecteur et à l'arrêt inattendu de réacteurs voisins.

Le seul autre détecteur existant capable de faire des mesures de géoneutrinos, *Borexino*, est plus petit que KamLAND. Mais, situé dans un tunnel sous le Gran Sasso, le plus haut sommet des Apennins, en Italie, il est beaucoup moins gêné par les réacteurs alentours : le réacteur nucléaire le plus proche est à un millier de kilomètres. L'équipe de *Borexino* a publié ses premières mesures de géoneutrinos en 2010. Les géophysiciens et géochimistes peuvent maintenant s'appuyer sur deux gros détecteurs situés dans des environnements distincts, et confrontés à des bruits de fond différents.

La Terre émet environ six millions d'antineutrinos électroniques par centimètre carré et par seconde. Un tel flux surfacique émerge librement de l'intérieur de notre planète parce que la Terre, comme tous les matériaux, est presque transparente pour ces particules. La probabilité qu'un neutrino, avec une énergie de un mégaélectronvolt, traverse une épaisseur d'une année-lumière de plomb sans interagir est très élevée. Le flux important de géoneutrinos permet d'augmenter les chances que le détecteur en enregistre un.

L'observation des géoneutrinos est une nouvelle méthode pour estimer les quantités d'uranium et de thorium présentes dans la croûte et le manteau terrestres, et clore ainsi le débat sur les sources internes de chaleur de la Terre lancé il y a un siècle et demi par lord Kelvin. Une mesure précise du flux surfacique de géoneutrinos indiquerait la part de la radioactivité dans la production totale de chaleur de la planète et permettrait de tester les différents modèles censés rendre compte de la composition de la Terre. Ces scénarios portent sur les matériaux et processus ayant contribué à la formation de la Terre, tel le matériau primitif indifférencié qui s'est formé dans la nébuleuse planétaire du Soleil il y a 4,5 milliards d'années et qui se retrouve aujourd'hui dans les météorites chondritiques.

Les géologues espèrent tirer de ces données ou de futures expériences des informations sur l'existence, dans le manteau, de zones riches en éléments radioactifs, dont certaines se seraient formées à la frontière entre le noyau et le manteau tôt dans l'histoire de la Terre. Les géoneutrinos pourront aussi nous éclairer sur la question du niveau



3. LA DÉSINTÉGRATION DE L'URANIUM ET DU THORIUM, présents dans la croûte et le manteau terrestres, réchauffent la Terre. Ces éléments radioactifs émettent des antineutrinos qui arrivent à la surface de la planète, où certains sont détectés par les expériences *Borexino*, en Italie, et KamLAND, au Japon. Ces deux installations sont aussi sensibles aux antineutrinos (notés $\bar{\nu}$) provenant des réacteurs nucléaires. D'autres expériences étudient les neutrinos (ν) émis par le Soleil, par les supernovæ et ceux produits par l'interaction des rayons cosmiques avec les atomes de l'atmosphère. On ignore encore comment détecter les neutrinos fossiles issus du Big Bang et présents dans le fond cosmologique.

de radioactivité (vraisemblablement faible) du noyau terrestre.

De nombreuses autres questions géophysiques peuvent trouver des éléments de réponse grâce aux géoneutrinos. Par exemple, dans quelle mesure la puissance radiogénique – due aux éléments radioactifs – de la Terre participe à la tectonique des plaques ou contrôle la dynamo terrestre dans le noyau de fer liquide ? Un autre débat animé concerne la part du flux de chaleur surfacique qui provient de la désintégration radioactive actuelle et la part due à des sources primordiales de chaleur (énergie emmagasinée lors de l'accrétion des gaz, poussières et blocs rocheux qui ont formé la planète, radioactivité ancienne, etc.). La radioactivité actuelle assure-t-elle toute l'énergie dissipée aujourd'hui ?

On estime le flux de chaleur rayonné par la Terre à environ 46 térawatts, dont quelque 8 térawatts sont dus au chauffage radiogénique des continents, d'après les estimations des quantités de potassium, thorium et uranium radioactifs présentes dans la croûte continentale.

Dans les profondeurs de la Terre, la chaleur radiogénique provient à 40 pour cent du thorium, à 40 pour cent de l'uranium et à 20 pour cent du potassium. Ces proportions sont déterminées à partir des énergies de désintégration des différents isotopes et des rapports d'abondance thorium/uranium, potassium/uranium, etc., au sein de la Terre, ces derniers étant eux-mêmes donnés par l'étude des météorites chondritiques (le rapport d'abondance thorium/uranium est égal à 4, et le rapport potassium/uranium est égal à 10 000).

Combien de chaleur radioactive ?

Dans les 46 – 8 = 38 térawatts de chaleur rayonnée par le manteau terrestre, quelle est la part des désintégrations radioactives ? Cette part dépend directement de l'abondance des éléments radioactifs dans le manteau. La détermination de ces abondances doit faire appel à des modèles de la composition de la Terre, qui sont contraints par des données sismiques et géodésiques. La mesure du flux de géoneutrinos est un nouvel outil, qui permet de tester les prédictions des différents modèles quant aux quantités d'éléments radioactifs.

Pour estimer la composition de la Terre, on se sert de trois approches différentes : cosmochimique, géochimique et géophysique, qui donnent des quantités d'uranium dans la croûte et le manteau variant entre 5×10^{16} et $1{,}3 \times 10^{17}$ kilogrammes. La contribution du thorium et du potassium à la production de chaleur est obtenue par extrapolation, à partir des rapports d'abondance avec l'uranium – l'élément naturel le plus rare du Système solaire.

Les cosmochimistes cherchent à concilier les compositions chimiques et isotopiques des météorites chondritiques avec celles de la Terre. Ils ont remarqué que les chondrites à enstatite (une classe rare caractérisée par son extrême pauvreté en oxydes) partagent avec la Terre les mêmes compositions isotopiques pour de nombreux éléments. Ils en concluent que ce sont les briques essentielles à partir desquelles la Terre a été formée. Ces chondrites sont plutôt pauvres en uranium, ce qui conduit les cosmochimistes à opter pour une valeur basse des abondances possibles en uranium.

Les cosmochimistes comparent la composition des roches en surface probablement représentatives du manteau avec celle des chondrites. Les premières sont plus pauvres en fer et silicium que les secondes. Pour expliquer ces différences, ils doivent supposer que la partie profonde du manteau a une composition différente, plus riche en fer et en silicium, de celle du manteau supérieur. Mais de nombreux géologues rejettent l'idée d'une telle hétérogénéité à grande échelle dans le manteau, car elle n'est pas compatible avec les images sismologiques des plaques océaniques de subduction qui plongent dans le manteau profond, brassant sans cesse l'ensemble du manteau soumis à la convection.

Une approche alternative propose une modélisation fondée sur l'utilisation d'échantillons géochimiques réels du manteau et de la croûte pour estimer la concentration des éléments dans le manteau primitif avant la formation de la croûte. Ces modèles géochimiques prédisent environ 8×10^{17} kilogrammes d'uranium dans la croûte et le manteau. Ils sont cohérents avec les modèles d'élasticité du manteau et avec des modèles chondritiques plus larges qui minimisent l'importance des enstatites. Mais le point faible de ces approches géochimiques est que les roches émergeant du manteau n'échantillonnent que des profondeurs de quelques centaines de kilomètres et ne révèlent pas si elles se sont trouvées autrefois à de plus grandes profondeurs dans le manteau.

© Pour la Science - n° 418 - Août 2012

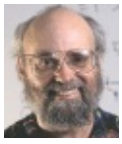
Quant aux modèles géophysiques, ils utilisent les connaissances actuelles du flux de chaleur surfacique mesuré pour trouver des solutions à l'évolution thermique de la planète qui spécifient les contributions relatives de la chaleur primordiale et de la production radiogénique actuelle de chaleur. Les géophysiciens modélisent la convection de chaleur au sein du manteau en termes de diffusion thermique et des lois de la rhéologie. Typiquement, les modèles géophysiques prédisent les abondances en uranium les plus élevées pour le manteau. Dans ce cas, plus de la moitié du flux de chaleur actuel est d'origine radiogénique. Ces trois approches diffèrent en ce qui concerne la structure, l'abondance et la distribution des éléments producteurs de chaleur de la Terre.

Depuis la première détection de géoneutrinos par KamLAND en 2005, des avancées considérables ont eu lieu. Les physiciens de KamLAND ont obtenu des résultats avec des incertitudes plus faibles en 2011. La nouvelle valeur pour les contributions combinées de l'uranium et du thorium au flux de chaleur de la Terre reste cohérente avec les trois grandes classes de modèles terrestres. Elle exclut désormais, avec un niveau de confiance de 97 pour cent, un modèle entièrement radiogénique qui suppose que toute la chaleur primordiale de la planète s'est dissipée depuis longtemps et qui attribue l'intégralité du flux de chaleur à la radioactivité actuelle. La mesure en 2010 de *Borexino*, avec sa grande barre d'erreur, ne permettait d'exclure aucun scénario.

Un troisième détecteur de géoneutrinos sera mis en service en 2013 : le détecteur SNO+. Cet instrument est une version modernisée du détecteur à eau lourde de neutrinos solaires de l'Observatoire de neutrinos de Sudbury, dans l'Ontario (Canada). Un liquide scintillateur remplace désormais l'eau lourde. La détection des géoneutrinos sera pour SNO+ une activité annexe, comme c'était le cas pour KamLAND et *Borexino*. L'un de ses objectifs principaux est la recherche des doubles désintégrations

■ LES AUTEURS

W. McDONOUGH est professeur de géologie à l'Université du Maryland, aux États-Unis.


J. LEARNED est professeur de physique à l'Université de Hawaï à Honolulu.

Stephen DYE est professeur de physique à l'Université Hawaï Pacifique à Kaneohe.

L'ANOMALIE DES ANTINEUTRINOS DE RÉACTEUR : UN QUATRIÈME NEUTRINO ?

En 2011, des chercheurs du CEA et de l'IN2P3 ont publié des résultats surprenants sur le flux d'antineutrinos produits par les réacteurs de centrales nucléaires. Ces derniers produisent de l'énergie par la fission entretenue de noyaux d'uranium et de plutonium. À chaque fission, les noyaux instables produits subissent des désintégrations radioactives de type bêta, qui émettent, chacune, un antineutrino et un électron. Pour évaluer le flux d'antineutrinos issu de réacteurs, toutes les expériences, avant *Double Chooz*, avaient utilisé des données de référence provenant de mesures effectuées auprès du réacteur de l'ILL à Grenoble dans les années 1980. Il manquait de trois pour cent par rapport aux prédictions, qui faisaient référence depuis 25 ans, a été mis en évidence.

Les résultats de 20 expériences réalisées dans les années 1980-1990 en France, aux États-Unis, en Suisse et en Russie ont été réexaminés avec un regard nouveau. En incluant non seulement les nouveaux résultats, mais aussi [illegible] théorique d'interaction dans les détecteurs, les physiciens sont arrivés à la conclusion que sept pour cent d'antineutrinos manquent à l'appel dans ces expériences situées à moins de 100 mètres des réacteurs ! Une découverte étonnante, car les mesures s'accordaient aux anciennes [illegible]. Cet effet est désormais connu sous le nom d'anomalie des antineutrinos de réacteur.

Cette anomalie pourrait s'expliquer par une erreur dans le calcul théorique du flux d'antineutrinos. Toutefois, aucune faille n'a été trouvée à ce jour pour expliquer l'amplitude importante de l'effet. Les chercheurs du CEA ont donc proposé une hypothèse plus hardie, impliquant une extension du modèle standard de la physique des particules : l'existence d'un quatrième neutrino qui serait à ajouter au bestiaire du modèle standard des particules. Ce neutrino serait « stérile », c'est-à-dire insensible à toute interaction hormis la gravitation, mais pourrait se mélanger avec les trois saveurs connues de neutrinos (électronique, muonique et tauique) [illegible] d'oscillation. L'existence d'un quatrième neutrino aurait par ailleurs des conséquences cosmologiques, car il pourrait contribuer à la mystérieuse masse manquante de l'Univers.

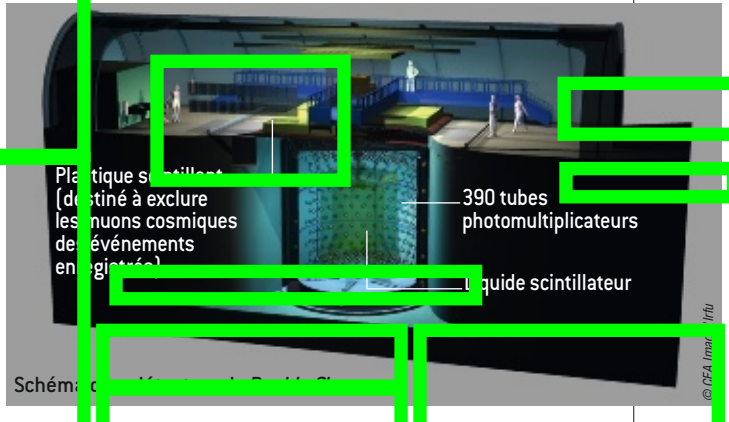


Schéma [illegible]

En somme, selon cette hypothèse, la détection des neutrinos de réacteur [illegible] à la transformation (l'oscillation) d'antineutrinos en antineutrinos stériles, donc indétectables !

L'explication de l'anomalie par l'existence d'un neutrino stérile va dans le sens d'autres résultats indépendants : les données d'étalonnage des expériences de neutrinos solaires (*Sage* et *Gallex*) [illegible] ces américaines auprès de faisceaux de neutrinos produits par des accélérateurs (LSND et *MiniBoone*).

La preuve irréfutable de l'existence de cette nouvelle particule passera par une future série de mesures : la détection d'antineutrinos à [illegible] mètres des cœurs compacts de réacteurs ou le déploiement d'une source intense de neutrinos au cœur ou près de grands détecteurs à liquide scintillant, qui donnerait une mesure très propre de l'empreinte de l'oscillation en fonction de la distance à la source. Une quinzaine de projets sont à l'étude et il y a fort à parier [illegible] sés dans les dix prochaines années.

Thierry Lasserre
CEA Saclay - [illegible]

Neutrinos et supernovae

Les neutrinos sont produits en grand nombre dans les supernovae. À ce jour, seule la supernova de 1987, dans la galaxie du Grand Nuage de Magellan, a été observée en coïncidence avec des neutrinos. Trois détecteurs distincts ont observé 24 neutrinos provenant de la supernova. Ces mesures sont compatibles avec les modèles de supernovae selon lesquels 99 pour cent de l'énergie de l'explosion est émise sous forme de neutrinos. La future génération d'expériences en recherche d'autres pour mieux comprendre les mécanismes à l'origine de ces explosions d'étoiles.

bêta sans émission de neutrinos, qui ne peuvent se produire que si les neutrinos sont des particules de Majorana (c'est-à-dire des particules identiques à leurs antiparticules, *voir l'encadré page 44*). Grâce à sa situation géographique, SNO+ devrait avoir un taux de comptage de géoneutrinos double de celui de KamLAND, et un bruit de fond dû aux réacteurs très inférieur.

Les détecteurs s'améliorent progressivement. Ils sont fabriqués à partir de matériaux plus purs qui minimisent le bruit de fond. *Borexino* contient moins d'une demi-kilotonne de scintillateur, mais la grande pureté du liquide et de son contenant lui permet de détecter les neutrinos par des réactions de diffusion élastique ainsi que par désintégration bêta inverse. Aussi propre que *Borexino*, le détecteur SNO+, à deux kilomètres sous la surface, sera le plus profond des détecteurs de géoneutrinos, un atout pour réduire le bruit de fond des muons du rayonnement cosmique.

Les grandes expériences en projet se proposent d'inclure des techniques de détection avancées qui seront utiles pour des applications en physique des particules, en géologie, en physique des astroparticules et pour la sûreté nationale. Une équipe de l'Université technique de Munich monte un projet de détecteur à scintillation gigantesque de 50 kilotonnes nommé LENA *(Low Energy Neutrino Astronomy)*. Une proposition américaine d'expérience appelée *Hanohano* (*Hawaiian Anti-Neutrino Observatory*, doublé comme le veut la tradition linguistique hawaïenne) envisage un détecteur mobile avec 10 à 50 kilotonnes de scintillateur liquide, qui opérerait au fond de la mer. Il pourrait être déployé soit au milieu de l'océan, loin de la radioactivité de la croûte continentale, soit à différentes distances de réacteurs nucléaires particuliers. La première configuration permettrait de se concentrer sur la radioactivité du manteau plutôt que sur celle de la croûte, et la seconde faciliterait l'étude des oscillations des neutrinos en fonction de la distance à la source.

DÉTERMINER LA DIRECTION des neutrinos augmenterait fortement notre capacité à surveiller à distance les réacteurs nucléaires.

Il serait intéressant d'installer un tel détecteur mobile au milieu du Pacifique Sud, à égale distance de l'Amérique latine, de l'Australie et de la limite entre le noyau et le manteau. Placé là, au-dessus de la mince croûte océanique, qui est relativement dépourvue de radioactivité, il aurait un meilleur accès aux émissions du manteau que les installations terrestres.

Mesurer la direction

Une importante amélioration des détecteurs consisterait à pouvoir déterminer la direction des neutrinos enregistrés. Dans la réaction de désintégration bêta inverse utilisée par une partie des détecteurs (antineutrino + proton → positron + neutron), le positron émis produit un bref éclair lumineux en traversant quelques millimètres de scintillateur avant de s'annihiler avec un électron. L'intensité de l'éclair donne une mesure approximative de l'énergie du neutrino. Environ 0,2 milliseconde plus tard, le neutron, beaucoup plus lourd, qui a parcouru environ un mètre avec une très petite partie de l'énergie cinétique de l'antineutrino incident, crée un rayon gamma de 2,2 mégaélectronvolts en fusionnant avec un proton pour former un deutéron.

Avec ce type d'événements à double éclair dans une fenêtre de temps, d'espace et d'énergie aussi étroitement spécifiée, il y a peu de risque de fausses détections liées à d'autres processus. Mais aucun des détecteurs fondés sur la désintégration bêta inverse n'est capable de déterminer la direction incidente des antineutrinos événement par événement.

Identifier la direction d'un antineutrino enregistré par un détecteur à scintillation serait très intéressant pour la géologie, l'astrophysique et la surveillance nucléaire. Mais KamLAND et *Borexino* en sont incapables. Le détecteur d'antineutrinos de Chooz, en France, et celui de Palo Verde, aux États-Unis, beaucoup plus petits, ont fait la démonstration qu'ils étaient capables de déterminer la direction de la source à 20 degrés près pour des échantillons statistiques de quelques milliers d'événements, en provenance d'un réacteur situé à quelques kilomètres. Cela leur est possible car, pour un échantillon assez grand provenant d'une source unique, les trajectoires aléatoires des neutrons produits (sur une longueur d'un mètre environ) pointent en moyenne dans la direction opposée à cette source.

Nous espérons que les démonstrations de Chooz et de Palo Verde ne sont qu'un début. Le contingent de l'Université de

■ BIBLIOGRAPHIE

A. Gando *et al.*, **Partial radiogenic heat model for Earth revealed by geoneutrino measurements**, *Nature Geoscience*, vol. 4, pp. 647-651, 2011.

G. Mention *et al.*, **The reactor antineutrino anomaly**, *Physical Review D*, vol. 83, 073006, 2011.

G. Bellini *et al.*, **Observation of geo-neutrinos**, *Physics Letters B*, vol. 687, pp. 299-305, 2010.

T. Lasserre et D. Vignaud, **La mystérieuse identité des neutrinos**, *Dossier Pour la Science*, n° 62, 2009.

© Pour la Science - n° 418 - Août 2012

Hawaï au sein de la collaboration KamLAND développe un petit détecteur de neutrinos qui peut localiser l'interaction de l'antineutrino à quelques millimètres près et un scintillateur dopé qui peut, de façon semblable, localiser le point d'arrivée du neutron.

La détermination de la direction des neutrinos augmenterait fortement notre capacité à surveiller à distance les réacteurs nucléaires en identifiant les particules qui nous intéressent et en éliminant celles qui viennent d'ailleurs. Au plus près des centrales, des détecteurs directionnels permettraient de forger une image du cœur du réacteur en fonctionnement. Les géologues utiliseraient de tels détecteurs pour établir des cartes tomographiques des neutrinos du manteau, qui indiqueraient les zones de forte accumulation de thorium et d'uranium. Et les physiciens des particules sont très intéressés par tout ce qui pourrait renforcer le rapport signal sur bruit des données d'oscillation des neutrinos.

De petits détecteurs sont en cours de développement, spécifiquement pour surveiller les émissions d'antineutrinos des réacteurs nucléaires. L'un des prototypes est pour l'essentiel une version moderne du détecteur original de Reines-Cowan. Contenant environ une tonne de scintillateur liquide, il a fonctionné avec succès auprès de centrales nucléaires d'une puissance de l'ordre du gigawatt. Sans avoir accès à l'information de la salle de commande, ces dispositifs ont prouvé leur capacité à observer des cycles quotidiens de production et l'évolution du [illegible]

De petits mouchards nucléaires

Contrairement aux détecteurs d'une kilotonne, profondément enterrés et très protégés des rayons cosmiques, les appareils de surveillance d'un mètre cube fonctionnant en surface ou à proximité seront inondés par les muons des rayons cosmiques. Mais les réacteurs sont des sources si brillantes d'antineutrinos – une centrale nucléaire rayonne en fonction de sa puissance environ 10^{20} antineutrinos par seconde – que le rapport signal sur bruit sera favorable si le détecteur est à proximité des réacteurs. À une distance de 25 mètres, un dispositif de surveillance d'une tonne détecterait quelques centaines d'événements par jour.

L'adoption de détecteurs de neutrinos modernes, compacts et autonomes par l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) représenterait une avancée importante. Les appareils de surveillance plus classiques sont obligés de se « brancher » sur l'infrastructure d'un réacteur (plomberie par exemple). On pense que les détecteurs de neutrinos vont se généraliser à côté des installations nucléaires qui coopèrent. Une telle surveillance non intrusive pourrait offrir des avantages économiques en aidant les opérateurs à ajuster le réacteur pour une production maximale d'électricité. De tels détecteurs, en donnant le signal pour un arrêt opportun du réacteur, aideraient peut-être à éviter des catastrophes nucléaires.

Le programme neutrino est devenu un acteur de premier plan en cosmologie et dans la quête d'une théorie complète des interactions fondamentales. Il est en train d'acquérir une autre place de choix pour sonder les profondeurs inaccessibles de notre planète et mieux surveiller les activités nucléaires. ■

Les voyages du LION

Grâce à une organisation sociale élaborée et à une fécondité soutenue, le lion a conquis presque tous les continents. Sa première sortie d'Afrique date de plusieurs centaines de milliers d'années.

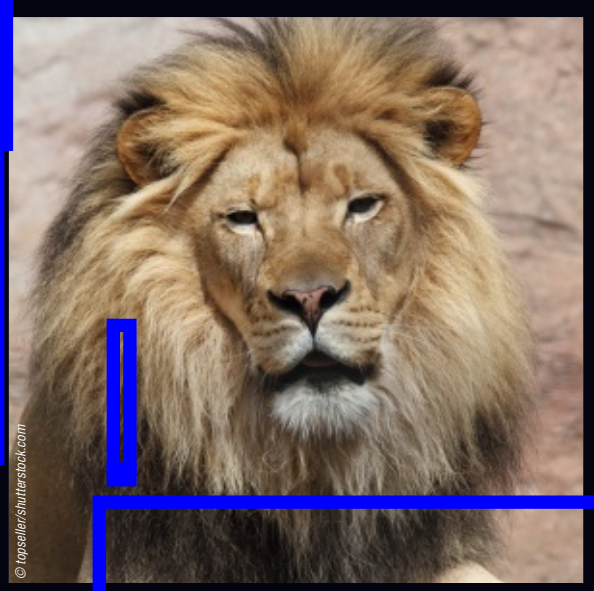
Annik Schnitzler

Dans l'imaginaire collectif, le lion est souvent associé à l'Afrique. Pourtant, au cours de son histoire, il a conquis presque tous les continents : on trouve des restes osseux, ainsi que des peintures et des gravures préhistoriques le représentant, en Europe, en Amérique et en Asie. Il est d'ailleurs très présent dans de nombreuses traditions culturelles *(voir l'encadré page 52)*.

La première sortie d'Afrique du lion remonte à plusieurs centaines de milliers d'années. Elle concernait des ancêtres du lion des cavernes, qui vivait en Eurasie et dont le statut taxonomique fait débat : certains le considèrent comme une espèce à part entière, en se fondant notamment sur des analyses génétiques, tandis que d'autres le rattachent aux lions africains dont descendent les lions actuels. Une seconde vague de lions s'est ensuite répandue en Europe et en Asie, avant de décliner, victime des activités humaines. Aujourd'hui, seules quelques centaines de lions sauvages survivent en dehors d'Afrique, dans l'Ouest de l'Inde.

L'ESSENTIEL

- Outre l'Afrique, dont il est originaire, le lion a peuplé une grande partie du monde, lors de deux vagues de colonisation.
- Les lions de la première vague ont disparu naturellement il y a environ 10 000 ans, tandis que ceux de la seconde ont décliné sous l'influence des activités humaines. Aujourd'hui, ils sont encore présents en Inde.
- Les recherches récentes ont précisé le statut taxonomique et le mode de vie du lion, ce qui devrait aider à prendre des mesures adéquates pour sauvegarder l'espèce.



© topseller/shutterstock.com

1. LE LION D'ASIE *(à droite)* n'est plus présent qu'en Inde. Il est plus petit que les lions vivant au Sud du Sahara *(ci-dessus)*, en Afrique, et a une crinière moins fournie. Il est rattaché au groupe nord-africain/asiatique. Outre l'Asie du Sud-Ouest, ce groupe a peuplé l'Afrique du Nord et une partie de l'Europe – d'où il a disparu –, et peut-être aussi le centre et l'Ouest de l'Afrique.

© Bhushan Pandya

© Pour la Science - n° 418 - Août 2012

© Pour la Science - n° 418 - Août 2012

La grande mobilité des lions complique la détermination des sous-espèces, et des recherches récentes en paléontologie et en génétique ont précisé la parenté entre les groupes des différentes régions. Cette mobilité s'explique en partie par un système social élaboré, comprenant une part de nomadisme. Après avoir détaillé ces points, nous décrirons les territoires peuplés par les deux vagues de lions. Nous nous intéresserons ensuite aux derniers de ces animaux vivant hors d'Afrique, ceux de l'Ouest de l'Inde, et aux mesures nécessaires pour les sauvegarder.

Le lion appartient à la famille des félidés (Felidae) et au genre *Panthera*. L'espèce actuelle se nomme *Panthera leo*. Selon l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN), elle se divise en deux sous-espèces : le lion subsaharien *(Panthera leo leo)* et le lion d'Asie *(Panthera leo persica)*, qui vit dans la péninsule de Kâthiâwar, au Nord-Ouest de l'Inde. Le lion d'Asie présente des différences morphologiques avec le lion subsaharien, telles une peau pendante sous l'abdomen, une crinière peu étendue et une taille inférieure *(voir la figure page 56)*.

Une taxonomie sans cesse améliorée

Cependant, cette classification ne reflète pas la complexité de l'histoire du lion, et d'autres ont été proposées. Les plus anciennes exploitent des traits morphologiques : soit elles n'admettent aucune sous-espèce à *Panthera leo*, soit elles en proposent entre six et neuf. Les plus récentes, fondées sur des analyses génétiques et craniométriques, les recoupent partiellement, subdivisant l'espèce en deux à huit groupes distincts. En particulier, Ji Mazák, du Musée des sciences et de la technologie de Shanghai, a proposé en 2010 de distinguer deux groupes majeurs, qui recoupent partiellement ceux de l'UICN : le groupe africain (comprenant les lions de l'Est et du Sud de l'Afrique), très diversifié génétiquement, et le groupe nord-africain/asiatique, plus homogène.

Ce dernier groupe se serait différencié du premier il y a entre 200 000 et 73 000 ans, à partir des populations d'Afrique de l'Est. Ces populations sont progressivement sorties du continent et ont peuplé une partie de l'Europe et de l'Asie, tout en gardant des contacts étroits avec les lions d'Afrique du Nord.

Selon certains scientifiques, le groupe nord-africain/asiatique n'est plus représenté que par le lion d'Asie de la classification de l'UICN et par quelques lions de l'Atlas (un sous-groupe ayant peuplé l'Afrique du Nord) hybridés avec des lions subsahariens et vivant dans des zoos. Cependant, d'autres proposent de rattacher à ce groupe les lions de l'Ouest et du centre de l'Afrique, soit environ 2 000 individus : ainsi, en 2011, Laura Bertola, de l'Université de Leyde, aux Pays-Bas, et ses collègues ont mis en évidence une grande proximité génétique entre ces lions et ceux d'Asie *(voir l'encadré page 55)*.

Préciser le statut taxonomique du groupe nord-africain/asiatique est crucial pour prendre des mesures de conservation adéquates. Les derniers lions sauvages d'Afrique du Nord ont disparu vers le milieu du XX^e^ siècle. Si on ne lui associe pas les lions du centre et de l'Ouest de l'Afrique, le groupe nord-africain/asiatique se limite donc à la population indienne : selon un recensement effectué en 2010, l'effectif des animaux sauvages n'est plus que de 411 individus. La CITES (*Convention on International Trade of Endangered Species*, ou Convention sur le commerce international des espèces de faune et de flore sauvages menacées d'extinction), signée en 1973 à Washington, stipule que le lion d'Asie est en voie d'extinction ; il est classé dans l'annexe I, qui interdit le commerce sauf dans des cas exceptionnels ; en 2008, l'UICN a confirmé ce statut d'espèce menacée d'extinction.

La situation est plus contrastée pour les lions subsahariens, dont le territoire couvre trois millions de kilomètres carrés, soit dix pour cent du continent : si les populations de l'Ouest de l'Afrique sont précaires, celles de l'Est sont moins menacées. Leur effectif total a diminué de 30 à 50 pour cent au cours des 20 dernières années, mais il reste supérieur à 20 000, selon une estimation de 2009. Le lion subsaharien est classé dans l'annexe II de la CITES, qui répertorie les espèces non menacées d'extinction mais dont le commerce est réglementé, et a été décrit comme « vulnérable » par l'UICN en 2008.

Le lion a un système social élaboré, unique parmi les félidés. Tandis que les autres félidés sont solitaires en dehors des périodes de reproduction, les lions coopèrent pour chasser, protéger les lionceaux et se défendre. Leur architecture sociale comporte deux groupes différents : un résident et un nomade. Le groupe résident, très stable, est composé de femelles adultes apparentées, de une à 18 selon la disponibilité en ressources, et en moyenne six pour les lions subsahariens) et de leurs petits, accompagnés par deux ou trois mâles adultes. Ses membres se côtoient sur un même territoire, dont les dimensions varient en fonction de la ressource alimentaire. Il comprend un ou plusieurs points d'eau et des lieux où mettre bas en toute tranquillité.

Les mâles adultes des groupes résidents protègent le territoire et leurs petits, en patrouillant, en marquant leur territoire par de l'urine et en rugissant. Les femelles ont un comportement égalitariste : aucune ne domine, ni ne manifeste d'agressivité vis-à-vis d'une autre. Elles élèvent leurs petits en commun dès qu'ils sont âgés de six mois. Lors du partage des aliments, il n'y a pas de lutte pour les carcasses. Les femelles s'entraident en cas d'attaques par des « gangs » étrangers, faisant front ensemble pour éviter des infanticides quand un lion mâle [illegible]

Le lion est présent dans les arts, les religions et les philosophies des sociétés eurasiennes et africaines depuis le Paléolithique. Il est parfois représenté sous une forme hybride : l'une des plus [illegible] Almagre et datée de 30 000 ans, figure un être à tête de lion et à corps d'homme. On trouve aussi des lions dans l'art paléolithique (grotte Chauvet) et dans les mythes anciens.

Ainsi, l'animal a eu une dimension symbolique tout au long de l'histoire des sociétés humaines. Il représente la puissance, le courage, la justice, mais aussi parfois la cruauté ou les forces du mal. En Occident et en Asie, il orne les trônes, les tombes et les drapeaux des gouvernants, qui renforcent leur prestige en organisant des chasses au lion. Les mythes décrivent des héros qui affrontent l'animal, tels Gilgamesh et Hercule.

Le lion a aussi été dieu, gardien de l'empire des morts, compagnon des dieux, animal sacré... Les déesses de l'Antiquité, de Ishtar à Cybèle, et les prophètes, tels Mahomet et Bouddha, sont souvent accompagnés de lions ; la Bible nomme Jésus le lion de la tribu de Judas (l'une des 12 tribus d'Israël, dont sont issus les rois de la lignée de David). En Égypte, on a trouvé un squelette de lion, datant de 143 ans avant notre ère, dans la tombe de la nourrice de Toutankhamon. L'animal [illegible] publics et les fontaines. Aujourd'hui encore, l'image du lion est abondamment utilisée dans les arts et la publicité, ainsi que par le cinéma et les fabricants de jouets.

Cette dimension symbolique complique la reconstitution des aires [illegible] placé en captivité, à des endroits où il ne vivait pas à l'état sauvage. En outre, des peaux de lion, qui faisaient l'objet d'un commerce, étaient importées de contrées lointaines

© Pour la Science - n° 418 - Août 2012

cas en effet, le mâle étranger tue les petits, car les femelles, privées de ces derniers, redeviennent vite fécondes.

Deux ou trois ans après leur naissance, la plupart des mâles quittent le groupe et forment des coalitions. Certains intègrent d'autres groupes résidents en expulsant les mâles présents, tandis que d'autres deviennent nomades : ils errent à l'intérieur ou aux marges des territoires des groupes résidents, poussant parfois très loin, chassant eux-mêmes ou se comportant comme des charognards à partir des proies laissées par les groupes résidents. Des femelles se joignent parfois à ces groupes nomades.

Les anciens lions avaient aussi un système social élaboré – nous y reviendrons. Grâce à leur taille et à leur fécondité, ils ont conquis de vastes territoires. Ces deux attributs sont avantageux dans un environnement où les lions se disputent la nourriture avec les hyènes, les canidés et d'autres félidés.

Deux vagues principales ont marqué la sortie d'Afrique du lion. La première remonte à plusieurs centaines de milliers d'années : le plus ancien reste osseux de lions trouvé en Eurasie date de 680 000 ans ; il s'agit d'un fragment de mandibule, découvert à Pakefield, en Angleterre. En comparaison, le plus ancien fossile de lion connu en Afrique date de 1,7 million d'années.

Deux vagues de colonisation

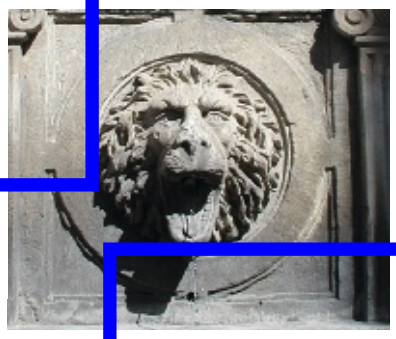
Les premiers lions découverts en Eurasie (*Panthera fossilis* ou *Panthera leo fossilis* selon les scientifiques) seraient une forme ancienne du lion des cavernes (*Panthera spelaea* ou *Panthera leo spelaea*). Ce dernier était plus imposant que les lions actuels : il atteignait 3,50 mètres de longueur (du nez à l'extrémité de la queue), pour une hauteur de 1,30 mètre au garrot – la taille d'un bœuf ! – et un poids d'environ 400 kilogrammes, selon le paléontologue Alain Argant, de l'Université d'Aix-Marseille. On a découvert des peintures le représentant, datées d'environ 30 000 ans, dans les grottes de Chauvet, de Lascaux et des Combarelles. On y voit que ces lions

■ L'AUTEUR

Annik SCHNITZLER est professeur au Laboratoire des interactions écotoxicologie, biodiversité, écosystèmes (LIEBE), UMR-CNRS 7146, à l'Université de Lorraine, à Metz.

LA DIMENSION SYMBOLIQUE DU LION

Une fontaine à tête de lion, en Azerbaïdjan. L'association du lion et de l'eau viendrait d'Égypte : la constellation du lion apparaissant avec la crue du Nil, l'animal y était lié à l'eau, nécessaire à la vie.



Le sphinx de Gizeh, en Égypte, est l'un des multiples exemples de représentation hybride d'homme et de lion.

© Frédéric Neema/Sygma/Corbis

© Landesmuseum Württemberg, P. Frankenstein, H. Zwietasch

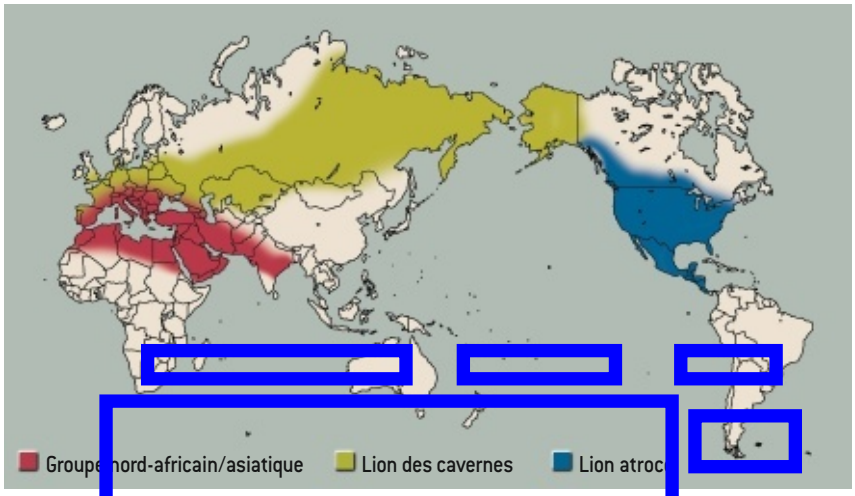
Cette statuette en ivoire *(ci-contre)*, découverte en Allemagne, est vieille de 30 000 ans. Haute de 30 centimètres, elle figure un homme à tête de lion.

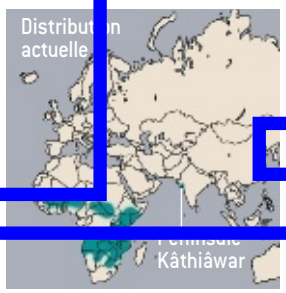
© Matthias Kabel/fotolia.com

Les gouvernants, ici le doge de Venise, sont souvent représentés avec des lions, parfois ailés. L'animal symbolise la puissance, le courage et la justice.

© Annik Schnitzler

En Inde, des lions ornent les temples. Ils sont considérés comme les compagnons des dieux.





2. LES LIONS SONT SORTIS D'AFRIQUE il y a environ 700 000 ans. Le lion des cavernes s'est répandu dans une grande partie de l'Europe et de l'Asie *(en vert sur la carte ci-dessus)*, avant de passer en Amérique et de se différencier en une autre sous-espèce, le lion atroce *(en bleu)*. Au Nord, son expansion a été bloquée par des glaciers. Plus tard, une seconde vague de lions, appartenant au groupe nord-africain/asiatique, a quitté l'Afrique de l'Est pour coloniser de vastes territoires *(en rouge)*. On ignore s'ils ont interagi avec les lions des cavernes, mais ils n'en descendent pas. Aujourd'hui, les lions ne vivent plus qu'en Afrique (au Sud du Sahara) et dans l'Ouest de l'Inde *(carte ci-contre)*.

n'avaient pas de crinière. Les peintures de Chauvet représentent des lions des cavernes chassant en groupe et d'autres dans des postures indiquant des contacts sociaux, par exemple avec les oreilles penchées en arrière : à l'instar des lions modernes, ils avaient donc une organisation sociale élaborée.

L'expression « lions des cavernes » est trompeuse, car ces lions n'habitaient pas dans les grottes. C'est pourtant là qu'ils ont été retrouvés le plus souvent. Ils y sont probablement morts des suites de luttes avec les hyènes *(Crocuta crocuta spelaea)*, dont ils étaient les compétiteurs directs, ou avec les ours des cavernes, qu'ils attaquaient durant la période d'hivernation ; ils ont aussi pu tomber dans des trous en cherchant leurs proies. Selon des analyses récentes, les lions des cavernes mangeaient principalement des ours brun et des rennes.

Le lion des cavernes a parcouru toute l'Europe, puis l'Asie, jusqu'en Sibérie, évitant les parties nordiques couvertes de glace, les montagnes asiatiques et les forêts denses. L'Asie était alors connectée à l'Amérique par le pont terrestre de la Béringie, et le lion a poursuivi sa route vers l'Alaska, qu'il a atteint il y a 480 000 à 360 000 ans.

Les populations de l'Eurasie se seraient ensuite séparées génétiquement de celles de la Béringie et de l'Alaska il y a environ 337 000 ans – une hypothèse non confirmée pour l'instant en raison du manque d'échantillons. Plus tard, le lion américain a encore évolué, donnant il y a environ 200 000 ans une nouvelle sous-espèce (ou une espèce selon certains scientifiques) : le lion atroce (*Panthera atrox* ou *Panthera leo atrox*), qui s'est répandu sur le continent, jusqu'en Amérique centrale. Il y a quelques dizaines de milliers d'années, les lions occupaient ainsi une grande partie du monde : tout le continent africain, où vivait la sous-espèce *Panthera leo shawi*, ainsi qu'une bonne part de l'Eurasie et de l'Amérique, où demeuraient le lion des cavernes et le lion atroce *(voir la figure ci-dessus)*.

Les lions disparus sans descendance

Ces deux derniers lions ont disparu sans descendance à la fin de la dernière période glaciaire. Selon des datations au carbone 14 des restes osseux les plus récents, le lion des cavernes s'est éteint il y a environ 11 150 ans en France et il y a environ 12 450 ans au Nord-Est de la Sibérie. Ces dates suggèrent une disparition quasi synchrone sur toute l'Eurasie. Le lion atroce, quant à lui, se serait éteint il y a environ 10 370 ans. Ces dates reflètent l'état actuel des découvertes, mais il est possible que de petites poches localisées de lions aient survécu plus tardivement. Auparavant, les populations d'Eurasie et d'Amérique s'étaient fragmentées, en raison d'épisodes climatiques très froids qui ont notablement limité les proies disponibles. L'homme a peut-être aussi contribué à ce processus.

Quels liens les lions disparus ont-ils avec les lions actuels ? Des analyses d'ADN ont montré que les seconds ne descendent pas des premiers, même s'ils ont tous deux les lions d'Afrique *Panthera leo shawi* pour ancêtres : les lions du groupe nord-africain/asiatique seraient apparus sur leur continent d'origine – et non en Eurasie à partir du lion des cavernes –, avant de coloniser l'Eurasie plus tardivement que leurs cousins disparus. La frontière Nord du territoire des lions du groupe nord-africain/asiatique et la frontière Sud de celui des lions des cavernes se recoupent entre l'Espagne et le Caucase *(voir la figure ci-contre)*, et ces deux lions pourraient s'y être côtoyés pendant un temps, mais on ignore s'ils ont interagi.

Les restes osseux sont souvent trop fragmentaires pour qu'on puisse distinguer auquel de ces lions ils appartiennent. On considère que les premières traces avérées des lions du groupe nord-africain/asiatique en Eurasie datent d'entre 6 000 et 4 000 ans avant notre ère, lorsque les lions des cavernes avaient disparu. Ils y sont peut-être arrivés plus tôt, mais cela reste à confirmer.

Bien qu'on manque de certitudes sur les dates d'arrivée dans les différents lieux, on peut reconstituer l'aire globale peuplée par le groupe nord-africain/asiatique. On s'appuie sur plusieurs champs disciplinaires, de la zoologie historique à l'archéozoologie et l'archéologie. Les données sont plus ou moins nombreuses pour les différentes périodes de l'Holocène (qui s'étend sur les 10 000 dernières années). Au cours de cette époque, les milieux naturels ont profondément changé dans de multiples régions du monde.

Ainsi, entre 9600 et 3500 ans avant notre ère, une partie de l'aire du lion, du Sahara à l'Inde, avait un climat assez humide. D'importantes étendues lacustres ou marécageuses s'étendaient dans le Sahara, sur des superficies atteignant parfois 100 kilomètres carrés (en comparaison, le lac Léman fait un peu moins de 600 kilomètres carrés). Elles étaient entrecoupées de larges steppes herbeuses. La faune saharienne était alors

© Pour la Science - n° 418 - Août 2012

d'une incroyable richesse et abondait en ongulés, bovidés, équidés et carnivores, venus de la région du Nil ou de la côte méditerranéenne.

D'autres types de steppes couvraient l'Asie du Sud-Ouest, au climat plus froid, du Turkestan au plateau iranien. Dans le bassin méditerranéen, les forêts occupaient de vastes régions, s'avançant jusqu'au centre de l'Anatolie (la partie asiatique de la Turquie) et le Levant (une région comprenant le Liban, une partie de la Syrie, la Jordanie, Israël et les Territoires palestiniens). L'Indus, un des plus puissants fleuves du monde qui coule entre l'Inde et le Pakistan, était alors bordé d'une forêt dense.

Les restes osseux les plus anciens d'Eurasie (8 000 avant notre ère dans la péninsule Ibérique, et 5 460 avant notre ère, en Italie) font l'objet de controverses : trop fragmentaires pour être identifiés avec précision, ils pourraient avoir appartenu à des lions des cavernes. Entre 5000 et 3500 avant notre ère, les restes sont sans doute ceux de lions du groupe nord-africain/asiatique, mais ils restent très rares : ils ont été trouvés en Israël, en Europe centrale (Bulgarie, Ukraine) et en Grèce. D'autres indices de la présence du lion en Eurasie à cette époque sont donnés par les gravures rupestres qui les représentent : on en a découvert en Azerbaïdjan (dans la région du Gobustan) et dans la péninsule Arabique. Notons qu'on a également retrouvé de telles gravures en Afrique du Nord, dans les montagnes du Sahara (sites de Djanet, dans le Sud de l'Algérie, de Messak Settafet en Libye…), entre le Nil et le Sahara central, et sur la rive Est du Nil (où les lions étaient représentés assis ou en chasse).

De 5000 avant notre ère à l'an 500 de notre ère, le climat est devenu aride dans une grande partie du territoire du lion : les déserts ont succédé aux steppes, du Sahara à la péninsule Arabique. Les zones arides se sont étendues jusqu'à la vallée de l'Indus, le Pakistan et l'Inde il y a environ 2 000 ans.

La présence des lions au Proche-Orient (Irak, Palestine, Israël, Jordanie, Liban, Syrie), en Égypte et en Grèce pendant toute cette période est attestée par de nombreux indices. Outre des vestiges osseux, des gravures rupestres de lions ont été découvertes en divers endroits. Les sources écrites confirment la présence de lions. Les plus anciennes qui les évoquent remontent au IIIe millénaire avant notre ère et proviennent

Qui sont les lions de l'Ouest et du centre de l'Afrique ?

Faut-il multiplier par six l'effectif du groupe nord-africain/asiatique ? C'est ce que suggère une étude publiée en 2011 par Laura Bertola, de l'Université de Leyde, aux Pays-Bas, et ses collègues. Ils ont mis en évidence une grande proximité génétique entre les lions d'Asie (environ 400 individus) et ceux de l'Ouest et du centre de l'Afrique (environ 2 000 individus). Ils proposent donc de rattacher ces derniers au groupe nord-africain/asiatique.

Les biologistes se sont fondés sur des séquences d'ADN mitochondrial prélevées sur 126 lions, issus de toutes les zones peuplées aujourd'hui par l'animal. Ces séquences d'ADN sont comprises dans la région du génome codant le cytochrome *b*, une enzyme essentielle à la voie de respiration pour exploiter l'oxygène respiratoire et produire l'énergie de la cellule. En analysant le degré de ressemblance des séquences, les chercheurs ont établi l'arbre phylogénétique des lions, c'est-à-dire qu'ils ont reconstitué leurs relations de parenté.

Ils ont conclu que les lions de l'Ouest et du centre de l'Afrique sont génétiquement éloignés de ceux de l'Est et du Sud du continent, et assez proches de ceux d'Asie. Ils expliquent cette proximité par la succession suivante : il y a entre 40 000 et 18 000 ans, de vastes régions d'Afrique centrale et occidentale sont devenues hyperarides et ont perdu leur grande faune ; il y a 8 000 à 3 000 ans, les lions du groupe nord-africain/asiatique issus du Moyen-Orient auraient traversé le Sahara, qui connaissait alors une période humide, et recolonisé ces zones. Des peintures rupestres découvertes au milieu du Sahara, représentent peut-être ces conquérants hardis.

Les résultats de L. Bertola doivent être confirmés – pour l'instant, l'Union internationale de la nature (UICN) considère encore que tous les lions vivant au Sud du Sahara, y compris ceux de l'Ouest et du centre de l'Afrique, appartiennent à la même sous-espèce, celle du lion subsaharien. Quelles seraient les conséquences pour la conservation de l'espèce ? Le lion du groupe nord-africain/asiatique garderait probablement son statut d'espèce en voie d'extinction, mais les populations du centre et de l'Ouest de l'Afrique bénéficieraient également de ce statut, ce qui n'est pas le cas aujourd'hui. Ce serait d'autant plus profitable que ces populations sont petites et fragmentées, à l'inverse de celles de l'Est et du Sud, plus importantes et plus stables. Enfin, il faudrait limiter les hybridations entre les lions captifs issus de deux sous-groupes différents.

3. UN CRÂNE FOSSILE de lion des cavernes, vieux de 600 000 ans, a été découvert à Château Breccia, en Bourgogne.

Crâne complet de *Panthera spelaea fossilis*, Château (Saône-et-Loire, France). Ensemble Nord, fouilles A.J. Argant, CHA1-98-C3-246

BIBLIOGRAPHIE

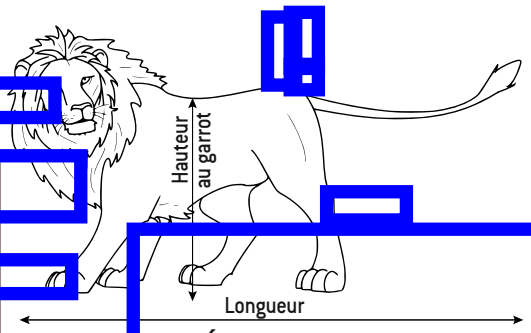
A. Schnitzler, **Past and present distribution of the African–Asian lion subgroup : a review,** *Mammal Review*, vol. 41, pp. 220-243, 2011.

L. Bertola *et al.*, **Genetic diversity, evolutionary history and implications for conservation of the lion (Panthera leo) in West and Central Africa,** *Journal of Biogeography*, vol. 38, pp. 1356-1367, 2011.

A. Stuart et A. Lister, **Extinction chronology of the cave lion *Panthera spelaea*,** *Quaternary Science Review*, vol. 30, pp. 2329-2340, 2010.

J. Mazak, **Geographical variation and phylogeny of the modern lions based on craniometric data,** *Journal of Zoology*, vol.281, pp. 194-209, 2010.

Y. Jhala *et al.*, **Home range and habitat preference of female lions *(Panthera leo persica)* in Gir forests, India,** *Biodiversity and Conservation*, vol.18, pp. 3383-3394, 2009.



	Longueur	Hauteur au garrot	Poids	Crinière
Lion des cavernes et lion atroce	3,[illegible] mètres	1,3 [illegible] mètre	500 kilogrammes	Absente ou réduite
Lion d[illegible]	2,9 mètres	0,95 mètre	190 kilogrammes	Discrète
Lion subsaharien	3,2 mètres	1,10 mètre	225 kilogrammes	Développée

© Linda Bratkorb/shutterstock.com (lion)

4. LES LIONS SE RÉPARTISSENT en plusieurs groupes (espèces ou sous-espèces), dont les caractéristiques morphologiques diffèrent. Ces caractéristiques [illegible] d'un même groupe. On donne ici les valeurs moyennes pour les mâles.

des hauts plateaux mésopotamiens. Les lions, qui s'attaquaient au bétail et aux gardiens de troupeaux, y étaient activement chassés. En Égypte, des textes rédigés sous Aménophis III (1352-1330 avant notre ère) relatent que le pharaon a tué une centaine de lions. L'animal habitait alors les oasis des déserts orientaux et occidentaux, ainsi que sur la côte méditerranéenne. D'autres écrits où il est question de lions, tels ceux d'Homère (VIIIe siècle avant notre ère), sont d'origine grecque. Quelques siècles plus tard, la Bible mentionne 135 fois l'animal, qui peuplait alors le Sud d'Israël.

En Inde, les premiers textes évoquant des lions datent du IIIe siècle avant notre ère. L'animal pourrait y être arrivé vers l'an 2000 avant notre ère, par des passages dans les forêts denses de l'Indus ; ces passages auraient été ouverts par des sécheresses et par la civilisation de l'Indus (entre 3 300 et 1 400 avant notre ère), qui pratiquait le brûlis pour créer des pâturages. Toutefois, les preuves et les ossements manquent sans doute en raison de la rareté des lions dans la région à cette époque. Par la suite, ils ont conquis toute la partie Nord de l'Inde, du Rajasthan au Punjab.

Les lions du groupe nord-africain/asiatique ont donc vécu dans des conditions écologiques (milieu, climat, durée relative du jour et de la nuit...) variées. Ils ont peuplé des déserts pourvus d'oasis (Sinaï, Sahara, Yémen), des steppes (Irak, Anatolie), des bords de mer et divers types de forêts ; ces dernières se trouvaient dans des plaines, des deltas (Afrique du Nord, Levant, Grèce), en moyenne et haute montagne ou en bordure des cours d'eau (Danube, Amou Daria, Samur, Euphrate, Nestos, Indus…). Quoique davantage présent dans les savanes, le lion subsaharien peut aussi s'adapter à différents milieux. Le lion des cavernes a également vécu dans des écosystèmes variés, manifestant notamment une résistance au grand froid commune à de nombreux félidés.

Cependant, l'aire peuplée par les lions du groupe nord-africain/asiatique est bien moins vaste que celle des lions des cavernes et des lions atroces. Elle englobe les zones tempérées et tropicales d'Eurasie, d'Afrique du Nord et de la péninsule Arabique, s'étendant jusqu'en Hongrie au Nord et jusqu'à l'Inde à l'Est *(voir la figure page 54)*. Les latitudes comprises entre 30 et 43 degrés Nord auraient constitué le cœur de leur territoire. Ils s'y sont maintenus durant six à huit millénaires. Plus au Nord, leur expansion aurait été limitée par des conditions naturelles qui différaient trop de celles de leur lieu d'origine. En outre, les proies y étaient moins nombreuses et moins grosses.

En Inde, l'environnement semble avoir été accueillant, sauf en bordure du Gange (où les forêts étaient trop denses pour le lion), et au Nord (où s'élèvent les premiers contreforts himalayens). Les lions n'ont pas atteint le Sud du pays, mais aucune barrière écologique n'y a été détectée : il est possible que leur expansion ait été arrêtée par l'homme.

Les lions sont restés plus ou moins longtemps aux divers endroits. Ils ont disparu de l'Ouest et du centre de l'Europe il y a plusieurs milliers d'années : des restes osseux datés de 2 500 ans avant notre ère et découverts en Hongrie et en Ukraine constituent la dernière trace qu'on y ait trouvée. Ils ont sans doute été fragilisés par une accumulation de conditions naturelles contraignantes (saisons marquées, froid et neige pendant plusieurs mois, couverture forestière dense…). En Asie du Sud-Ouest, notamment au niveau de l'Afghanistan, ils ont pâti de l'aridité, du froid, et peut-être de la réduction de la dispersion des grands herbivores dans les steppes. Au Sud, ils ont été mis en difficulté par l'aridité, qui s'est installée du Sahara à la péninsule Arabique.

Outre ces facteurs climatiques, les lions ont été victimes de l'accentuation des impacts anthropiques à partir de l'âge du bronze. L'espace disponible pour la faune sauvage s'est amenuisé et les populations de lions se sont fragmentées et isolées, devenant de plus en plus vulnérables.

Les lions, victimes de l'homme

En Grèce, les lions se sont retranchés dans les montagnes du Nord et du centre du pays, où ils ont fini par disparaître vers le Ier siècle de notre ère. Dans le Transcaucase (Géorgie, Arménie, Azerbaïdjan), où ils semblent avoir été nombreux, ils ont survécu jusqu'au Xe siècle de notre ère. Ils se sont finalement éteints en raison des chasses organisées par les peuples natifs, les Shirvanshakhs, dont ils habitent encore les récits et le folklore. En Israël et en Palestine, ils se sont maintenus jusqu'au XIIIe siècle.

Ils ont persisté plus longtemps dans d'autres régions de l'Asie. En Turquie, ils ont survécu jusqu'au XIXe siècle dans des contrées isolées. En Syrie, en Irak, et plus à l'Est au Turkestan, en Afghanistan et au Pakistan, ils se sont également maintenus jusqu'au XIXe siècle, notamment dans les vallées près des fleuves. En Iran, ils étaient encore abondants en 1875, mais avec les chasses et les déforestations, ils ont fini par disparaître en 1941. En Inde, où ils étaient assez répandus dans le Nord, ils ont subi des chasses intensives pendant plusieurs siècles et se sont raréfiés drastiquement ; dès 1891, il n'en restait que dans la région qu'ils peuplent encore aujourd'hui.

Que dire enfin du berceau du groupe nord-africain/asiatique, l'Afrique du Nord ? Du IVe siècle avant notre ère au IIIe siècle de notre ère, les lions ont été massacrés par les Romains. Après cet

© Pour la Science - n° 418 - Août 2012

épisode, ils ont connu un répit de près de 1 500 ans. Leur sort s'est à nouveau dégradé à partir de la colonisation européenne, au XIXe siècle, l'apparition du fusil à tir rapide et la démocratisation de la chasse. Les lions ont disparu progressivement d'Afrique du Nord entre la fin du XIXe et le milieu du XXe siècle. Le dernier lion sauvage d'Afrique du Nord a été tué au Maroc en 1942. Au Sahara, les lions avaient décliné, mais pas totalement disparu, avec l'extension du désert. Quelques populations isolées ont survécu jusqu'au milieu du XXe siècle. Elles ont été éliminées par les Touaregs.

Les derniers lions sauvages d'Eurasie vivent dans la péninsule Kâthiâwar, dans l'Ouest de l'Inde, où une réserve naturelle a été créée. À la fin du XIXe siècle, leur population a décliné jusqu'à une douzaine d'individus, dont sont issus tous les lions d'Asie actuels, de sorte qu'ils présentent une diversité génétique plus faible que les lions subsahariens.

Le milieu naturel est composé d'un environnement mixte de savanes et de forêts. Le climat alterne entre saisons sèches et moussons. Les cyclones y sont réguliers, pouvant déraciner des centaines d'arbres en quelques heures. La faune comprend une dizaine d'espèces de gros herbivores sauvages, avec une large dominance du chital *(Axis axis)*, un cervidé d'environ 50 kilogrammes. D'autres grands carnivores, tels les léopards, peuplent aussi la région.

Une population croissante, mais fragile

À l'inverse de leurs homologues africains, les lions indiens actuels vivent essentiellement dans les forêts. Ils peuvent s'y embusquer près des points d'eau, très fréquentés par les grands herbivores durant la saison sèche. Les mâles indiens sont de meilleurs chasseurs que ceux d'Afrique, notamment parce que leur crinière moins fournie les préserve d'une transpiration excessive, de sorte qu'ils ne dépendent pas des femelles pour se nourrir.

En Inde, les groupes résidents comportent peu d'individus (deux femelles en moyenne) et ont de petits territoires : entre 72 et 81 kilomètres carrés pour les groupes de femelles, et entre 75 et 188 kilomètres carrés pour les groupes de mâles, qui vivent de façon indépendante en dehors des périodes de rut.

La femelle ne se reproduit que tardivement : elle doit être âgée d'au moins huit ans et s'allie dans un groupe. Les lions indiens ont une grande fécondité : la population comptait 177 adultes en 1968, 359 en 2005 et 411 en 2010. Avec la croissance de la population, le territoire des lions s'est naturellement élargi : en 2006, 106 d'entre eux s'étaient établis en dehors de la réserve. Les groupes y sont plus réduits, car les proies sont plus rares et la survie plus aléatoire.

© Brigitte Lion

© Frantisekhojdysz/shutterstock.com

© Arnik Schmitz

5. DES MILIEUX VARIÉS ont été investis par les lions d'Asie, depuis les bords de cours d'eau (*a*, dans la vallée de l'Euphrate) jusqu'aux oasis au milieu de déserts (*b*), des forêts de montagne (*c*, en Crète)...

Malgré cette croissance, la population indienne reste très fragile, en raison d'une grande uniformité génétique, d'une spermatogenèse anormale (79 pour cent des spermatozoïdes sont non fécondants, contre 25 à 61 pour cent pour le lion africain) et d'un taux de mortalité élevé (environ 59 pour cent) parmi les lionceaux. Tout événement climatique ou sanitaire important peut l'anéantir rapidement : le lion est sujet à de nombreux pathogènes, d'autant plus dangereux que les populations sont petites et que leur uniformité génétique rend difficile la sélection d'une souche résistante.

Autre problème, les lions indiens cohabitent assez mal avec les villages périphériques. Dans la réserve de Kâthiâwar et ses alentours vivent près de 160 000 personnes et plus de 110 000 têtes de bétail. Les lions s'attaquent aux uns et aux autres : entre 1985 et 1995, ils ont tué 11 485 bovidés domestiques, blessé 95 personnes et causé 16 décès humains. Des efforts politiques sont donc indispensables pour améliorer la cohabitation entre l'homme et le lion. En Inde, on a par exemple proposé d'augmenter la densité de proies sauvages, pour diminuer les attaques contre l'homme et le bétail, et d'augmenter la superficie de la réserve : celle-ci passerait de 1 883 kilomètres carrés à 2 500 kilomètres carrés.

Depuis les années 1960, le lion d'Asie bénéficie d'un programme international de reproduction en captivité. Des études génétiques ont déterminé les lions de ce groupe non hybridés, présents dans le zoo de Junagadh, dans la péninsule Kâthiâwar. On les a par la suite faits se reproduire, jusqu'à obtenir plus d'une centaine de lions. Entre 1991 et 1992, ceux-ci ont été envoyés dans 36 zoos du monde entier (Zurich, Helsinki, Nantes…). Ces lions seront-ils relâchés un jour ? C'est envisageable, notamment dans la région de Junagardh, où ils pourraient être accueillis dans la réserve.

Les programmes de survie du lion d'Asie s'appuient aussi sur des recherches comportementales. Les zoologues tentent de préciser les conditions les plus favorables au développement, ce qui pourrait améliorer le choix des futures réserves.

La conservation de l'espèce, de l'Asie à l'Afrique, dépend de l'homme, en pleine expansion démographique. Dans ce contexte, la question de l'acceptation du lion par l'homme est cruciale. Elle est liée à des héritages symboliques – le lion est très présent dans les traditions culturelles de tous les continents –, et aux évolutions sociétales plus récentes, par exemple la préoccupation pour la biodiversité. Une certaine éthique environnementale serait également importante, afin de limiter au maximum la chasse dans les parcs nationaux. Quant à la question des exhibitions d'individus captifs, elle reste ouverte, même si les zoos ont au moins l'intérêt d'éviter une disparition pure et simple. Mais, à l'évidence, ce n'est pas une fin en soi. ■

La géologie des gemmes

Lee Groat et Gaston Giuliani

L'ESSENTIEL

- Composition chimique, structure cristalline, origine, nature des inclusions : chaque gemme présente des caractéristiques liées aux conditions de sa formation.
- En les étudiant, les géologues remontent aux mécanismes qui ont conduit à la formation des gemmes.
- Leurs travaux permettent de prospecter de nouveaux gisements et de mieux comprendre les processus mis en jeu dans les profondeurs de la Terre.

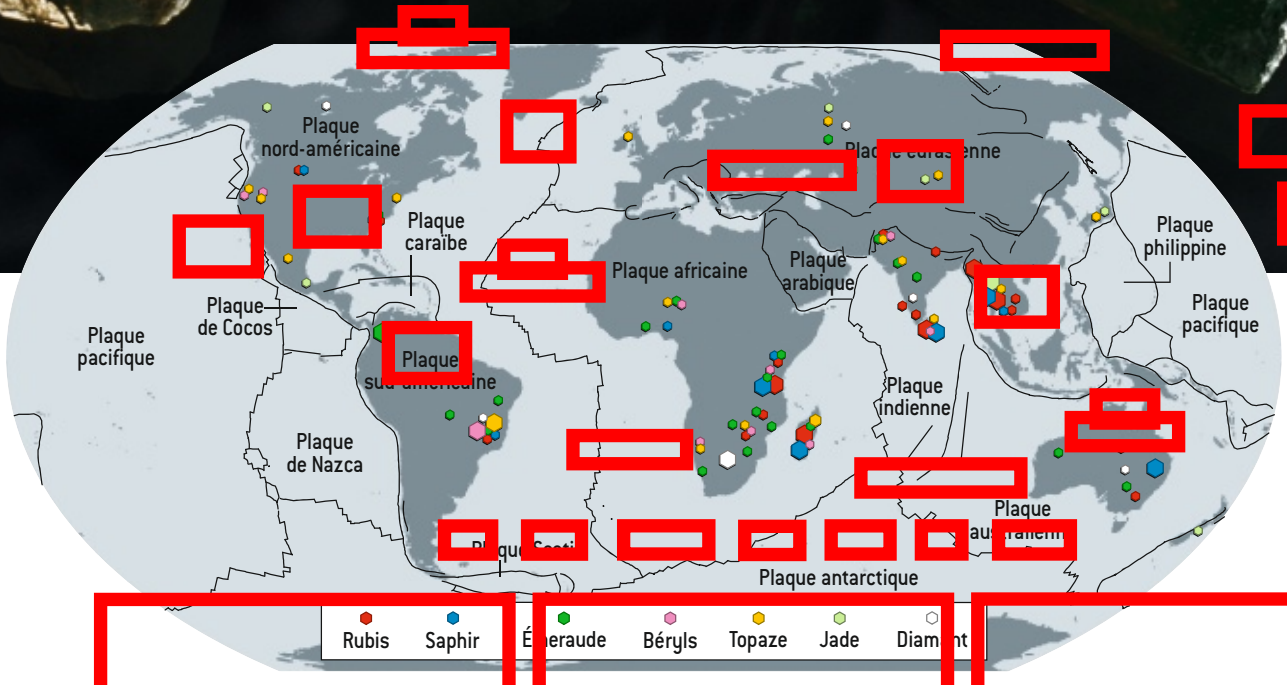
Diamant, rubis, saphir, émeraude, topaze, jade... Les gemmes sont autant d'indices qui renseignent les géologues sur les conditions régnant dans les profondeurs de la Terre.

Objets prisés depuis des milliers d'années, les gemmes sont appréciées pour leur couleur, leur lustre, leur transparence, leur longévité et… leur valeur commerciale. Nombre de gemmes étant produites par de petites exploitations dans des régions reculées de pays en développement, il est difficile d'obtenir des statistiques précises sur leur production et leur valeur. En 2008, on estimait néanmoins la production mondiale de diamants bruts à dix milliards d'euros et en 2001 le commerce mondial de gemmes colorées s'élevait à près de cinq milliards d'euros par an, selon le magazine *Colored Stone*.

Si les gemmes atteignent des valeurs si élevées, c'est en partie en raison de leur rareté. Un gisement de diamant produit en moyenne cinq grammes de gemmes par tonne de matériau extrait, et seuls 20 pour cent de ces gemmes sont de qualité joaillière. Comme le pétrole, les gemmes se forment sur des temps longs, même à l'échelle géologique : par datation radiométrique des inclusions piégées par les diamants, on a déterminé que certaines formations de gemmes ont entre 970 millions et 3,3 milliards d'années. Les gemmes de haute qualité sont extraites beaucoup plus vite qu'elles ne sont produites, ce qui en fait une ressource finie.

© Pour la Science - n° 418 - Août 2012

© Stephen J. Krasemann/All Canada Photos/Corbis



Par exemple, la mine d'émeraude découverte en 1981 à Santa Terezinha de Goiás au Brésil a produit, en 1988, 25 tonnes de pierres brutes estimées à sept millions d'euros ; en 2010, le même tonnage s'est vendu pour seulement 710 000 euros. Des formes synthétiques de nombreuses gemmes existent aujourd'hui, mais elles n'ont pas encore d'impact sérieux sur le marché international des gemmes.

Cette rareté rend aussi les pierres gemmes « précieuses » pour les géologues. Des conditions géologiques exceptionnelles sont nécessaires pour produire les gisements de gemmes. Quelles sont ces conditions ? Où trouver de nouvelles gemmes ?

Un nombre croissant de géologues se penchent aujourd'hui sur ces questions avec l'espoir de mieux comprendre l'origine des gemmes et les mécanismes qui conduisent à leur formation. Notamment, si la géologie du diamant est étudiée depuis plusieurs décennies, on ne s'intéresse aux processus de formation des gemmes de couleur que depuis une vingtaine d'années, et, nous allons le voir, elles sont loin d'avoir révélé tous leurs secrets.

Il existe des dizaines de types de gemmes. Nous nous intéresserons à quelques-unes parmi les plus connues et les plus importantes sur le marché international : le diamant, le rubis et le saphir, l'émeraude et d'autres variétés du béryl, le chrysobéryl, la grenat, la tsavorite, la topaze et le jade. Parmi les gemmes courantes dont nous ne traiterons pas ici, citons l'ambre, l'améthyste, la calcédoine, le grenat, la lazurite, la malachite, les opales, le péridot, la rhodonite, la spinelle, la tourmaline, la turquoise et le zircon).

ON TROUVE SOUVENT LES GEMMES dans des zones d'activité tectonique ou volcanique, mais certains gisements sont localisés à des endroits sans signe d'activité magmatique. La taille des symboles indique l'importance économique des gemmes dans une région donnée. En photo, des émeraudes brutes et taillées.

LE DIAMANT

Le diamant est la phase cristalline du carbone stable à très haute pression. C'est la gemme la plus « précieuse » ; certaines pierres coûtent jusqu'à 400 000 euros le carat (un carat équivaut à 0,2 gramme), soit plus de 15 millions d'euros la pièce. Les études sur l'origine et la signification des structures, des roches hôtes ainsi que les inclusions piégées par le diamant ont permis de déterminer les équilibres des phases minérales profondes terrestres et même conduit à l'élaboration de protocoles pour la synthèse du diamant en laboratoire.

Pendant des centaines d'années, la région de Golkonda, dans l'Inde centrale, a été la première source de diamants, jusqu'à la découverte de gisements au Brésil au XVIIIe siècle, puis à Kimberley, en Afrique du Sud, en 1866. Aujourd'hui les trois principales nations productrices de diamants sont le Botswana, [illegible] suivies de l'Angola, l'Australie, le Congo, le Lesotho, la Namibie, la Sierra Leone et l'[illegible].

Le diamant cristallise dans le système cubique : les atomes de carbone qui le composent sont disposés aux sommets d'un réseau dont la maille est un cube de 0,356 nanomètre d'arête. Cette maille conduit à des formes variées : octaèdres, cubes, cubo-octaèdres ou agrégats moins réguliers. Le diamant présente diverses propriétés physiques, telle l'émission d'une lueur lorsqu'il est soumis à un rayonnement ultraviolet ou X. Cette caractéristique commune aux pierres gemmes est due à l'absorption du rayonnement par des défauts de la structure cristalline excités par le rayonnement, les électrons de ces défauts vibrent et se désexcitent en émettant de la lumière. Cette fluorescence est exploitée dans le traitement du minerai pour distinguer les diamants des roches sans intérêt, car [illegible] sion lumineuse varient selon la provenance des gemmes – naturelles, synthétiques ou fausses.

La couleur des diamants naturels est liée à leurs impuretés et aux défauts de leur réseau cristallin. Les diamants contenant des impuretés d'azote [illegible] ou jaunes quand les impuretés sont regroupées, et jaunes, orangés ou bruns quand elles sont plus diffuses. Certains [illegible] sont aussi roses, rouges ou violets : cette couleur serait liée à la déformation de la région du réseau cristallin portant les impuretés, après la formation de la gemme. Les diamants de type II contiennent peu ou pas d'impuretés d[illegible] des impuretés de bore, qui rendent le diamant bleu à gris. Les diamants purs sont incolores ou marron.

C'est en étudiant les inclusions minérales dans les diamants que l'on détermine leurs conditions de formation. D'une part, la nature de ces inclusions permet de calculer les pressions et températures de l'environnement dans lequel ils se [illegible] D'autre part, on détermine l'âge des diamants par datation géochronométrique de certaines inclusions : on mesure la proportion des différents isotopes d'un même élément dans un matériau qui a subi une désintégration radioactive au cours du temps géologique. Dans un dia[illegible] étudiant les inclusions de silicates et de sulfures, contemporains de sa formation. À une restriction près : si c[illegible]

DIAMANT sur sa gangue de kimberlite (taille 1 cm environ).

LE RUBIS ET LE SAPHIR

SAPHIR découvert sur l'île de Baffin, au Canada, en 2002.

Avec l'aimable autorisation de Lee Groat

Le rubis et le saphir sont des variétés de corindon, un oxyde d'aluminium de formule générale Al_2O_3. Ce sont sans doute les pierres gemmes colorées les plus vendues au monde. Représentant environ un tiers des ventes en valeur, ils atteignent des prix parmi les plus élevés : en 2006, un rubis birman [illegible] 2 860 000 euros et, en 2009, un saphir du Cachemire de 16,65 carats a été acheté 1 880 000 euros.

Le corindon cristallise dans le système hexagonal : il présente un axe de symétrie d'ordre 6 (sa maille est un prisme droit dont la base est un losange, et trois mailles forment un prisme droit à base hexagonale). C'est le remplacement des ions aluminium par d'autres éléments – chrome, titane, fer – qui transforme ce minéral en gemme [illegible] coloré [illegible] saphir est bleu, et les autres saphirs sont nommés par leur couleur (jaune, rose, violet, vert, orangé-rose, etc.).

La couleur du rubis est due au chrome, qui est également responsable de la couleur… verte de l'émeraude. Pourquoi cette différence de couleur ? Dans ces deux gemmes, le chrome est entouré de six atomes d'oxygène, mais il n'absorbe pas la lumière de la même façon. Selon une des théories [illegible] cette variation de couleur serait liée au potentiel électrostatique imposé par le reste des ions du réseau sur les électrons actifs de l'unité chrome-oxygène. Un champ électrique est ainsi créé dans le voisinage de l'ion chrome du rubis, alors qu'il n'en apparaît pas dans l'émeraude en raison de la symétrie de son réseau. Cette charge entraîne un décalage du spectre d'absorption du rubis vers des énergies plus élevées, de telle sorte que la gemme absorbe la lumière visible dans [illegible] centrés sur 400 et 550 nanomètres, et émet de la lumière à 480 nanomètres (bleu) et 610 nanomètres (rouge).

Le rubis semble rouge parce que l'œil humain est plus sensible au rouge au-dessus de 610 nanomètres qu'au bleu. La fluorescence rouge sous lumière ultraviolette et, parfois, à la lumière du [illegible] rouge du rubis explique l'effet de feu observé dans de nombreux rubis du Myanmar et du Vietnam.

La couleur bleue du saphir est liée au transfert d'électrons entre les ions fer (Fe^{2+}) et titane (Ti^{4+}) remplaçant les ions aluminium (Al^{3+}) dans la structure (moins de 0,1 pour cent d'ions fer et titane suffisent). Lors de leur transfert, les électrons absorbent de l'énergie à une longueur d'onde spécifique du domaine visible, et la couleur correspondante n'est plus perçue. Dans le saphir, les électrons transférés absorbent la lumière de l'extrémité rouge [illegible] à la gemme. Incolore, le saphir « geuda » est souvent chauffé pour obtenir une plus grande transparence et des colo-

© Pour la Science - n° 418 - Août 2012

inclusions se situent le long des plans de clivage du diamant, leur analyse ne témoigne pas nécessairement de l'âge de sa formation, car les compositions isotopiques peuvent aussi refléter l'âge de l'éruption volcanique qui a porté le diamant à la surface terrestre.

Le scénario de formation des diamants se dessine ainsi. Ils cristallisent à des profondeurs de 135 à 200 kilomètres et à des températures de 1 100 à 1 200 °C. La majorité provient de la lithosphère – la croûte rigide et le manteau supérieur de la Terre –, sous des parties anciennes et stables de la croûte continentale nommées cratons. Ces derniers sont éloignés des zones de subduction. Le diamant cristallise à la base (la quille) des cratons anciens, là où l'énergie géothermique est affaiblie par les masses plus froides constituées par la croûte. Pauvre en silice, ce milieu est dominé par des roches telles que la péridotite et l'éclogite, riches en magnésium et [illegible] se forment dans la sublithosphère – les couches profondes de la Terre, jusque dans le manteau inférieur.

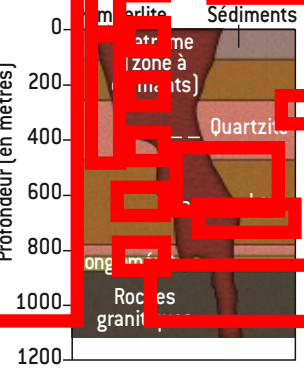
Deux processus ont pu conduire à la formation des diamants. Le premier est la réduction (gain d'électrons) du carbonate (CO_3^{2-}) à l'état solide, dans une roche fondue ou un fluide riche en éléments chimiques. Le carbonate, quant à lui, proviendrait de deux minéraux, la dolomite ($CaMg(CO_3)_2$) ou la magnésite ($MgCO_3$). Il se formerait lorsque des substances chimiques volatiles, tel le dioxyde de carbone (CO_2), se sont échappées [illegible] qu'elle glisse par subduction sous une autre plaque tectonique et pénétrait dans une région de roche fondue.

Le second processus est l'oxydation (perte d'électrons) de carbone réduit en méthane. D'où provient ce méthane ? Sans doute de fluides réduits présents dans le manteau supérieur. L'eau libérée par l'oxydation du méthane faciliterait la circulation de fluides réactifs riches en carbone dans la lithosphère subcratonique, lesquels encercheraient une lente mé[illegible] traversée où cristallisent les diamants.

L'origine du carbone des diamants reste cependant ambiguë et fait encore l'objet de recherches. Les modèles d'évolution du manteau suggèrent que les diamants ayant plus de 2,5 milliards d'années résultent d'une oxydation de [illegible] ont moins de 2,5 milliards d'années auraient été formés par réduction de carbonate.

Quelle que soit la profondeur de leur formation, les diamants sont transportés vers la surface par des masses de roche fondue en ascension rapide [illegible] de kimberlite *(ci-contre)* ou de lamproïte (selon leur composition) – qui proviennent des zones de croissance de la gemme ou de plus grandes profondeurs. Les kimberlites jaillissent à des vitesses moyennes de 10 à 30 kilomètres par heure grâce à la libération rapide de dioxyde de carbone et d'eau, qui engendre une poussée ascensionnelle. Pourquoi cette libération ? James Russell et ses collègues, de l'Université de Colombie-Britannique, aux États-Unis, viennent d'en élucider le mécanisme. Dans des expériences à [illegible] montant, le magma quitte une région riche en carbone pour une région riche en silice. Il se charge en silice, ce qui entraîne une chute rapide de la solubilité [illegible] conséquent, une expulsion continue et vigoureuse du gaz qui stimule l'ascension du magma kimberlitique.

Les kimberlites ont en général un âge de formation compris entre 65 à 135 millions d'années, mais atteignant pour certaines 1,1 milliard d'années. Elles sont en général plus jeunes que les diamants qu'elles contiennent, lesquels se sont globalement formés de quelques centaines de millions à quelques milliards d'années plus tôt.



KIMBERLITE de Kimberley, en Afrique du Sud.

Parent Géry / Wikimedia

ris bleus : en fondant, les inclusions libèrent du fer et du titane, et le transfert de charge peut avoir lieu. Dans le saphir orange-rose, nommé padparadscha (« couleur de la fleur de lotus » en sanskrit), l'aluminium est remplacé par une combinaison d'ions chrome (Cr^{3+}), qui créent [illegible] fer (Fe^{3+}), dont le transfert de charge avec les ions oxygène (O^{2-}) produit une teinte jaune.

La plupart des corindons gemmes sont extraits à partir de dépôts de sédiments (placers) alluviaux (transport par l'eau), colluviaux (transport par la gravité) et éluviaux (érosion), ou de sédiments compactés et solidifiés (paléoplacers). Les gisements se sont formés dans des régions ayant subi des événements géodynamiques tels des collisions, des rifts et des phénomènes de subduction. Trois périodes de formation ont été identifiées : l'orogenèse panafricaine (entre 750 et 450 millions d'années), qui a produit des gisements primaires de corindon gemme en Afrique, en Inde, à Madagascar et au Sri Lanka ; l'orogenèse himalayenne avec ses gisements à rubis en Asie (entre 45 et 5 millions d'années) ; et les extrusions de basalte alcalin au Cénozoïque (entre 65 et 1 million d'années). [illegible] formation des rubis et saphirs rosés les plus fins, provenant des marbres de l'Asie centrale et du Sud-Est, vient d'être élucidée. Voici plus de 250 millions d'années, les régions étaient occupées par des lagons peu profonds et les deltas alimentés par la mer et les rivières. Peu à peu, les sédiments charriés s'accumulaient sur le fond, se mêlant aux dépôts calcaires d'origine marine. Ces lagons étaient partiellement isolés et riches en saumures (sels et sulfates). Lors de l'orogenèse himalayenne, les empilements – grès et sels – ont été chauffés par le métamorphisme régional (la transformation chimique des roches à l'état solide). Les grès se sont transformés en quartzites et les calcaires en marbres – formés de calcite ($CaCO_3$). Entre 600 et 650 °C et à des pressions de l'ordre de 3×10^8 pascals, les sels ont fondu et ont réagi avec le marbre environnant qui contenait de l'aluminium (environ 0,1 pour cent d'Al_2O_3), du chrome et du vanadium pour former du rubis. [illegible] est réalisé actuellement sur du saphir rose dans des marbres de la Colombie-Britannique.

L.-D. Bayle / le Règne Minéral

RUBIS de Mogok, au Myanmar.

LES AUTEURS

Lee GROAT est professeur de sciences de la Terre et des océans à l'[illegible] de Colombie-Britannique, où il dirige le programme de sciences intégrées.

Gaston GIULIANI est directeur de recherche à l'Institut de recherche pour le développement (GET / IRD) et au CRPG/CNRS à Vandœuvre-lès-Nancy, où il dirige des programmes sur la géologie des gemmes avec les pays du Sud.

Article publié avec l'aimable autorisation de *American Scientist*.

L'ÉMERAUDE

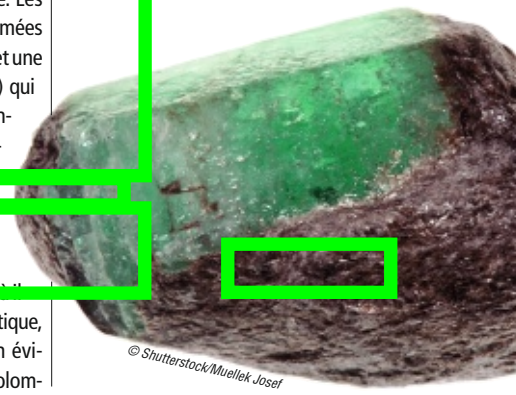
L'émeraude, une des gemmes les plus recherchées (en 2000, une émeraude colombienne de 10,11 carats a été achetée 916 000 euros), est la variété verte et riche en chrome et en vanadium de la famille du béryl – constitué de béryllium, de formule générale $Be_3Al_2Si_6O_{18}$. La Colombie fournit environ 60 pour cent de la production mondiale ; la Zambie est la deuxième source en valeur monétaire. La production [illegible] en 2001 était de 5,5 millions de carats, pour une valeur supérieure à 400 millions d'euros.

Comme le corindon (rubis, saphir), le béryl cristallise dans le système hexagonal. La couleur de l'émeraude est due à des traces de chrome ou de vanadium qui remplacent l'aluminium dans la structure du minéral. Une caractéristique du béryl est qu'il contient de l'eau (jusqu'à trois pour cent de son poids) : celle-ci ou d'autres constituants moléculaires liquides et gazeux se situent au cœur d'un empilement atomique hexagonal formé d'anneaux de silicium et d'oxygène. Lors du chauffage d'une émeraude, [illegible] piégée se fragmente en molécules gazeuses qui restent confinées dans les canaux. Elle est libérée à des températures d'environ 800 °C. Ainsi, l'eau des canaux reflète la composition du fluide au moment de la formation du cristal, et la mesure du rapport des isotopes de [illegible] par le béryllium permet de déterminer la source des fluides à partir desquels le béryl s'est constitué.

Des conditions géologiques et géochimiques inhabituelles sont requises pour que le béryllium soit associé au chrome ou au vanadium. Le béryllium se trouve essentiellement dans des roches crustales (formées à l'intérieur des continents) et il est rare dans la croûte continentale supérieure. Il se concentre dans des roches telles que les granites riches en eau, les pegmatites (granites filoniens à gros cristaux) et les schistes noirs (une roche sédimentaire). Le chrome et le vanadium, quant à eux, sont concentrés dans les roches volcaniques associées aux dorsales océaniques, plus précisément dans des roches ignées dites roches ultramafiques ou mafiques telles que les péridotites (riches en magnésium et en fer), les basaltes (du magma basique rapidement refroidi) de la croûte océanique et du manteau supérieur et leurs équivalents métamorphiques. On rencontre aussi parfois de fortes concentrations de chrome et de vanadium dans les roches [illegible] schistes noirs. Ces derniers contiennent de trois à cinq parties par million de béryllium.

Dans le modèle classique, les pegmatites contenant du béryllium réagissent à l'écoulement de magma avec des roches ultramafiques ou mafiques plus anciennes et refroidies – à teneur élevée en magnésium et en fer, mais contenant aussi du chrome et du vanadium *(voir la figure page ci-contre)*. La pegmatite et la roche ultramafique ou mafique sont altérées par la circulation d'un fluide soit d'origine granitique soit métamorphique. Les deux roches sont alors transformées en un schiste à biotite (un mica) et une roche riche en feldspath (albite) qui contiennent des émeraudes. Néanmoins, d'autres événements géologiques [illegible] que ont pu jouer un rôle important dans la formation de certains gisements d'émeraude.

n'y a pas trace d'activité magmatique, un modèle unique a été mis en évidence en 1994. Les gisements colombiens d'émeraude (plus de 200) se situent dans deux bandes étroites de part et d'autre du bassin sédimentaire de la cordillère orientale. Les émeraudes se sont formées par croissance hydrothermale associée à une activité tectonique : des fluides du fond du bassin sédimentaire, riches en calcium et sodium, ont interagi avec des lits de sel (évaporites) intercalés dans des schistes noirs du Crétacé inférieur (de 145 à 100 millions d'années), à des profondeurs voisines de sept kilomètres. À une température voisine de 300 °C [illegible] alcalins ont migré vers les parties supérieures du bassin sédimentaire, le long de failles de décollement acti-



© Shutterstock/Muellek Josef

LES AUTRES BÉRYLS

D'autres béryls sont utilisés en joaillerie : l'aigue-marine *(ci-dessous, b)* et le maxixe (bleu), le héliodore (*a*, jaune verdâtre), la goshénite (incolore), la morganite (*c*, rose), le béryl rouge…

Chris Ralph / Wikimedia

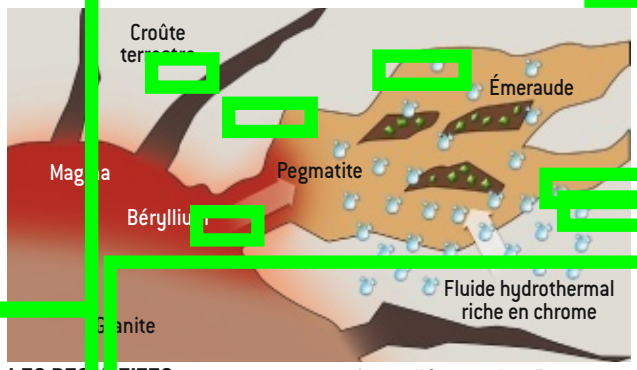
Leurs couleurs sont dues à la présence d'impuretés. Nos travaux [illegible] que la couleur de l'aigue-marine est due à un transfert de charge entre des ions fer qui ont remplacé l'aluminium du cristal : les cations ferreux (Fe^{2+}) échangent des électrons avec quelques cations ferriques (Fe^{3+}). Le bleu foncé du maxixe résulte de l'inclusion de nitrate (NO_3^-) et de carbonate (CO_3^{2-}) [illegible] naux du cristal situés au centre des anneaux structuraux du béryl. La couleur s'atténue avec une exposition prolongée à la lumière, par déstructuration des atomes d'hydrogène dans le cristal. Une étude récente a suggéré que le nitrate est formé par un processus naturel, alors que le carbonate est dû à l'irradiation par la roche environnante. Les cations ferriques sont responsables [illegible] et de l'héliodore, et les ions manganèse, [illegible] celles de la morganite [illegible] du béryl rouge (Mn^{3+}).

À l'exception du béryl rouge, on trouve ces gemmes dans des pegmatites et certaines roches métamorphiques. Le béryl rouge, en revanche, n'a été observé que dans des rhyolites à topaze, une roche volcanique riche en silicium et pauvre en fer et en magnésium [illegible] veau-Mexique et dans l'Utah. Le béryllium du béryl rouge proviendrait de la rhyolite hôte. Sa mobilisation sous la forme de complexes fluorés aurait été favorisée par la très faible teneur en calcium de la rhyolite hôte, qui a inhibé la formation de la fluorite (CaF_2). Ce phénomène a eu lieu quand les gaz riches en fluor issus de la [illegible] lite en cours de refroidissement se sont mélangés avec des [illegible] enant d'une eau hydrothermale souterraine, chaude, produisant un fluide supercritique ; la température et la pression d'un tel fluide sont si élevées qu'il s'infiltre à travers les solides comme un gaz tout en dissolvant le matériau comme un liquide. L'absence d'inclusions minérales de fluide dans le béryl rouge suggère qu'il s'est formé à des températures supérieures à celle nécessaire [illegible] rhyolitique (environ 650 °C) et supérieures à celles qui entraînent l'altération de l'argile (200 à 300 °C).

© Pour la Science - n° 418 - Août 2012

ves. Les fluides riches en chlorure de sodium et sulfates ont alors interagi avec les schistes noirs sédimentaires contenant béryllium, chrome et vanadium. Ainsi, l'émeraude a précipité dans des veines et des cavités à remplissage de calcite ($CaCO_3$) et de pyrite (sulfure de fer, FeS_2). La matière organique et le soufre dérivé interviennent dans la formation de ces gisements par un mécanisme [illegible] sulfates (oxydation de la matière organique des schistes noirs et réduction du sulfate d'origine évaporitique).

D'autres processus interviennent dans la formation des émeraudes. À Habachtal, en Autriche, le gisement d'émeraude exploité dès l'époque gallo-romaine est associé à une zone de cisaillement qui était contemporaine du métamorphisme régional : les émeraudes et leur gangue présentent des indices de croissance à plusieurs étapes, des textures liées à la variation de la pression et des traînées d'inclusions incurvées. Ces émeraudes sont d'origine métamorphique, c'est-à-dire liées à [illegible] que des roches à l'état solide provoquée par leur enfouissement lors de mouvements tectoniques. Certains objectent que le modèle classique de la pegmatite pourrait encore s'appliquer à des pegmatites ayant été décelées ailleurs dans la région, des fluides pegmatitiques auraient pu migrer en particulier le long de roches cisaillées, et former des émeraudes distales des pegmatites. Néanmoins, l'étude récente des isotopes du bore des [illegible] les émeraudes de Habachtal n'est pas en faveur de cette hypothèse : elle suggère que deux fluides séparés ont circulé dans la zone de cisaillement, mais qu'aucun de ces fluides n'est d'origine pegmatitique. Un fluide issu du métamorphisme régional a transporté l'isotope léger du bore, comme cela a été observé dans la gangue des émeraudes. L'autre fluide, dérivé de serpentinites (des roches mafiques oxydées par l'eau) encaissantes dans la série métamorphique, [illegible] lourd du bore typique des basaltes des dorsales océaniques ou de la croûte océanique altérée.



LES PEGMATITES sont une source majeure d'émeraudes. Du magma enrichi en béryllium s'écoule dans une fissure, la dilate et forme une pegmatite en refroidissant. Un fluide hydrothermal lié à cette formation extrait [illegible] lium, à l'aluminium et au silicium du fluide pour former des émeraudes dans des roches de la pegmatite.

BIBLIOGRAPHIE

J. K. Russell, **Kimberlite ascent by assimilation-fuelled buoyancy**, *Nature*, vol. 481, pp. 352-356, 2012.

L. A. Groat *et al.*, **Crystal chemistry of dark blue aquamarine from the True Blue showing, Yukon Territory, Canada**, *Canadian Mineralogist*, vol. 48, pp. 597-613, 2010.

T. Stachel et J. W. Harris, **Formation of diamond in the Earth's mantle**, *Journal of Physics : Condensed Matter*, vol. 21, 364206, 2009.

L. A. Groat *et al.*, **Emerald deposits and occurences : a review**, *Ore Geology Reviews*, vol. 34, pp. 87-112, 2008.

L. A. Groat (éd.), **The Geology of Gem Deposits**, Mineralogical Association of Canada, Short Course, vol. 37, 2007.

E. Kiselenko, **Geology of Gems**, Ocean Pictures, 2003.

G. Giuliani *et al.*, **La route des émeraudes**, *Pour la Science*, n° 275, pp. 58-65, 2000.

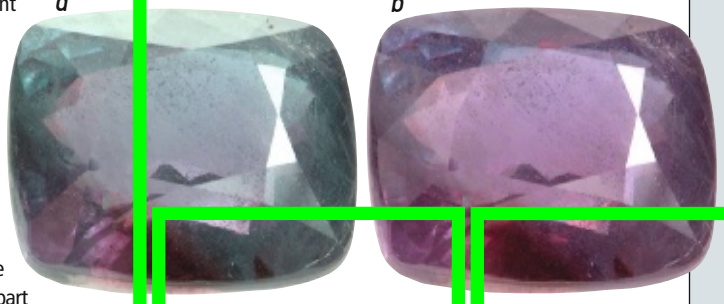
LE CHRYSOBÉRYL

De formule générale $BeAl_2O_4$, le chrysobéryl est une autre gemme à base de béryllium, mais il s'agit d'un oxyde distinct des béryls. Sa couleur – du jaune doré au jaune verdâtre ou brunâtre – est liée aux cations ferriques (Fe^{3+}) qui se substituent à l'aluminium dans la structure cristalline. L'essentiel du chrysobéryl gemme disponible ces [illegible] de dépôts alluviaux dans les États brésiliens de Bahia, Espirito Santo et Minas Gerais.

Les deux variétés gemmes les plus connues sont l'alexandrite et la cymophane. Bleu-vert en lumière naturelle *(a, Tanzanie, largeur 1,5 centimètre)*, l'alexandrite vire au rouge profond en lumière incandescente *(b)* – un effet dû à la [illegible] cymophane est un chrysobéryl translucide chatoyant surnommé « œil-de-chat », car des inclusions d'aiguilles de rutile parallèles produisent une bande brillante qui se déplace quand on fait tourner la pierre.

Dans les monts Oural en Russie et à Franqueira en Espagne, l'alexandrite est associée à l'émeraude et à la phénakite (un autre silicate de béryllium). Son processus de formation est [illegible] celui de l'émeraude associée aux pegmatites. Si la plupart des chrysobéryls sont trouvés dans des pegmatites, dans de nombreux cas, la pierre est associée à des minéraux riches en aluminium en général absents des pegmatites. Plusieurs hypothèses ont été avancées sur la formation de ces gemmes. Certaines études ont conclu qu'à hautes températures et [illegible] de silicate d'aluminium est instable et se décompose en un assemblage de chrysobéryl et de quartz. Selon une autre hypothèse, le chrysobéryl se formerait par accumulation de minces couches sur des [illegible] tants (un silicate de magnésium et de fer), car le chrysobéryl présente une structure de type olivine.

L'étude d'échantillons supplémentaires a conduit à une autre conclusion, [illegible] tir de la décomposition d'un autre minéral, la saphirine (un silicate de magnésium et d'aluminium riche en béryllium, de couleur similaire à celle du saphir) [illegible] ours du métamorphisme. [illegible] re et la composition du chrysobéryl, quant à elles, suggèrent que la pierre s'est formée lorsque des masses de roches métamorphiques à grain moyen ou grossier ont subi des changements de pression et de température, [illegible] nommé métamorphisme régional de faciès granulite, aurait libéré du béryllium de la roche sédimentaire hôte.



David Weinberg / Wikimedia (CC BY-SA 3.0)

LA TANZANITE ET LA TSAVORITE

La tanzanite *(ci-dessous)* est la variété variadifère, de couleur bleu foncé, du minéral zoïsite, de formule générale $Ca_2Al_3(SiO_4)_3(OH)$: sa couleur est due au vanadium qui se substitue à l'aluminium dans la structure cristalline. En général, la tanzanite non traitée est de couleur marron grisâtre, violet grisâtre, violet brunâtre, bleuâtre et marron verdâtre ; on la chauffe à basse température pour modifier les impuretés et éliminables, mais surtout pour obtenir la couleur bleue. La tsavorite *(page ci-contre)*, quant à elle, est la variété verte, de qualité gemme, du grenat calcique alumineux grossulaire (du nom de la groseille à maquereaux, de couleur similaire), de formule générale $Ca_3Al_2(SiO_4)_3$, en présence de petites quantités de vanadium qui remplacent l'aluminium (grossulaire variadifère).

La tanzanite et la tsavorite ont toutes deux été découvertes en 1967 en Tanzanie. La plupart des mines et gisements de tsavorite se trouvent en Afrique de l'Est, dans l'Est et le Sud de la Tanzanie, et dans le Sud-Est du Kenya, à proximité du parc national du Tsavo, et dans le Sud de Madagascar. Tous ces gisements se situent dans des environnements métamorphiques riches en vanadium qui sont associés à des marbres et des niveaux d'évaporites (sels et sulfates).

Les gisements du district de Merelani, en Tanzanie, au pied du Kilimandjaro, restent la seule source connue de tanzanite. C'est aussi dans ce district que l'on trouve les meilleurs cristaux de tsavorite, associés à de la tanzanite et de la tourmaline chromifère. Ces gisements sont situés sur le flanc Ouest d'une série de roches sédimentaires (schistes noirs, calcaires, sels et sulfates) plissées, déformées et « métamorphisées » à une température d'environ 700 °C, nommée la ceinture plissée de Lelatema. La tanzanite et la tsavorite de qualité gemme sont en général concentrées soit dans des veines et filons de quartz développés à la charnière des plis, soit dans des nodules dispersés dans les schistes métamorphiques (gneiss graphiteux) transformés en marbres. Les mécanismes de formation des deux gemmes semblent toutefois distincts.

La tsavorite s'est formée au cours de la phase de réchauffement du métamorphisme régional (métamorphisme prograde), suivant deux types de minéralisation : dans les nodules, la tsavorite a remplacé des sels et des sulfates initiaux qui contenaient des argiles à vanadium et chrome. Cette transformation s'est effectuée à une température de 580 à 690 °C et une pression de 5×10^8 à 704×10^8 pascals ; dans les veines de quartz, la circulation du fluide métamorphique calcique a déposé la tsavorite à une température comprise entre 500 et 590 °C et une pression de $3{,}6\times10^8$ à 5×10^8 pascals.

Didier Descouens / Wikimedia (CC-BY-SA-3.0)

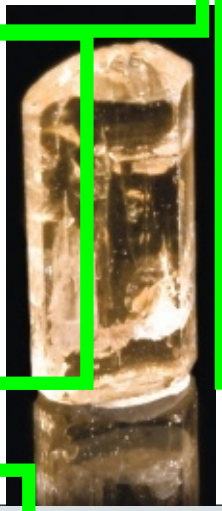
L.-D. Bayle/ le Règne Minéral

LA TOPAZE

De formule générale $Al_2SiO_4(F,OH)_2$, la topaze est majoritairement incolore, mais certaines sont jaune pâle, roses, orange, marron, bleues, vertes ou grises. Les teintes roses et rougeâtres résultent de la substitution de chrome, de manganèse et de fer à la place de l'aluminium. Les couleurs brunâtres et bleues sont dues à une variété de défauts nommés centres de couleur au sein des pierres et sont accentuées par le chauffage. La topaze bleu ciel est apparue sur les marchés au milieu des années 1980 : elle est obtenue en irradiant la topaze incolore à l'aide de neutrons ou de rayons gamma ; l'irradiation entraînerait le déplacement des hydroxyles (OH) dans la structure cristalline, créant des défauts ainsi créés absorberaient la lumière à certaines longueurs d'onde, révélant une dominante bleue.

On connaît plus de 80 gisements de topaze bien cristallisée dans le monde. La plupart des topazes de belle gemme sont produites dans des pegmatites en général peu profondes et enrichies en terres rares, telles celles du Minas Gerais, au Brésil. La région d'Ouro Preto, [illegible] sont issues nombre de topazes gemmes, en particulier la variété « impériale » rouge à rose orangé, riche en chrome. Il ferait toutefois exception : la topaze contenant des concentrations élevées d'hydroxyle, ses gisements se sont formés dans des veines hydrothermales de quartz issues de la mise en place d'un granite dans des formations mafiques métamorphisées porteuses de chrome. Des gisements similaires sont connus au Pakistan et en Russie.

On trouve aussi des topazes dans des coulées de rhyolite, une roche volcanique riche en silicium et pauvre en fer et en magnésium ; dans l'Ouest des États-Unis et au Mexique, notamment, une ceinture d'unités de rhyolite du Cénozoïque (65 millions d'années) enrichie en fluor est grande productrice de gemmes. Les textures pétrographiques observées sur les roches indiquent que la topaze s'est formée à plusieurs stades à partir du début de la sortie de la lave (extrusion) et à des températures de 650 à 850 °C. À Cerro El Gato (San Luis Potosi, Mexique), cependant, d'autres mécanismes sont invoqués : la topaze incolore aurait cristallisé à plus de 500 °C à partir de fluides enrichis en éléments extraits de la lave par lessivage, tandis que la topaze bleue a été formée à moins de 500 °C à partir de fluides plus riches en éléments volatils, dont l'arsenic.



Didier Descouens / Wikimedia (CC-BY-SA-3.0)

LE JADE

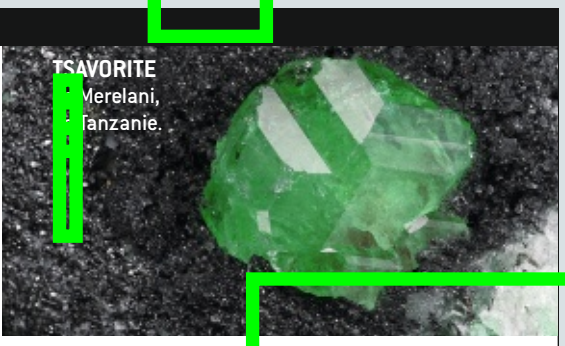
Le jade désigne deux types de roches : la jadéitite, composée en majorité de jadéite ($NaAlSi_2O_6$), et la néphrite, une variété de trémolite-actinolite ($Ca_2(Mg,Fe)_5Si_8O_{22}(OH)_2$) avec de minuscules cristaux. La jadéitite est plus dure que la néphrite, mais la ténacité (résistance à la fracture) et l'énergie de surface de la néphrite sont en [illegible] tite. Moins courante et plus précieuse que la néphrite, la jadéitite est davantage utilisée en bijouterie qu'en sculpture.

La jadéite pure est blanche. Les teintes verte et bleue sont attribuées au remplacement de l'aluminium par du fer, ou par quelques atomes de chrome pour la couleur « impériale » vert émeraude. La couleur [illegible] gande se dans une jadéite pauvre en fer. Rarement, la néphrite présente une couleur vert émeraude intense par substitution de chrome.

On ne recense que 14 gisements de jadéitite. Le principal district producteur est le *Jade Tract* de l'État de Kachin, au Nord du Myanmar. La jadéitite se présente sous forme d'inclusions ou de fragments dans des agrégats rocheux à dominante de serpentinite (une roche métamorphique de silicates de magnésium), [illegible] tre source importante de jadéitite est la vallée du Motagua au Guatemala, où deux ceintures de jade associé à de la serpentinite sont les té-

John Hill / Wikimedia (CC BY-SA 3.0)

© Pour la Science - n° 418 - Août 2012



TSAVORITE Merelani, Tanzanie.

La tanzanite, quant à elle, s'est formée à partir de fluides hydrothermaux lors de la phase de refroidissement du métamorphisme régional (métamorphisme rétrograde). La formation a eu lieu à des températures comprises entre 390 et 450 °C et des pressions de 2×10^8 à 3×10^8 pascals, soit dans de veines de quartz, soit par transformation de la tsavorite par hydratation du grenat. D'après la datation par traces de fission sur la tanzanite – traces laissées par la désintégration spontanée de certains éléments radioactifs –, elle aurait cristallisé il y a environ 585 millions d'années.

JADE MAYA en jadéite (hauteur 20 cm).

moins d'une zone de subduction entre les plaques américaine et caraïbes. Tous les gisements de jadéite (et beaucoup de néphrite) se forment à la périphérie des plaques, où des fluides in-

(roches riches en magnésium et en fer) et avec les roches environnantes, à une profondeur atteignant 50 kilomètres.

L'essentiel de la néphrite est un produit de la transformation chimique de roches par la circulation de fluides au contact d'une intrusion siliceuse ou d'une extrusion magmatique (métasomatisme de contact), et ce de deux façons : le remplacement de la serpentinite par du calcium au contact de la roche siliceuse, et le remplacement de la dolomite par des fluides riches en silice associés aux magmas granitiques. Les principaux gisements de la première catégorie sont situés dans les mines du Nord de la Colombie-Britannique et dans le massif du Saïan oriental en Sibérie. Les mines de la seconde catégorie se trouvent dans les monts Kunlan en Chine et la province de Cowell dans le Sud de l'Australie.

Si de nombreuses gemmes sont encore extraites par des exploitants isolés dans des endroits difficiles d'accès, l'industrie des gemmes s'est modernisée en systématisant ses méthodes de prospection de nouveaux gisements. Depuis que, dans les années 1980, les images du satellite d'observation de la surface terrestre *Landsat* ont été mises à disposition pour un coût faible, les prospecteurs possédant une technologie de pointe cartographient directement les gîtes minéraux à l'aide de ces clichés dans le domaine visible, voire d'autres bandes spectrales dans des zones dépourvues de végétation. Et les satellites plus récents ont encore amélioré la résolution des images.

Quand la technologie s'en mêle

Au Canada, les images satellites et aériennes ont été utilisées pour rechercher des sites potentiels de kimberlite diamantifère, car les mesures chimiques et magnétiques sur ces formations sont différentes de celles des roches environnantes. La recherche des signatures magnétiques est particulièrement utile pour la découverte de kimberlites sous couverture ou sous l'eau. En 2002, au Canada, 100 millions d'hectares de zones potentielles de kimberlite ont été identifiées, parmi lesquels 4 millions d'hectares se sont révélés diamantifères par échantillonnage direct (dont 22 kimberlites qui devraient avoir un rendement important).

D'autres propriétés physico-chimiques des roches sont utilisées pour l'exploration. Cédric Simonet et ses collègues, de la Société *Akili Mineral Services*, au Kenya, ont trouvé que les roches associées aux gisements de rubis dans ce pays ont une résistance électrique et une radioactivité inférieures à celles des roches hôtes environnantes.

Une autre approche est la géochimie, la recherche de compositions minérales comme signature de certains gisements de gemmes. En Colombie, les roches hôtes à forte teneur en sodium, mais appauvries en lithium, potassium, béryllium et molybdène, se sont révélées de bons indicateurs pour la prospection des émeraudes. Il en est de même pour les cours d'eau et les sédiments : des relevés ont montré que, lorsque les cours d'eau et les sédiments s'écoulent de gisements d'émeraudes connus, leur composition est différente. Un contenu en sodium anormal dans les sédiments a aussi été utilisé avec succès pour trouver plusieurs nouvelles sources d'émeraudes.

Les béryllomètres sont des instruments utiles pour rechercher les émeraudes et autres béryls. Ces appareils projettent un rayonnement gamma qui excite les atomes de béryllium, de telle sorte que sa teneur peut être mesurée dans les roches hôtes. Deux modèles sont disponibles, l'un léger (2 kilogrammes), mais lent et peu sensible, l'autre assez lourd (17 kilogrammes) mais plus rapide et sensible. Leurs inconvénients respectifs limitent leur utilisation sur le terrain.

Notre groupe étudie des approches pour explorer des gisements d'émeraudes susceptibles d'appartenir au type colombien, telles les vastes étendues de schistes noirs du Nord-Ouest canadien. D'une part, nous effectuons des analyses géochimiques d'échantillons afin de rechercher les régions riches en sodium et pauvres en béryllium et en potassium. D'autre part, nous examinons la géologie structurale à la recherche de régions propices : présence de failles de déchirement, de charriages reliés à des plans de décollement régionaux (où une unité géologique glisse par rapport à une autre).

D'autres études ont montré que les magmas des pegmatites à émeraudes sont fractionnés : leurs éléments constitutifs sont séparés selon leur solubilité. Ce processus enrichit le fluide en béryllium, qui atteint son seuil de saturation – une condition nécessaire à la formation des émeraudes. Des telles pegmatites sont décelées par leurs signatures géochimiques, telles que les rapports potassium-rubidium ou rubidium-strontium. Quant aux zones à pegmatites encore non repérées – des massifs cristallins formés de roches issues du refroidissement d'un magma en profondeur (plutons) –, elles sont identifiées à l'aide de l'imagerie satellitaire.

Ces outils sont bien sûr à utiliser avec prudence, car ils ne sont pas infaillibles. Les analyses géochimiques dépendent de la dissolution correcte des phases minérales qui contiennent les éléments recherchés, et la spectrométrie de masse, qui permet d'étudier la composition chimique d'un échantillon, présente des limites de sensibilité en fonction des éléments en présence.

À mesure que la technologie progresse, il est probable que la localisation des régions recelant des gemmes sera facilitée. Deviendront-elles alors moins rares et, de ce fait, moins précieuses ? Pas pour les géologues en tout cas, qui y verront autant de sources d'informations sur les mouvements internes de la Terre. ■

Déchiffrer la planète rouge

Le 6 août à 7 h 31, heure de Paris, le robot *Curiosity* de la NASA se posera sur Mars et entamera pour la première fois la recherche directe de traces d'un environnement propice à la vie

John Grotzinger et Ashwin Vasavada

LES AUTEURS

John GROTZINGER est directeur scientifique de la mission Mars *Science Laboratory*.

Ashwin VASAVADA est directeur scientifique adjoint du projet.

BIBLIOGRAPHIE

P. Smith, Ont-a creusé sur Mars, *Pour la Science* n° 411, janvier 2012. http://bit.ly/411_smith

J. Bell, Mars : un passé humide, *Pour la Science* n° 352, février 2007. http://bit.ly/352_bell

P. Christensen, Histoires d'eau sur Mars, *Pour la Science* n° 333, juillet 2005. http://bit.ly/333_christensen

Le site de la NASA sur la mission *Curiosity* : www.nasa.gov/mission_pages/msl/index.html#71.php

F. Forget, F. Costard et Ph. Lognonné, La planète Mars, histoire d'un autre monde, Belin-Pour la Science, 2007.

En science, tout commence souvent comme dans la série *Star Trek* : on explore des territoires encore vierges et on découvre des choses que l'on n'avait pas imaginées auparavant. Mais une fois les premières analyses terminées et une longue liste de questions dressée, on se retrouve plutôt dans *Sherlock Holmes* : il s'agit de formuler des hypothèses précises et d'imaginer des moyens de les vérifier. L'exploration de Mars est à la veille de cette transition. Les sondes en orbite ont établi des cartes topographiques et minéralogiques globales de la surface, et les atterrisseurs ont permis de reconstituer les grandes lignes de son histoire géologique. Il est temps de passer à des recherches plus pointues.

Notre équipe a construit le véhicule d'exploration *Mars Science Laboratory*, surnommé *Curiosity*, en supposant que Mars a jadis été une planète habitable. Ce «rover» embarque un laboratoire d'analyses pour tester cette hypothèse et déterminer ce qu'il est advenu des conditions propices à la vie qu'aurait connues la planète dans sa jeunesse. Pour l'essentiel, un environnement habitable comprend de l'eau, de l'énergie et du carbone. Les missions précédentes ont confirmé que de l'eau liquide était présente sur Mars par le passé. Elles ont également détecté des signes de gradients géochimiques susceptibles de fournir de l'énergie. Mais aucune trace de carbone sous une forme exploitable par des organismes vivants n'a été décelée.

Comme les missions *Viking* des années 1970, *Curiosity* est doté d'un chromatographe en phase gazeuse couplé à un spectrographe de masse capable d'identifier les composés organiques, qu'ils soient d'origine biologique ou non. Mais contrairement aux sondes *Viking*, *Curiosity* peut se déplacer, et il se posera dans un site bien plus prometteur.

Et, plus que de trouver le carbone lui-même, la mission vise à comprendre comment chercher des traces de vie. Même sur Terre, nous ne savons pas exactement comment explorer les enregistrements géologiques pour dénicher de telles traces. Les caractéristiques qui font un environnement habitable (eau, oxydants, gradients chimiques et de température, etc.) tendent aussi à dégrader les composés organiques. Les paléontologues ont appris à rechercher les conditions qui facilitent la préservation, par exemple la minéralisation précoce. On sait que la silice, le phosphate, l'argile, le sulfate ou le carbonate séquestrent les substances organiques en précipitant. Les cartes minéralogiques établies par les sondes orbitales pour certains de ces minéraux autour du site d'atterrissage de *Curiosity* permettront de guider son exploration.

© Pour la Science - n° 418 - Août 2012

L'ATTERRISSAGE

De l'espace au sol en sept minutes

Qui dit rover sophistiqué dit rover volumineux et lourd. *Curiosity* a la taille d'une petite voiture et une masse de 900 kilo… l'espace est plus grosse que celle qui abritait les astronautes d'*Apollo*. Par conséquent, la méthode d'atterrissage retenue pour *Curiosity* est inédite.

La capsule de rentrée atmosphérique commence par se séparer des systèmes de propulsion spatiale et d'alimentation ❶. Elle éjecte du lest (en tungstène) pour déplacer son centre de masse et se transformer en une sorte d'aile pilotable. La capsule rencontre la haute atmosphère martienne à une vitesse hypersonique d'environ six kilomètres par seconde. Son bouclier thermique… produite par le freinage ❷. Le vaisseau vole alors horizontalement, des propulseurs latéraux le dirigeant vers le site d'atterrissage ❸.

À une altitude de 10 kilomètres, le vaisseau déploie un parachute de 21,5 mètres de diamètre et long de 50 mètres ❹. À ce stade, la vitesse de descente est toujours… été un point délicat : à de telles vitesses, la physique qui gouverne le déploiement du parachute est mal comprise et très difficile à modéliser.

Peu après avoir déployé son parachute, la capsule largue le bouclier thermique et allume le radar de détection du sol. À environ deux kilomètres d'altitude, le vaisseau descend à une centaine de mètres par seconde, presque à la vitesse terminale, la plus lente qui puisse être atteinte grâce au freinage de l'atmosphère… rissage : le rover se sépare alors du parachute, et déclenche son dispositif porteur, doté de moteurs-fusées pour contrôler la descente ❺.

À environ 20 mètres au-dessus de la surface, le porteur se stabilise et le rover est descendu au bout de trois câbles. Il est déposé à la surface, roues et suspensions entièrement déployées, à environ 0,75 mètre par seconde ❻. Après deux secondes, le temps de confirmer qu'il est bien sur un sol dur, le rover coupe les câbles et le « cordon ombilical » qui transmet les données au porteur. Ce dernier s'envole alors pour aller s… heure plus tard, *Curiosity*… mières images de la surface et, dès la fin du deuxième mois, il aura analysé les premiers échantillons de sol et de roches.

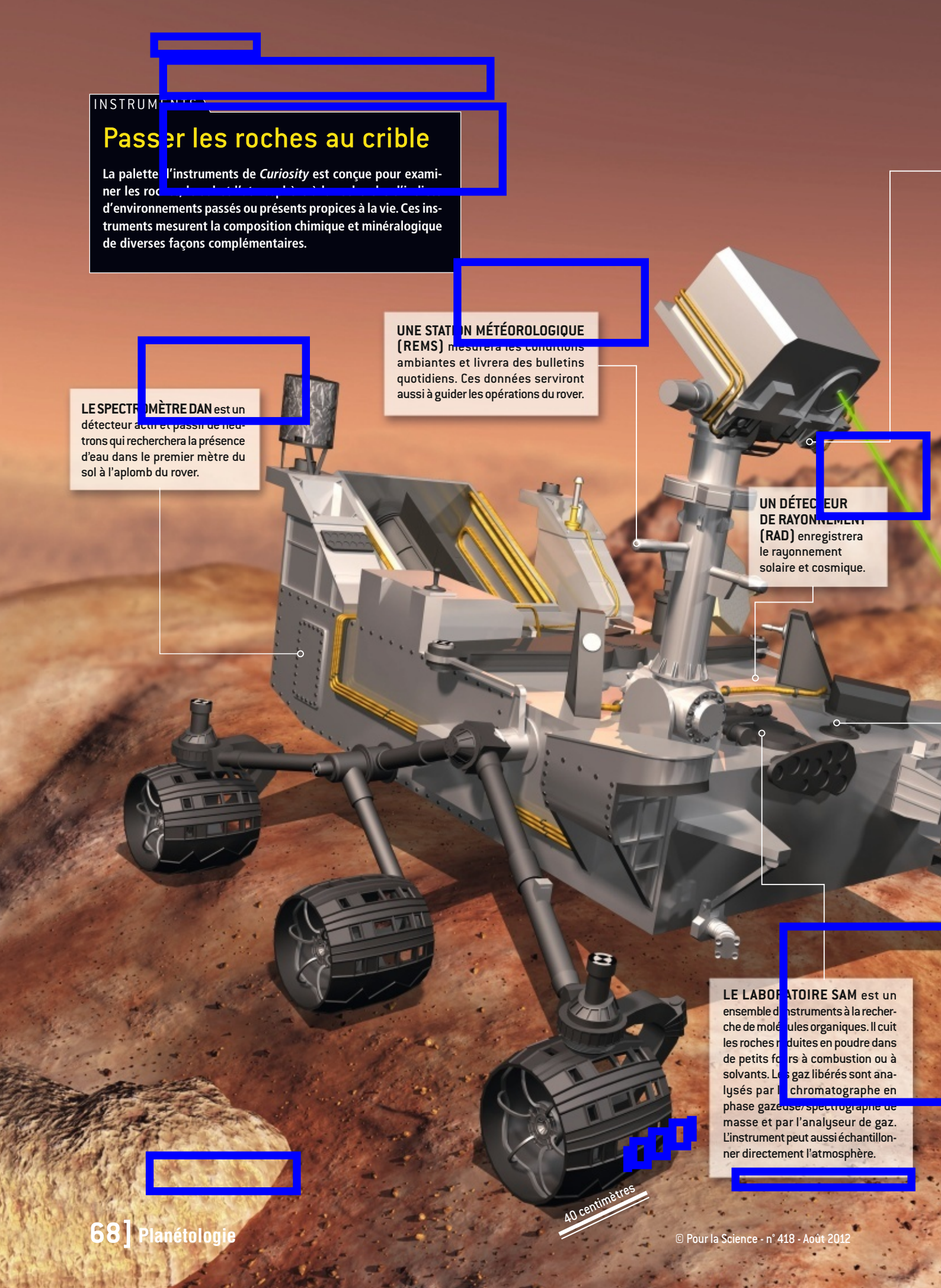
Steeve Lee, Univ. of Colorado ; Jim Bell, Cornell Univ. ; Mike Wolff, Space Science Inst.

© Pour la Science - n° 418 - Août 2012

INSTRUMENTS

Passer les roches au crible

La palette d'instruments de *Curiosity* est conçue pour examiner les roches, le sol et l'atmosphère à la recherche d'environnements passés ou présents propices à la vie. Ces instruments mesurent la composition chimique et minéralogique de diverses façons complémentaires.



© Pour la Science - n° 418 - Août 2012

DES CAMÉRAS EN COULEUR (MASTCAM) enregistreront des images en haute résolution des paysages et des textures des roches. Ces dernières aideront à reconstituer les processus de formation des roches et du sol, qui impliquent peut-être l'action de l'eau. L'une des caméras (MARDI), située sous le rover, filmera la descente et l'atterrissage.

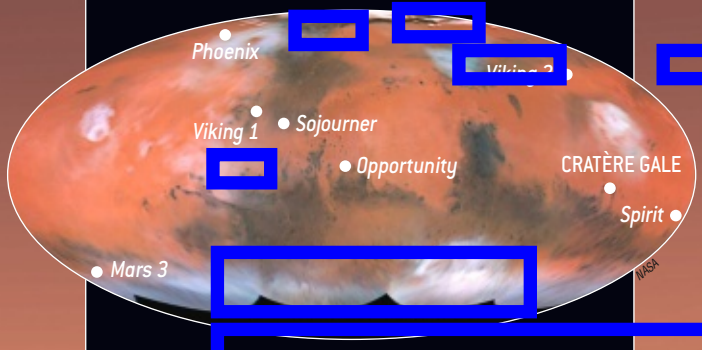
L'INSTRUMENT CHEMIN effectuera l'analyse minéralogique des roches réduites en poudre en envoyant des rayons X pour faire apparaître des motifs de diffraction caractéristiques des minéraux. Contrairement aux missions précédentes, il pourra analyser plusieurs types de minéraux.

LE BRAS ROBOTISÉ, d'une portée allant jusqu'à deux mètres, est équipé de 30 kilogrammes d'outils permettant de percer des trous et de pulvériser des roches. Un ensemble de tamis prépare de la poudre pour les instruments d'analyse.

LE SPECTROMÈTRE PAR ABLATION LASER (CHEMCAM) analysera la composition des roches à distance en les volatilisant en plasma avec un laser et en analysant la lumière qu'elles émettent alors.

LE SPECTROMÈTRE À PARTICULES ALPHA ET RAYONS X (APXS) déterminera *in situ* la composition en élements lourds des roches par fluorescence induite par rayons X.

LES SITES D'ATTERRISSAGE



Le cratère Gale

Après cinq ans d'études, la NASA a retenu le cratère Gale parmi 50 sites candidats proposés pour faire atterrir *Curiosity*. Dans cet ancien cratère d'impact de 150 kilomètres de diamètre, l'érosion éolienne et des impacts récents ont exposé des matériaux autrefois enterrés, [illegible] trace d'écoulements d'eau et des terrains fracturés riches en minéraux, analogues à ceux que l'on trouve sur Terre au-dessus des aquifères.

Le cratère est dominé par un pic central, le mont Sharp, qui culmine à plus de 5 000 mètres au-dessus des plaines environnantes. La majeure partie de ce mont est accessible au rover *Curiosity* par différents chemins. Il en entamera l'ascension 6 à 12 mois après l'atterrissage. Le pic est constitué de strates de roches sédimentaires qui, [illegible] livreront une chronologie de la [illegible] *Opportunity* a examiné 15 à 20 mètres de strate ; trop peu pour retracer l'évolution du climat, mais assez pour donner un aperçu de ce que verra *Curiosity*.

Les roches sédimentaires sont particulièrement intéressantes et pourraient renfermer des signatures éventuelles de vie passée. En se plongeant dans l'histoire martienne, *Curiosity* éclairera de façon indirecte une [illegible] que disparu des profils géologiques, quand les deux planètes n'étaient peut-être pas si différentes. De quoi mieux comprendre notre propre planète...

© Pour la Science - n° 418 - Août 2012

Le cerveau STRESSÉ

Amy Arnsten, Carolyn Mazure et Rajita Sinha

Les circuits neuronaux assurant le contrôle de soi sont perturbés par un stress, même modéré. Dès lors, les émotions et les désirs prennent les commandes...

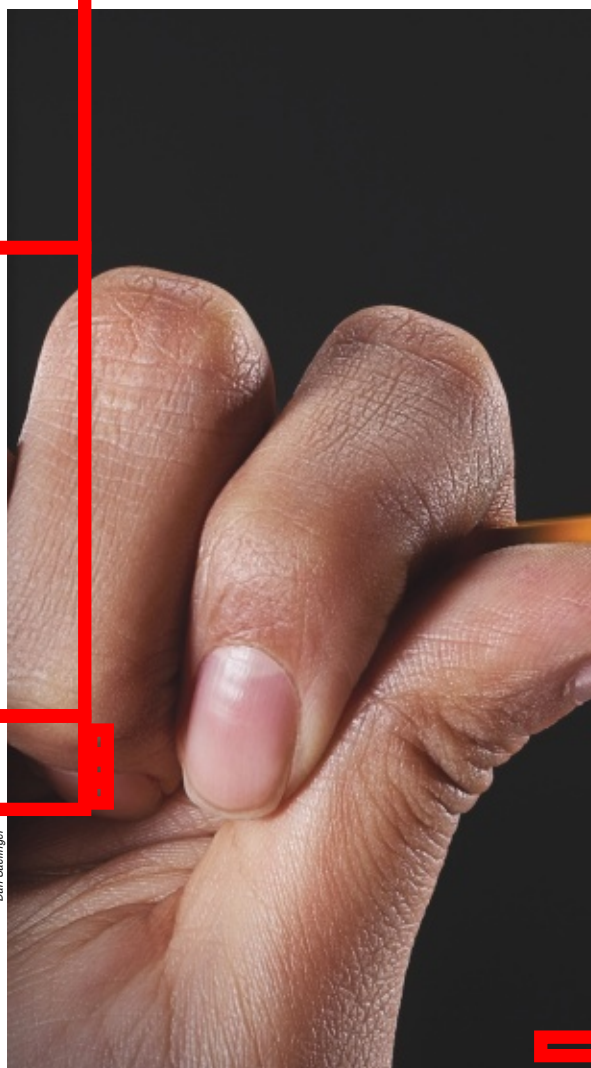
Chez certains étudiants, la perspective des examens perturbe, voire bloque totalement, les capacités de raisonnement. Les expressions imagées ne manquent pas pour décrire ce phénomène : être paralysé, sur les nerfs, mort de peur, au bord de l'évanouissement, etc. De même, certaines personnes sont paralysées à l'idée de parler en public. Les situations de stress sont courantes et chacun en connaît les effets.

Les neuroscientifiques croyaient comprendre les mécanismes cérébraux du stress, mais les recherches récentes ont remis en cause leurs explications. La réponse au stress n'est pas seulement une réaction primitive qui ne concerne que les aires cérébrales communes à de nombreuses espèces, de la salamandre à l'homme. En réalité, le stress affecte les facultés cognitives, les zones cérébrales les plus élaborées chez les primates.

Auparavant, on décrivait la manifestation physiologique du stress comme une réaction de l'hypothalamus, une structure apparue très tôt au cours de l'évolution et située à la base du cerveau : l'hypothalamus déclencherait la sécrétion d'hormones par l'hypophyse (localisée à la base du cerveau) et les glandes surrénales (juste au-dessus des reins), hormones qui accélèrent le rythme cardiaque, augmentent la pression sanguine et diminuent l'appétit. Les recherches récentes ont révélé un rôle inattendu du cortex préfrontal, une structure cérébrale située derrière le front. Il est le siège des capacités cognitives les plus élaborées – la concentration, la planification, la prise de décision, l'intuition, le jugement... C'est la partie du cerveau apparue le plus tard au cours de l'évolution.

Le cortex préfrontal agit comme un centre de commande. Quand tout va bien, il maintient nos émotions et nos pulsions « primaires » sous contrôle. En revanche, un stress aigu déclenche une série d'événements chimiques qui réduisent son influence, tout en renforçant celle d'aires cérébrales plus anciennes. Nous pouvons alors nous retrouver en proie à une anxiété paralysante ou à des pulsions que d'habitude nous réussissons à contrôler : excès de nourriture et de boissons, consommation de drogues, frénésie dépensière... En d'autres termes, nous perdons le contrôle de nous-mêmes.

Depuis qu'ils ont découvert que le stress peut perturber des fonctions exécutives supérieures, les neurobiologistes cherchent



Dan Saelinger

à comprendre les mécanismes sous-jacents. Ils espèrent mettre au point des thérapies comportementales et des médicaments permettant de garder son sang-froid.

Le cortex préfrontal : un chef d'orchestre

La question intrigue les scientifiques depuis des décennies. Après la Seconde Guerre mondiale, ils se sont demandé pourquoi certains pilotes de chasse, virtuoses à l'entraînement, commettaient des erreurs grossières et fatales dans le feu du combat. Ils n'ont pu analyser en détail l'activité du cerveau qu'avec les progrès des techniques de neuro-imagerie dans les années 1990. Ils ont alors remarqué une « explosion » d'activité dans le cortex préfrontal lors des événements stressants.

Si cette zone est si sensible au stress, c'est en raison de son statut hiérarchique particulier au sein des structures cérébrales. Proportionnellement plus gros chez l'homme que chez les autres primates, le cortex préfrontal représente un bon tiers du cortex humain. Sa maturation est plus lente que celle des autres zones cérébrales et ne s'achève qu'après l'adolescence. Il est responsable de la pensée abstraite. Grâce à lui, nous sommes capables de nous concentrer sur une tâche, tout en stockant des informations dans la mémoire de travail. Cette dernière nous permet de garder à l'esprit des données dont nous avons besoin pendant quelques instants, telle la retenue à reporter dans la colonne suivante lors d'une addition. Cette donnée est ensuite oubliée. Enfin, le cortex préfrontal inhibe les pensées et les actions inappropriées.

Il fonctionne grâce à un vaste réseau de connexions reliant certains de ses neurones, nommés cellules pyramidales car leur corps cellulaire a une forme triangulaire. Ces neurones sont aussi connectés à des aires plus éloignées, qui contrôlent les émotions, les désirs et les habitudes. En l'absence de stress intense, ce réseau joue un rôle régulateur. Le cortex préfrontal peut par exemple envoyer un signal à d'autres régions cérébrales pour contrecarrer le désir d'un second verre de vin. Ou encore, si un homme imposant s'approche,

L'ESSENTIEL

Le cortex préfrontal maintient nos émotions sous contrôle en régulant l'activité de structures cérébrales sous-corticales où elles prennent naissance.

Il peut être désactivé par les modifications neurochimiques dues au stress, ce qui entraîne des réactions peu rationnelles, voire une paralysie mentale.

Grâce à une meilleure compréhension des mécanismes du stress, on développe des thérapies comportementales et des médicaments pour mieux y résister.

LES AUTEURS

Amy ARNSTEN est professeur de neurobiologie à la Faculté de médecine de l'Université Yale, aux États-Unis.

Carolyn MAZURE est professeur de psychiatrie et de psychologie dans la même faculté.

Rajita SINHA est professeur de psychiatrie dans la même faculté.

SUR LE WEB

Questionnaire (en anglais) pour évaluer votre stress : www.scientificamerican.com/article.cfm?id=stress-periodic-meter

SOUS L'EFFET D'UN STRESS PROLONGÉ, le cortex préfrontal peut être perturbé durant plusieurs jours, voire plusieurs semaines.

le cortex préfrontal transmet un message à l'amygdale, une petite structure cérébrale ancestrale impliquée dans les réactions de peur, pour indiquer que cet homme n'a pas d'intentions agressives.

Le bon fonctionnement de ce réseau est très sensible aux conditions chimiques. Nos recherches visant à préciser l'influence de ces conditions ont commencé il y a une vingtaine d'années. En réponse au stress, notre cerveau est inondé de composés chimiques « stimulants », telles la noradrénaline et la dopamine. Ces composés sont des neurotransmetteurs (les substances chimiques qui assurent la transmission des signaux électriques d'un neurone à l'autre). Ils sont libérés par des neurones du tronc cérébral, dont les prolongements atteignent toutes les régions du cerveau. Quand ils se déversent en grande quantité dans le cortex préfrontal, ils inhibent toute décharge neuronale : d'une part, ils réduisent l'efficacité de la transmission synaptique entre les neurones et, d'autre part, ils rendent les neurones eux-mêmes temporairement inaptes à transmettre les signaux électriques *(voir l'encadré page ci-contre)*. L'activité du réseau diminue, tout comme la capacité de régulation du comportement.

Ces effets s'aggravent lorsque les glandes surrénales, contrôlées par l'hypothalamus, libèrent du cortisol – l'hormone du stress – dans le sang. Dans ces conditions, le contrôle de soi devient difficile à assurer.

Tandis que le cortex préfrontal s'éteint, l'emprise d'autres régions cérébrales sur le comportement se renforce – un même neurotransmetteur peut avoir des effets opposés sur les neurones, en fonction des récepteurs présents sur leur membrane. Ainsi, la dopamine accroît l'activité d'une série de structures situées dans les profondeurs du cerveau, nommées ganglions de la base. Ces structures régulent nos envies, nos émotions et nos mouvements. Elles sont activées aussi bien quand nous roulons à bicyclette que lorsque nous cédons à l'attrait d'une cigarette interdite.

En 2003, Benno Roozendaal, aujourd'hui à l'Université de Groningue, aux Pays-Bas, James McGaugh, de l'Université de Californie à Irvine, et leurs collègues ont découvert un renforcement similaire du rôle de l'amygdale. Sous l'influence de la noradrénaline et du cortisol produits lors d'un stress, elle transmet un signal d'alerte au reste du système nerveux pour le préparer à fuir ou à combattre le danger. Elle améliore également la mémorisation des souvenirs associés à la peur et au danger.

Les hommes inégaux face au stress

Les recherches sur le stress, qui ont d'abord concerné l'animal, ont été poursuivies chez l'homme. Elles montrent que certaines personnes sont plus sensibles que d'autres, en raison de prédispositions génétiques ou d'expositions antérieures au stress. Après l'extinction du cortex préfrontal par la dopamine et la noradrénaline, des enzymes détruisent ces neurotransmetteurs. Ainsi, le cerveau recommence à fonctionner normalement quand le stress disparaît. Cependant, ces enzymes sont parfois peu efficaces en raison de facteurs génétiques, ce qui s'accompagne d'une sensibilité accrue au stress et, dans certains cas, aux maladies mentales. Des facteurs environnementaux peuvent avoir un effet similaire : par exemple, le saturnisme (l'intoxication au plomb) a des conséquences physiologiques voisines de celles du stress et diminue les capacités cognitives.

Sous l'effet d'un stress prolongé (ou d'une répétition régulière d'événements stressants), le cortex préfrontal peut être perturbé durant plusieurs jours, voire plusieurs semaines. Les études ont montré que le réseau complexe des connexions entre neurones se développe dans les centres émotionnels primitifs, telle l'amygdale. Simultanément, les aires cérébrales impliquées dans le raisonnement (philosophique, mathématique...) rétrécissent au sein du cortex préfrontal, car des neurones meurent. John Morrison, de la Faculté de médecine du Mont Sinai, à New York, et ses collègues ont découvert que le cerveau peut en partie récupérer après un stress, à condition qu'il n'ait pas été trop intense : la connectivité entre les neurones existants augmente. L'une d'entre nous (Rajita Sinha) l'a mis en évidence chez l'homme, où la diminution de la substance grise (liée au nombre de neurones) dans le cortex préfrontal traduit la durée de l'exposition au stress.

Les transformations du cortex préfrontal nous rendent plus vulnérables face à un stress ultérieur et favorisent probablement la dépression, la dépendance et les troubles de l'anxiété, tel le stress post-traumatique. Les femmes y seraient plus sensibles. Comme

Dan Saelinger

© Pour la Science - n° 418 - Août 2012

l'une d'entre nous (Carolyn Mazure) et ses collègues ont montré, le stress augmente le risque de dépression et de comportement addictif, tel le tabagisme, chez la femme. Chez l'homme, le stress exacerbe les envies et perturbe les comportements régulés par les ganglions de la base, entraînant des tics ou des mouvements stéréotypés (se ronger les ongles, se mordiller les joues...).

La façon dont le stress modifie le cortex préfrontal, impliqué dans le contrôle de soi, doit encore être précisée. Pour ce faire, certains scientifiques étudient l'influence de divers composés neurochimiques sur cette aire cérébrale. Ainsi, Trevor Robbins et Angela Roberts, de l'Université de Cambridge, cherchent si la sérotonine, qui joue un rôle clé dans la dépression, module le stress et l'anxiété en agissant sur le cortex préfrontal.

Les exigences éthiques compliquent ces études, car les sujets ne doivent pas être exposés à des stress psychologiques extrêmes. De fait, on leur précise qu'ils peuvent arrêter l'expérience à tout moment, de sorte qu'ils ne sont pas placés dans des conditions proches de la réalité. Plusieurs

POURQUOI PERD-ON LE CONTRÔLE DE SOI ?

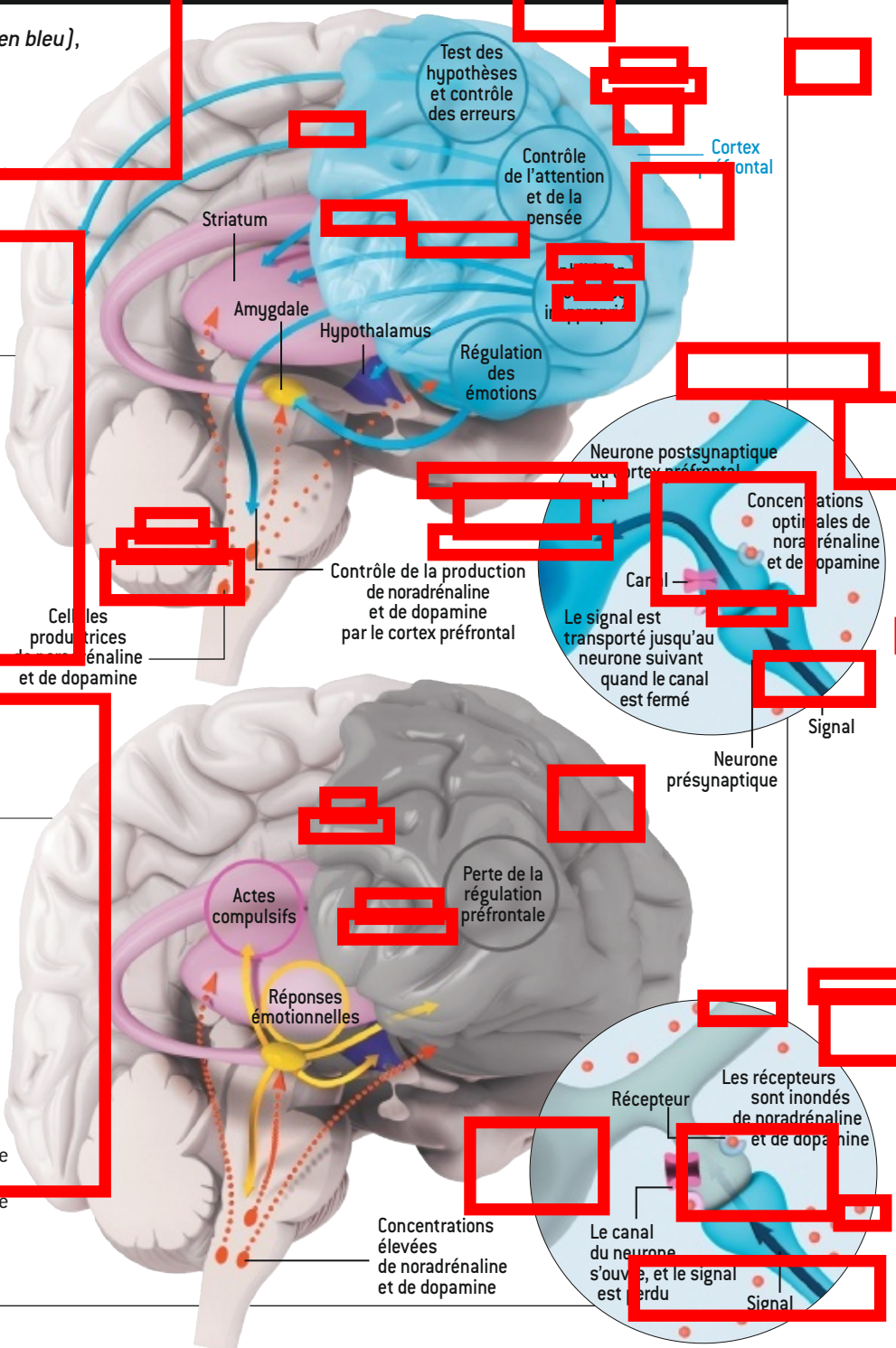
La région située juste derrière le front *(en bleu)*, nommée cortex préfrontal, est le centre de commande du cerveau. C'est elle qui inhibe les pulsions inappropriées. Cependant, des stress aigus quotidiens affaiblissent temporairement le contrôle de soi. Les émotions et l'impulsivité peuvent alors prendre le dessus.

Non stressé

Le cortex préfrontal régule l'activité de zones situées dans les profondeurs du cerveau : le striatum, impliqué dans les habitudes, l'hypothalamus, siège des besoins fondamentaux telles la faim ou l'activité sexuelle, et l'amygdale, où naissent les émotions, par exemple la peur. Le cortex préfrontal régule aussi la réponse au stress, notamment la production de deux neurotransmetteurs (la noradrénaline et la dopamine) par les neurones du tronc cérébral. En quantité modérée, ces deux neurotransmetteurs renforcent les connexions avec le cortex préfrontal *(voir le cartouche)*.

Stressé

Dans des conditions stressantes, l'amygdale renforce la production de noradrénaline et de dopamine, ce qui affaiblit le cortex préfrontal, mais augmente l'activité du striatum et de l'amygdale. L'excès de ces substances entraîne l'ouverture de canaux ioniques dans les neurones du cortex préfrontal. Or un influx nerveux se caractérise par la propagation d'un potentiel membranaire, résultant de déséquilibres de charges entre l'intérieur et l'extérieur du neurone. En réduisant les concentrations ioniques de part et d'autre de la membrane neuronale, l'ouverture des canaux portés par les neurones postsynaptiques entraîne la perte du signal. Dès lors, le cortex préfrontal ne contrôle plus les émotions et les pulsions *(voir le cartouche)*.



AXS Biomedical Animation Studio, source : A. Arnsten, Nature Reviews Neuroscience, 2009

© Pour la Science - n° 418 - Août 2012

Comment décider en cas de stress ?

Le cortex préfrontal joue un rôle central dans la prise de décision. Quelles sont les conséquences de son « extinction » par un stress aigu ou chronique ?

Certains modèles montrent que nos décisions résultent de l'activation conjointe de processus stratégiques ou rationnels et de processus intuitifs ou émotionnels. L'imagerie fonctionnelle a révélé qu'un vaste réseau neuronal, essentiellement situé dans le cortex préfrontal, sous-tend les premiers, tandis que les seconds ont pour support un réseau cérébral plus profond. Ce dernier comprend des régions du système limbique (amygdale, hypothalamus…) et des ganglions de la base.

Quand l'activité du cortex préfrontal diminue sous l'effet du stress, les décisions viennent principalement dictées par nos émotions. Elles risquent alors d'être inadéquates, se fondant sur des routines, une vision simpliste ou manichéenne des enjeux, un comportement de groupe, des réponses réotypées… Le fonctionnement est qualifié de mode mental automatique.

L'absence de réponse efficace accentue le ressenti de stress, créant des tensions psychologiques et physiques, ainsi que des troubles somatiques (tachycardie, essoufflement, diarrhée…). Afin de gérer son stress, on doit basculer du mode mental automatique vers un « mode mental adaptatif » supporté principalement par le cortex préfrontal : c'est le but des exercices de gestion des modes mentaux développés par l'institut de médecine environnementale (IME), à Paris.

Inspirés à la fois de la neuropsychologie cognitive et comportementales, ces exercices permettent de s'affranchir des pensées irrationnelles et des biais cognitifs dus au stress, en mobilisant des facultés régies par le cortex préfrontal : flexibilité, prise de recul, réflexion… On demande par exemple au sujet de répertorier les avantages et les inconvénients d'une situation donnée, de changer de point de vue, de confronter ses exigences avec les moyens dont il dispose, etc.

La mobilisation volontaire des facultés cognitives élevées « rallume » le cortex préfrontal, et réactive ainsi la régulation des émotions et l'inhibition des actions inappropriées. En conséquence, le stress ressenti devient moins intense. Le sujet peut pratiquer ces exercices « au repos », afin de développer des réponses automatiques adaptées, ou lors d'une situation stressante, par exemple avant un discours ou un entretien d'embauche.

Riadh Lebib
Institut de médecine environnementale (IME)

■ BIBLIOGRAPHIE

Vaincre son anxiété, *L'Essentiel Cerveau & Psycho*, mai-juillet 2012.

A. Arnsten, **Prefrontal cortical network connections : key site of vulnerability in stress and schizophrenia,** *Journal of Developmental Neuroscience*, vol. 29, pp. 215-223, 2011.

A. Arnsten, **Stress signalling pathways that impair prefrontal cortex structure and function,** *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 10, pp. 410-422, 2009.

S. Halpern, **Can't Remember What I Forgot : Your Memory, Your Mind, Your Future,** Three Rivers Press, 2009.

équipes ont tout de même réussi à simuler les effets d'un stress non contrôlé en projetant des films perturbants aux sujets, ou en leur demandant d'imaginer brièvement des situations stressantes.

Une autre question intrigue les chercheurs : pourquoi le cerveau est-il doté de mécanismes affaiblissant ses fonctions cognitives les plus élevées ? C'est que ces mécanismes, qui déclenchent des réactions ancestrales, seraient salvateurs face à un prédateur. Il est alors bien plus utile de se figer pour ne pas se faire remarquer ou de se préparer à fuir à toute vitesse que de se souvenir d'un poème de Victor Hugo !

Une telle réaction est parfois également utile dans le monde moderne – par exemple quand un chauffard vous coupe la route et que vous devez freiner brutalement. Toutefois, si l'état de stress persiste, les fonctions du cortex préfrontal s'affaiblissent durablement. Ce sera handicapant, par exemple pour prendre une décision compliquée ou organiser rapidement un projet important.

Une meilleure compréhension du stress permet de concevoir des stratégies de défense. La connaissance des événements moléculaires qui provoquent le passage du cerveau d'un état « réfléchi » à un état « réflexe » pourrait conduire à de meilleurs traitements des troubles liés au stress.

Les résultats théoriques obtenus précisent ce que l'on savait déjà. L'entraînement des infirmiers urgentistes ou des militaires inscrit des réactions de survie dans les ganglions de la base et d'autres structures cérébrales, de sorte qu'elles s'exécutent de façon automatique en cas de stress. L'utilité d'un entraînement est confirmé par les études sur des animaux : ceux-ci gèrent mieux le stress s'ils y ont été confrontés à de multiples occasions quand ils étaient jeunes et s'ils ont bien réagi. De même chez l'homme, une bonne gestion de situations stressantes rend de plus en plus résistant. En revanche, si des enfants sont soumis à des situations stressantes et qu'ils en sont affectés, ils risquent de devenir plus vulnérables au stress et à la dépression en grandissant.

Des médicaments et des thérapies comportementales

De nouveaux traitements sont en cours d'élaboration. La prazosine, un médicament qui bloque certains effets néfastes de la noradrénaline, est actuellement testée chez des anciens combattants et des civils souffrant de stress post-traumatique. La prazosine semble aussi réduire la dépendance à l'alcool. Fin 2011, Sherry McKee, de l'Université Yale, et ses collègues ont publié une étude sur les effets d'un autre médicament, nommé guanfacine et utilisé aujourd'hui pour faire baisser la pression artérielle. Il inhibe certaines réactions au stress et renforce les réseaux du cortex préfrontal, ce qui diminue l'envie de fumer lors d'une exposition au stress. En outre, de nombreuses équipes ont montré que des stratégies comportementales telles que la relaxation, la respiration profonde et la méditation réduisent le stress.

Apprendre les mécanismes et le rôle du stress vous aidera peut-être à le maîtriser. Ainsi, la prochaine fois que vous perdrez vos moyens en passant un examen ou en parlant en public, vous pourrez vous dire : « Ce n'est que mon cerveau qui essaie de me sauver d'un prédateur. » À défaut de vous apporter la réponse ou le mot juste, cela vous fera sans doute sourire, ce qui aura un effet positif sur vous, mais aussi sur l'examinateur et le public. ■

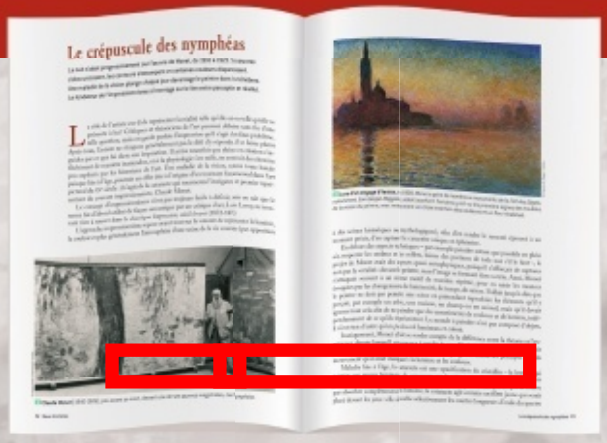
© Pour la Science - n° 418 - Août 2012

Maux d'artistes

par Sebastian Dieguez

Ce livre est un recueil d'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 dont celles de Dostoïevski, Maupassant, Monet, Ravel, De Chiricho, Proust, Van Gogh, etc.

176 pages • 25 euros • ISBN 978-2-8424-5101-1

Disponible en librairie et sur www.cerveauetpsycho.fr

La sélection de livres POUR LA SCIENCE

Cet été prenez le temps.
Notamment le temps de lire.
Ces ouvrages vous feront
voyager... dans le temps,
et découvrir des époques,
des histoires,
des personnages,
des jeux mathématiques
et des questions
de logique qui vous
raviront.

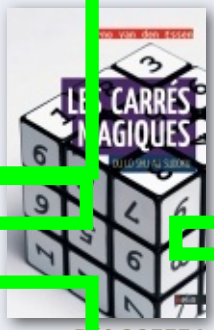
La logique
Un aiguillon pour la pensée
Jean-Paul Delahaye

Nouveauté

La logique a connu d'incroyables progrès depuis deux siècles : l'infinie variété des infinis, les étranges hyperensembles, l'indécidabilité de Turing, les déconcertants paradoxes probabilistes... Cet ouvrage sur la logique moderne des sciences interessera autant mathématiciens que philosophes et curieux, intrigués par le monde abstrait des raisonnements !

Éditions Belin/Pour la Science 2012
200 pages – 27 euros – ISBN 978-2-8424-5115-8
Réf. 025115

Les carrés magiques
Du Lo Shu au Sudoku
Arno Van den Essen



Si les carrés magiques ont conquis la planète sous la forme moderne du sudoku, leur histoire commence il y a plus de 5000 ans, avec le premier carré 3 × 3 du Lo Shu ! Accessible sans connaissances mathématiques particulières, cet ouvrage illustre la richesse et la modernité des carrés magiques.

Éditions Belin/Pour la Science 2011
224 pages – 19,30 euros – ISBN 978-2-7011-5554-8
Réf. 005554

La formule secrète
Ou le duel mathématique qui enflamma l'Italie de la Renaissance
Fabio Toscano

Au XVIe siècle, les mathématiciens italiens s'affrontent en duels publics pour résoudre des problèmes difficiles. Suivant cette tradition, Tartaglia et Cardan sont les acteurs d'une polémique féroce qui aboutit à l'une des découvertes les plus importantes de l'algèbre.

Éditions Belin/Pour la Science 2011
184 pages – 19,30 euros – ISBN 978-2-7011-5694-1
Réf. 005694

En partenariat
avec les éditeurs

Belin ÉDITEUR INDÉPENDANT DEPUIS 177
Le Pommier

Tous ces livres sont
également disponibles
en librairie.

Les mathématiciens
Collectif, nouvelle édition

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

Réf. 075109
Éditions Belin/Pour la Science 2010
280 pages – 24,35 euros – ISBN 978-2-8424-5109-7

Galois, le mathématicien maudit
Norbert Verdier

La vie et l'œuvre d'un mathématicien hors norme. La nuit précédant le duel auquel il sera contraint pour sa belle et où il sera tué, il rédige son grand mémoire aux idées encore fécondes aujourd'hui. Le lecteur suivra ce génie tourmenté dans les méandres de l'histoire.

Réf. 075112
Éditions Belin/Pour la Science 2011
144 pages – 18,25 euros – ISBN 978-2-8424-5112-7

Histoires de géomètres… et de géométrie

Jean-Louis Brahem

L'arpenteur babylonien mesure les parcelles agricoles, le jardinier d'Ératosthène donne de la grâce au jardin de son maître, le maçon picard voyage dans la France gothique et Léonard de Vinci nous explique comment tromper l'œil. Tous mettent en scène des pratiques vivantes de la géométrie.

Réf. 0905[illegible]*

Éditions Le Pommier 2011

288 pages – 27 euros – ISBN 978-2-7465-0585-8

Au nom de l'infini

Jean-Michel Kantor, Loren Graham

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

Réf. 075107

Éditions Belin/Pour la Science 2011

288 pages – 24,35 euros – ISBN 978-2-8424-5107-3

Mathématiques pour le plaisir

Jean-Paul Delahaye

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

Réf. 075104

Éditions Belin/Pour la Science 2010

208 pages – 24,40 euros – ISBN 978-2-8424-5104-2

Les déchiffreurs

Jean-François Dars, Annick Lesne et Anne Papillault

Qui sont les mathématiciens ? Comment travaillent-ils ? Qu'est-ce que l'intuition ? Autant de réponses et de questions dans cet ouvrage, où une cinquantaine de chercheurs, professeurs mondialement reconnus, médailles Fields ou jeunes thésards, proposent leur vision des mathématiques.

Réf. 004737

Éditions Belin 2008

208 pages – 20,30 euros – ISBN 978-2-7011-4737-6

Pour commander ces ouvrages

renvoyez le bon de commande ci-dessous

ou connectez-vous sur www.pourlascience.fr/librairie

(sauf références signalées par un * sur www.editions-belin.fr)

LA SÉLECTION POUR LA SCIENCE C'EST AUSSI…

Au pays des paradoxes

Jean-Paul Delahaye

Éditions Belin/Pour la Science 2008

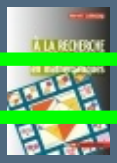
192 pages – 24,35 euros

ISBN 978-2-8424-[illegible]

Réf. 075090

À la recherche de la preuve en mathématiques

Hervé Lehning



Éditions Belin/Pour la Science 2009

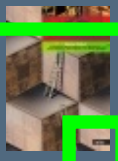
128 pages – 18,80 euros

ISBN 978-2-8424-[illegible]

Réf. 075098

Histoire d'algorithmes

Jean-Luc Chabert



Éditions Belin 2010

592 pages – 36,55 euros

ISBN 978-2-7011-5518-0

Réf. 005518

BON DE COMMANDE

POUR LA SCIENCE

à retourner accompagné de votre règlement à : Groupe Pour la Science • 628 avenue du Grain d'Or 41350 Vineuil • Tél. : 0 805 655 255 • e-mail : pourlascience@daudin.fr

❑ **Oui, je commande les livres présentés dans la sélection de *Pour la Science*.** Je reporte les titres, prix et références à 6 chiffres correspondant aux ouvrages choisis :

Titre	Réf.	Prix
		€
		€
		€
		€
		€
Frais de port (4,90 € France – 12 € étranger)		+ €
Total à régler		= €

Indiquez mes coordonnées :

Nom :

Prénom :

Adresse :

C.P. :

Pays : Tél.* : *facultatif

E-mail : @

*pour recevoir la newsletter Pour la Science (à remplir en majuscules).

Je choisis mon mode de règlement :

❑ par chèque à l'ordre de *Pour la Science*

❑ par carte bancaire

Numéro

Date d'expiration

Cryptogramme

Signature obligatoire

DPL418

Belin ÉDITEUR INDÉPENDANT DEPUIS 1777 — Le Pommier

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

HISTOIRE DES SCIENCES

Charles Knight, voyageur temporel

Au tournant du XX^e siècle, Charles Knight, un artiste naturaliste américain hanté par l'extinction des espèces, a immortalisé les derniers représentants d'espèces menacées et mis en scène des animaux disparus.

Richard MILNER

Peut-être ne connaissez-vous pas son nom, mais vous avez probablement déjà admiré son œuvre. L'artiste américain Charles Knight (1874-1953) a réalisé de nombreuses peintures et sculptures de dinosaures, mammouths, tigres à dents de sabre et hommes préhistoriques, qui ornent aujourd'hui les grands musées d'histoire naturelle américains. Ses dinosaures sont devenus des jouets, des timbres, des bandes dessinées ou ont illustré des revues scientifiques et des ouvrages de paléontologie. Sir Arthur Conan Doyle s'en est servi pour illustrer son roman *Le Monde perdu*, paru en 1912. Certains dinosaures de Knight sont même devenus des stars de cinéma en inspirant des séquences de films célèbres : *King Kong* (1933), *Fantasia* des studios Disney (1940) ou *Jurassic Park* de Steven Spielberg (1993). Ray Harryhausen, maître de l'animation des monstres à Hollywood, créateur des dinosaures du film *Un million d'années avant Jésus-Christ* (1966) et d'autres films cultes, a réalisé ses maquettes animées d'après les peintures et sculptures de Knight.

Si Knight est réputé pour ses descriptions d'espèces éteintes, il était avant tout

© Bibliothèque du Muséum d'histoire naturelle américain

1. UN TIGRE À DENTS DE SABRE défend sa proie contre un *Teratornis* – un vautour préhistorique géant – dans un puits de goudron de La Brea, aujourd'hui au cœur de Los Angeles, sur une peinture de Charles Knight datant des années 1920. Les puits de La Brea, qui existent depuis des dizaines de milliers d'années, recèlent de nombreux fossiles, dont ceux des animaux mis en scène par Knight.

© Pour la Science - n° 418 - Août 2012

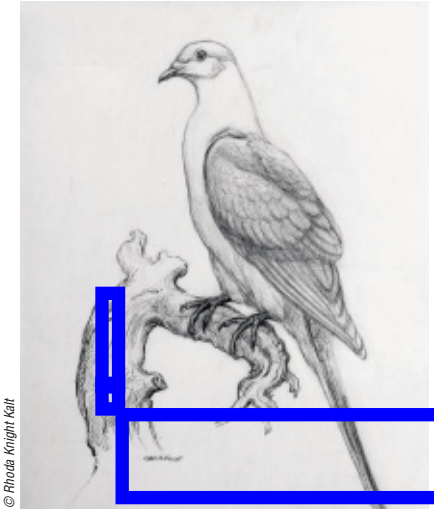
un peintre animalier : il a peint près d'un millier d'animaux vivants représentant 800 espèces. Ses reconstitutions préhistoriques ont bénéficié de nombreuses années d'observations minutieuses et d'études anatomiques détaillées des espèces actuelles. Ses peintures de lions, tigres, léopards des neiges et chats domestiques lui ont permis d'affiner sa représentation du tigre à dents de sabre, grondant et luttant à mort contre un vautour géant ressemblant à un condor, dans un puits de goudron de La Brea, aux États-Unis *(voir la figure 1)*. Ses croquis d'éléphants de zoo l'ont également aidé à donner vie à des mammouths laineux marchant dans un paysage neigeux de la période glaciaire, en France.

Le dernier pigeon migrateur

Au cours de mes recherches sur Knight, une note du centre jusque-là passée inaperçue a retenu mon attention. Après plusieurs décennies passées à étudier des os fossiles avec le paléontologue Henry Fairfield Osborn, son mentor scientifique au Muséum d'histoire naturelle de New York, Knight avait été

© Bibliothèque du Muséum d'histoire naturelle américain

2. UN LÉOPARD DES NEIGES, sur un croquis récemment découvert, réalisé par Knight en 1904.



© Rhoda Knight Kait

3. LE DERNIER PIGEON MIGRATEUR américain, dont Knight vint faire une esquisse au zoo de Cincinnati pour l'immortaliser.

4. KNIGHT EST PLUS CONNU pour ses œuvres pionnières en art paléontologique, tel ce modèle de stégosaure, réalisé en 1899.

■ L'AUTEUR

Richard MILNER est chercheur associé au Département d'anthropologie du Muséum d'histoire naturelle de New York, aux États-Unis.

marqué par l'irrévocabilité de l'extinction des animaux. Il était devenu hanté par le fait que nombre d'espèces étaient condamnées et que les humains accéléraient le processus, au point qu'il consacra le reste de sa vie à représenter non seulement les espèces disparues, mais aussi celles en passe de s'éteindre.

Le bison américain, autrefois si abondant, avait échappé de peu à l'extermination. Tardivement, en 1901, le gouvernement américain l'avait érigé en icône en reproduisant les dessins du bison de Knight sur un timbre-poste et sur un billet de dix dollars. Knight se mit à considérer chaque espèce vivante comme un trésor irremplaçable. Quand certaines devenaient très rares, tel le dernier pigeon migrateur américain (*Ectopistes migratorius*) qui mourut en 1914 dans le zoo de Cincinnati (*voir la figure 3*), il s'empressait de les peindre ou de les esquisser. Son empathie pour le règne animal avait quand même une limite : dans son ouvrage *Life through the Ages* (La vie à travers les âges, 1946), il écrivait que les dinosaures (un groupe qui inclut les tyrannosaures) « ont disparu depuis longtemps, ce qui n'était peut-être pas plus mal, car ainsi plus jamais une espèce aussi sinistre ne marcherait à la surface de cette Terre ».

Son intérêt pour les animaux s'était développé lorsque, au début des années 1890, il avait quitté son Brooklyn natal, où il peignait

Sauvegarder la nature : une idée dans l'air du temps à New York

Retracer la carrière d'un homme revient souvent à souligner ses traits de caractère ou ses talents, à évoquer ses rencontres ou à insister sur sa formation intellectuelle et artistique. Dans le cas de Knight, l'un des déterminants les plus importants pour comprendre sa vie est son lieu de naissance, New York. Cette ville devient à la fin du XIXe siècle la capitale de la protection d'une faune sauvage qui n'existe plus dans la région depuis longtemps. Durant la jeunesse de Knight, New York connaît une rapide croissance démographique : la population est presque multipliée par quatre entre 1870 et 1900 pour atteindre 3,4 millions d'habitants (bien plus peuplée que Berlin ou Paris, elle dépasse Londres seulement dans les années 1920).

Quelques dates sont nécessaires pour mieux comprendre le dynamisme intellectuel du mouvement newyorkais en faveur de la sauvegarde de la nature. L'anthropologue et naturaliste George Bird Grinnell étudie l'impact du braconnage dans le parc du Yellowstone avant de devenir, en 1876, directeur de *Forest and Stream*, l'un des périodiques des États-Unis, qu'il oriente de plus en plus vers ces questions. En 1886, Grinnell forme une éphémère société *Audubon* dédiée à la protection des oiseaux, qui compte près de 50 000 membres un an après sa création. En 1887, Theodore Roosevelt lance le *Boone and Crocket Club*, dont l'objectif est de réformer la chasse afin d'en limiter les excès. Sa carrière politique new-yorkaise commence en 1898 lorsqu'il est nommé gouverneur de la ville, puis vice-président du pays deux ans plus tard avant de devenir le 26e président des États-Unis en 1901. Grinnell, Roosevelt et d'autres défenseurs de l'environnement contemporains tels les naturalistes John Muir et John Burroughs lu dans leur jeunesse l'ouvrage *Man and Nature* (1864) de George Perkins Marsh, première analyse de l'impact de l'homme sur son environnement, et tous voient changer les paysages et la faune de l'Amérique du Nord.

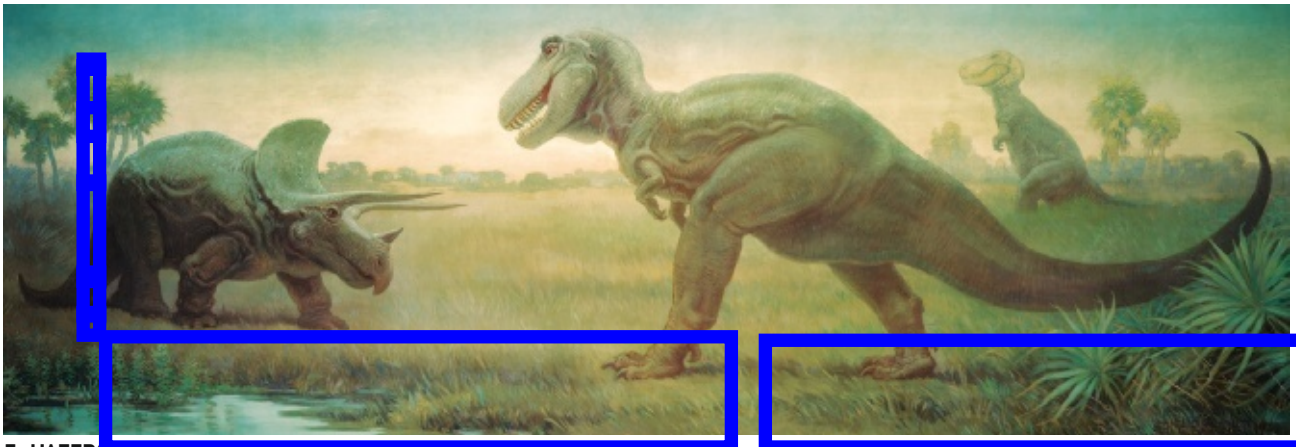
En 1891, diverses personnalités dont Henry Fairfield Osborn, le mentor de Knight, Roosevelt et Grinnell, créent la Société zoologique de New York, dont l'un des principaux objectifs est d'assurer la sauvegarde de la [illegible] ans plus tard, cette organisation se dote d'un jardin zoologique de plus de 100 hectares dans le Bronx. Le père de Knight est le secrétaire particulier d'un riche financier, Morgan, qui se trouve être l'oncle d'Osborn et le trésorier du Muséum de la ville. Osborn devient au début du XXe siècle, la figure de proue de la paléontologie américaine : en 1891, il est professeur à l'Université Columbia et conservateur de la paléontologie des vertébrés au Muséum d'histoire naturelle américain, deux établissements prestigieux de New York. Ainsi, lorsque Knight atteint ses 20 ans, en 1894, tout est en place [illegible] tion de la disparition des espèces un enjeu de premier plan et il se trouve au bon endroit et au bon moment.

Osborn a souvent inscrit son travail sur les mammifères disparus [illegible] du Nord (et notamment sur les proboscidiens tels le mastodonte ou le mammouth) dans la perspective historique de l'impact de l'homme sur son environnement. Pour lui comme pour bien d'autres naturalistes de son temps, l'homme a une part de responsabilité dans la disparition de certaines espèces de grands mammifères, et constitue un phénomène [illegible] titre que la dernière glaciation. Mais ce n'est pas parce que l'impact de l'homme sur les extinctions d'espèces est ancien qu'il doit être ignoré au XXe siècle, bien au contraire. C'est le sens du discours que Osborn prononce au *Boone and Crockett Club* en 1904 sur la « préservation des animaux sauvages d'Amérique du Nord » : pour lui, nos connaissances scientifiques nous donnent une [illegible] portante que celle de nos ancêtres qui ne pouvaient comprendre la conséquence de leurs actes.

Cette inscription dans la durée (l'étude du passé permet de mieux vivre le présent afin de ménager l'avenir) est le propre de nombreux défenseurs de l'environnement. C'est aussi le propre de la biologie qui, avec Darwin, considère le monde naturel comme un système complexe en perpétuelles transformations : l'évolution d'une espèce (l'homme, par exemple) peut avoir des conséquences en cascade sur nombre d'autres espèces. Les reconstructions d'animaux disparus et les illustrations d'espèces sur le point de s'éteindre [illegible] crivent dans ce cinéma intellectuel, scientifique et culturel propre au New York de cette époque.

Valérie Chansigaud
Historienne de l'environnement associée au Laboratoire SPHERE, UMR 7219 CNRS/Paris 7

© Pour la Science - n° 418 - Août 2012



Avec l'aimable autorisation du Field Museum, CK 9T

5. L'AFFR[illegible] *tops*, une peinture murale réalisée par Knight en 1927. S'appuyant sur ses connaissances en anatomie et sur ses études des attitudes des animaux vivants, Knight donnait un rendu précis et détaillé des animaux disparus. Auparavant, la scène serait représentée différemment (des lits d'ossements découverts depuis suggèrent que les dinosaures à cornes vivaient en troupeaux). Pourtant, Knight continue d'inspirer les paléo-artistes.

déjà régulièrement des scènes de nature pour décorer des églises, et s'était installé à Manhattan. Arpentant les zoos et les parcs, disséquant des carcasses, passant des journées entières au Muséum américain d'histoire naturelle, il s'était plongé dans le dessin méticuleux des animaux et des plantes et avait commencé une carrière d'illustrateur d'ouvrages d'histoire naturelle.

Des reconstitutions pour le Muséum

C'est au Muséum que Knight avait commencé à s'intéresser aux espèces éteintes ou menacées. D'abord, un paléontologiste lui avait demandé de créer une réplique d'un mammifère éteint. Puis, après un voyage en Europe et une période centrée sur les dinosaures, il avait travaillé avec Osborn. Paléontologue et directeur du Muséum, Osborn recherchait quelqu'un pour transposer ses collections d'os en représentations vivantes d'animaux dans leur milieu naturel. Knight avait ainsi mis en scène nombre d'espèces éteintes, dans des peintures qui reflétaient les idées de son mentor. Par exemple, il avait représenté un *Dryptosaurus*, un dinosaure carnivore, bondissant sur un adversaire, alors que les paléontologues restaient dubitatifs sur la capacité du théropode à sauter. On pense aujourd'hui que ces théropodes étaient en effet des chasseurs agressifs. De façon générale, Knight travaillait en collaboration étroite avec des paléontologues et son art reflète les dogmes scientifiques de son temps.

Presque aveugle pendant une grande partie de sa vie, Knight peignait à l'huile des croquis minuscules et détaillés sur des supports à quelques centimètres de ses yeux, que des assistants agrandissaient méticuleusement sur les murs du musée. C'est alors qu'il montait sur l'échafaudage pour apporter la touche finale. Quand il regardait une peinture murale achevée d'un duel de dinosaures, de paresseux et de tatous géants, elle lui paraissait complètement floue. Pourtant, il a persévéré. Il souhaitait que les gens découvrent, ne fût-ce que dans leur imagination, « le monde perdu » qu'il avait si souvent visité en pensée, et il proposa la construction d'un parc à thème rempli de statues de dinosaures grandeur nature.

Faute de sponsor, le parc ne vit le jour que dix ans après sa mort, grâce à son ami et collaborateur Louis Paul Jonas, un taxidermiste de talent et sculpteur d'animaux. Financé par la Compagnie *Sinclair Oil*, Jonas a confectionné neuf sculptures de dinosaures en fibre de verre, notamment un « brontosaure/apatosaure » de plus de 20 mètres de long pour l'Exposition universelle de 1964, à New York. Des milliers de visiteurs ont afflué pour visiter ce monde préhistorique qui, dans la continuité des peintures et sculptures de Knight, laissait entrevoir les splendeurs et la vie d'un monde disparu. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

R. Milner, **Charles R. Knight : The Artist Who Saw Through Time**, Abrams, 2012.

V. Chansigaud, **Des plumes de chapeaux à la protection de l'environnement**, *Pour la Science*, n° 388, pp. 82-86, 2010.

G. S. Paul, **The art of Charles R. Knight**, *Scientific American*, vol. 274, pp. 86-93, 1996.

LOGIQUE & CALCUL

Combiner des pertes pour gagner

L'idée que, en associant plusieurs jeux défavorables, on puisse en obtenir un favorable est choquante. Les exemples de telles situations, dont le premier est dû à l'Espagnol Juan Parrondo, sont pourtant nombreux et variés.

Jean-Paul DELAHAYE

Si un jeu de hasard n'est pas trop compliqué, vous calculez ce qu'il rapporte ou fait perdre en moyenne à chaque partie. Le jeu de roulette des casinos français est « perdant » pour les joueurs : statistiquement, plus vous y jouez, plus vous perdez de l'argent. Dans sa version la plus simple, pour chaque euro joué sur un nombre, vous perdez en moyenne 1/37e d'euro.

Autre exemple de jeu perdant : vous lancez une pièce de monnaie non truquée : si c'est PILE, vous gagnez 1 euro, si c'est FACE, vous perdez 2 euros. Comme vous gagnez une fois sur deux et perdez une fois sur deux, vous perdez en moyenne 0,50 euro par partie. On dit que l'espérance mathématique du jeu vaut – 0,50 euro par partie. Dans le cas de la roulette, elle est – 1/37e d'euro pour chaque euro joué. Si le jeu est gagnant, et c'est le cas pour les mêmes jeux vus du côté de ceux qui vous les proposent, alors l'espérance est positive : + 1/37e d'euro pour chaque euro joué dans le cas du casino et +0,50 euro par partie pour le PILE ou FACE inéquitable donné en exemple.

Rien n'interdit de jouer à deux jeux A et B en même temps ou d'alterner les deux jeux, par exemple en jouant régulièrement A, B, A, B, etc. Lorsque les jeux sont indépendants (c'est-à-dire n'influent pas l'un sur l'autre), si l'espérance de A est e, et celle de B est f, alors le jeu simultané de A et de B a une espérance f, et celle de B est f, alors le jeu simultané de A et de B a une espérance $(e+f)/2$. En jouant simultanément ou alternativement à deux jeux indépendants d'espérance négative, vous créez donc un jeu perdant : la somme de deux nombres négatifs est négative !

Vous pourriez alors vous dire que combiner deux jeux perdants donne toujours un jeu perdant. C'est faux ! C'est le paradoxe de Parrondo, le sujet de notre rubrique. Découvert en 1996 par le physicien espagnol Juan Parrondo, ce paradoxe a suscité un intérêt considérable. On a dit, mais aussi contesté, qu'il concernait l'économie, la finance, la génétique des populations, la physique quantique. Surtout, il incite à rêver : en participant astucieusement à plusieurs jeux qui vous sont tous défavorables, il suggère qu'il est possible d'en tirer un jeu favorable. Cela ressemble à de la magie !

Gagner en combinant deux jeux perdants

Plus d'une centaine d'articles scientifiques ont été publiés pour l'étudier, le généraliser ou en proposer des variantes. Chaque année, de nouveaux travaux se réfèrent à ce paradoxe, preuve que l'idée initiale du chercheur espagnol est non seulement intéressante, mais d'une grande fécondité. Pourtant, comprendre pourquoi il est possible de combiner des jeux perdants pour gagner n'est pas facile.

Bien sûr, la combinaison de deux jeux perdants que propose le paradoxe de Parrondo n'est pas un simple jeu simultané ou alterné entre jeux indépendants, car de tels jeux sont nécessairement perdants. J. Parrondo, dans la forme initiale du paradoxe, propose une combinaison plus subtile, où deux jeux très particuliers notés A et B sont mélangés.

Le jeu A consiste à lancer une pièce de monnaie légèrement truquée : PILE, qui fait gagner le joueur, tombe avec une probabilité $1/2-e$, où e est un petit nombre positif ; FACE, qui fait perdre, tombe avec la probabilité complémentaire $1/2+e$. Gagner rapporte un euro, perdre en coûte un. L'espérance d'un tel jeu est $-2e$ euros par partie ; comme elle est négative, le jeu A est perdant.

Le jeu B est un peu plus compliqué. Si le capital du joueur est un multiple de 3, il gagne un euro avec une probabilité $p_1 = 1/10 + e$ et perd un euro avec la probabilité $1-p_1$; sinon, il gagne un euro avec une probabilité $p_2 = 3/4 - e$, et perd un euro avec la probabilité $1-p_2$ *(voir l'encadré 1)*.

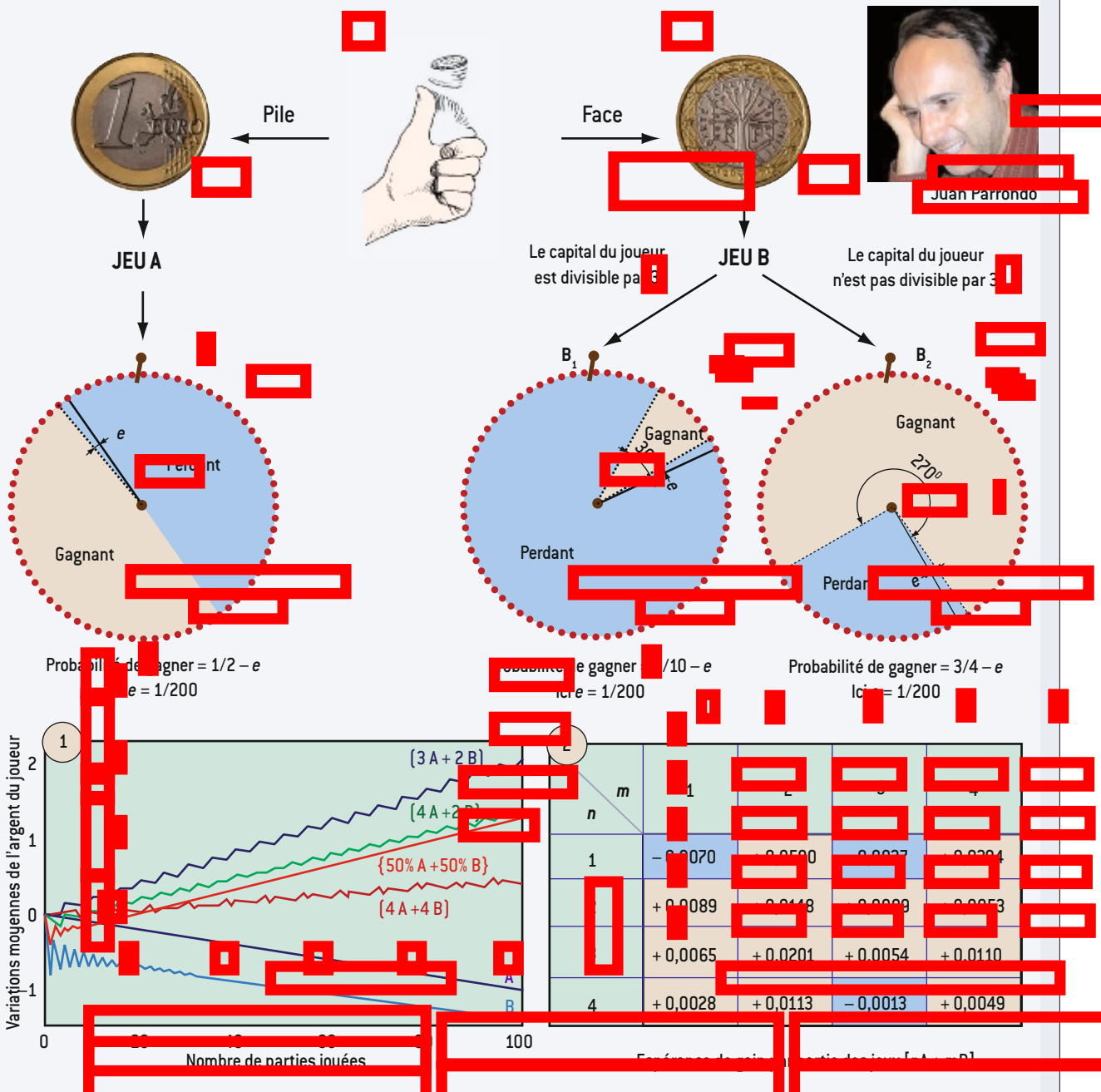
On choisit une valeur de e qui rend le second jeu défavorable. C'est le cas pour la valeur $e = 1/200$. L'espérance du jeu B est alors de $-0,007$ euro par partie. Il s'agit d'une valeur assez faible, mais, à long terme, jouer au jeu B fait perdre de l'argent *(voir le tableau 1 de l'encadré 1)*.

Il se produit alors un étonnant phénomène : une multitude de combinaisons simples de jeux A et B sont des jeux gagnants. L'expérimentation numérique montre par exemple que les trois combinaisons suivantes sont des jeux gagnants.

– Combinaison aléatoire équilibrée des jeux A et B, notée {50 % A + 50 % B} : on joue

© Pour la Science - n° 418 - Août 2012

1. Le paradoxe de Parrondo



n \ *m*	1	2	3	4
1	– 0,0070	– 0,0500	– 0,0027	– 0,0294
2	+ 0,0089	– 0,0148	– 0,0089	– 0,0053
3	+ 0,0065	+ 0,0201	+ 0,0054	+ 0,0110
4	+ 0,0028	+ 0,0113	– 0,0013	+ 0,0049

Pour $e = 1/200$, les jeux A et B du paradoxe de Parrondo sont perdants. En jouant A, on perd en moyenne 0,01 euro par partie. En jouant B, on perd en moyenne 0,0027 euro par partie. En revanche, en combinant A et B, on construit divers jeux gagnants. Ainsi, en jouant aléatoirement une fois sur deux A, et une fois sur deux B, noté {50 % A + 50 % B}, on gagne en moyenne 0,01 euro par partie.

Les combinaisons périodiques sont elles aussi gagnantes : le tableau 1 donne les gains moyens par partie pour les jeux [*n*A + *m*B] : on joue *n* fois A, puis *m* fois B, et on recommence périodiquement. Les calculs pour le tableau 1 ont été faits en évaluant la moyenne des résultats de 50 000 simulations. Pour le tableau 2, on en a utilisé 1 000 000.

N'y a-t-il pas là un miracle ? Pourrait-on battre la banque à la roulette, ou pour imaginer des stratégies boursières assurant de gagner de l'argent sur des marchés boursiers en baisse ?

© Pour la Science - n° 418 - Août 2012

2. L'explication [illegible] du

Nous allons introduire une variante du paradoxe de Parrondo qui nous donnera la clef du mécanisme à l'œuvre, bien dissimulé.

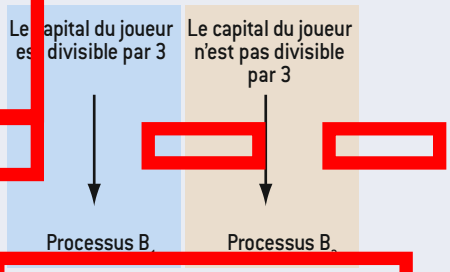
Dans le cas examiné précédemment, le jeu B est composé de deux sous-jeux B_1 et B_2. Quand $e = 1/200$, B_1 est défavorable, B_2 est favorable. Selon la valeur modulo 3 du capital du joueur, c'est B_1 ou B_2 qui est pratiqué. Le jeu que nous introduisons, B#, ressemble au jeu B à ceci près qu'au lieu de choisir selon le capital, on choisit aléatoirement entre B_1 et B_2 avec des probabilités 1/3 et 2/3 (avec une roue de loterie). L'espérance du jeu B# est la valeur moyenne des espérances de B_1 et B_2, pondérées par 1/3 et 2/3, soit :

1/3 (1/10 – e – 9/10 – e) + 2/3 (3/4 – e – 1/4 – e),

qui devient, après simplification, 1/15 – 2e.

Les valeurs de e qui rendent négative cette espérance vérifient 1/15 – 2e < 0, soit e > 1/30. Pour la valeur e = 1/200 qu'utilise J. Parrondo, le jeu B# a donc une espérance positive : c'est un jeu gagnant. Que pour e = 1/200 le jeu B soit un jeu perdant est donc étonnant. Cela provient de ce que les variations du capital du joueur ne sont pas aléatoires et font que B_1 (qui est perdant) est choisi un peu plus souvent que dans 1/3 des cas. La simulation numérique montre que B_1 est choisi dans 38,3 % des cas, ce qui [illegible] l'analyse mathématique par la théorie des chaînes de Markov [illegible] exactement 32 401/84 463 = 38,361 175 % des cas.

Cependant, ce léger glissement fortuit qui fait [illegible] jeu perdant n'a pas de raison de persister.



le jeu A ou le jeu B en choisissant au hasard à chaque fois, à pile ou face par exemple. L'espérance de ce jeu combiné est + 0,0147, ce qui signifie qu'on gagne en moyenne 1,47 centime d'euro par partie.

– Combinaison périodique « 2 fois A, puis 2 fois B, etc. », notée [2A + 2B]. On choisit de jouer deux fois de suite le jeu A, puis deux fois le jeu B, et on recommence indéfiniment selon le même schéma. L'espérance de ce jeu combiné est de + 0,0148 ; on gagne en moyenne 1,48 centime par partie.

– Combinaison périodique [A + 2B]. L'espérance est encore meilleure : + 0,058 ; on gagne en moyenne 5,8 centimes par partie.

Il est étonnant que la combinaison de deux jeux perdants soit un jeu gagnant, d'autant que certaines autres combinaisons de A et B restent perdantes. La combinaison [A + B] (jouer périodiquement A, puis B, puis A, etc.) est un jeu perdant d'espérance – 0,007 *(voir les tableaux 1 et 2 de l'encadré 1)*. Bien évidemment, si la combinaison de deux jeux perdants peut être un jeu gagnant, la combinaison de deux jeux gagnants est parfois un jeu perdant : on reprend les jeux A et B et on inverse gains et pertes !

Les résultats obtenus par simulation sont confirmés par la théorie des chaînes de Markov, théorie qui permet une étude mathématique [illegible] utilisés dans le paradoxe de Parrondo.

Ces calculs sont assez longs et ne mettent pas en lumière les causes profondes des étonnants résultats de combinaisons. La confirmation du résultat des simulations par l'étude mathématique permet cependant d'affirmer qu'au sens strict, il n'y a pas de paradoxe, mais seulement une situation contraire à notre attente intuitive.

Comment comprendre cela ? Pourquoi notre bon sens est-il piégé ? Une vision claire est-elle possible ? L'explication profonde de ce qui se passe dans le cas du paradoxe de Parrondo provient de ce que le jeu B est composé d'un jeu perdant et d'un jeu gagnant. Le jeu gagnant est battu par le jeu perdant quand on joue B seul, mais s'impose plus fréquemment quand B est mélangé à A *(voir l'encadré 2)*. Pour saisir comment deux jeux perdants peuvent engendrer un jeu gagnant et vous persuader qu'on ne doit pas s'en étonner, examinons un autre exemple, plus net, plus clair et plus spectaculaire que le paradoxe original.

Le rôle de l'interaction

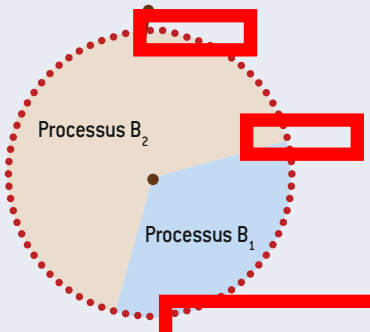
Notons d'abord le point essentiel suivant : c'est l'existence d'un paramètre commun aux deux jeux et intervenant dans les règles, la valeur du capital du joueur, qui est à l'origine du phénomène paradoxal. Pour toutes les compositions produisant le paradoxe, les deux jeux associés sont dépendants, chacun faisant évoluer le paramètre partagé. S'il n'y avait pas ce lien entre A et B qui fait que ce qui se passe avec le jeu A influe sur le jeu B, et réciproquement, alors on pourrait, comme dans le cas des jeux simultanés ou alternés, appliquer des raisonnements montrant que le résultat ne peut être qu'un jeu perdant.

On démontre en effet que les jeux combinés du type {x % A + y % B} (on joue au hasard A ou B en choisissant A avec une probabilité x et B avec la probabilité $y = 1 - x$) ou [nA + mB] (on joue n fois A, puis m fois B, et on recommence) construits avec des jeux perdants indépendants sont nécessairement perdants : l'espérance de tels jeux composés est donnée par la formule $xe + yf$ pour les jeux {x % A + y % B}, et par la formule $\frac{ne + mf}{n + m}$ pour les jeux [nA + mB], où e est l'espérance de A et f celle de B.

Sans interaction, deux jeux perdants donnent inéluctablement un jeu perdant : si vous voulez combiner des jeux perdants pour en faire des jeux gagnants, il faudra vous arranger pour que les jeux interagissent. Dans le cas de la roulette et de bien d'autres jeux, n'ayez pas trop d'espoir : pour la roulette aucune martingale ne retourne en faveur du joueur l'avantage que le casino s'attribue. En conséquence, quelle que soit la combinaison de martingales que vous

© Pour la Science - n° 418 - Août 2012

paradoxe de Parrondo



quand on combine le jeu B avec le jeu A. En effet, l'introduction du jeu A modifie le capital du joueur et, le plus souvent, la combinaison de A et de B fait que la proportion de cas où B_1 est choisi (quand on joue B) se rapproche de 1/3, faisant alors du jeu B (modifié par son association à A) un jeu gagnant. On peut même parier que plus la perturbation créée par le [illegible] complexe, plus il y aura de chances pour que la proportion de cas où B_1 sera choisi (quand B sera joué) s'approchera de 1/3.

Dans le cas précis d'un mélange aléatoire équilibré {50 % [illegible] d'utilisation de B_1 quand B est utilisé passe de 0,3836 à 0,3451 conformément à la prédiction théorique formulée plus haut [illegible] cette valeur s'approcherait de 1/3. Lorsqu'on fait un mélange {75 % A + 25 % B}, le glissement est encore plus net, puisque cette fois la proportion d'utilisation de B_1 passe à 0,3363.

Notons enfin que B# est plus fortement gagnant que A n'est perdant : pour $e = 1/200$, l'espérance de A est $-2e = -0,01$ et celle de B# est $(1/15 - 2e) = +0,0666$. En composant A et B, ce qui fera le plus [illegible] nant qu'on obtienne facilement un jeu gagnant. C'est d'ailleurs le cas pour {50 % A + 50 % B} et pour {75 % A + 25 % B}.

En deux mots : combiner A (faiblement perdant) avec [illegible] rapprocher B de B# (qui est gagnant plus fortement que A n'est perdant) et produit donc souvent et sans surprise un jeu gagnant.

pratiquerez, même en vous inspirant de la méthode de Parrondo, vous n'obtiendrez jamais une martingale gagnante.

Une variante plus spectaculaire

Une variante du paradoxe de Parrondo, due à Roland Yéléhada, et dénommée « méga-paradoxe de Parrondo », éclairera le paradoxe.

On considère deux jeux utilisant un jeton à deux faces, l'une noire, l'autre blanche ; ce jeton sera le lien entre les deux jeux.

Jeu A' : on tire à pile ou face avec une pièce non truquée. Selon que le jeton montre son côté blanc ou son côté noir, on opère différemment.

Quand le jeton montre son côté blanc :
• si on a PILE, le joueur gagne 3 euros (et ne touche pas au jeton) ;
• si on a FACE, le joueur perd 1 euro et retourne le jeton.

Quand le jeton montre son côté noir :
• si on a PILE, le joueur gagne 1 euro (et ne touche pas au jeton) ;
• si on a FACE, le joueur perd 2 euros (et ne touche pas au jeton).

Le jeu A' est perdant. En effet, même si le jeton montre au départ son côté blanc et donc que le jeu est momentanément favorable au joueur, il finira par être retourné, ce qui conduira à un jeu défavorable, dont le joueur ne sortira plus, puisque le jeton ne sera plus retourné et restera noir. L'espérance du jeu A' tendra vers – 0,5 euro par partie. La simulation numérique confirme ce résultat.

Jeu B' : on tire à pile ou face avec une pièce non truquée.

Quand le jeton montre son côté noir :
• si on a PILE, le joueur gagne 3 euros (et ne touche pas au jeton) ;
• si on a FACE, le joueur perd 1 euro, et retourne le jeton.

Quand le jeton montre son côté blanc :
• si on a PILE, le joueur gagne 1 euro (et ne touche pas au jeton) ;
• si on a FACE, le joueur perd 2 euros (et ne touche pas au jeton).

Comme le jeu A', le jeu B' (qui est le même que le jeu A' en échangeant le rôle du noir et du blanc) est perdant et son espérance est – 0,50 euro par partie *(voir l'encadré 3)*. Pourtant, toutes les combinaisons simples des jeux A' et B' donnent des jeux gagnants.

– Combinaison aléatoire équilibrée des jeux A' et B' notée {50 % A' + 50 % B'} : on joue le jeu A' ou le jeu B' en choisissant au hasard, à pile ou face par exemple, de manière équilibrée le jeu pratiqué. L'espérance de ce jeu combiné est + 0,246 (on gagne en moyenne 24,6 centimes d'euro par partie). C'est encore le cas pour d'autres compositions du même type : l'espérance du jeu {40 % A' + 60 % B'} est + 0,216 euro par partie, celle du jeu {30 % A' + 70 % B'} est + 0,130 euro par partie.

– Combinaison périodique [A' + B']. On choisit de jouer une fois le jeu A', puis une fois le jeu B', et on recommence indéfiniment selon le même schéma. L'espérance de ce jeu combiné est de + 0,50 (on gagne en moyenne 50 centimes par partie). C'est encore le cas pour d'autres compositions du même type : l'espérance du jeu [2A' + 2B'] est + 0,399 euro par partie, celle de [4A' + 3B'] est + 0,208 euro par partie.

– Combinaison alternante que l'on note {0,3 : A' ⟷ B'} : on alterne les jeux A et B en décidant de changer de jeu avec une probabilité de 0,3 d'une partie à la suivante. L'espérance de ce jeu combiné est + 0,06 euro par partie. C'est aussi le cas pour d'autres combinaisons du même type : l'espérance du jeu {0,1 : A' ⟷ B'} est + 0,16 euro par partie, celle du jeu {0,5 : A' ⟷ B'} est + 0,25 euro par partie.

Cette variante du paradoxe de Parrondo est plus spectaculaire : les espérances des jeux combinés sont supérieures, alors que les espérances des jeux de départ sont plus négatives. Partant de deux jeux qui perdent 50 centimes d'euro par partie, on arrive, par exemple avec [A + B], à un jeu qui en gagne 50, le retournement est total.

Le « truc » qui produit le prétendu paradoxe est maintenant [illegible] lyse rationnelle assez simple. Le jeu A'

comme le jeu B' sont perdants car, même si au départ on peut gagner plusieurs fois de suite, les règles font qu'on tombe rapidement dans un état défavorable qui fait inéluctablement perdre de l'argent au joueur.

Une explication simple !

Cet état défavorable est celui correspondant au côté BLANC du jeton pour le jeu A', et au côté NOIR du jeton pour le jeu B'. La combinaison des jeux A' et B' a pour effet de permettre au joueur qui joue A' de sortir de l'état de blocage BLANC qui lui est défavorable et dans lequel il reste indéfiniment coincé quand seul A' est pratiqué. Le jeu B', qui subit de même un blocage dû au côté NOIR du jeton, en sort grâce au jeu A'. En jouant un seul des jeux, A' ou B', le joueur tombe dans un piège dont il ne sort plus. En jouant alternativement l'un ou l'autre (et plus généralement en mélangeant A' et B'), chaque jeu débloque l'autre.

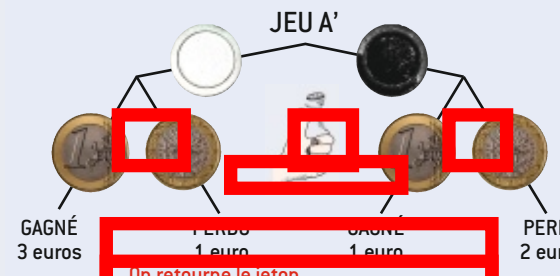
Comme on le constate en examinant les [illegible] des diverses combinaisons *(voir l'encadré 3)*, plus les basculements entre A' et B' sont rapides dans un jeu combiné, plus le jeu composé est gagnant. Inversement, si les changements de A' à B' et de B' à A' sont trop lents, la combinaison des deux jeux perdants reste un jeu perdant. C'est ainsi que :

– le jeu {5 % A+95 % B} est perdant, d'espérance – 0,45 euro par partie.

– le jeu [8A' + 8B'] est perdant, avec une espérance de – 0,13 euro par partie.

– le jeu (0,2 : A' ↔ B') est perdant, d'espérance – 0,[illegible] par partie.

3. Le mégaparadoxe de Parrondo



Les jeux A' et B' du mégaparadoxe de Parrondo (découvert par Roland Yéléhada en 2011) dépendent d'un jeton mis en commun quand on compose les jeux. Dans chaque jeu, on tire à pile ou face avec une pièce non truquée. Selon que le jeton montre son côté blanc ou son côté noir, on opère différemment.

Jeu A'. Quand le jeton est blanc, si on a PILE, le joueur gagne 3 euros, si on a FACE, le joueur perd [illegible] le cas où le jeton montre son côté noir, si on a PILE, le joueur gagne 1 euro ; si on a FACE, le joueur perd 2 euros.

Jeu B'. Quand le jeton montre son côté noir, si on a PILE, le joueur gagne 3 euros ; si on a FACE, [illegible] le jeton. Dans le cas où le jeton montre son côté blanc, si on a PILE, le joueur gagne 1 euro, si on a FACE, le joueur perd 2 euros.

Chaque jeu possède une espérance très négative de – 0,50 euro par partie, mais toutes les compositions simples associant A et B sont nettement gagnantes. C'est seulement pour les compositions [illegible] de la même stratégie sont jouées consécutivement que l'espérance est négative. Le texte de l'article donne la clef de ce comportement

	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Espérance de {*x* % A' + *y* % B'}	– 0,500	– 0,320	– 0,232	– 0,180	– 0,216	– 0,346	– 0,339	– 0,428	– 0,848	– 0,331	– 0,500

Schéma de composition {*x* % A' + *y* % B'}. On joue aléatoirement le jeu A' ou le jeu B' avec la probabilité *x* exprimée en pourcentage de choisir A' et *y* = 1 – *x* de choisir B'.

n \ m	1	2	3	4	5	6
1	0,500					
2	0,356					
3	0,199					
4	0,080					
5	– 0,007	+ 0,128	+ 0,139	+ 0,106	+ 0,063	+ 0,021
6						– 0,016

Schéma de composition : [*m* A' + *n* B'], on joue périodiquement *m* fois le jeu A', puis *n* fois le jeu B'.

x	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Espérance de (x : A' ↔ B')	– 0,500	– 0,250	– 0,070	+ 0,061	+ 0,162	+ 0,250	+ 0,318	+ 0,376	+ 0,424	+ 0,464	+ 0,500

Schéma de composition 3 : [*x* : A' ↔ B']. On joue l'un des jeux A' ou B', en changeant de l'un à l'autre avec la probabilité *x*.

© Pour la Science - n° 418 - Août 2012

La combinaison de deux jeux perdants en interaction produit quelquefois un effet de déblocage mutuel, qui est apparent avec A' et B'. Parfois, cette combinaison produit seulement une perturbation légère du comportement de l'un des jeux ; c'est ce qui se passe pour le jeu B de Parrondo quand il interagit avec A. Si cette perturbation est suffisante, on passe d'un jeu perdant à un jeu gagnant. Le cas du paradoxe de Parrondo initial est de la même nature que le cas des jeux A' et B' : l'interaction de A et B, d'une manière un peu cachée, aide le jeu B et fait de la combinaison un jeu gagnant.

On comprend qu'il n'y a là rien de miraculeux, puisque les jeux qui partagent un paramètre (la valeur du capital du joueur, la position d'un jeton, etc.) ne sont pas indépendants et que le déroulement d'un jeu peut s'y trouver profondément perturbé par l'autre. Les interactions des jeux changent parfois les dynamiques des jeux comme si un intervenant extérieur en manipulait les résultats. Que de telles manipulations fassent parfois passer d'un jeu perdant à un jeu gagnant ou l'inverse ne surprend nullement... après réflexion.

Paradoxe de Parrondo : ne pas en abuser !

Chaque fois que l'on rencontre un cas où l'interaction de deux dynamiques ou deux entités négatives en produit une positive, il est devenu courant de dire qu'il s'agit d'une « variante du paradoxe de Parrondo », et cela explique en partie le grand nombre d'articles mentionnant le paradoxe. C'est là un usage un peu excessif de l'expression, car on connaît depuis bien longtemps en physique et en mathématiques des situations où deux propriétés négatives combinées en donnent une positive.

Ce qu'on nomme *Ouzo's effect* en anglais, et qu'en français on nommerait plutôt *effet pastis* est une telle situation. L'eau n'arrête pas la lumière, le pastis pur non plus. Pourtant, une fois mélangés, on obtient un liquide opaque qui arrête la lumière. Doit-on y voir une variante du paradoxe de Parrondo ? Ce serait ridicule ! En mathématiques, la somme de deux nombres transcendants (c'est-à-dire qui ne sont pas solutions d'une équation polynomiale à coefficients entiers) est parfois un nombre algébrique (solution d'une équation polynomiale à coefficients entiers). C'est le cas pour les deux nombres π et $1 - \pi$. Doit-on y voir une variante du paradoxe de Parrondo ? Certes pas. Il sera plus sage de réserver l'expression au domaine de la théorie des jeux.

S'il ne faut sans doute pas accorder au paradoxe de Parrondo une importance excessive, notons qu'il joue un rôle très positif et parfaitement conforme aux rôles joués par les meilleurs paradoxes de l'histoire des mathématiques et de la physique. Il met le doigt sur une attente intuitive injustifiée provenant d'une analyse précipitée : ici fondée sur l'idée que les propriétés des combinaisons de jeux indépendants restent valables pour les combinaisons de jeux liés. Il permet de réfléchir aux conditions de composition qui assurent l'additivité des espérances (et donc que la composition de deux jeux perdants le sera encore), il conduit à la mise au point d'exemples simples qui, une fois assimilés, évitent de tomber dans le piège de l'oubli de la condition d'indépendance.

Dans le cas du paradoxe de Parrondo, il faut peut-être regretter que la complexité de l'exemple de départ laisse persister l'espoir chez certains qu'il se produit vraiment un phénomène général dont la clef pourrait contredire ce qu'on sait des situations les plus classiques de théorie des jeux.

La théorie du paradoxe de Parrondo n'est pas comme la théorie de la relativité ou la mécanique quantique qui ont montré que la physique classique est fausse dans certains cas. Elle ne contredit pas les résultats obtenus avant qu'on en ait eu connaissance en nous proposant une nouvelle vision de la théorie des jeux. C'est seulement une mise en garde contre une mauvaise interprétation des résultats sur la composition de jeux et la confusion entre jeux indépendants et jeux liés. Le désir de miracle est insatiable, y compris chez les plus rationnels des scientifiques. Seul un effort intellectuel déterminé et constant permet d'éviter qu'il nous conduise à l'erreur. ■

L'AUTEUR

Jean-Paul DELAHAYE est professeur à l'Université de Lille et chercheur au Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille (LIFL).

BIBLIOGRAPHIE

S. N. Ethier et J. Lee, **Parrondo Games With Spatial Dependence**, 2012. http://arxiv.org/pdf/1203.0818.pdf

D. Abbott, **Asymmetry and disorder : A decade of Parrondo's paradox**, *Fluct. Noise Lett.*, vol. 9, pp. 129-156, 2010.

S. N. Ethier et J. Lee, **Limit theorems for Parrondo's paradox**, *Electron. J. Probab.*, vol. 14, pp. 1827-1862, 2009.

Z. Mihailovic et M. Rajkovic, **Cooperative Parrondo's games on a two-dimensional lattice**, *Physica A*, vol. 365, pp. 244-252, 2006.

R. Iyengar et R. Kohli, **Why Parrondo's paradox is irrelevant for utility theory, stock buying and the emergence of life**, *Complexity*, vol. 9(1), pp. 23-27, 2004.

G. P. Harmer et D. Abbott, **A review of Parrondo's paradox**, *Fluct. Noise Lett.*, vol. 2, pp. 71-107, 2002.

G. P. Harmer et D. Abbott, **Parrondo's paradox**, *Statist. Sci.*, vol. 14, pp. 206-213, 1999.

ART & SCIENCE

Turner et le Soleil, vu de près !

Grâce à trois textures différentes, le peintre Joseph Turner a représenté un Soleil en accord avec les observations de l'astronome William Herschel.

Loïc MAGGIN

En avril 1801, à Londres, au siège de l'Académie royale des Beaux-Arts, on prépare activement une prochaine exposition. Le peintre Joseph Turner (1775-1851), membre de l'institution depuis qu'il a 15 ans, est présent et a prévu de montrer *Dutch boats in a Gale (Bateaux hollandais dans la tempête)*. À cette époque, la Société royale des sciences bruisse des commentaires faits aux exposés donnés par l'astronome William Herschel (1738-1822) sur la nature du Soleil. Or, en ce début de XIXe siècle, les deux vénérables assemblées se partagent le même bâtiment, la *Sommerset House*, et ne sont séparées que par une mince cloison. A-t-elle été suffisamment poreuse pour autoriser les échanges entre artistes et scientifiques ? C'est l'hypothèse défendue par James Hamilton, de l'Université de Birmingham, biographe du peintre. Les idées de Herschel auraient inspiré l'artiste, qui aurait fait du Soleil un objet réel plutôt qu'une simple source de lumière : *The festival of the opening of the vintage at Mâcon (Fête pour le début des vendanges dans le Mâconnais, voir page ci-contre)* serait le premier tableau où le Soleil est peint de cette façon.

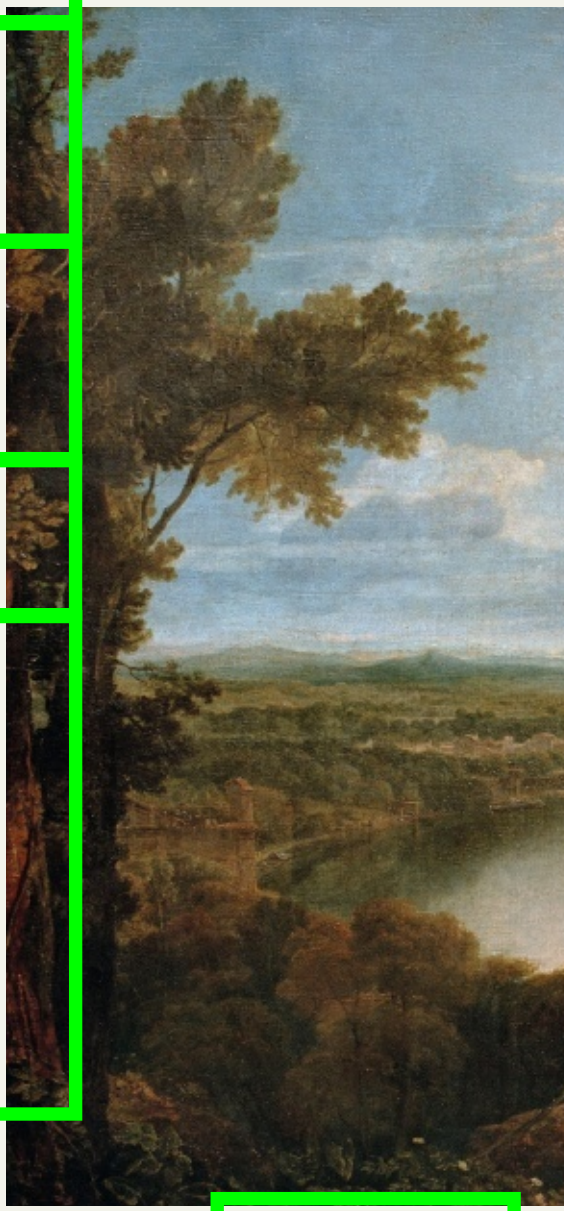
De fait, le 16 avril 1801, une conférence de Herschel est consacrée aux imperfections de la surface du Soleil et aux causes des variations de ses émissions de lumière et de chaleur. Il décrit les observations qu'il a faites grâce à des filtres (des solutions d'encre diluée) installés sur des télescopes. Selon lui, le Soleil est constitué d'un corps solide opaque entouré d'un milieu élastique transparent le séparant d'une couche lumineuse. Cette dernière est marquée de tâches, notamment découpée des ouvertures, c'est-à-dire des trouées qui donnent à voir la surface du corps solide plus sombre. La couche lumineuse est aussi parcourue « de crêtes, d'ondulations, de nodules... ».

Ces trouées sont aujourd'hui nommées taches solaires. On sait qu'elles résultent d'une baisse localisée de la température de la photosphère (la couche lumineuse externe) ce « refroidissement » s'accompagnant d'une diminution de l'émission lumineuse. L'idée de trouée est obsolète.

Étonnamment, Herschel imaginait que des habitants vivaient à la surface du cœur solide ! Encore, en étudiant les variations des taches solaires, il montra que plus elles étaient nombreuses, plus le prix du blé était élevé. C'était le premier lien établi entre l'activité solaire et le climat.

Ainsi, le Soleil cessait d'être inaccessible à l'étude et devenait un objet physique que l'on pouvait analyser et décrire. La nouvelle eut beaucoup de retentissement, même au-delà de la communauté scientifique.

Turner a peint *The festival* au retour de son périple en France et en Suisse en 1803, à un moment où les théories de Herschel étaient connues de tous. Comment s'en est-il emparé ? Un examen minutieux révèle qu'il a utilisé trois techniques différentes pour représenter le Soleil *(voir la figure page ci-contre en haut)* et lui conférer une réalité physique. Une région du disque de peinture a été tamponnée par des petits coups de pinceaux *(zone 1)* ; dans une autre, un linge fin a été appliqué *(zone 2)* ; une autre encore a été un peu plus lissée *(zone 3)*. Au total, trois textures distinctes donnent corps aux observations de Herschel et font apparaître « nodules, crêtes et ondulations ».

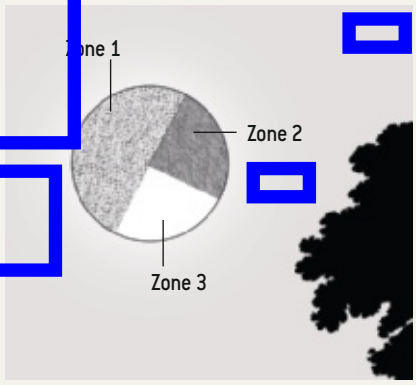


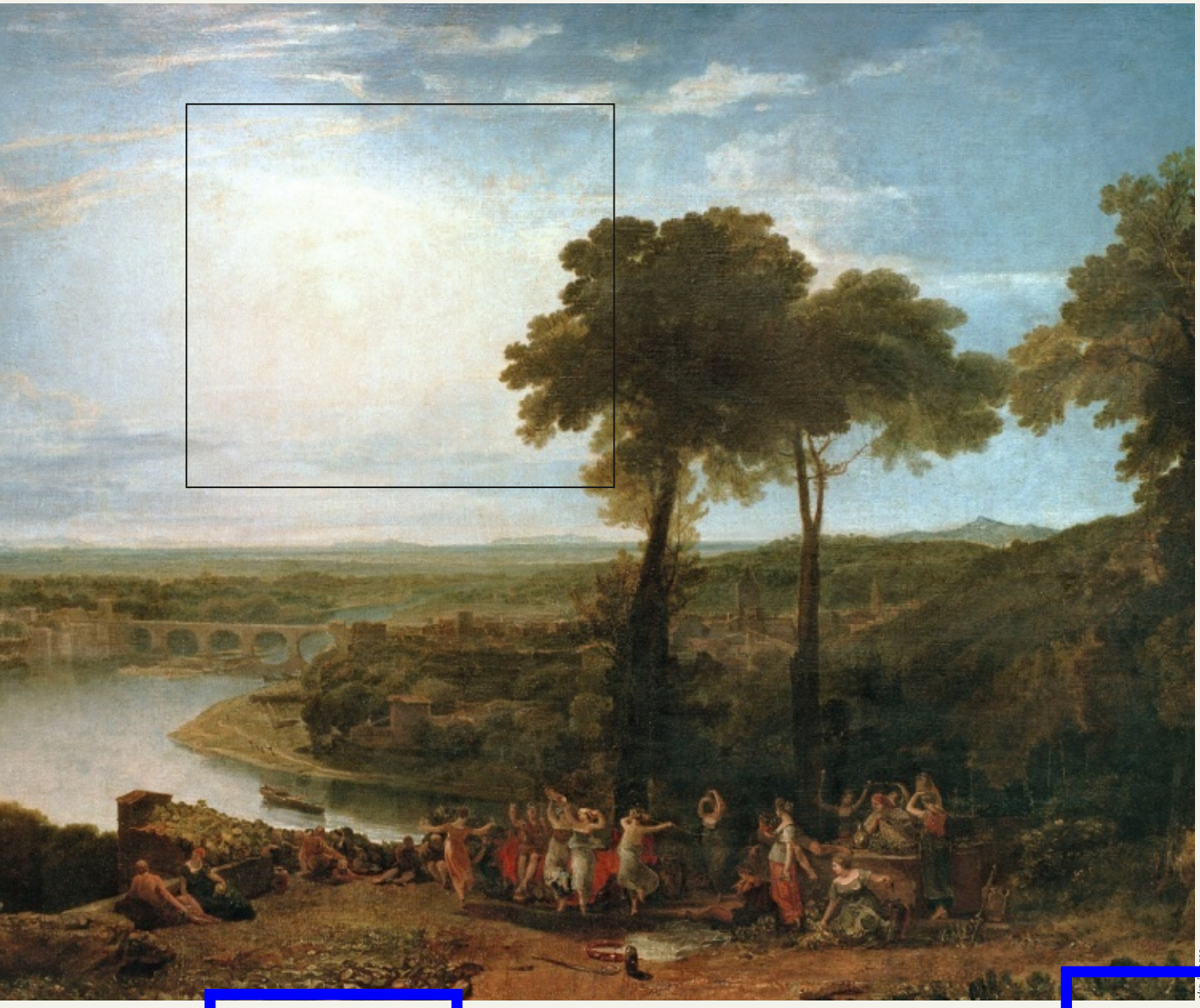
© Pour la Science - n° 418 - Août 2012

On ne dispose d'aucun témoignage d'une communication directe entre Herschel et Turner, mais on sait que le peintre connaissait plusieurs scientifiques, notamment le paléontologue Richard Owen, la mathématicienne Mary Somerville et le chimiste Humphry Davy. Même si on en ignore le truchement, on ne peut douter que Turner ait eu vent des travaux de Herschel.

Une amitié solide liait également le peintre avec le physicien Michael Faraday. Les deux hommes ont souvent discuté – et testé – les qualités des pigments et leur dégradation dans le contexte pollué du Londres des XVIIIe et XIXe siècles. Ils appréciaient aussi les couchers de soleil. Le physicien regrettait le peu d'intérêt des peintres en général pour l'étude de la lumière, mais Turner le « peintre de la lumière », n'était sans doute pas concerné par cette critique. ■

Turner and the Elements, pp. 52-64, Bucerius Kunst Forum, 2012.
La conférence d'Herschel du 16 avril 1801 en intégralité : http://tinyurl.com/d9verck





akg-images

IDÉES DE PHYSIQUE

Pourquoi le ciel n'est pas bleu

Même par temps dégagé et en l'absence de poussières, le ciel n'est pas d'un bleu uniforme. En cause : l'épaisseur d'atmosphère traversée par les rayons du Soleil.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

De quelle couleur est le ciel quand l'air est pur et sans nuages ? « Bleu », répond-on sans hésiter. Pourtant, cette couleur n'est jamais uniforme et présente de nombreuses nuances. À des bleus plus ou moins sombres – et même du bleu pâle vers l'horizon – durant la journée, succèdent des teintes orange, rose, rouge ou pourpre en début de soirée et au crépuscule.

Un unique mécanisme est à l'origine de ces colorations : la diffusion de la lumière du Soleil par les molécules de l'atmosphère. Comme nous allons le voir, les diverses nuances colorées s'expliquent par la variation, avec la position du Soleil ou la direction du regard, de l'épaisseur d'air traversée par les rayons solaires.

De jour, le ciel n'est pas sombre. Pourquoi ? Parce que chacune des molécules de l'atmosphère (diazote, dioxygène, etc.), éclairées par le Soleil, renvoie dans toutes les directions une petite quantité de la lumière incidente : c'est la diffusion Rayleigh.

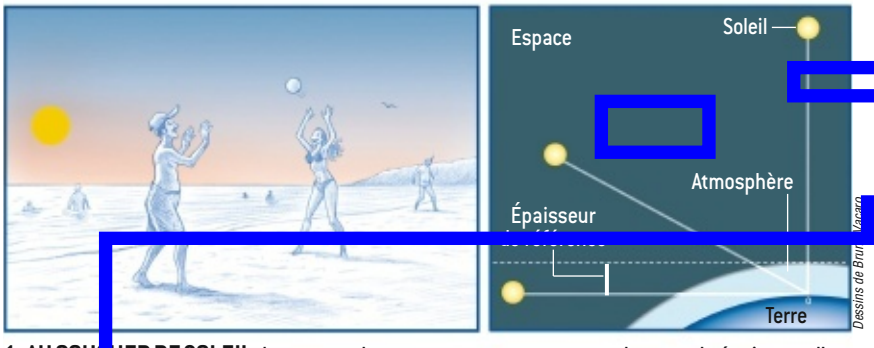
Ce phénomène porte le nom du physicien anglais qui montra en 1871 que l'intensité diffusée pour une lumière monochromatique est inversement proportionnelle à la puissance quatrième de sa longueur d'onde. Il s'ensuit que pour des intensités incidentes égales, une même molécule renvoie 4,3 fois plus le bleu (longueur d'onde vers les 450 nanomètres) que le rouge (vers 650 nanomètres).

Pourquoi le ciel est bleu... ou presque

Ainsi, éclairée par de la lumière blanche où toutes les longueurs d'onde sont présentes avec des intensités à peu près égales, comme l'est la lumière du Soleil, une molécule diffuse plus de bleu que de rouge. C'est pour cette raison qu'un ciel pur nous apparaît bleu : lorsqu'on fixe une direction donnée dans le ciel (distincte de celle du Soleil !), l'œil capte la lumière diffusée selon cette direction par l'atmosphère et qui contient bien plus de bleu que de rouge.

Toutefois, on ne voit pas un bleu uniforme sur tout le ciel. La principale raison est que l'épaisseur d'atmosphère traversée par la lumière solaire dépend de la direction observée. Lorsque nous fixons le zénith, cette épaisseur est minimale, de l'ordre de dix kilomètres. Si nous nous trouvons à la montagne ou à bord d'un avion, l'épaisseur est réduite d'une valeur égale à notre altitude. Par conséquent, le nombre de molécules d'air susceptibles de diffuser la lumière du Soleil vers notre œil diminue en proportion : l'intensité de la lumière diffusée baisse et le ciel devient plus sombre – jusqu'à devenir noir lorsque nous quittons l'atmosphère, comme l'est le ciel vu à partir de la Lune.

Revenons sur Terre et abaissons notre regard vers l'horizon : l'épaisseur d'atmosphère traversée par notre ligne de visée se met à croître *(voir la figure 1)*. Pour un angle de 10 degrés au-dessus de l'horizon, l'épaisseur traversée est double de celle au zénith, que nous prenons comme référence. Par conséquent, l'intensité de la lumière diffusée double. Si la Terre était plate, en s'approchant de l'horizon, cette épaisseur traversée tendrait vers l'infini ; mais comme notre globe est sphérique, elle demeure finie. Elle atteint 38 épaisseurs atmosphériques à l'horizon.



1. AU COUCHER DE SOLEIL, les rayons de notre astre traversent une plus grande épaisseur d'atmosphère que lorsque le Soleil est au zénith. Quand le Soleil est au niveau de l'horizon, l'épaisseur traversée est près de 40 fois celle traversée au zénith (le schéma n'est pas à l'échelle). Plus l'épaisseur d'air traversée est grande, plus la lumière incidente est diffusée. Comme les molécules de l'air diffusent davantage le bleu que le rouge, la lumière incidente dans la direction de l'horizon perd ses composantes bleues : elle apparaît donc orange.

© Pour la Science - n° 418 - Août 2012

La conséquence sur l'intensité lumineuse est immédiate : plus notre regard s'éloigne du zénith, plus le ciel est lumineux, puisque davantage de molécules diffusent la lumière. Mais ce n'est pas tout : on peut aussi constater que le ciel blanchit *(voir la figure 2)*. Pour en comprendre la raison, remarquons d'abord qu'à cause de la diffusion Rayleigh, l'intensité d'un rayon lumineux diminue à mesure qu'il se propage dans l'atmosphère, jusqu'à s'éteindre presque complètement. Comparons à présent ce qu'il advient à un rayon de lumière bleue et à un rayon de lumière rouge.

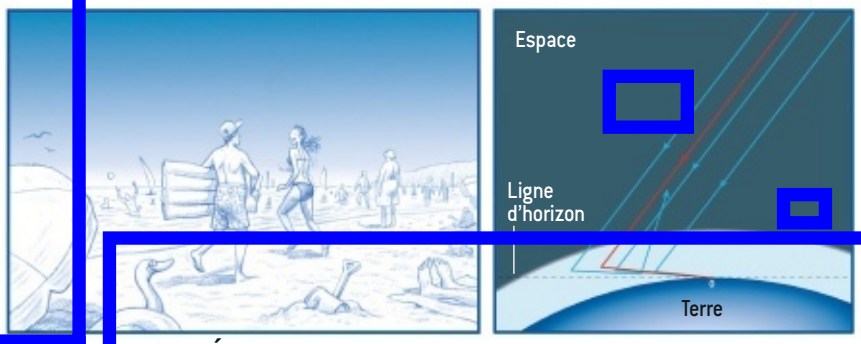
Pour de la lumière bleue, il ne reste plus que cinq pour cent de l'intensité initiale après la traversée d'environ dix épaisseurs atmosphériques. Cela signifie que si nous regardons dans une direction pour laquelle l'épaisseur traversée est supérieure (entre 0 et 5 degrés au-dessus de l'horizon), nous ne verrons pas la lumière bleue diffusée par les molécules distantes de plus de dix épaisseurs atmosphériques de nous. Il s'ensuit que l'intensité diffusée dans le bleu cesse de croître lorsqu'on abaisse le regard, et sature avant d'atteindre l'horizon.

En revanche, pour la lumière rouge, l'épaisseur d'extinction est 4,3 fois supérieure et demeure plus grande que l'épaisseur maximale d'atmosphère : la lumière diffusée dans le rouge ne sature donc pas. Par conséquent, l'horizon envoie autant de lumière bleue que de lumière rouge (cette dernière étant diffusée quatre fois moins que le bleu par chaque molécule, mais par quatre fois plus de molécules) et donc nous retrouvons de la lumière blanche. Ainsi, à mesure que notre regard s'éloigne du zénith, le bleu intense pâlit, jusqu'à devenir presque blanc à l'horizon.

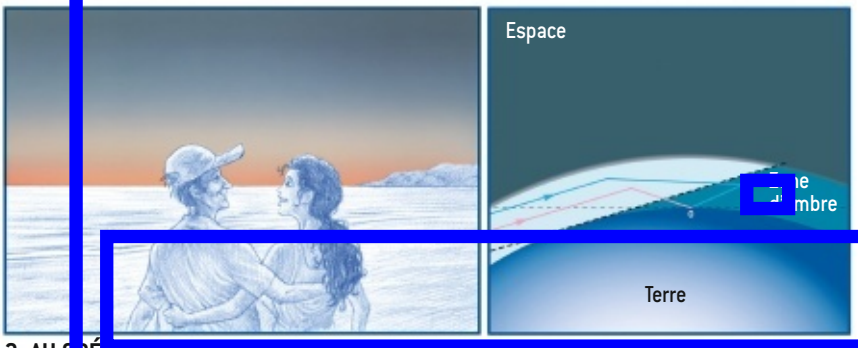
Des coloris au coucher et au crépuscule

Quand le Soleil se couche, de nouvelles couleurs apparaissent. D'une part, la couleur de notre atmosphère change : il devient rouge profond. En effet, puisque la lumière solaire incidente traverse à l'horizon près de 40 épaisseurs atmosphériques, toutes ses composantes autres que les rouges et les oranges sont diffusé. D'autre part, on remarque que même si le Soleil est passé sous l'horizon, le ciel reste lumineux, parce que la lumière solaire rasante est diffusée par l'atmosphère, que notre regard embrasse *(voir la figure 3)*. On peut constater qu'au crépuscule, la lumière solaire forme une bande jaunâtre qui embrase l'horizon de part et d'autre de l'endroit où le Soleil se couche, bande dont la luminosité diminue horizontalement à mesure que l'on s'écarte de l'endroit du coucher.

À quoi est due cette arche crépusculaire ? La lumière qui atteint l'atmosphère au-dessus de nous rougit et s'éteint au fur et à mesure que le Soleil s'abaisse vers l'horizon. Il en est de même de la lumière diffusée de l'horizon vers nous, mais, puisque les composantes de petites longueurs d'onde



2. EN PLEINE JOURNÉE, le ciel est bien bleu, mais tire vers le blanc juste au-dessus de l'horizon. Ce phénomène est dû au fait que les composantes bleues et rouges de la lumière (blanche) du Soleil qui parviennent à l'observateur depuis l'horizon s'équilibrent à peu près. Le bleu est environ quatre fois plus diffusé que le rouge par chaque molécule de l'air. Il s'ensuit que les rayons bleus devant traverser plus d'une dizaine d'épaisseurs atmosphériques pour atteindre l'observateur (tel le rayon bleu le plus à gauche dans le schéma) sont très atténués, ce qui n'est pas le cas des rayons rouges. Mais ces derniers sont moins diffusés, d'où la compensation.



3. AU CRÉPUSCULE, quand le Soleil est sous l'horizon, la lumière solaire rasante est diffusée par l'atmosphère. Le ciel garde donc une certaine luminosité, même dans la partie de l'atmosphère qui se trouve dans l'ombre. La lumière en provenance de l'horizon est rougeâtre, car l'épaisseur atmosphérique traversée est très grande. En direction du zénith, le ciel est bleu sombre.

■ **LES AUTEURS**

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris.
Leur blog : http://blog.iqbus.fr

Retrouvez les articles de J.-M. Courty et É. Kierlik sur www.pourlascience.fr

■ BIBLIOGRAPHIE

D. K. Lynch et W. Livingston, **Aurores, mirages, éclipses...**, Dunod, 2002.

restent les plus diffusées, on passe successivement par le jaune quand le Soleil est, disons, 5 degrés au-dessus de l'horizon, puis par l'orange (–5 degrés), le rouge, le rouge sombre (–10 degrés) quand il est au-dessous. Par ailleurs, puisque la lumière diffusée doit traverser de plus en plus d'atmosphère pour nous atteindre et provient de régions de plus en plus basses vers l'horizon, l'arche crépusculaire s'atténue et perd en extension à la fois verticale et horizontale.

Si cette arche nous apparaît aussi spectaculaire, c'est parce qu'elle bénéficie également d'un fort effet de contraste avec le reste du ciel : au crépuscule, lorsque nous regardons vers le zénith, nous voyons une lumière diffusée qui a traversé une épaisseur d'air bien plus faible. La teinte revient donc vers le bleu tout en s'assombrissant, car le nombre de molécules diffusantes diminue. Pour les angles de regard intermédiaires, on observe un mélange qui peut donner des pourpres magnifiques, au hasard des conditions atmosphériques. Puis, à mesure que le Soleil s'abaisse sous l'horizon, la proportion d'atmosphère située dans l'ombre de la Terre augmente.

Le ciel s'assombrit, sans toutefois être complètement noir : il n'est plus éclairé directement par le Soleil, mais indirectement, par la partie du ciel illuminée par le Soleil. Les rayons qui nous parviennent de cette région du ciel ont donc subi deux diffusions pour nous atteindre. Leur intensité est très faible ; cependant, notre œil est suffisamment sensible pour distinguer ce ciel obscur de la noirceur de la nuit à venir. ■

© Pour la Science - n° 418 - Août 2012

SCIENCE & GASTRONOMIE

Du vin avec la salade ? Hérésie !

L'astringence, plus une sensation qu'un goût, est multiple.

Hervé THIS

J.-M. Tiret

Un vin un peu jeune est astringent : il « resserre la bouche », tout comme le font certains sels de métaux, des acides et des composés déshydratants tels que les alcools. À quoi est dû cet effet ? Une expérience intéressante consiste à mettre en bouche une petite quantité d'un vin astringent, de laisser tourner dans la bouche et de la recracher : on voit apparaître des précipités. On les attribuait à la liaison des tanins du vin aux protéines salivaires, d'où l'astringence.

Hélas, cette expérience n'était pas tout et le mot « tanin » est imprécis : depuis quelques décennies, on sait que seuls certains de ces composés phénoliques se lient aux protéines. Auxquelles ? D'autres composés que les composés phénoliques se lient-ils aux protéines de la salive ? Et la liaison de composés à des protéines est-elle la seule cause de l'astringence ? C. Lee, R. Ismail et Z. Vickers, à l'Université du Minnesota, viennent de réexplorer la question (*Journal of Food Science*, vol. 77(4), pp. C381-C387, 2012).

Les analyses de l'astringence s'étaient focalisées sur les protéines salivaires PRP riches en proline (un acide aminé) et sur des composés phénoliques nommés tanins condensés. Elles n'avaient pas considéré l'effet d'autres composés sur ces PRP, et n'avaient guère examiné l'effet des divers produits astringents sur d'autres protéines salivaires.

À l'aide d'électrophorèse sur gel (sur un gel, des mélanges de protéines sont soumis à un fort champ électrique : les divers types de protéines migrent alors à des vitesses différentes selon leurs masses et charges électriques), les chimistes américains ont analysé le contenus en protéines salivaires dans les précipités formés avec les tanins, avec de l'alun (sulfate de potassium et d'aluminium) et avec de l'acide chlorhydrique.

Par ailleurs, afin de déterminer si l'astringence était associée à une lubrification réduite de la bouche, ils ont mesuré le contenu en mucine et en ADN de solutions recrachées après mise en bouche de composés astringents : les mucines sont de grosses protéines salivaires liées à des sucres, qui sont plus lubrifiantes que les PRP et qui, *in vitro*, sont précipitées par des acides et des tanins.

Dans une telle étude, l'eau distillée est de rigueur, les composés utilisés sont purs, tout est caractérisé et quantifié. Par exemple, les chimistes ont soigneusement consigné et réglementé ce que mangeaient et buvaient les acteurs des tests ; ils ont mesuré la concentration en protéines chaque fois que les dégustateurs recrachaient, en fonction des conditions des tests (le matin, le soir, après s'être rincé la bouche...) ; ils ont cherché si les solutions recrachées contenaient plus d'ADN qu'en période normale, hors sessions expérimentales, ce qui aurait indiqué une desquamation de la muqueuse orale...

Il est apparu que les tanins et l'alun précipitent plusieurs PRP, mais que l'acide est sans effet sur ces protéines. Les mucines, en revanche, étaient précipitées à la fois par l'acide et par l'alun, mais pas par les tanins... ce qui était troublant, car d'autres équipes avaient observé une précipitation : on suppose aujourd'hui soit que la composition en tanins est en cause, soit que ces tanins forment des complexes avec les protéines mais que ces complexes ne précipitent pas.

Autrement dit, la précipitation des protéines salivaires est une des composantes de l'astringence, mais la précipitation des PRP n'est pas indispensable. La perte de lubrification n'est pas toujours associée à l'astringence. D'ailleurs, les astringents les plus puissants détachaient notablement plus d'ADN que les autres composés, mais l'interaction des composés astringents et des protéines salivaires ne semble pas éliminer la couche salivaire qui est sur les tissus de la bouche.

Au total, l'astringence n'est pas une, mais multiple dans sa nature et ses sensations. Par exemple, frotter la peau d'une banane verte sur la partie interne des lèvres engendre une sensation de contraction qui n'est pas celle que l'on ressent avec les acides. Pour ces derniers, la désorganisation de la couche lubrifiante semble être en cause. Pour l'alun, des études de tissu porcin semblent montrer que l'astringence est analogue à celle conférée par les acides.

Et à table ? On dit souvent qu'il faut éviter les vins astringents avec la salade. Il est vrai que la sensation est souvent désagréable, plusieurs mécanismes d'astringence pourraient agir en synergie, une astringence due aux composés phénoliques s'ajoutant à l'astringence due aux acides de la vinaigrette. ■

Hervé This est chimiste dans le Groupe INRA de gastronomie moléculaire, professeur à AgroParisTech et directeur scientifique de Science & Culture Alimentaire de l'Académie des sciences.

.fr Retrouvez les articles de Hervé This sur www.pourlascience.fr

→ PHYSIQUE

Feynman

Jim Ottaviani et Leland Mirick
Vuibert, 2012
(272 pages, 21 euros).

Cette bande dessinée se présente comme une biographie de Richard Feynman, grand physicien américain du XXe siècle, lauréat du prix Nobel de physique en 1964 pour ses travaux en électrodynamique quantique. Elle peut donc sembler destinée aux amateurs chevronnés de physique. Le sous-titre nous met la puce à l'oreille : « Si c'est lui, l'homme le plus intelligent du monde, on est dans de beaux draps ! » L'ambition de l'ouvrage est tout autre. Par une série de tableaux suivant une progression à peu près chronologique, les auteurs explorent plusieurs facettes de ce personnage fascinant et le lecteur sera tour à tour intéressé, amusé et ému.

Certes, pour commencer, il y a Feynman le génie scientifique. De sa thèse dirigée par John Wheeler à la commission d'enquête sur l'accident de la navette spatiale *Challenger*, en passant par le projet Manhattan, l'électrodynamique quantique (et ses « crobards », que le reste de la communauté appelle encore les « diagrammes de Feynman ») et l'étude de la superfluidité de l'hélium, peu de sujets semblent avoir échappé à son intérêt et à la sagacité de Feynman. Mais c'est un récit bien plus riche qu'une simple présentation synthétique des réussites scientifiques de Feynman que les auteurs nous proposent.

Tout d'abord, l'ouvrage nous entraîne dans la vision très personnelle que Feynman avait de la science, de la manière dont elle avance, de ce que signifie « comprendre » la science. « Moi non plus je ne comprends pas. Et je n'aime pas ça. Mais c'est comme ça » s'amusait-il à dire à ses étudiants, de façon parfaitement sincère ! À plusieurs reprises au cours de sa vie, ces « je ne comprends pas », comme le « Eureka » à l'envers, des doigts pointés sur le nœud des problèmes, l'ont amené à se poser des questions nouvelles pour en trouver de réponses originales, voire révolutionnaires.

Ensuite, Feynman est bien connu des physiciens pour ses cours donnés au Caltech (Institut de technologie de Californie) et qui, en collaboration avec Matt Sands et Bob Leighton, ont produit une série d'ouvrages pédagogiques réputés et toujours appréciés. Encore une fois, cette bande dessinée nous montre le processus mental qui a conduit Feynman à accepter ce défi, ainsi que sa méthode (Feynman affichait un certain dédain pour la philosophie, mais le mot aurait été approprié ici) : distiller chaque domaine de la physique pour en extraire l'essentiel – le point où se dresse un « je ne comprends pas » – pour l'accepter, puis le dépasser et dérouler la réflexion, devant un auditoire qui ne peut qu'être entraîné et se mettre à penser. Car c'est bien de curiosité, d'ouverture et d'intelligence, autant que de physique, que nous parle cette magnifique bande dessinée.

Enfin, avec beaucoup de finesse et de pudeur, l'ouvrage nous plonge dans la découverte d'un homme complexe et attachant, drôle et sincère, même dans les épreuves les plus tragiques. À mettre entre toutes les mains !

→ Richard Taillet

LAPTh, UMR 5108, CNRS/Université de Savoie, Annecy-le-Vieux

→ SCIENCE ET SOCIÉTÉ

Les marchands de doute

Naomi Oreskes et Erik Conway
Le Pommier, 2012
(524 pages, 29 euros).

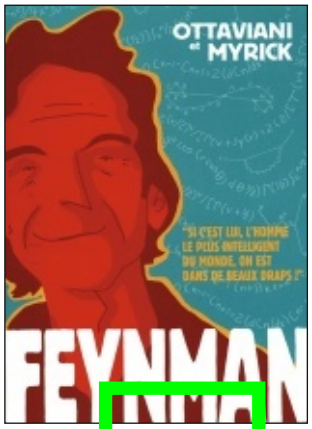
Il existe de nombreux ouvrages dénonçant les liens supposés ou réels entre l'industrie, l'État et les scientifiques, mais ce livre est bien plus que cela. À partir de l'étude d'un riche fonds d'archives, Naomi Oreskes et Erik Conway, deux historiens des sciences, dressent un passionnant historique de la trajectoire et de l'engagement de certains scientifiques aux côtés des industriels. On retrouve les mêmes hommes, au sein des mêmes organisations (des *think tanks* ou des fondations), s'exprimant dans les mêmes médias, utilisant les mêmes stratégies au service de la défense du tabac ou de l'Initiative de défense stratégique de Reagan, dans la mise en doute des pluies acides ou du réchauffement climatique. Le but est simple : produire du doute en diffusant un brouhaha d'informations contradictoires. Si cela ne suffit pas, les scientifiques, le plus souvent à la retraite et liés à la course aux armements nucléaire de la guerre froide, n'hésitent pas à truquer les données, à attaquer leurs collègues et, phase ultime, à jeter l'opprobre sur le fonctionnement même de la science.

Ce livre est d'une grande intelligence et la spécialisation des auteurs en histoire des sciences leur permet de bien faire ressortir les caractéristiques si particulières de la science : une œuvre collective fonctionnant par consensus. C'est d'ailleurs parce qu'ils connaissent parfaitement la science que les semeurs de doute font tant de dégâts. Mais ils n'auraient pas d'impact sans les médias qui, en leur attribuant des temps de parole équivalents à ceux des scientifiques, favorisent les polémiques sur des sujets qui font pourtant consensus parmi les scientifiques.

Un autre point fort de ce livre est l'analyse de l'engagement politique et idéologique de ces scientifiques alliés des industriels : c'est moins l'argent qui les a corrompus (même si d'importantes sommes circulent), qu'un véritablement engagement militant en faveur de l'ultralibéralisme et de la défense de la libre entreprise. Finalement, en s'attaquant aux environnementalistes, l'action des semeurs de doute n'a pas d'autre objectif que de masquer les conséquences environnementales d'un capitalisme sans régulation.

→ Valérie Chansigaud

Chercheuse associée à SPHERE, UMR 7219 CNRS-Paris 7



© Pour la Science - n°418 - Août 2012

→ MÉDECINE

L'homme réparé

Hervé Chneiweiss

PLON, 20[illegible]
(214 pages, 19,50 euros).

Est-il encore temps de regretter l'époque où le médecin intervenait avant tout pour aider un organisme en souffrance à puiser en lui-même les moyens de restaurer son équilibre avec le milieu ? On ne caractérise plus guère la santé comme « la capacité d'instituer de nouvelles normes biologiques » (G. Canguilhem) et de se relever ainsi de la maladie. L'OMS en donne aujourd'hui une définition à la fois plus large et moins exigeante pour l'individu : « un état de complet bien-être physique, mental et social ». Hervé Chneiweiss en tire les conséquences : nous sommes désormais portés à vouloir « mourir jeune et le plus tard possible », de sorte que la médecine régénératrice devient l'« un des piliers de notre société ». Ainsi, le vieillissement ne désigne plus que le déséquilibre de la régénération dont notre organisme est le théâtre permanent, et non plus la « fatalité de la flèche du temps ». L'espoir mis dans les cellules souches pluripotentes induites, des cellules souches produites à partir de cellules humaines adultes, est à la mesure de cette ambition d'inverser le temps biologique de nos cellules, sinon de produire l'immortalité par autogreffe.

H. Chneiweiss fait l'inventaire des prouesses biotechnologiques appliquées d'abord à la réparation des corps puis très vite à son « augmentation ». La prothèse sensorielle qui permet à l'aveugle de voir est assurément une bonne chose. L'amplificateur sensoriel qui la prolonge pour la personne valide est plus discutable. Selon lui, la médecine sort de son rôle lorsqu'on l'utilise pour améliorer les performances individuelles et elle se laisse instrumentaliser pour « biologiser » les critères d'une société productiviste : avoir une taille suffisante, exclure les comportements turbulents, être apte à la multi-activité, développer une mémoire sans faille… Notre gourmandise technologique nous porte à confondre le « plus » et le « mieux », le « bien-être » et le « bonheur ». Qui ne voit que la possibilité de ne jamais souffrir, grâce à des antidépresseurs tels la fluoxétine ou le Seropram, exposerait à l'incapacité d'aimer profondément ? Qui peut ignorer que l'augmentation des capacités de l'esprit offerte par les neurosciences limiterait l'exercice des fonctions du cerveau à celles qu'exige « l'injonction sociale permanente » à la compétitivité et à la concurrence (être toujours à la hauteur, toujours disponible au risque du stress et de l'hyperactivité…) ?

À force de rejeter le handicap, nos sociétés conspirent à produire des hommes reprogrammés comme des logiciels d'ordinateurs, voués comme tels à un individualisme égoïste, bornés à une éthique minimaliste et finalement contraints à ne plus se penser que comme « une banque d'organes ». Le livre d'H. Chneiweiss est éloquent : nous avons la victoire triompher Epiméthée, l'étourdi qui « pense après » et qui a laissé son épouse Pandore ouvrir la jarre des maux les plus pernicieux aux hommes.

→ Jean-Michel Besnier

Université Paris III Sorbonne Nouvelle

→ PHILOSOPHIE

Petite histoire des grands singes

Christophe Herzfeld

Seuil, 2012
(220 pages, 20 euros).

En effet, contrairement aux grands singes, la pensée occidentale a toujours été écartelée entre deux conceptions : celle, si présente dans les philosophies et les religions, qui fait de l'homme un être « à part », complètement coupé de l'animalité, et, à l'inverse, celle qui souligne la continuité entre humains et animaux, voire rêve à « un monde édénique où les différentes espèces vivaient en harmonie ». C'est un peu l'histoire de cette amitié fondamentale que nous conte l'auteure, philosophe et artiste qui a beaucoup étudié les grands singes et notamment leur aptitude à faire, avec des cordes, des nœuds complexes.

Depuis l'Antiquité, où « les hommes sont fascinés par les singes et la facilité avec laquelle ils imitent les comportements » jusqu'à l'époque moderne, où les théories transformistes intègrent l'homme dans sa lignée animale, l'auteure retrace, dans un texte passionnant, cette petite histoire de la pensée occidentale. On passe par le Moyen Âge et son « simien apparenté à Satan », les premières ménageries, la première classification des primates par John Ray en 1693,

Brèves

LES DÉBORDEMENTS DE LA MER D'ARAL

Daniel Le Jean

PUF/Le Monde, 2012
([illegible] pages, 22 euros).

La mer d'Aral sera-t-elle le siège d'une guerre de l'eau, comme le suggèrent économistes et observateurs internationaux ? Peut-être, mais la responsabilité de cette guerre sera loin d'être seulement locale. L'enquête minutieuse de terrain de l'auteur, sociologue et ingénieur, révèle qu'en appliquant des modèles hydro-économiques généraux à la région sans en prendre les particularités, les experts internationaux attisent cette guerre en accentuant les tensions entre États.

SOMMES-NOUS TOUS VOUÉS À DISPARAÎTRE ?

Éric Buffetaut

Le Cavalier Bleu, 2012
(100 pages, 16 euros).

Pourquoi des espèces disparaissent-elles ? Quel est le rôle de l'homme dans ces extinctions ? Si des extinctions ont eu lieu de tout temps, pourquoi s'en préoccuper aujourd'hui ? En une vingtaine de thèmes, soit autant de chapitres didactiques, étayé de nombreux exemples, répond à toutes vos questions sur l'extinction des espèces.

L'ONTOPHYLOGENÈSE

Jean-Jacques Kupiec

Quæ, 2012
(78 pages, [illegible] euros).

Et si la genèse des individus (l'ontogenèse) et l'évolution des espèces (la phylogenèse) ne formaient qu'un seul et même processus (l'ontophylogenèse) ? Telle est la thèse de l'auteur : une cause unique, la sélection naturelle, provoque le développement [illegible] et l'évolution des espèces. En termes simples, il présente sa théorie et explique en quoi elle satisfait aux critères de scientificité.

Brèves

ÉCHECS ET TRICTRAC

M. Grande et J-F. Goret
Errance, 20[illegible] (160 pages, 29 euros).

Les pratiques ludiques ont d'abord été le fait de l'élite. Passant en revue les découvertes de pièces d'échecs, de pions et de dés livrées par l'archéologie médiévale des dernières décennies, le catalogue de l'exposition sur le sujet au château de Mayenne est une occasion d'appréhender la pratique médiévale de ces jeux toujours familiers.

L'UNIQUE TERRE HABITÉE ?

André Maeder
Favre, 2012
(360 pages, 24 euros).

Sérieusement, systématiquement, l'auteur, professeur d'astrophysique, recense et explique les centaines de conditions nécessaires à l'existence d'autres planètes habitées dans l'Univers. Il les présente et les discute à la faveur de paragraphes très clairs, dont l'accumulation finit par persuader le lecteur de [illegible] qu'une Terre ; une telle planète est rarissime ; nous ferions mieux de tout faire pour protéger la nôtre....

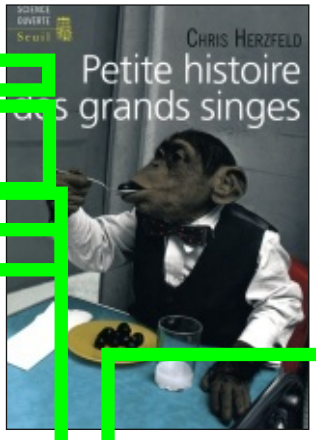
L'EXPLORATION SPATIALE

A. [illegible]mmar-Israël, L.-L. Fellous
CNRS éditions, 2012
(32[illegible] pages, 27 euros).

Suivant les points de vue, l'exploration spatiale apparaît comme un front de progrès ou comme un miroir aux alouettes. Retraçant son histoire, les auteurs nous montrent qu'elle est les deux à la fois : ses principales avancées étaient censées être motivées par la science, mais elles l'ont été surtout par la guerre, ce qui n'empêche pas d'immenses retombées scientifiques. Sur cette base, l'ouvrage présente ce que l'exploration spatiale pourrait être à l'horizon 2040. Une fois de plus, cela fait rêver !

L'intérêt de Buffon pour les chimpanzés ou les dissections du XIXe siècle. On remarque que le transformisme n'empêche pas des dérives racistes, qui font de la « race blanche » le sommet de l'évolution et situent les « autres races » entre elle et les grands singes ! Au XXe siècle, malgré l'adoption de chimpanzés dans des familles, les théories réductionnistes, dont le béhaviorisme (une approche psychologique prônant l'apprentissage par conditionnement), et l'utilisation des anthropoïdes comme animaux d'expérience donnent un bien triste sort à nos cousins primates.

Une lueur d'espoir apparaît de nos jours grâce aux développements de l'éthologie. Les travaux de Jane Goodall, Dian Fossey, Frans de Waal ou de nombreux autres, dont beaucoup de « femmes-chercheurs », nous montrent les anthropoïdes pour ce qu'ils sont : des animaux très proches de nous sur le plan du comportement, de l'affection donnée aux jeunes, dotés de capacités de choix esthétiques et de comportements moraux, capables d'apprendre des ébauches de langage, de créer des outils, voire de se considérer comme des humains : une chimpanzé, qui devait classer sa propre image dans une des deux catégories « humaines » ou « animales », se place spontanément chez les hommes. Cette porosité de la frontière qui était supposée nous séparer des singes fait pas d'interroger profondément chacun d'entre nous.



→ Georges Chapouthier
Centre Émotion, CNRS, Biologie Intégrative, Paris

→ HISTOIRE DES SCIENCES

L'histoire des sciences naturelles de Cuvier

Theodore [illegible] (sous la dir.)
MNHN, 2012
(764 pages, 49 euros).

« Il n'est pas de science dont l'histoire ne soit utile aux hommes qui la cultivent ; mais l'histoire des sciences naturelles est indispensable aux naturalistes. » C'est par cette sentence que le naturaliste Georges Cuvier fixe l'importance qu'il accorde à ses ultimes leçons au Collège de France, de 1829 à 1832. Au travers d'une mise en chronologie des progrès des sciences naturelles depuis la plus haute Antiquité, Cuvier entend défendre sa méthode scientifique, son rejet des systèmes fondés sur les théories *a priori*, au profit de l'observation, comme l'aboutissement d'un processus historique. C'est donc une histoire des sciences naturelles, de l'Antiquité à son temps qu'il entreprend alors de présenter dans ses leçons.

Le présent ouvrage est une réédition bilingue du premier volume de l'*Histoire des sciences naturelles* de Cuvier (1841), rassemblant ses 24 premières leçons, de l'Antiquité à la Renaissance. D'abord « religieuse » dans les civilisations des Babyloniens, des Égyptiens et des Hébreux, la science entre dans sa période « philosophique » avec les écoles grecques. Cuvier met l'accent sur l'apport d'Aristote, avant qui « la science n'existait pas », qui fonde la méthode d'observation et inaugure l'ère de la « spécialisation ». Il aborde ensuite les connaissances du monde romain, des Étrusques à la chute de l'Empire en passant par Pline et ses contemporains. Puis, Cuvier décrit les « ténèbres de l'ignorance » du Moyen Âge avant que le « mouvement de l'esprit humain » ne reprenne son cours à la Renaissance.

Cet ouvrage nous offre la première « grande histoire » de la biologie accompagnée d'un remarquable travail d'édition. Cuvier synthétise en somme de plusieurs siècles de littérature scientifique européenne dans un texte très accessible où le lecteur trouvera l'essence du regard et de la pensée de l'infatigable savant.

→ Josquin Debaz
CNRS, FMSH, Paris

.fr Retrouvez l'intégralité de votre magazine et plus d'informations sur : www.pourlascience.fr

Imprimé en France – Maury Imprimeur S.A. Malesherbes – Dépôt légal 5636 – AOÛT 2012 – N° d'édition 077418-01 – Commission paritaire n° 0912K82079 –
Distribution : NMPP – ISSN 0 153-4092 – N° d'imprimeur 101/174 616 – Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé.