LE GULF STREAM : tempère-t-il vraiment l'hiver européen ?

POUR LA SCIENCE

Avril 2013 - n° 426

www.pourlascience.fr

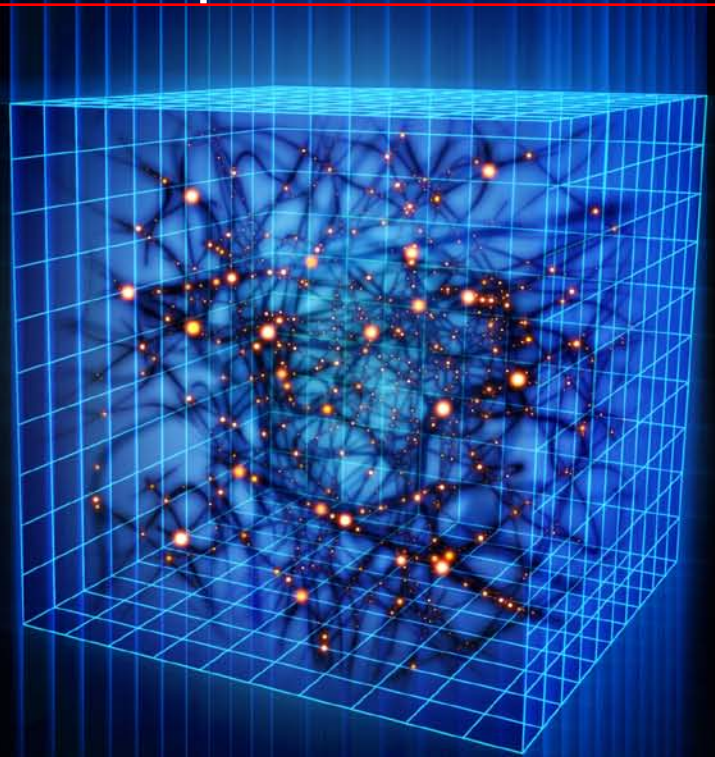
Édition française de Scientific American

Les étoiles de matière noire

Plus brillantes qu'un million de soleils

Natation
La physique de la propulsion

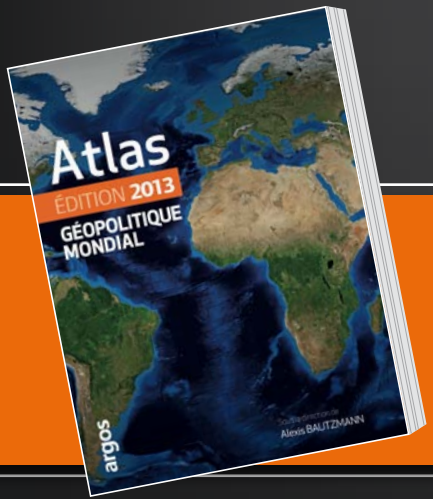
Jeux de dés paradoxaux
Tous gagnants et tous perdants



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.

M 02687 426 H F: 6,20 €

En vente chez votre marchand de journaux



Retrouvez DIPLOMATIE sur Internet

www.GEOSTRATEGIQUE.com

Et ne manquez pas en librairie dès le 27 février prochain !

ATLAS GÉOPOLITIQUE MONDIAL 2013

270 cartes et graphiques pour décrypter toute l'actualité internationale
(Éditions ARGOS/AREION - Diffusion PUF - 212 pages - 22,50 €)

AREION GROUP • 91 rue Saint-Honoré • 75001 Paris (France) • Tel. +33(0) 175 435 271 • Fax : +33 (0) 811 622 931 • E-mail : diplomatie@areion.fr

POUR LA
SCIENCE
www.pourlascience.fr
8, rue Férou - 75278 Paris cedex 06
Standard : 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
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 :
Mihail Barboiu, Armand Fiasson, Sophie Gallé-Soas, Giorgio Gatta, Évelyne Host-Platret, Jean-Pierre Le Goff, Mathieu Lihoreau, Guylaine Poulin-Vittrant, Didier Swingedouw, Daniel Tacquenet.

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

SERVICE ABONNEMENTS
Ginette Bouffaré. Tél. : 01 55 42 84 04
Espace abonnements :
http://tinyurl.com/abonnements-pourlascience
Adresse e-mail : abonnements@pourlascience.fr
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 Caravelle : 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
www.ojd.com

À armes inégales

Prouver qu'un nouveau virus pathogène pour l'homme est apparu et démontrer comment il se transmet sont des tâches difficiles. Ce fut notamment le cas au début des années 1980 avec les premiers malades atteints de ce que l'on nommera plus tard le virus du sida. Autre exemple : établir à quel moment précis une espèce animale disparaît est tout aussi difficile. Le cas du dodo est emblématique. Cet oiseau de l'île Maurice ne volait pas. Il fut chassé pour sa viande. Ses œufs ainsi que les petits furent victimes des rats et des chats échappés des bateaux qui mouillaient près des côtes. Le dodo semble avoir disparu à la fin du XVII^{e} siècle. Mais comment les personnes qui ont croisé le dernier représentant de cette espèce auraient-elles pu l'identifier en tant que tel ?

Si prouver l'existence de ce qui est avéré peut être difficile, démontrer que quelque chose n'existe pas est parfois tâche impossible. Comme le soutient le sociologue Gérald Bronner, les croyances s'entretiennent aisément, chaque argument favorable à la thèse soutenue étant pris pour argent comptant et tout élément défavorable étant rejeté d'un péremptoire : « Moi, je n'y crois pas ! » Dans ces conditions, tout dialogue est exclu *(voir le Point de vue : Comment Internet fait le lit des croyances, page 14)*.

Démontrer que quelque chose n'existe pas est parfois tâche impossible.

La difficulté n'est pas tant que quelqu'un refuse de réexaminer ses convictions, mais qu'il estime que son opinion vaut bien celle d'un spécialiste. La cosmologie est parfois victime de tels rejets injustifiés, par exemple lorsqu'il s'agit de matière noire. Pourtant, d'innombrables arguments théoriques et observations sont des preuves – indirectes – de l'existence de cette matière invisible, mais dont les effets sont quantifiables. Les astrophysiciens proposent même l'existence d'étoiles noires, issues de l'annihilation de particules et d'antiparticules de matière noire *(voir Les étoiles noires, page 20)*.

Dans les croyances, un biais cognitif est à l'œuvre : le biais de confirmation, selon lequel chacun privilégie les informations en faveur de ses convictions et tend à rejeter celles qui s'y opposent. Remettre ses croyances en cause est bien plus coûteux en termes d'efforts cognitifs pour le cerveau que de trouver de nouveaux arguments semblant les confirmer. Au risque de croire que le dodo est toujours vivant ! ■

SOMMAIRE

1 ÉDITO

4 BLOC-NOTES
Didier Nordon

Actualités

6 **Des ondes de surface en forme d'étoile**

7 **Les bébés bilingues et la grammaire**

10 **La quadruple hélice de l'ADN**

11 **La pollinisation en crise ?**

... et bien d'autres sujets.

Opinions

14 POINT DE VUE
Comment Internet fait le lit des fausses croyances
Gérald Bronner

15 DÉVELOPPEMENT DURABLE
Réduire les émissions de particules : un enjeu climatique et sanitaire
Gilles Bergametti et Isabelle Momas

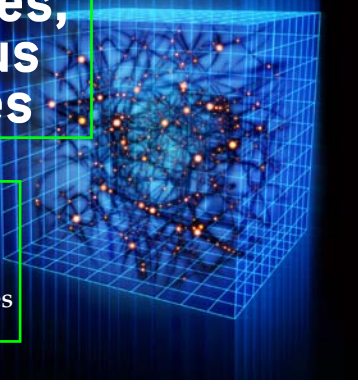
19 VRAI OU FAUX
Tous les animaux dorment-ils ?
Irene Tobler-Borbély

Ce numéro comporte 10 000 ex d'un encart *Sciences Humaines* posé en aléatoire sur l'édition abonnés France et deux encarts d'abonnement brochés sur la totalité du tirage.
En couverture : © Mondolithic Studios/Kenn Brown

À LA UNE

20 ASTROPHYSIQUE
Les étoiles noires, des astres venus du fond des âges
K. Freese, P. Gondolo et P. Salati

Les premières étoiles de l'Univers, gigantesques et très lumineuses, puisaient peut-être leur énergie dans l'annihilation de particules de matière noire.

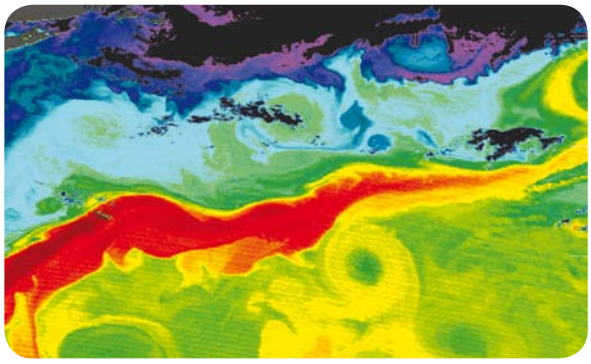


28 ARCHÉOLOGIE
Des jardins mauresques à la Renaissance
Felix Arnold

L'étude archéologique d'une villa de l'époque califale, près de Cordoue, suggère que la conception des jardins orientaux a influencé celle des jardins d'agrément de la toute première Renaissance italienne, où se concrétisent des idées humanistes.

36 CLIMATOLOGIE
Le rôle controversé du Gulf Stream
Stephen Riser et Susan Lozier

Le Gulf Stream, courant marin chaud en provenance des tropiques, est-il vraiment responsable de la relative douceur des hivers européens ? Plusieurs théories remettent en cause cette explication ou la précisent.



© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013

42 PHYSIQUE
La physique de la natation
Nunzio Lanotte et Sophie Lem

Le corps humain est de forme si peu régulière que l'explication physique de la propulsion d'un nageur fait toujours débat. Traînée, portance, tourbillons, etc. : plusieurs mécanismes distincts seraient en jeu.

50 ÉTHOLOGIE
Quand les animaux accordent leurs cris
Kendra Sewall

Les animaux de plusieurs espèces sociales imitent les cris de leurs congénères. Ce phénomène renforce les liens entre individus et favorise la survie de l'espèce.

58 MÉDECINE
Une rétine en culture
Yoshiki Sasai

Des biologistes ont créé une rétine à partir de cellules souches : une étape vers la culture, à l'extérieur du corps, d'organes de remplacement.

64 TECHNOLOGIE
Les robots-abeilles
Robert Wood, Radhika Nagpal et Gu-Yeon Wei

Un essaim de milliers de robots volants de la taille d'un insecte et se partageant les tâches pour réaliser un objectif commun : ce projet constitue un défi mécanique, électronique et informatique.

© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013

Regards

72 HISTOIRE DES SCIENCES
L'instinct maternel sous la IIIe République
Marion Thomas
Les Républicains puisaient dans le règne animal des exemples en faveur du rôle nourricier de la femme, à l'inverse de ce que montraient certaines études.

80 LOGIQUE & CALCUL
Les dés affreux d'Efron
Jean-Paul Delahaye
Les rapports de force entre dés différents sont parfois étranges.

86 SCIENCE & FICTION
Les dinosaures de la science-fiction
J. Sébastien Steyer et Roland Lehoucq

88 ART & SCIENCE
Thèbes, victime d'Œdipe ou... d'une bactérie ?
Loïc Mangin

90 IDÉES DE PHYSIQUE
La fontaine de Héron
Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

93 SCIENCE & GASTRONOMIE
Nous mangeons nos souvenirs
Hervé This

94 À LIRE

Rendez-vous sur

POUR LA SCIENCE .fr

Le site de référence de l'actualité scientifique internationale

- **Toutes les 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.

THÉORIES BIEN COTÉES

Excellente initiative des Éditions *Intellectans*, que de lancer la revue *L'Argus des Théories*. Grâce à elle, chacun peut savoir si telle théorie à la mode devrait continuer de monter dans le firmament intellectuel, ou retomber aussi vite qu'elle est apparue. Ou si telle autre, ancienne et oubliée, a des chances de refaire surface.

Le choix entre les théories dont il faut se réclamer et celles qu'il faut mépriser est capital. La moindre hésitation suffit à vous faire paraître hors du coup. *L'Argus des Théories* met fin à l'angoisse. La revue révèle le cours des théories sur les grandes places (Collège de France, Harvard, Shanghaï, etc.), et dit si le moment est venu de vendre ou d'acheter. *L'Argus des Théories* : la lecture indispensable de tout penseur soucieux de coller à son époque.

PAS D'ATHÉES ?

Le véritable athée est celui qui ne croit pas… en l'humanité ! Non qu'il en conteste l'existence, bien sûr, mais il ne s'en fait pas une idole. D'abord, elle n'est pas un absolu. Son évolution est une errance sans but ni raison, qui suit une voie pleine de hasards : s'ils avaient été autres, l'être humain serait autre. Ensuite, même si, comme le pensent certains croyants, ces hasards répondent en fait à un dessein supérieur, l'humanité commet trop d'horreurs pour que notre athée la révère et s'en remette à elle avec confiance.

Cependant, un « narcissisme d'espèce » semble inévitable. Les membres de chaque espèce doivent agir comme si l'existence de cette espèce était en soi un bien. Sinon, l'espèce s'éteindrait faute de vitalité.

Bref, l'athéisme, au sens donné ci-dessus, est insécurisant, décourageant. Du coup, il n'existe à peu près pas d'athées. Il est dans la nature des hommes d'être humanistes. Comme il est dans la nature des cobras d'être cobraïstes et dans celle des moustiques d'être moustiquistes.

LE TCHAT DE SCHRÖDI

Qu'est-ce qui est le plus habile : un chat ou une équation ? Réponse dans *Le Monde*, qui parle de Schrödinger comme « d'un chercheur mort depuis plus d'un demi-siècle et dont, sans l'expérience du chat, le nom aurait disparu dans l'oubli » (25 janvier 2013). Ainsi, le chat a su se faire une place dans la culture journalistique, alors que l'équation du même Schrödinger a échoué. Tout comme certaine pomme devenue plus populaire que la loi de la gravitation, l'arbre de l'anecdote cache la forêt de la théorie. Deux épisodes de la rivalité entre frivolité et profondeur…

Mais le mot chat est ambigu depuis qu'il signifie aussi bavardage. Le jour pourrait venir, où on évoquera le « tchat' » de Schrödinger en s'imaginant que c'est son habileté exceptionnelle à parler pour ne rien dire qui a rendu Schrödinger célèbre. Un comble, pour cet auteur d'une équation aussi compacte que les équations savent l'être.

SPÉCIALISTE PAR DÉSESPOIR

Le monde n'est pas la juxtaposition de strates indépendantes : x% de biologie, x% de chimie, x% de physique, x% de mathématiques, etc. La formule « Tout est dans tout » n'est pas une boutade, mais une contrariante vérité : si minuscule soit-il, un fait relève de tous les ordres à la fois, inextricables, donc ne se laisse pas appréhender en totalité. Personne ne réussit jamais à « faire le tour » d'une question.

La spécialisation n'a pas d'autre raison d'être que la faiblesse des hommes. Dominer une spécialité ne donne aucun moyen de saisir ne serait-ce qu'une portion du monde : celui-ci n'est pas un saucisson qu'on absorbe tranche après tranche ! Quand des spécialistes se flattent d'être « pointus », ils retournent en motif de fierté ce qui devrait humilier. Ils recourent là à un mode fréquent de consolation.

Rien, sinon le désespoir à l'idée qu'il ne comprendra jamais le monde, ne peut expliquer le geste d'un homme qui décide de se spécialiser.

PRÉFÉRENCES NATURELLES

La nature pourrait bien voter à droite. En effet, la droite, favorable à l'équilibre naturel des marchés, prône le libre échange censé y mener naturellement. Elle défend la famille traditionnelle (père, mère, enfants), qu'elle estime conforme à la nature. Réticente devant l'assistance sociale, elle préfère une hiérarchie naturelle : chaque individu doit jouir d'une réussite proportionnée à ses mérites.

La nature pourrait bien voter à gauche, et même à l'extrême-gauche, celle qui considère que les hommes sont égaux par nature, et a la nostalgie du communisme primitif, époque où les hommes, à l'état de nature, vivaient dans l'abondance et la paix, sans hiérarchies opposant les uns aux autres.

© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013

On aurait évité nombre de guerres si on avait su quel camp Dieu soutenait. Au lieu que chacun prétende l'avoir avec lui, on se serait soumis à l'arbitrage divin. La nature a un avantage sur Dieu : on peut la connaître scientifiquement. Un prix Nobel pour celui qui réalisera une expérience permettant de dire si la nature a le cœur à droite ou à gauche !

➜ POTENTIELLEMENT...

Qu'il soit réel ou imaginaire, tout danger est potentiel. S'il cesse d'être potentiel, il disparaît : ou il s'est éloigné, ou l'événement redouté s'est produit.

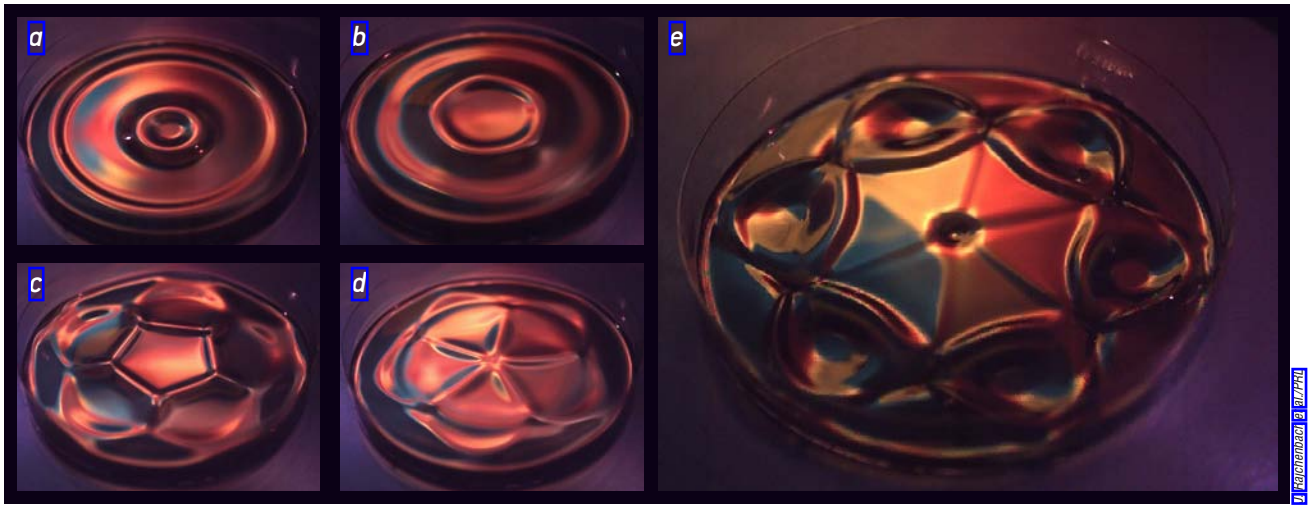
Pourtant, l'expression « danger potentiel » n'est pas un pléonasme, comme le serait « danger dangereux », mais une mise en œuvre de l'art de dire sans dire. Elle exploite une asymétrie connue. On peut démontrer que tel produit est dangereux, on ne peut pas démontrer que tel autre ne l'est pas : qu'on n'ait repéré aucun effet nocif n'assure pas qu'on n'en repérera jamais. À ce compte, tout présente un danger potentiel. Tout peut même devenir effectivement dangereux, si se réalise quelque circonstance plus ou moins improbable. Le rire, par exemple : rire mal à propos peut vous créer de rudes inimitiés. Ou une espèce naturelle (si elle se met à proliférer). Du coup, dire que, par exemple, les OGM sont potentiellement dangereux ne fâche ni ceux qui sont pour les OGM (ils comprendront que le danger n'est pas avéré) ni ceux qui sont contre (ils entendront le mot dangereux accolé au terme OGM).

Dénoncer quelque « danger potentiel », c'est être sûr qu'aucun événement futur ne pourra être considéré comme vous démentant. Pas étonnant que cette expression soit à la mode ! ■

Physique

Des ondes de surface en forme d'étoile

Des interactions non linéaires de plusieurs ondes se propageant à la surface d'un liquide peuvent créer des formes spectaculaires.



Les vibrations verticales d'un récipient contenant de l'huile de silicone font d'abord apparaître des ondes concentriques *(a)*. Puis, quand l'amplitude des vibrations augmente, la symétrie de rotation se brise : des formes pentagonales *(b et c)*, en étoile *(d)* ou mettant en jeu d'autres polygones *(e)* émergent.

Dans un récipient soumis à des vibrations verticales, Jean Rajchenbach, Didier Clamond et Alphonse Leroux, de l'Université de Nice-Sophia Antipolis, ont mis en évidence des ondes aux formes étonnantes : des étoiles et des pentagones. Un mécanisme d'interaction non linéaire (c'est-à-dire où les effets ne sont pas proportionnels aux causes) de plusieurs ondes est certainement à l'origine des phénomènes observés.

Dans leur expérience, ces chercheurs font vibrer verticalement une cuve cylindrique contenant de l'huile de silicone, dont la viscosité est dix fois celle de l'eau. Dans un premier temps, les physiciens fixent la fréquence de vibration et augmentent l'amplitude progressivement. Le premier phénomène qui apparaît correspond à de petites ondulations circulaires qui démarrent au bord du récipient et s'amortissent assez vite en allant vers le centre. Puis, quand l'amplitude est plus forte, deux ondes solitaires concentriques se forment, l'une se propageant vers le centre et l'autre vers l'extérieur *(a)*. Elles rappellent des ondes bien connues, les solitons – observés par exemple le long d'un cours d'eau sous la forme de vagues solitaires se propageant sans se déformer. Au moment du croisement des deux ondes dans le récipient, elles restent immobiles pendant 0,05 seconde, phénomène aussi constaté quand deux solitons se rencontrent.

Quand l'amplitude des oscillations augmente encore, il se forme, au croisement des deux ondes, cinq angles dans la ligne de crête *(b)*. Ainsi, la symétrie de rotation qui régnait jusque-là se brise. Enfin, en augmentant encore l'amplitude, on obtient, en alternance dans le temps, un pentagone *(c)* et une étoile à cinq branches *(d)*.

Pourquoi de telles ondes n'ont-elles jamais été observées auparavant ? L'amplitude des vibrations est ici très importante et peut atteindre deux fois la profondeur moyenne du liquide. Dans les creux, le fluide peut se réduire à une épaisseur de seulement un millimètre. Il s'agit donc d'un régime extrême, où les non-linéarités, dues notamment à l'interaction du fluide avec le fond du récipient, sont fortes.

Le plus étonnant dans les figures formées est la brisure de la symétrie de rotation. Les puissantes non-linéarités déstabilisent sans doute cette symétrie et certaines relations entre les vecteurs d'onde et la fréquence des ondes, ce qui engendrerait les pentagones et les étoiles. Mais une modélisation précise reste à établir.

Les physiciens obtiennent d'autres structures intrigantes en modifiant les paramètres d'excitation. Enfin, le phénomène présente une certaine mémoire du processus : la forme obtenue ne dépend pas uniquement de la fréquence, de l'amplitude et de la profondeur du liquide, elle dépend aussi des ondes précédentes qui se sont propagées…

→ Sean Bailly

J. Rajchenbach et al., Physical Review Letters, vol. 110, 094502, 2013

© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013

Éthologie

Dangers de la route : pas folle, la suricate !

Les routes sont un risque pour les nombreux animaux qui tentent de les traverser. Si l'adaptation du comportement face aux dangers naturels est bien identifiée chez certaines espèces, qu'en est-il face aux menaces récentes introduites par les activités humaines ? Nicolas Perony, de l'École polytechnique fédérale de Zurich, et Simon Townsend, de l'Université de Zurich, ont étudié le cas des groupes de suricates (*Suricata suricatta*) confrontés à une route passante dans le désert du Kalahari, en Afrique du Sud.

Les deux chercheurs montrent que lorsque c'est la femelle dominante qui conduit le groupe en direction de la route, elle ne traverse la route en premier que dans 40 pour cent des situations observées : le plus souvent, elle laisse d'abord passer un ou plusieurs congénères. En revanche, si c'est un subordonné qui conduit le groupe, il traverse en premier dans plus de 80 pour cent des cas.

Ces résultats ont pu être reproduits par un modèle simple de mouvement collectif où l'un des paramètres représente l'aversion au risque, supérieure chez la femelle suricate dominante.

Cette femelle minimise ainsi ses propres risques, mais aussi ceux des autres membres du groupe, qui s'exposerait à une désorganisation hiérarchique si elle venait à disparaître. En effet, le couple dominant est le seul à se reproduire, ce qui lui donne une importance toute particulière.

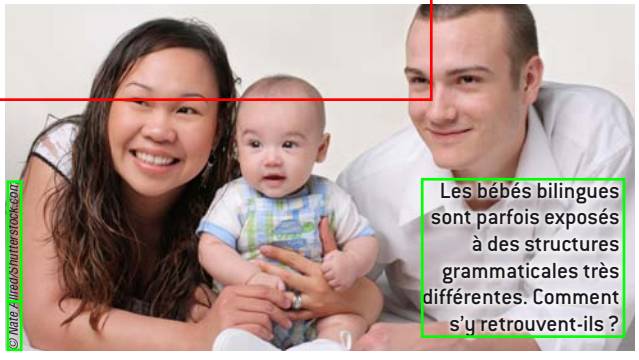
→ S. B.

PLoS ONE, vol. 8(2), e52834, 2013

Linguistique

Les bébés bilingues et la grammaire

Comment comprendre une phrase dont on ignore la grammaire de base ? En particulier, le premier mot désigne-t-il un objet, une action, un pronom ? Le problème est d'autant plus difficile pour les bébés bilingues que l'ordre des mots peut être différent dans les deux langues auxquelles ils sont confrontés. Judith Gervain (CNRS-Université Paris Descartes) et Janet Werker (Université de Colombie-Britannique) ont montré que dès sept mois, les bébés bilingues se fondent sur la prosodie des phrases pour distinguer l'ordre des mots et reconnaître la langue parlée.



Les bébés bilingues sont parfois exposés à des structures grammaticales très différentes. Comment s'y retrouvent-ils ?

Les langues ont des structures grammaticales variées. Ainsi, les foncteurs (articles, pronoms, etc.) sont placés en début de phrase dans certaines langues, et à la fin dans d'autres. La prosodie varie aussi : dans les langues où les foncteurs sont au début, les mots « de contenu » sont soulignés par des contrastes de durée (par exemple, dans l'expression « le pain », la voyelle de « pain » est prononcée plus longuement que celle du mot « le »), tandis que les autres langues exploitent plutôt des contrastes de ton ou d'intensité.

Les foncteurs sont plus fréquents que les mots de contenu. Les bébés les distinguent vite des autres mots grâce à cette fréquence supérieure, et ceux confrontés à une seule langue s'en servent pour commencer à structurer les phrases. Mais comment font les bébés bilingues soumis à deux structures différentes ? En leur apprenant des mots prononcés selon des prosodies distinctes, les chercheuses ont montré qu'ils associent la prosodie d'une langue à sa structure grammaticale : la façon dont est souligné un nouveau mot (par un contraste de durée ou de ton) leur permet de rattacher ce mot à l'une des deux langues et à une façon de structurer les unités sémantiques.

→ Guillaume Jacquemont

Nature Communications, en ligne le 14 février 2013

En bref

Revêtement insigne

À Fréjus, les fouilles du Service municipal d'archéologie viennent de mettre au jour un cas intéressant d'*opus signinum*, mortier que réalisaient les Romains en mélangeant chaux, eau, sable et tuileau (brique pilée) ; ils le rehaussaient souvent de fragments polychromes de pierre. C'est le cas à Fréjus, mais avec un détail inhabituel : un médaillon en plaquettes de marbre représentant un fronton de temple. Il traduit clairement l'intention de signaler un lieu précis. Salle de réception, lieu de culte ? Les archéologues sont à l'affût d'un indice qui pourrait le révéler.

Flair hiérarchique

Lorsqu'un animal flaire un congénère, il ferait plus que le sentir. Selon l'Américain Daniel Wesson, il transmet aussi des informations sur son rang social. Face à un rat dominant, un rat de rang inférieur ralentit le rythme de ses reniflements, et le dominant se calme à son tour. Si le dominé ne le fait pas, le dominant devient agressif… Et ce, même si les animaux sont privés d'odorat. Ce comportement disparaît quand on traite les rats à l'ocytocine, une hormone qui diminue stress et méfiance.

Canaux souterrains de Mars

Marte Vallis est la plus grande vallée de débâcle martienne récente (moins de 500 millions d'années). Longue de 1 000 kilomètres et large de 100, elle aurait été créée par une inondation. Son origine était mal connue, car les canaux qui ont apporté l'eau sont enfouis sous la lave. Des astronomes américains ont reconstitué leur tracé grâce aux données de la sonde *Mars Reconnaissance Orbiter*, et ainsi montré que l'eau provenait de Cerberus Fossae, une série de crevasses voisines.

Brèves d'avril

Pas de vieux bourrins : les viandes des bœufs

Alertés par l'aspect rance du derme de bêtes quasiment brisées émergeant de caisses trouvées dans des flaques, des experts en fermes inspectées ont découvert des bouffes atterrantes, emballées à la va-vite pour se faire plein de pèze. Ils ont vidé des packs minables remplis de déchets de bourrins cachés dans des morceaux de panses et laissant des traces de rouille sur les caddies™. Ces scientifiques ont ainsi débusqué des filières « enfermées » (cachées pour les fermiers), des bouffes de parrains servies par des hommes aux gros nez, des Findus™ qu'on ne peut répandre que sur des dalles, et autres bouffes dissimulées dans de douteux plaids. Il faut d'urgence revenir aux bœufs que fournissent de vaillantes bouchères ou aux génisses visibles à chaque étape car, faute de panses traçables, on n'a rien pu bouffer après ces délations.

(22 contrepèteries, avec les deux du titre)

Le 1er avril, vous trouverez sur notre site quelques indices pour résoudre les contrepèteries de Maël Jortin.

www.pourlascience.fr

© Jörgen Ahlstedt

Les résidus d'anxiolytiques déversés dans les rivières rendent les perches européennes plus voraces, plus hardies et moins sociales.

Planétologie

La jeune Lune était-elle riche en eau ?

Suivant le scénario le plus consensuel, la Lune s'est formée à partir des débris issus d'une collision d'un objet de la taille de Mars avec la proto-Terre. En raison de la chaleur intense produite lors de ce cataclysme, la Lune aurait été entièrement recouverte de magma d'où s'échappaient les éléments et composés les plus volatils, tels que l'eau. Cet océan magmatique se serait peu à peu refroidi pour former la croûte lunaire, il y a plus de 4,3 milliards d'années. Les premières analyses des roches lunaires ont confirmé ce scénario appuyant l'hypothèse d'une Lune anhydre. Toutefois, de nouvelles analyses d'échantillons de roche provenant de la croûte lunaire, réalisées par Anne Peslier de la NASA et ses collègues, ont révélé des traces d'eau dans ces roches primordiales.

NASA/JPL/USGS

Les roches de la croûte lunaire contiennent des traces d'eau qui datent de la formation de notre satellite.

Les améliorations des techniques d'analyse ont permis de détecter les faibles quantités d'eau présentes dans des minéraux de morceaux de roche lunaire rapportés lors des missions *Apollo*. Les géochimistes n'observent pas directement de l'eau liquide, mais la présence d'hydrogène incorporé aux minéraux. Ils ont étudié des échantillons de plagioclases, des minéraux silicatés de la famille des feldspaths, qui seraient représentatifs de la croûte primordiale de la Lune et qui n'ont pas été contaminés par des phénomènes plus récents tels que le vent solaire ou le bombardement tardif de météorites riches en eau. La présence d'hydrogène semble indiquer que de l'eau était présente dans la Lune lorsqu'elle s'est constituée. Mais il reste alors à concilier ces observations avec les modèles de formation de notre satellite.

→ S. B.

H. Hui et al., Nature Geoscience, en ligne 17 février 2013

Écologie

Des poissons plus hardis sous anxiolytiques

Les eaux usées véhiculent de multiples résidus de médicaments. Encore biologiquement actifs après avoir été excrétés, ils finissent dans les rivières. Quels sont leurs effets ? Tomas Brodin, de l'Université d'Umeå, en Suède, et ses collègues ont montré qu'un des anxiolytiques (médicaments contre l'anxiété) les plus abondamment consommés, l'oxazepam, modifie le comportement de la perche européenne *(Perca fluviatilis)*.

Les biologistes ont exposé des perches à de l'oxazepam, de façon à ce qu'elles en accumulent des concentrations représentatives de celles trouvées dans le corps des perches sauvages. Les poissons testés sont alors devenus plus voraces, plus hardis et moins sociaux. Dans la nature, ce changement de comportement risque de déséquilibrer les écosystèmes. En dévorant les organismes du zooplancton qui broutent les algues, les jeunes perches pourraient notamment entraîner la prolifération de ces dernières. Cependant, les poissons exposés à l'anxiolytique s'aventurent plus souvent dans des endroits nouveaux et s'isolent du groupe, ce qui les rend plus vulnérables aux prédateurs : l'augmentation de la mortalité résultante pourrait compenser la surconsommation individuelle de zooplancton. L'effet global est donc difficile à cerner.

Il reste que la pollution médicamenteuse des cours d'eau est préoccupante, et ses effets sur les écosystèmes ainsi que sur l'homme sont encore mal connus. Comment s'en prémunir ? Pour Hélène Budzinski, de l'Université de Bordeaux, il faudrait mieux dégrader les médicaments dans les stations d'épuration, mais aussi limiter leur consommation. En outre, des plans de surveillance systématiques et ciblés devraient être mis en place.

→ G. J.

T. Brodin et al., Science, en ligne le 14 février 2013

© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013

Zoologie

Limace à pénis détachable

En 1976, *L'empire des sens*, du Japonais Nagisa Oshima, est présenté au Festival de Cannes. À la fin du film, le héros est émasculé et meurt. Un destin improbable pour la limace de mer *Chromodoris reticulata* : son pénis est détachable !

Cet animal est hermaphrodite et, lors de l'accouplement, son pénis pénètre dans l'orifice femelle de son partenaire, et *vice versa*. Jusque-là, rien que de très ordinaire. L'équipe de Ayami Sekizawa, de l'Université d'Osaka, a observé qu'ensuite, l'organe mâle est abandonné, mais qu'il est remplacé en 24 heures ! Par quel mécanisme ?

Le sexe mâle, très long, est en grande partie enroulé en spirale dans le corps. Ainsi, le pénis détachable n'est qu'une première partie d'un organe que la limace peut extruder (jusqu'à trois fois). Ce n'est pas le seul cas où le pénis est abandonné, mais ce serait la première fois que l'on découvre une régénération.

→ Loïc Mangin

A. Sekizawa et al., Biology Letters, vol. 9, 20121150, en ligne le 13 février 2013

La limace de mer *Chromodoris reticulata*.

© Kobe Art

Mathématiques

Le 48e premier de Mersenne

Composé de 17 425 170 chiffres, le nombre premier découvert par Curtis Cooper, professeur à l'Université du Missouri, est le plus grand connu à ce jour. Il a été trouvé dans le cadre du projet participatif GIMPS (*Great Internet Mersenne Prime Search*, ou Grande recherche sur Internet de nombres premiers de Mersenne). Les nombres premiers sont les entiers qui ne sont divisibles que par un et par eux-mêmes, comme 3, 11 ou 17. Il en existe une infinité. Mais si les nombres premiers sont fréquents, celui trouvé par C. Cooper appartient à une famille de nombres premiers très rares, les nombres premiers de Mersenne, du nom du moine français du XVIIe siècle Marin Mersenne. Les nombres de Mersenne sont les entiers de la forme $2^p - 1$, où p est lui-même un nombre premier. Mersenne a étudié les nombres premiers pouvant s'écrire sous cette forme. Le nombre découvert par C. Cooper s'écrit $2^{57\,885\,161} - 1$; ce n'est que le 48e nombre premier de Mersenne connu.

→ S. B.

http://www.mersenne.org

Électronique

Des biomatériaux pour la microélectronique 3D

Et si, pour augmenter les performances des ordinateurs, on utilisait… des biomatériaux ? C'est ce que proposent des biophysiciens du CEA, du CNRS, de l'Université Joseph Fourier et de l'INRA à Grenoble. Leur idée : construire des puces tridimensionnelles à l'aide de polymères biologiques.

Dans la course à la miniaturisation informatique, les circuits intégrés 3D, apparus il y a 20 ans, sont des plus prometteurs. Constitués de plaques de silicium gravées de circuits bidimensionnels, empilées et interconnectées, ils offrent une densité supérieure de composants et réduisent la longueur des circuits de connexion. Toutefois, plusieurs obstacles empêchent leur développement à grande échelle.

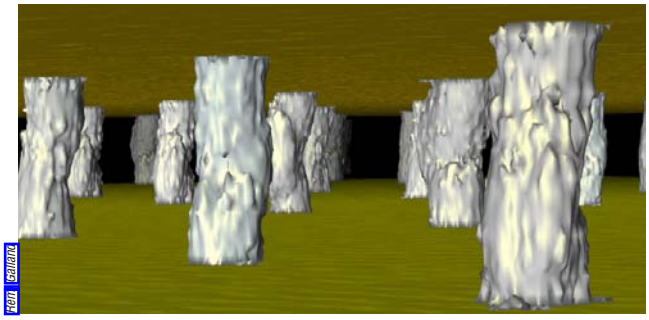
Les connexions verticales utilisées dans certains modules de mémoires, des microtrous remplis d'un métal conducteur, nécessitent un bon remplissage des trous et un alignement parfait des plaques, et leur densité est limitée par le nombre de trous. Quant aux connexions directes entre tranches de silicium, elles sont effectuées par adhésion moléculaire, à des températures supérieures à 200 °C qui risquent d'endommager les circuits intégrés, et nécessitent des surfaces extrêmement plates, lisses et propres – autant de contraintes à appliquer aux galettes de silicium.

Rémi Galland et ses collègues proposent une connexion verticale fondée sur les propriétés d'assemblage d'une molécule produite par les cellules eucaryotes : l'actine. Essentielle pour le maintien de l'architecture cellulaire, l'actine, par le biais d'une régulation fine de sa polymérisation, assure aussi, dans les cellules, la propulsion de bactéries telles que *Listeria* : elle forme un réseau de petits filaments interconnectés – une sorte de comète – dont la polymérisation pousse la bactérie. C'est cette propriété que les biophysiciens ont utilisée.

Entre deux lamelles de verre préparées pour que la polymérisation de l'actine ne se produise qu'en certains points en regard, ils ont injecté des monomères d'actine et les composants nécessaires à la formation des comètes. Des piliers d'actine ont poussé sur chaque lamelle et se sont rejoints. Métallisée avec des particules d'or, la structure obtenue devient conductrice. Les biophysiciens doivent à présent tester leur technique sur de vraies galettes de silicium, avec des circuits intégrés.

→ Marie-Neige Cordonnier

R. Galland et al., Nature Materials, en ligne le 10 février 2013



© Rémi Galland

Reconstitution de piliers d'actine auto-assemblés entre deux lamelles. Les piliers (0,8 micromètre de diamètre) ont été scannés au microscope confocal, et les images obtenues réassemblées numériquement.

Biologie moléculaire

La quadruple hélice de l'ADN

En 1953, Francis Crick et James Watson présentaient leurs conclusions : l'ADN est constitué de deux brins formant une double hélice. Dix ans plus tard, une structure de quadruple hélice, qualifiée de G-quadruplexe, était observée sur un brin d'ADN *in vitro*.

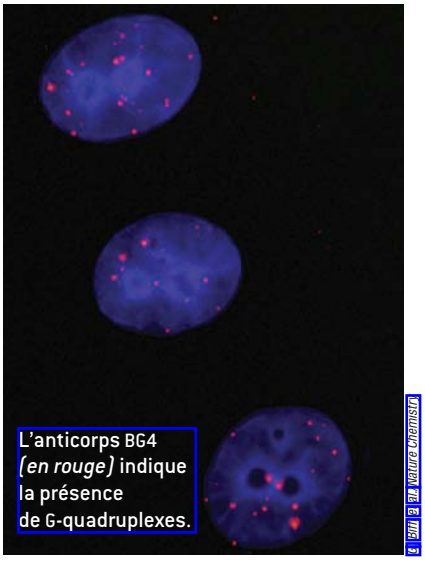
Un brin unique peut en effet former des circonvolutions et établir des liaisons entre différents points de la molécule, ce qui lui donne localement l'aspect d'une hélice à « quatre brins ». Giulia Biffi, du Centre de recherche contre le cancer à Cambridge, au Royaume-Uni, et ses collègues ont mis au point un anticorps, BG4, qui se fixe sur les G-quadruplexes ; il leur a permis d'observer la présence de ces structures dans les cellules et de suivre leur évolution lors du cycle cellulaire.

Les G-quadruplexes apparaissent surtout au cours de la division cellulaire, quand les deux brins de la double hélice d'ADN se séparent pour effectuer la réplication. Elles en perturbent le processus, comme des nœuds qu'il faudrait d'abord défaire.

Cette étude pourrait être un pas dans la lutte contre le cancer : en stabilisant les G-quadruplexes, il serait possible de ralentir, voire de bloquer, la réplication particulièrement rapide des cellules cancéreuses.

→ S. B.

G. Biffi et al., Nature Chemistry, en ligne, 20 janvier 2013



L'anticorps BG4 *(en rouge)* indique la présence de G-quadruplexes.

© G. Biffi et al., Nature Chemistry

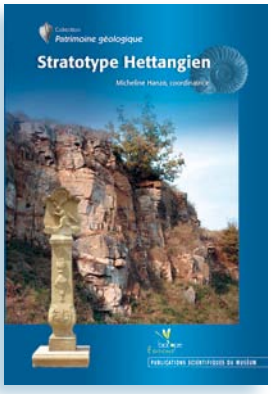
Muséum national d'Histoire naturelle

Le stratotype Hettangien

Coordonné par Micheline **Hanzo**

Le temps du géologue est divisé en étages définis par les fossiles qu'ils contiennent. Afin d'établir des références universelles, certains sites où les couches géologiques correspondant à ces étages affleurent ont été qualifiés de « stratotypes ».
La collection *Patrimoine géologique* a pour objet de publier des synthèses sur chacun des stratotypes situés en France.

Le stratotype de l'Hettangien est donc une référence géologique internationale. Il est de ce fait aussi la célébrité d'Hettange-Grande, localité de Moselle où il a été défini.
Suite à bien des controverses, c'est Eugène Renevier qui, en 1864, en fut l'initiateur, séduit par les travaux de son prédécesseur Olry Terquem, sur des niveaux particulièrement riches en fossiles.
Ce stratotype historique méritait d'être protégé ! Il obtint le statut de Réserve naturelle nationale d'Hettange-Grande en 1985. *Bildstock*, pavés, pierres à four, etc., témoignent de l'exploitation du matériau gréseux du site stratotypique.
Bien documenté, richement illustré, cet ouvrage constitue une synthèse des connaissances acquises sur l'Hettangien au niveau de son stratotype, et de la Lorraine belgo-luxembourgeoise, en évoquant plus brièvement d'autres sites du même âge en France.



317 p. • 232 figs • 35,90 € TTC • format 16,5 x 24 cm
ISBN 978-2-85653-688-9

ouvrage en vente à la librairie des Publications Scientifiques face à la Grande Galerie de l'Évolution

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES DU MUSÉUM

Commandes et renseignements :
Muséum national d'Histoire naturelle
Publications Scientifiques
Case postale 41 • 57 rue Cuvier • 75231 Paris cedex 05
Tél. : 01 40 79 48 05 • Fax : 01 40 79 38 40
diff.pub@mnhn.fr • http://www.mnhn.fr/pubsci

© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013

Archéologie

Massacre en piscine romaine

Dans son long poème épique les *Métamorphoses*, Ovide (–43 à 18) précise que, voyant ses enfants se faire massacrer par Artémis et Apollon, la reine mythique Niobé fut pétrifiée. Or voilà que les archéologues de la Superintendance des biens archéologiques du Latium viennent de retrouver ses enfants pétrifiés dans le marbre chez le protecteur d'Ovide.

© Soprint. dei beni archeol. di Latium

Niobé en souffrance

Les archéologues les ont découverts dans une propriété privée proche de la ville de Ciampino, où se trouvent les restes de la villa de Messalla (–64 à –8), le protecteur d'Ovide. C'est dans la piscine de la villa qu'ils ont eu la surprise de mettre au jour sept statues de marbre représentant le massacre des enfants de Niobé. Tout indique qu'elles ornaient les quatre coins du bassin ainsi qu'un socle placé au centre de la piscine. Les archéologues pensent qu'au IIe siècle de notre ère, un séisme les a précipitées dans la piscine, où elles sont restées ensuite sous la protection de la terre.

→ François Savatier

Entomologie

Les bourdons électrisés

Les fleurs usent d'une variété de formes, de couleurs, de motifs et de parfums pour attirer les insectes butineurs qui participent à leur fécondation. L'équipe de Daniel Robert, à l'Université de Bristol, a montré que les bourdons *(Bombus terrestris)* sont, en plus, sensibles au potentiel électrique des fleurs. Les fleurs ont tendance à avoir une charge électrique négative, alors que les bourdons acquièrent une charge positive par les frottements en vol de l'air sur leur corps. D. Robert et ses collègues ont établi que les bourdons sont capables de détecter les champs électriques dus aux différences de potentiel entre les fleurs et eux, et qu'ils utilisent ces informations pour reconnaître les fleurs riches en nourriture. En outre, quand un bourdon se pose sur une fleur, il modifie pendant quelques secondes son potentiel électrique, une variation que les autres bourdons peuvent percevoir.

→ S. B.

D. Clarke et al., Science, en ligne le 21 février 2013

Écologie

La pollinisation en crise ?

On estime que, dans le monde, les trois quarts des cultures alimentaires dépendent au moins en partie de la pollinisation par des animaux, les insectes en particulier. Sachant que la diversité des insectes pollinisateurs diminue depuis plusieurs décennies, y aurait-il une « crise de la pollinisation » ? Et si oui, le renforcement des effectifs d'abeilles domestiques permettrait-il de compenser le déclin des autres insectes ? Deux études apportent une réponse pessimiste à ces questions.

Avec deux collègues, Laura Burkle, de l'Université de l'État du Montana et de celle de Washington, a étudié, en s'appuyant sur des données historiques et en collectant de nouvelles données en 2009 et 2010, l'évolution des interactions plantes-pollinisateurs dans une région de l'Illinois sur une période de 120 ans. Les trois chercheurs ont notamment constaté que parmi les 532 associations plante-abeille recensées au XIXe siècle sur un sous-ensemble de 26 plantes et leurs 109 abeilles pollinisatrices, seules 125 associations subsistent aujourd'hui, soit un quart. Et parmi les interactions plante-abeille ayant été perdues, 183, soit près de la moitié, sont dues à la disparition, de la région étudiée, des espèces d'abeilles correspondantes (la moitié des espèces ne sont plus présentes). Qui plus est, en se concentrant sur une plante abondante *(Claytonia virginica)*, L. Burkle et ses collègues ont noté, d'une part, que la diversité des abeilles qui la visitent n'avait pas changé entre le XIXe siècle et 1970, mais qu'elle a diminué de moitié depuis ; d'autre part, que le rythme des visites a été divisé par quatre depuis 1970 (de 0,59 à 0,14 abeille par minute). Il y a ainsi, au moins sur la région étudiée, une dégradation notable du réseau d'interactions plantes-pollinisateurs, qui conforte l'idée d'une crise de la pollinisation.

Quant à la vaste étude internationale conduite par Lucas Garibaldi, de l'Université du Rio Negro en Argentine, qui a porté sur 600 champs de 41 cultures sur six continents, elle a notamment montré que les pollinisateurs sauvages sont environ deux fois plus efficaces que les abeilles domestiques : une augmentation des visites de pollinisateurs sauvages accroît la fructification (transformation de fleurs en fruits) deux fois plus que la même augmentation de visites d'abeilles domestiques. Ces dernières ne pourront donc pas compenser entièrement le déclin des pollinisateurs sauvages !

→ Maurice Mashaal

L. A. Burkle et al., L. A. Garibaldi et al., Science, en ligne le 28 février 2013

© Brian Maudsley/shutterstock.com

Les abeilles domestiques n'ont pas le monopole de la pollinisation, comme l'illustre ce syrphe (une mouche butineuse). Elles sont même globalement moins efficaces que les pollinisateurs sauvages.

Médecine

Protéine antidépigmentation

En réaction aux divers stress physiques ou émotionnels qu'il subit, l'organisme produit des protéines ayant parfois un effet délétère. L'une de ces protéines de stress, nommée HSP70 inductible, est notamment impliquée dans le vitiligo, une affection auto-immune qui se traduit par une dépigmentation de la peau, avec des taches blanches de formes et localisations aléatoires. Caroline Le Poole, à l'Université Loyola de Chicago, et ses collègues ont montré chez la souris qu'une version modifiée de la protéine HSP70i a un effet préventif et thérapeutique. Normalement, la protéine HSP70i active les cellules immunitaires responsables de la mort des cellules pigmentées de la peau. La protéine HSP70i modifiée se lie à ces cellules immunitaires et les désactive, ce qui bloque la réaction auto-immune.

→ M. M.

J. A. Mosenson et al., Science Translational Medicine, vol. 5, 174ra28, 2013

Biologie

Des archées dans la panse

Quelque 37 pour cent du méthane dégagé par les activités humaines proviennent… de la panse des vaches. L'équipe de Tim Urich, de l'Université de Vienne, y a découvert une nouvelle faune d'archées, des micro-organismes unicellulaires sans noyaux comparables aux bactéries. Il s'agit de thermoplasmatas, des archées qui ont la particularité de tirer leur énergie de la méthylamine et de ses dérivés, des substances organiques très concentrées dans les betteraves fourragères. Or les archées méthanogènes que l'on connaissait chez la vache consomment de l'hydrogène. Les stratégies visant à réduire le méthane issu de la panse bovine tendaient donc à réduire l'hydrogène disponible. La découverte des thermoplasmatas laisse imaginer de nouvelles voies pour réduire les émissions de méthane, un très puissant gaz à effet de serre.

→ F. S.

Nature Communications, en ligne le 5 février 2013

Climatologie

Le dioxyde de carbone, cause de la dernière déglaciation ?

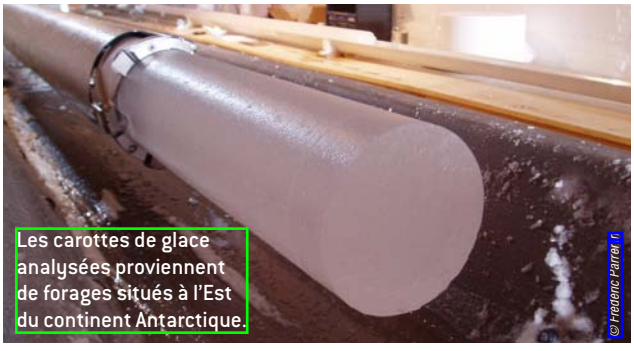
La dernière déglaciation s'est produite il y a 20 000 à 10 000 ans. Pour déterminer si le dioxyde de carbone (CO_2) atmosphérique était en cause, Frédéric Parrenin, de l'Université Joseph Fourier, à Grenoble, et ses collègues ont reconstitué les variations de sa concentration, en analysant grâce à une nouvelle méthode des carottes glaciaires prélevées dans l'Antarctique.

Les carottes de glace polaire nous renseignent sur les climats passés : la composition des bulles d'air piégées permet de déduire celle de l'atmosphère, tandis que la composition isotopique de la glace indique la température. Cependant, les bulles sont plus jeunes que la glace environnante, car elles contiennent de l'air ayant diffusé depuis la surface (dans les couches superficielles, la neige qui donnera la glace n'est pas assez dense pour le piéger).

Pour effectuer une datation relative des variations de température et de concentration en CO_2, les chercheurs ont déterminé la profondeur de piégeage de l'air. Pour ce faire, ils ont analysé la richesse des bulles en un isotope lourd de l'azote, d'autant plus élevée que la profondeur de piégeage est importante. Ils ont ainsi montré que la concentration atmosphérique en CO_2 a augmenté presque en même temps que la température lors de la dernière déglaciation, et expliquerait donc en partie le réchauffement.

→ G. J.

Science, en ligne le 1er mars 2013



Les carottes de glace analysées proviennent de forages situés à l'Est du continent Antarctique.

© Frédéric Parrenin

DERNIÈRE minute...

LES OISEAUX AVAIENT QUATRE AILES

L'équipe de Xiaoting Zheng, de l'Université de Linyi, en Chine, vient de décrire 11 spécimens remarquables d'oiseaux archaïques, des fossiles du Bas Crétacé : leurs membres postérieurs sont pourvus de plumes suffisamment développées pour que l'on suppose qu'il s'agissait d'ailes jouant un rôle dans le vol. Cette découverte laisse penser que les oiseaux avaient d'abord quatre ailes, puis qu'ils ont perdu les ailes postérieures au cours de l'évolution, sans doute en relation avec l'emploi de ces membres pour se déplacer au sol.

MICROCAPTEUR D'ACTIVITÉ CÉRÉBRALE

La mesure fine de l'activité du cerveau requiert des capteurs de petite taille, précis et n'entraînant pas d'inflammations. Une équipe dirigée par Christophe Bernard, de l'INSERM, a fabriqué un capteur en matériau organique épais de quelques micromètres et doté d'un système interne d'amplification du signal, puis l'a implanté sous le crâne de rats pour le tester. Avec succès : cet appareil se révèle plus biocompatible que des électrodes en métal et a un meilleur rapport signal sur bruit.

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

© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013

Regardez toujours plus loin avec

POUR LA SCIENCE

Offre liberté

19 € par trimestre

+ 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 2012 – Valeur : 9,90 €.

Pour la Science **12 n^{os}/an**

Dossier Pour la Science **4 n^{os}/an**

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 90382 • 75281 Paris cedex 06

1 ❑ **Oui, je m'abonne** à ***Pour la Science* + *Dossier Pour la Science*** au prix de **19 €/trimestre** ou 76 € pour 1 an.
En cadeau, je reçois **le CD *Einstein et les révolutions quantiques***. Je bénéficie également des versions numériques sur **www.pourlascience.fr**

Votre cadeau de bienvenue !

2 **J'indique mes coordonnées :**

Nom : _____ Prénom : _____

Adresse : _____

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

Je souhaite recevoir la newsletter *Pour la Science* à l'adresse e-mail suivante (à remplir en majuscule) :

_____@_____

3 **Je choisis mon mode de règlement :**

❑ Je règle en douceur **19 €/trimestre***. Je remplis la grille d'autorisation de prélèvement ci-dessous en joignant impérativement 1 RIB.
*Valable en France métropolitaine uniquement.

Autorisation de prélèvement automatique. J'autorise l'établissement teneur de mon compte à prélever le montant des avis de prélèvements trimestriels présentés par *Pour la Science*. Je vous demande de faire apparaître mes prélèvements sur mes relevés de compte habituels. Je m'adresserai directement à *Pour la Science* pour tout ce qui concerne le fonctionnement de mon abonnement.

Titulaire du compte à débiter

Nom, Prénom : _____

N° : _____ Rue : _____

CP : _____ Ville : _____

Établissement teneur du compte à débiter

Établissement : _____

N° : _____ Rue : _____

CP : _____ Ville : _____

Compte à débiter

Établissement | Code guichet | N° de compte | Clé RIB

Date et signature (obligatoire)

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

❑ Je préfère régler mon abonnement **en une seule fois 76 €** (+ frais de port en sus pour l'étranger : Europe 16 € - autres pays 35 €.)

❑ par chèque à l'ordre de Pour la Science ❑ par carte bancaire N° : _____

Expire fin : _____ Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB) : _____ Signature obligatoire :

PLS426 Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 30/04/13. Livraison du cadeau sous 5 semaines dans la limite des stocks disponibles.

En application de l'article 27 de la loi du 6 janvier 1978, les informations ci-contre sont indispensables au traitement de votre commande. Elles peuvent donner lieu à l'exercice du droit d'accès et de rectification auprès 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 ❑.

POINT DE VUE

Comment Internet fait le lit des croyances

Sur Internet, d'innombrables informations douteuses alimentent des inquiétudes non fondées et affaiblissent l'indispensable lien de confiance entre l'opinion publique et les scientifiques.

Gérald Bronner

Internet est un outil formidable, il représente à la fois une démocratisation du savoir et une possibilité d'expression inégalée dans l'histoire de l'humanité. Mais la massification de l'information qu'il entraîne (en 2005, l'humanité avait produit 150 exabits, soit 150×10^{18} bits, de données, ce qui est considérable ; en 2010, elle en a produit huit fois plus) et la possibilité donnée à tous d'intervenir sur le marché des idées dessinent les contours d'un dédale cognitif dans lequel beaucoup de nos contemporains prennent le risque de se perdre : où trouver l'information fiable ? Indépendamment des espoirs que cet outil suscite à juste titre, il est d'ores et déjà possible de déceler certains mécanismes qu'il autorise, plus favorables à la diffusion de croyances et d'idées douteuses qu'à celle de la connaissance.

La croissance exponentielle des informations disponibles permet notamment d'amplifier la tendance de tout « croyant » à chercher des données qui vont confirmer sa croyance plutôt qu'à prendre le risque de se confronter à la contradiction. On trouve souvent le moyen d'observer des faits qui ne sont pas incompatibles avec un énoncé douteux, mais cette démonstration n'a aucune valeur si l'on ne tient pas compte de la proportion, ni même de l'existence de ceux qui le contredisent. Quelqu'un croit-il à l'efficacité de l'homéopathie par exemple ? Grâce à n'importe quel moteur de recherche sur Internet et en quelques clics, il trouve des centaines de pages lui permettant d'affermir sa croyance. Ainsi, une étude menée en 2006 et publiée par Eric Lawrence et ses collègues de l'Université américaine George Washington a montré que 94 pour cent des internautes ne consultent que les blogs épousant leur sensibilité politique. En fait, cette disposition à la confirmation est très ancienne, mais Internet permet de l'amplifier. En effet, le mécanisme de recherche sélectif de l'information est rendu plus aisé par la massification de cette information : plus le nombre d'informations non validées sera important dans un espace social, plus la crédulité risque de se propager.

Mais qu'en est-il alors pour celui qui n'est pas croyant, qui n'a pas d'idée préconçue sur un sujet et souhaite se servir d'Internet pour en savoir plus ? Supposons qu'il utilise *Google* pour se renseigner sur des sujets de croyances divers : astrologie, télékinésie, monstre du Loch Ness, etc. Il découvrira que parmi les 30 premiers sites proposés par le moteur de recherche, plus de 80 pour cent défendent la croyance qui le préoccupe, si l'on ne retient que les sites qui prennent parti (pour ou contre). Pourquoi 30 sites ? Parce que 99 pour cent des internautes ne vont généralement pas au-delà quand ils font une recherche.

LES SCIENTIFIQUES ONT PEU D'INTÉRÊTS académiques ou personnels à consacrer beaucoup de temps à démonter les arguments des croyants.

Comment expliquer cette situation ? Il se trouve que les croyants sont généralement plus motivés que les non-croyants pour défendre leur point de vue et lui consacrer du temps. La croyance est partie prenante de l'identité du croyant, alors que le non-croyant est souvent dans une position d'indifférence : il refuse la croyance, mais sans avoir besoin d'une autre justification que la fragilité de l'énoncé qu'il révoque. Ce fait est d'ailleurs tangible sur les forums sur Internet où parfois croyants et non-croyants s'opposent. Parmi les *posts* proposés par ceux qui veulent défendre une croyance, 36 pour cent sont soutenus par un document, un lien ou une argumentation développée, alors que ce n'est le cas que dans 10 pour cent des *posts* de non-croyants. Les hommes de science en général n'ont pas beaucoup d'intérêts, ni académiques ni personnels, à consacrer du temps à cette concurrence ; la conséquence un peu paradoxale de cette situation, c'est que les croyants ont réussi à instaurer un oligopole cognitif sur Internet, mais aussi sur certains thèmes dans les médias traditionnels qui se font parfois les porte-parole de ces informations douteuses. Il s'agit alors, par exemple, des risques associés aux OGM ou aux ondes de basses fréquences.

Les thèmes concernés sur Internet sont multiples, ce média permettant une mutualisation des arguments de la croyance. Les mythes du complot, par exemple, étaient souvent colportés par le passé par le bouche à oreille, mode de communication ne permettant pas de constituer des argumentaires robustes. Aujourd'hui, au contraire, ces mythes peuvent s'affranchir de l'oralité et bénéficier d'une multitude de contributions qui s'agrègent et constituent des « mille-feuilles argumentatifs ». À la lecture, même superficielle, des sites conspirationnistes – qu'ils s'occupent de l'élucidation des attentats du 11 Septembre ou de la mort de Mickael Jackson –, on est frappé par l'ampleur de l'argumentation

© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013

développée et par la difficulté pour l'esprit non préparé de répondre rationnellement à cette masse de pseudopreuves.

Les modes de communication disponibles aujourd'hui apportent un soutien technique à tous ceux qui veulent rassembler des arguments pouvant paraître minuscules séparément et qui seraient facilement invalidés, mais qui, mutualisés, forment un corpus argumentatif qu'il devient coûteux, en temps et en énergie, de chercher à démonter. Si l'on ne retient, à titre d'exemple, que les mythes conspirationnistes prétendant que la version officielle des attentats du 11 Septembre est fausse, on trouve qu'ils revendiquent une centaine d'arguments différents !

On pourrait convoquer d'autres processus favorables à la diffusion d'idées douteuses tel le fait que la révolution du marché de l'information crée une pression concurrentielle qui place les médias classiques dans des positions délicates et réduit le temps de vérification de l'information. Cette temporalité, qui n'est pas celle de la science, autorise la mise en scène alarmante d'hypothèses concernant la santé publique ou l'environnement et nous conduit peu à peu à devenir des hypocondriaques permanents. Selon des données tirées d'une étude publiée en 2012 par l'Institut national du cancer et l'Institut national de prévention et d'éducation pour la santé, 64 pour cent des Français pensent, par exemple, qu'il est aussi dangereux de respirer l'air des villes que de fumer ! Certaines inquiétudes illégitimes progressent de façon spectaculaire. Ainsi, en 2005, 49 pour cent de Français déclaraient croire, contre les données scientifiques disponibles, que vivre à proximité d'une antenne relais augmente les risques de cancer, et ils étaient 69 pour cent en 2012...

Dans le bras de fer qui s'engage entre la démocratie des crédules et celle de la connaissance, Internet paraît souvent relayer les forces de la première plutôt que celles de la seconde. L'une des voies de réflexion pour sortir de cette situation fâcheuse serait d'examiner les façons dont l'expertise scientifique peut renouer des liens de confiance avec l'opinion publique. ■

Gérald BRONNER est professeur de sociologie à l'Université Paris-Diderot et membre de l'Institut universitaire de France.

La démocratie des crédules, PUF, 2013.

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

DÉVELOPPEMENT DURABLE

Réduire les émissions de particules : un enjeu climatique et sanitaire

Les particules en suspension dans l'air ont de multiples effets sur le climat et la santé. Un plan national vise à réduire leur concentration de 30 pour cent d'ici 2015.

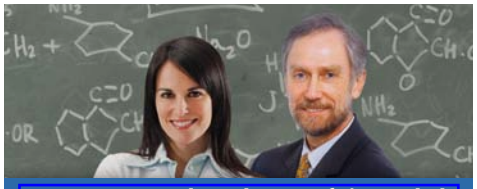
Gilles BERGAMETTI et Isabelle MOMAS

De nombreuses particules de taille micrométrique sont en suspension dans l'atmosphère. Solides ou liquides, elles y sont injectées par divers processus naturels (éruptions volcaniques, vents de sable, etc.) ou anthropiques. Ces derniers représentent 15 pour cent de la masse totale émise.

Quelque 40 pour cent des émissions anthropiques de particules dites fines (les PM2,5, pour *Particulate Matter*, de diamètre inférieur à 2,5 micromètres) sont d'origine domestique, dues en particulier au chauffage au bois. Les activités industrielles contribuent pour 25 pour cent à ces émissions, l'agriculture et les transports pour 15 pour cent chacun. Ces proportions varient beaucoup localement : en ville, la part des émissions dues aux transports est bien plus importante. Les particules émises sont variées : métaux (tels l'aluminium ou le mercure, issus des fonderies), suies, composés organiques divers... Certaines, notamment des sels de sulfate, se forment directement dans l'atmosphère, par transformation de précurseurs gazeux. Les particules restent peu de temps dans l'atmosphère, environ une semaine en moyenne, notamment à cause des pluies qui les lessivent.

Bien que minoritaires, les émissions anthropiques ont des effets importants sur le climat et la santé, en raison à la fois de la taille des particules (en moyenne plus petites que les particules naturelles) et de leur composition chimique. La plupart des particules réfléchissent vers l'espace une partie du rayonnement solaire et ont donc un effet refroidissant. Toutefois, certaines, notamment les suies, absorbent le rayonnement et réchauffent les couches atmosphériques où elles se trouvent. En outre, les particules influent parfois sur le nombre et la taille des gouttelettes nuageuses, dont elles modifient les propriétés optiques et la durée de vie.

© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013



Connectez-vous au service d'offres d'emplois scientifiques sur

POUR LA SCIENCE

en partenariat avec naturejobs

- Chaque semaine, plus de **8000 offres d'emploi dans le secteur des sciences.**
- En un clic **la sélection des postes à pourvoir en France** et dans les pays francophones ou voisins.
- Une équipe Naturejobs spécialisée, **au service des recruteurs francophones.**

Contact : Muriel Lestringuez
E-mail : m.lestringuez@nature.com
Tél. : +44 20 7843 4994

POUR LA SCIENCE .fr

Le site de référence de l'actualité scientifique

A l'échelle de la planète, les concentrations et les types de particules présentent d'importantes disparités spatiales et temporelles, ce qui complique l'analyse. Aussi, malgré les améliorations des modèles et les campagnes de mesure au sol ou par satellite des 20 dernières années, on connaît mal l'effet global des particules sur le climat.

L'impact sanitaire des particules dépend de leur taille et de leur composition chimique. Les plus grosses (les PM10, de diamètre inférieur à dix micromètres) sont retenues par les voies aériennes supérieures (nez, pharynx et larynx). En revanche, les plus fines (les PM2,5 et les PM1, de diamètre inférieur à 2,5 micromètres et 1 micromètre respectivement) pénètrent profondément dans les poumons. Ce sont donc les plus toxiques. Elles causent une inflammation et un stress oxydant, car elles contiennent des métaux et des molécules qui entraînent la formation d'espèces réactives de l'oxygène dans les cellules. Certaines sont aussi mutagènes et cancérogènes ; c'est le cas des particules émises par les moteurs diesels, que le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC), de l'Organisation mondiale de la santé, a classées en juin 2012 parmi les cancérogènes avérés.

LES PARTICULES ÉMISES par les moteurs diesels ont été classées en juin 2012 parmi les cancérogènes avérés.

Les études épidémiologiques confirment cet impact sanitaire. Elles montrent une association à court terme entre les concentrations ambiantes en PM10 ou PM2,5 et le nombre de décès cardio-pulmonaires, d'hospitalisations et d'admissions aux urgences. L'exposition aux particules exacerbe, voire déclenche, des asthmes et divers symptômes respiratoires.

La concentration de l'air en particules doit donc être à la fois suivie et anticipée. En France, on a notamment fixé un seuil d'information (à partir duquel des risques existent pour les personnes sensibles) et un seuil d'alerte : pour les PM10, ils sont respectivement de 50 et 80 microgrammes de particules par mètre cube en moyenne journalière. Le plus souvent, la concentration reste en dessous du seuil d'information, mais dans certains endroits (en particulier près du trafic routier), elle le dépasse jusqu'à 100 jours par an.

Qu'en est-il des prévisions ? Si les modèles de qualité de l'air sont assez fiables pour les polluants gazeux tels que l'ozone, ils restent à améliorer pour les particules. On doit notamment mieux quantifier les émissions et le lessivage par les pluies, et reproduire plus fidèlement la formation des aérosols organiques secondaires (formés dans l'atmosphère).

De nombreuses questions subsistent par ailleurs. Les mécanismes de toxicité ne sont pas complètement élucidés. La quantité de particules auxquelles nous sommes exposés et leurs effets à long terme doivent être précisés. Enfin, l'impact sanitaire des particules est à distinguer plus finement de celui des autres polluants dans le cas d'expositions multiples.

Face aux enjeux sanitaires et environnementaux, les pouvoirs publics français ont fait de la lutte contre les particules l'un des 12 objectifs phares du deuxième Plan national santé environnement. Deux grandes catégories de mesures sont envisagées. La première vise à améliorer, dans tous les secteurs, les procédés de combustion et de production, afin de les rendre moins polluants, ou à privilégier des procédés « propres » existants. Ainsi, pour le chauffage au bois, on préconise les foyers fermés (seulement connectés à l'extérieur par le conduit d'échappement), où la combustion est plus complète, de sorte que moins de particules sont émises. La seconde catégorie de mesures consiste à encourager les comportements écologiques, soit par l'information, soit en améliorant l'offre alternative : par exemple développer les transports en commun, diversifier les moyens de transport (vélos en libre-service, voitures électriques...). L'objectif est de réduire la concentration ambiante en particules de 30 pour cent d'ici 2015. ■

Gilles BERGAMETTI dirige le Laboratoire interuniversitaire des systèmes atmosphériques (LISA), UMR CNRS 7583, aux Universités Paris-Est Créteil et Paris Diderot. Isabelle MOMAS dirige le Département Santé publique et biostatistique à l'Université Paris Descartes.

© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013

FONDATION ÉCOLOGIE D'AVENIR

INSTITUT DE FRANCE

COLLOQUE

" ÉNERGIES RENOUVELABLES ET INTERMITTENCE: Quels défis ? Quelles solutions ? "

Sous la direction de **Pascal Colombani** et **Bernard Salha**

Informations, programme et inscription:
WWW.FONDATIONECOLOGIEDAVENIR.ORG

JEUDI 18 AVRIL 2013
15H-19H

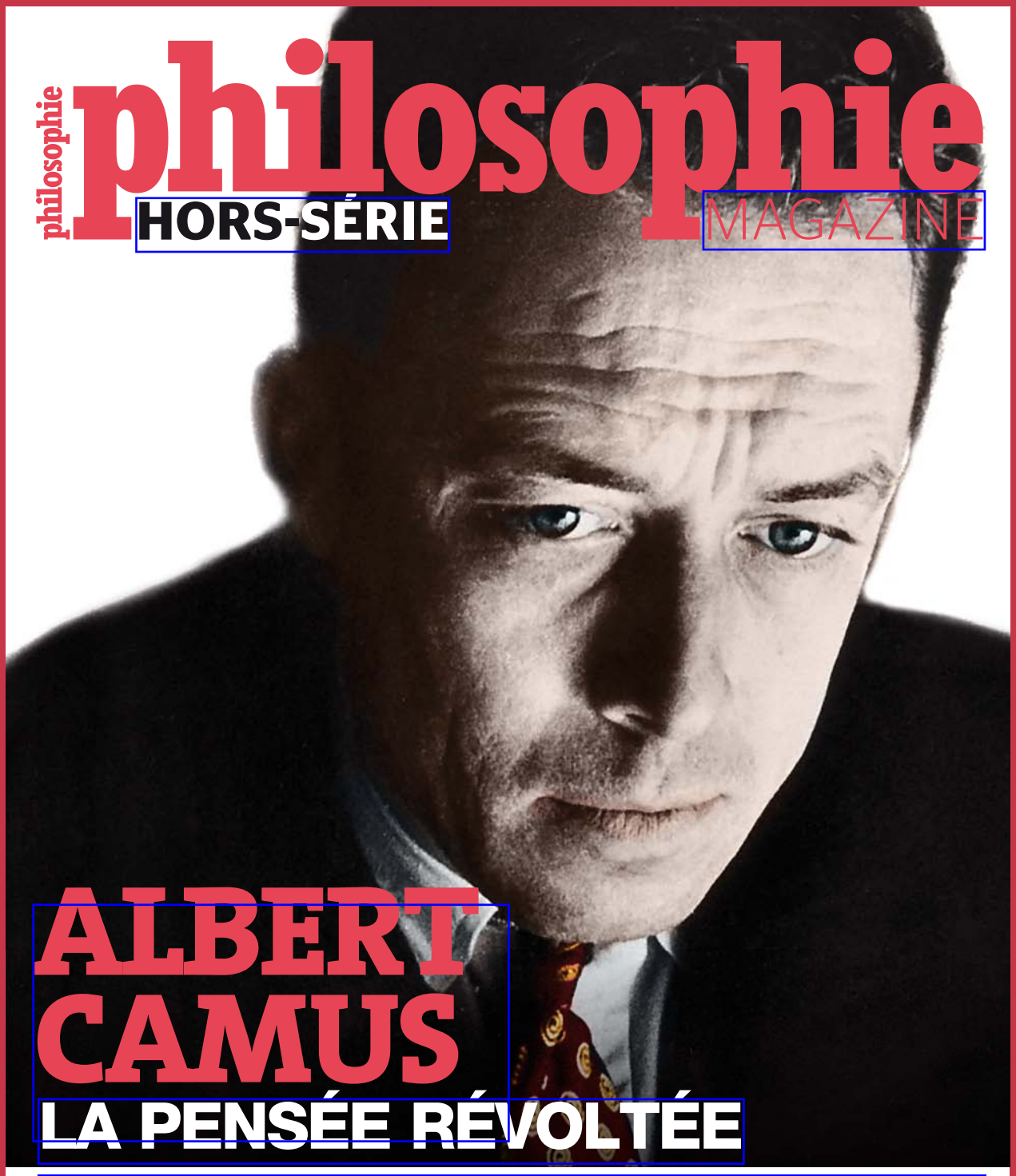
La Maison du Barreau
2 rue de Harlay – 75001 PARIS

ENTRÉE GRATUITE FONDATIONECOLOGIEDAVENIR.ORG
Réservation obligatoire - Places limitées

philosophie

philosophie MAGAZINE

HORS-SÉRIE



ALBERT CAMUS

LA PENSÉE RÉVOLTÉE

Les plus grandes pages de Camus commentées par les philosophes

Arendt : L'existentialisme • Comte-Sponville : l'absurde • Onfray : la révolte • Kertész : la leçon de vie • Finkielkraut : La pensée de midi • Worms : La querelle avec Sartre • Sansal : l'Algérie • Et... Barthes, Bataille, Diagne, Milosz, Rahimi, Grenier, Mattéi...

M 06296 - 17H - F: 7,90 € - RD

France: 7,90 € / Andorre: 7,90 € / Belgique-Luxembourg-Portugal: 8,90 € / Allemagne: 9,20 € / Suisse: 14,90 FS Canada: 13,25 $CAN / COM: 1100 XPF / DOM: 8,90 € / Maroc: 90 DH

En vente chez votre marchand de journaux ou sur www.philomag.com

VRAI OU FAUX

Tous les animaux dorment-ils ?

Oui. Divers critères physiologiques et comportementaux ont permis d'identifier des phases de sommeil chez toutes les espèces étudiées.

Irene Tobler-Borbély

© Kirilleva Ekaterina/shutterstock.com

Comment reconnaître le sommeil chez les animaux ? Par les yeux fermés ? Les bébés humains dorment parfois les yeux ouverts, et les poissons et les insectes n'ont pas de paupières. Par une position allongée ? Les chevaux, les girafes et les éléphants peuvent – littéralement – dormir debout, même si leur sommeil est alors moins profond. Pour distinguer le sommeil de la veille et déterminer si tous les animaux dorment, on définit donc d'autres critères.

On mesure notamment les activités cérébrale et musculaire, ainsi que les mouvements des yeux. Ces paramètres étant très fluctuants même chez un sujet endormi, on ne définit pas un mais plusieurs états caractéristiques du sommeil. Chez l'homme, on distingue deux stades, qui se succèdent : le second comporte des mouvements oculaires rapides (on parle de sommeil REM, pour *Rapid Eye Movement*), un comportement absent du premier stade (dit non-REM ou sommeil lent, et subdivisé en trois). Le neurobiologiste français Michel Jouvet a qualifié le stade REM de sommeil paradoxal, car les ondes cérébrales ressemblent à celles mesurées chez un sujet éveillé et car l'activité musculaire est nulle, à l'exception de contractions dans les extrémités (doigts, visage…) et des mouvements oculaires.

Outre ces paramètres physiologiques, divers critères comportementaux permettent de reconnaître le sommeil. Le plus évident est une quasi-immobilité, réversible par l'application d'un stimulus adéquat (telle une lampe de poche braquée sur l'animal), en général dans un site de couchage (nid, grotte, arbre, fond sableux) et dans une position spécifique. En outre, un animal endormi répond peu aux stimulus externes et est plus difficile à perturber que lorsqu'il est dans une phase d'éveil calme.

Les insectes dorment aussi

Quels sont alors les animaux qui dorment ? Sur la base des critères comportementaux, le sommeil a été identifié chez toutes les espèces étudiées. Celles-ci comprennent de nombreux vertébrés (mammifères, oiseaux, reptiles, amphibiens et poissons), mais aussi des invertébrés, tels les scorpions, les écrevisses, les cafards, les mouches et le nématode *Caenorhabditis elegans* (un petit ver).

L'existence du sommeil a été confirmée par les critères physiologiques chez de nombreux mammifères et oiseaux. La quasi-totalité d'entre eux dorment par cycles, successifs ou séparés. Chacun est composé d'un stade non-REM, suivi d'un stade REM. Parmi les mammifères, seuls les dauphins n'ont pas de sommeil REM. Comment s'en passent-ils ? On l'ignore, de même qu'on ignore la fonction de ce type de sommeil. En outre, lorsqu'ils sont dans leur phase de sommeil la plus profonde, les dauphins ont un hémisphère cérébral endormi et l'autre éveillé, sans doute pour maintenir leur orifice respiratoire à la surface.

Chez les oiseaux, le sommeil REM est bien plus court que chez les mammifères : une minute par cycle environ, tandis qu'il dure jusqu'à 20 minutes chez les humains. Certains oiseaux migrateurs peuvent peut-être dormir lorsqu'ils planent en altitude, mais on manque d'outils adaptés pour le confirmer. Globalement, la quantité de sommeil est très variable selon les espèces, les saisons et les conditions d'observation.

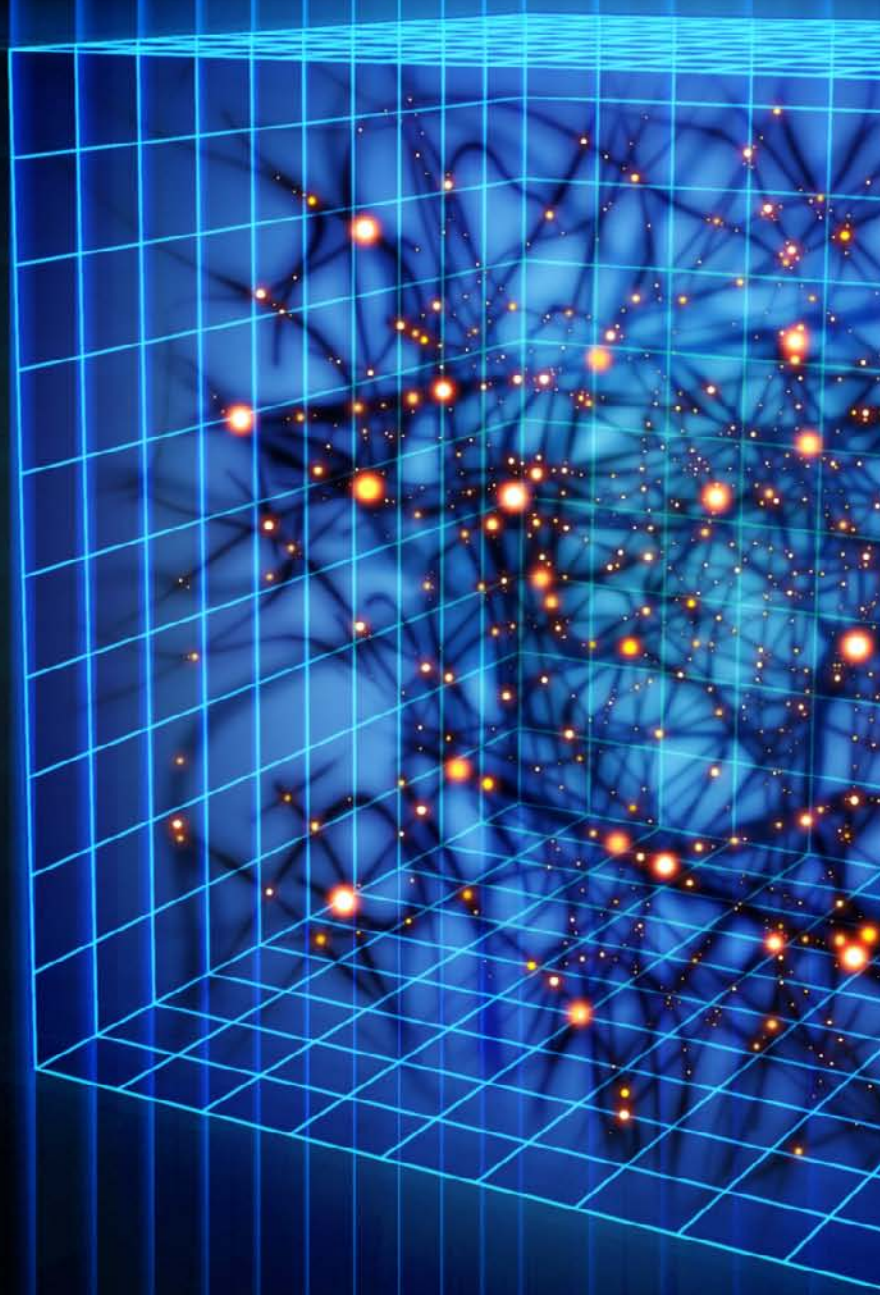
Des différences d'activité cérébrale correspondant à un état endormi et un état éveillé apparaissent aussi chez les reptiles, mais on n'observe pas plusieurs stades de sommeil. Chez les amphibiens et les poissons, on manque d'études de ce type. Chez les invertébrés, seules les activités cérébrales de l'écrevisse et de la drosophile ont été étudiées : là encore, on observe un état endormi, différent d'un état éveillé.

La drosophile est d'ailleurs un invertébré modèle précieux pour l'étude du sommeil. Elle a déjà permis de clarifier certains mécanismes physiologiques en jeu. À l'instar des mammifères, elle est sensible aux substances hypnotiques (utilisées pour endormir le sujet lors d'une anesthésie générale) et à la caféine.

Il semble donc que tous les animaux dorment. Toutefois, il y a plus de sept millions d'espèces sur la planète et le sommeil n'a été étudié que sur environ 240 d'entre elles ; cette affirmation est donc à prendre avec prudence. Il serait intéressant d'identifier l'espèce la plus ancienne et la plus primitive qui dorme, ainsi que des espèces qui ne dorment pas : elles fourniraient peut-être des indices sur la fonction du sommeil, encore mal connue. ■

Irene TOBLER-BORBÉLY est chercheuse à l'Institut de pharmacologie et de toxicologie à l'Université de Zurich, en Suisse.

Les étoiles des astres venus



Les premières étoiles de l'Univers, gigantesques et très lumineuses, puisaient peut-être leur énergie dans l'annihilation de particules de matière noire.

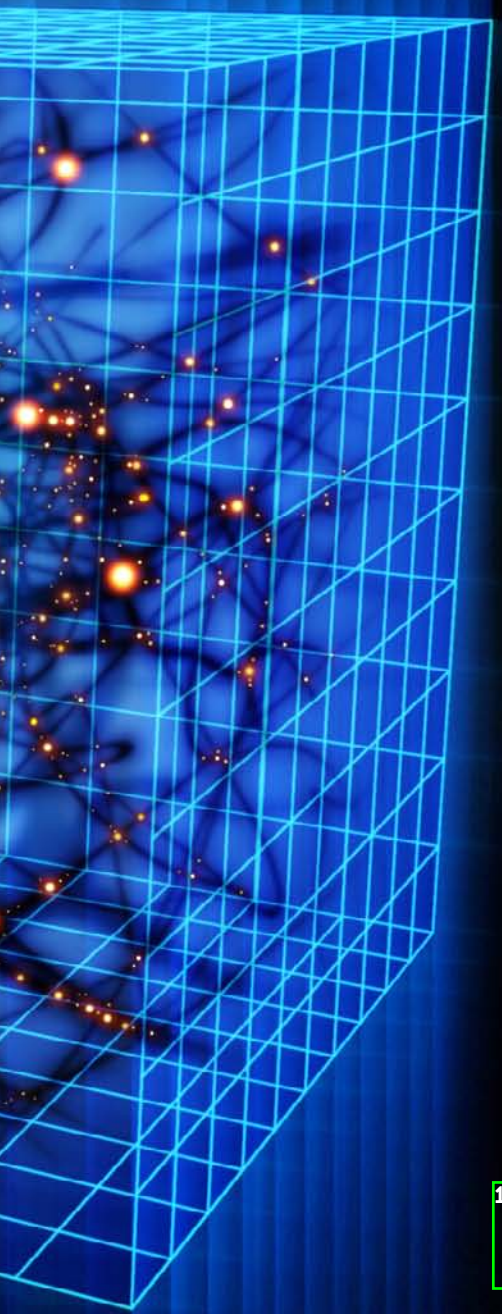
K. Freese, P. Gondolo et P. Salati

Le Soleil et toutes les autres étoiles visibles sont constitués des restes de gaz et de poussière de plusieurs générations d'étoiles. Les astrophysiciens commencent à bien comprendre les mécanismes à l'œuvre dans l'évolution de ces astres. Mais faute d'informations, la première génération d'étoiles reste mal connue. À quoi ressemblait-elle ? Comment s'est-elle formée ? Fonctionnait-elle sur les mêmes principes physiques que les étoiles actuelles ?

Les premières étoiles n'ont jamais été observées. Néanmoins, certains modèles les décrivent comme étant bien plus massives et lumineuses que les astres actuels. En outre, leur source d'énergie pourrait avoir été très différente. Les étoiles classiques ne sont constituées que de matière ordinaire et leur énergie provient de la fusion de noyaux atomiques. En revanche, la vie des premières étoiles aurait été intimement liée non seulement à la matière ordinaire, mais aussi à la matière noire. Cette composante de l'Univers, dont la nature reste aujourd'hui inconnue, a probablement eu un rôle actif dans la naissance des premières étoiles. Elle a permis, par des effets gravitationnels, d'accumuler de gigantesques quantités de gaz pour former les étoiles *(voir la figure 1)*. Mais, plus surprenant, la matière

© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013

noires
du fond des âges



© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013

L'ESSENTIEL

- La première génération d'étoiles s'est formée au sein des halos de matière noire entre 50 et 500 millions d'années après le Big Bang.
- Ces astres sont plus grands et plus lumineux que les étoiles ordinaires.
- Ils puisent leur énergie dans l'annihilation de neutralinos, particules hypothétiques qui composent la matière noire.
- Une nouvelle génération de télescopes permettrait de les observer directement, grâce au phénomène de lentille gravitationnelle.

© Monique Spaul, Caltech/Kenn Brown

1. DANS L'UNIVERS PRIMORDIAL, la matière noire est regroupée en filaments et en halos au sein desquels se sont constituées les premières étoiles.

noire aurait servi de source d'énergie à ces étoiles primordiales, que l'on peut ainsi qualifier d'étoiles noires.

La première génération d'étoiles aurait donc connu une évolution stellaire atypique et très différente de celle des étoiles actuelles. Comprendre le fonctionnement des étoiles noires permettrait de compléter la vision que les astrophysiciens ont de la vie des étoiles depuis leur toute première génération.

Le modèle que nous avons proposé en 2007 et que nous décrivons ici rend compte de l'évolution des étoiles noires : comment elles sont nées, comment elles sont devenues lumineuses grâce à l'annihilation de matière noire et comment elles sont mortes. Ces travaux restent à confirmer par des observations. Cette tâche est complexe en raison de l'éloignement temporel des étoiles noires : elles ont disparu il y a 13 milliards d'années et la lumière qui nous en parvient aujourd'hui est très atténuée, quasi indétectable.

En outre, la matière noire constitue une énigme supplémentaire. Les particules qui la composent restent à identifier. Toutefois, comme nous le verrons par la suite, les caractéristiques générales de la matière noire permettent de concevoir toute l'évolution de ces étoiles, depuis leur formation jusqu'à leur fin. Enfin, ces modèles d'étoiles noires laissent entrevoir quelques espoirs d'en observer la trace grâce à une future génération de télescopes spatiaux.

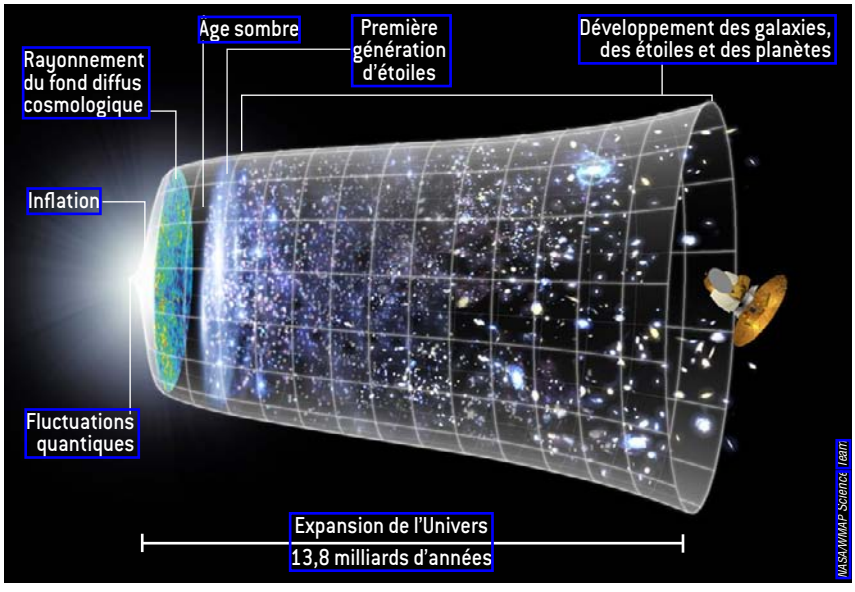
La fin de l'âge sombre

La première génération d'étoiles s'est formée alors que l'Univers était âgé de 50 à 500 millions d'années. Leur naissance a mis fin à ce qu'on nomme l'« âge sombre », qui a succédé à un phénomène crucial pour la cosmologie moderne, la « recombinaison ». Dans le cadre du modèle du Big Bang *(voir la figure 2)*, l'Univers est en expansion et sa température ne cesse de décroître. Il a connu différentes phases. Vers 375 000 ans, il s'était suffisamment refroidi – à environ 3 000 degrés (en kelvins) – pour que les électrons et les noyaux aient pu s'associer et former un gaz électriquement neutre d'atomes d'hydrogène et d'hélium : c'est la recombinaison. La lumière, qui interagissait fortement avec le plasma chargé, a pu alors s'échapper et s'est propagée dans l'espace jusqu'à aujourd'hui, près de 13,8 milliards d'années plus tard. Ce rayonnement, dit du fond diffus cosmologique, est une mine

d'informations sur la structure de l'Univers, sa géométrie et sa composition, en particulier les proportions de matière ordinaire et de matière noire. Les cosmologistes étudient ce rayonnement aujourd'hui grâce à des sondes spatiales telles que WMAP, lancée en 2001 par l'Agence spatiale américaine, ou *Planck*, mise en orbite en 2005 par l'Agence spatiale européenne.

Avec la recombinaison, l'Univers, rempli de gaz froid et sans source de lumière, est entré dans l'âge sombre. Un observateur de cette période n'aurait vu aucune lumière dans le spectre visible et aurait été plongé dans l'obscurité. Cette période a pris fin lorsque les premières étoiles se sont embrasées, entre 50 et 500 millions d'années après la naissance de l'Univers. La condensation du gaz primordial d'hydrogène et d'hélium en nuages protostellaires a conduit à l'apparition des premiers objets lumineux, dont l'intense émission dans l'ultraviolet a ionisé les atomes du milieu intergalactique. Les mesures de la sonde WMAP indiquent que cette réionisation s'est achevée vers 480 millions d'années.

Les premières étoiles, également qualifiées de population III (elles se distinguent des étoiles actuelles de population II, pauvres en métaux, et des étoiles de population I, riches en métaux car plus récentes), ont dû apparaître relativement tôt au cours de l'âge sombre pour provoquer la réionisation.



2. LE MODÈLE DU BIG BANG DÉCRIT L'ÉVOLUTION DE L'UNIVERS. L'âge sombre est une période dépourvue de source de lumière qui débute vers 380 000 ans, après la recombinaison des noyaux et des électrons et l'émission du rayonnement du fond diffus cosmologique. Il s'achève avec la naissance des premières étoiles, 50 à 500 millions d'années plus tard.

LES AUTEURS

Katherine FREESE est professeur de physique à l'Université du Michigan, aux États-Unis, et directrice adjointe du Centre de physique théorique du Michigan.

Paolo GONDOLO est professeur de physique et directeur de l'Institut d'astrophysique de haute énergie à l'Université de l'Utah, aux États-Unis.

Pierre SALATI est professeur à l'Université de Savoie et au Laboratoire de physique théorique d'Annecy-le-Vieux.

En général, les étoiles se forment par effondrement gravitationnel des nuages de gaz. Mais le processus est trop lent pour que le gaz se soit condensé seul et efficacement avant la réionisation. La solution a été de supposer que l'Univers recélait une autre composante susceptible d'aider la matière à s'agglomérer. Il s'agit d'un type différent de matière capable de constituer des zones denses, sous forme de mini-halos, avant même la recombinaison, et soumis à ses propres effets gravitationnels. Ces mini-halos auraient grandi et formé par la suite des pièges pour la matière ordinaire, où seraient apparus les premiers objets stellaires.

Indispensable matière noire

La matière noire est la clef du mécanisme d'effondrement des nuages de gaz. D'après les observations de la sonde WMAP, la matière ordinaire ne représentait que 15 pour cent de la composition de l'Univers au cours de l'âge sombre. Le reste était sous forme de matière noire.

Ce type de matière a été imaginé en 1933 par l'astronome suisse Fritz Zwicky lors de ses travaux sur l'amas de Coma. Distant d'environ 150 millions d'années-lumière, l'amas de Coma contient des milliers de grosses galaxies de taille comparable à la Voie lactée. Zwicky a mesuré les vitesses des galaxies au sein de l'amas et en a déduit la force de gravitation, donc la masse totale de l'amas, à l'origine de cette dynamique.

Le résultat de son calcul était 200 fois supérieur à ce que laissait supposer le recensement du contenu en matière de l'amas à partir de sa luminosité. Tel un gigantesque iceberg, l'amas de Coma ne laissait apparaître qu'une infime fraction de sa masse, l'essentiel étant obscur. Depuis 1933, de nombreuses observations ont révélé la présence de matière noire à toutes les échelles, aussi bien au sein des galaxies que dans l'Univers dans son ensemble.

La matière noire est constituée de particules de nature inconnue. Les physiciens et les cosmologistes ont cependant tracé les grandes lignes de leurs propriétés : ces particules sont électriquement neutres, interagissent peu avec la matière ordinaire, et ont été produites en abondance dans l'Univers primordial.

Contrairement au gaz de baryons (constituants de la matière ordinaire tels que les protons et les neutrons), la matière noire a formé des structures dès les premiers instants

© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013

LE NEUTRALINO, UN BON CANDIDAT POUR LA MATIÈRE NOIRE

Le neutralino est l'une des nombreuses particules introduites par la supersymétrie, une des extensions possibles du modèle standard de la physique des particules. Ses propriétés ne sont connues que dans les grandes lignes. L'une des missions du Grand Collisionneur de hadrons (le LHC) du CERN à Genève est de déterminer si la supersymétrie existe et de préciser les caractéristiques du neutralino.

Ce dernier, 10 à 1 000 fois plus massif que le proton, est électriquement neutre et n'interagit que faiblement avec son environnement. Dans de nombreux scénarios supersymétriques, le neutralino est stable, ce qui en fait un bon candidat pour la matière noire.

Les physiciens espèrent le détecter grâce à différents types d'observations. Il peut, avec une faible probabilité, interagir avec un noyau d'un détecteur terrestre et y laisser une trace ténue de son passage. De nombreuses expériences de détection directe tentent d'observer de tels événements dans des laboratoires souterrains à l'abri du rayonnement cosmique et bien protégés de la radioactivité, qui masquerait son signal.

Par ailleurs, deux neutralinos peuvent s'annihiler, le neutralino étant sa propre antiparticule. Ainsi, lorsque deux de ces particules se rencontrent, il y a une forte probabilité qu'elles s'autodétruisent en émettant deux photons ou d'autres particules. Ce phénomène assure que cette particule existe dans des proportions compatibles avec l'existence de la matière noire. Dans l'Univers primordial, les neutralinos étaient en équilibre avec le milieu dense et chaud : ils s'annihilaient sans cesse, mais étaient aussitôt régénérés à partir du plasma environnant. Celui-ci finit cependant par se refroidir et l'annihilation l'emporta. Les neutralinos disparurent en grande partie, mais pas complètement. Lorsqu'ils étaient devenus trop rares, ils ne se rencontraient plus que de façon sporadique et l'annihilation finit par cesser. Cela intervint lorsque l'Univers n'était âgé que de quelques milliardièmes de seconde.

L'expérience HESS-II recherche des signes d'annihilation de matière noire.

Les neutralinos restants formèrent la matière noire. Leur densité dépend de la probabilité d'annihilation – on parle de « section efficace d'annihilation ». Plus l'annihilation est fréquente, moins il reste de particules. La densité de matière noire mesurée par WMAP indique que la section efficace d'annihilation des neutralinos est de l'ordre du picobarn (soit 10^{-36} centimètre carré), une valeur comparable aux prévisions des théories supersymétriques.

Cette annihilation continue à se produire lentement aujourd'hui dans des régions qui présentent une forte densité de matière noire, car plus la densité est élevée, plus la rencontre de deux neutralinos est probable. Le halo de matière noire qui enserre la Voie lactée est un lieu possible d'annihilations. Ces dernières produisent notamment des particules d'antimatière et des photons de haute énergie, que les expériences dites de détection indirecte tentent d'observer.

de l'Univers. Cette différence de comportement provient de l'interaction des baryons avec les photons de haute énergie dans le plasma primordial. Les photons ont maintenu une distribution homogène des baryons et ont empêché la formation de régions plus denses que d'autres. Les particules de matière noire ne subissent d'inter-action de ce type, mais, étant sensibles à l'interaction gravitationnelle, elles ont formé des petits « halos » d'une masse équivalente à celle de la Terre.

Ces structures ont fusionné ensuite pour devenir des halos un million de fois plus massifs que le Soleil. Pendant l'âge sombre, ces halos ont constitué des zones de fort champ gravitationnel qui ont piégé et accumulé de grandes quantités de matière baryonique. Le gaz, en particulier de l'hydrogène moléculaire qui se refroidit rapidement et permet la condensation du gaz, est tombé au centre des halos et a formé les étoiles de population III dont la masse atteignit une centaine de masses solaires.

Dans le schéma classique des étoiles primordiales, la source d'énergie stellaire provient essentiellement des réactions thermonucléaires de la « chaîne proton-proton », chaîne de réactions partant uniquement de la fusion de l'hydrogène. Les étoiles primordiales avaient un cœur nucléaire plus chaud que celui des étoiles actuelles et brillaient avec une luminosité plus d'un million de fois supérieure à celle du Soleil. Leur température de surface étant de l'ordre de 100 000 degrés, elles ont émis un intense rayonnement ultraviolet qui a réionisé le gaz alentour, a détruit l'hydrogène moléculaire et a bloqué ainsi toute condensation ultérieure.

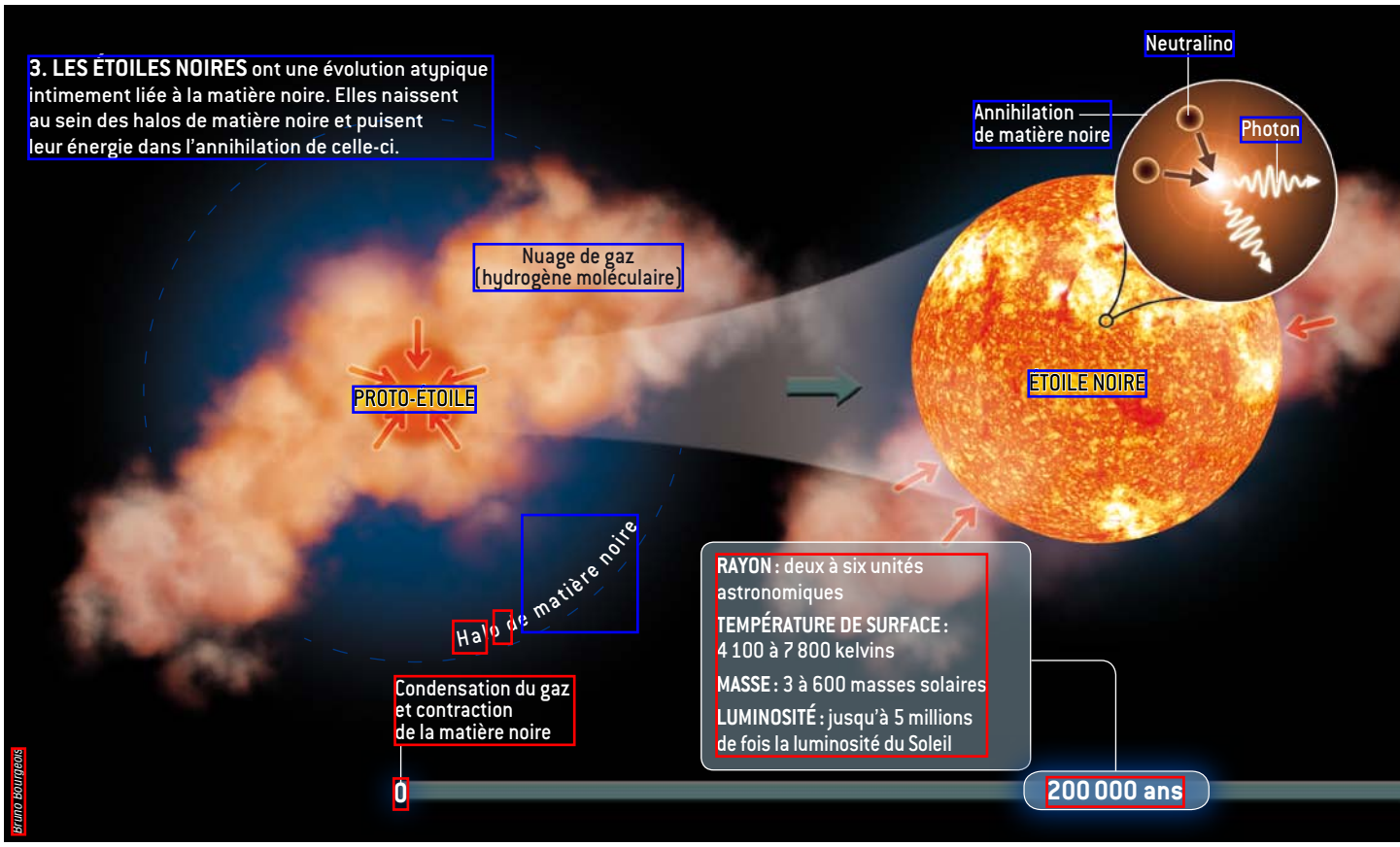
Annihilation de neutralinos

La matière noire a longtemps été considérée comme un acteur secondaire de la genèse des étoiles primordiales. Son seul rôle était d'avoir fourni, pendant l'âge sombre, des sites où le gaz stellaire s'était condensé. Ce point de vue a radicalement changé en 2007, quand on s'est rendu compte que la matière noire a peut-être servi de source de chaleur à une partie des étoiles de population III.

Pour comprendre ce scénario, il faut s'intéresser à une particule qui apparaît naturellement dans des extensions théoriques du modèle standard de la physique des particules : le neutralino *(voir l'encadré ci-dessus)*. Cette particule a toutes les propriétés requises pour constituer la matière noire : elle interagit faiblement avec la matière ordinaire et serait produite dans des quantités suffisantes pour reproduire les effets cosmologiques de la matière noire.

Une autre propriété du neutralino est d'être sa propre antiparticule. Ainsi, lorsque deux neutralinos se rencontrent, ils peuvent s'annihiler en produisant des particules ordinaires, tels des photons. La probabilité d'annihilation est plus élevée dans les régions riches en neutralinos, où les collisions sont plus nombreuses. Au cœur des étoiles de population III, l'annihilation de matière noire peut avoir servi de source d'énergie et de chaleur. Nous avons étudié le phénomène d'annihilation de neutralinos dans les étoiles primordiales et avons montré que l'évolution de ces étoiles diffère du scénario classique.

L'idée que la matière noire a eu des effets sur l'évolution des étoiles remonte à 1978. Gary Steigman et ses collègues, aux États-Unis, ont montré que si des neutralinos sont présents en grand nombre au centre d'une étoile, ils sont capables de transporter la chaleur du cœur vers la périphérie de l'astre. En 1985, Bill Press et David Spergel ont utilisé ce modèle pour expliquer le problème des neutrinos solaires. Ces particules avaient été imaginées par le physicien autrichien Wolfgang



Pauli en 1930 pour assurer la conservation de l'énergie dans la radioactivité bêta. Leur existence a été confirmée en 1956. Dans les années 1960, l'Américain Raymond Davis a mesuré le flux de neutrinos provenant du Soleil. Le résultat était trois fois inférieur à celui prévu par John Bahcall, théoricien à Princeton. Ce dernier avait calculé le flux de neutrinos solaires à partir de l'analyse des réactions thermonucléaires qui produisent des neutrinos au sein de l'étoile.

B. Press et D. Spergel ont expliqué le déficit observé par Davis en invoquant les neutralinos, qui emportent une partie de l'énergie du cœur de l'étoile. Ce processus diminue la température du cœur, réduit le nombre de réactions thermonucléaires et, par conséquent, le flux de neutrinos. Cependant, ce modèle se heurtait à une autre contrainte soulignée par l'un de nous (K. Freese) : comme les neutralinos s'annihilent entre eux, ils ne réduiraient pas assez le flux de neutrinos.

L'hypothèse des neutralinos pour résoudre le problème des neutrinos solaires est aujourd'hui obsolète. On sait désormais que les neutrinos, qui existent sous trois types, peuvent passer d'un type à l'autre, phénomène nommé oscillation. Le résultat de Davis s'explique par la transmutation partielle des neutrinos de type électronique en une autre espèce de neutrinos au cours de leur voyage du Soleil à la Terre.

Néanmoins, l'idée que la matière noire pouvait altérer les scénarios standards d'évolution stellaire a inspiré de nombreux travaux. En 1989, l'un de nous (P. Salati) et Joseph Silk, de l'Université de Berkeley, ont établi que certaines étoiles immergées dans une région où la matière noire est dense – par exemple au centre des galaxies – produiraient tellement d'énergie qu'elles gonfleraient et deviendraient des géantes rouges.

Cependant, toutes ces analyses reposaient sur des probabilités relativement élevées de collision entre un neutralino et un noyau au cœur de l'étoile. Or, aujourd'hui, les expériences dites de détection directe, qui cherchent précisément ce type de collisions sur Terre, excluent les valeurs de probabilités d'interaction nécessaires. Autrement dit, les effets stellaires des neutralinos semblaient si négligeables que le sujet est tombé en désuétude pendant une vingtaine d'années. Toutefois, deux d'entre nous (K. Freese et P. Gondolo) et Douglas Spolyar, de l'Université de Santa Cruz, le réexaminèrent en 2007 sous un jour nouveau.

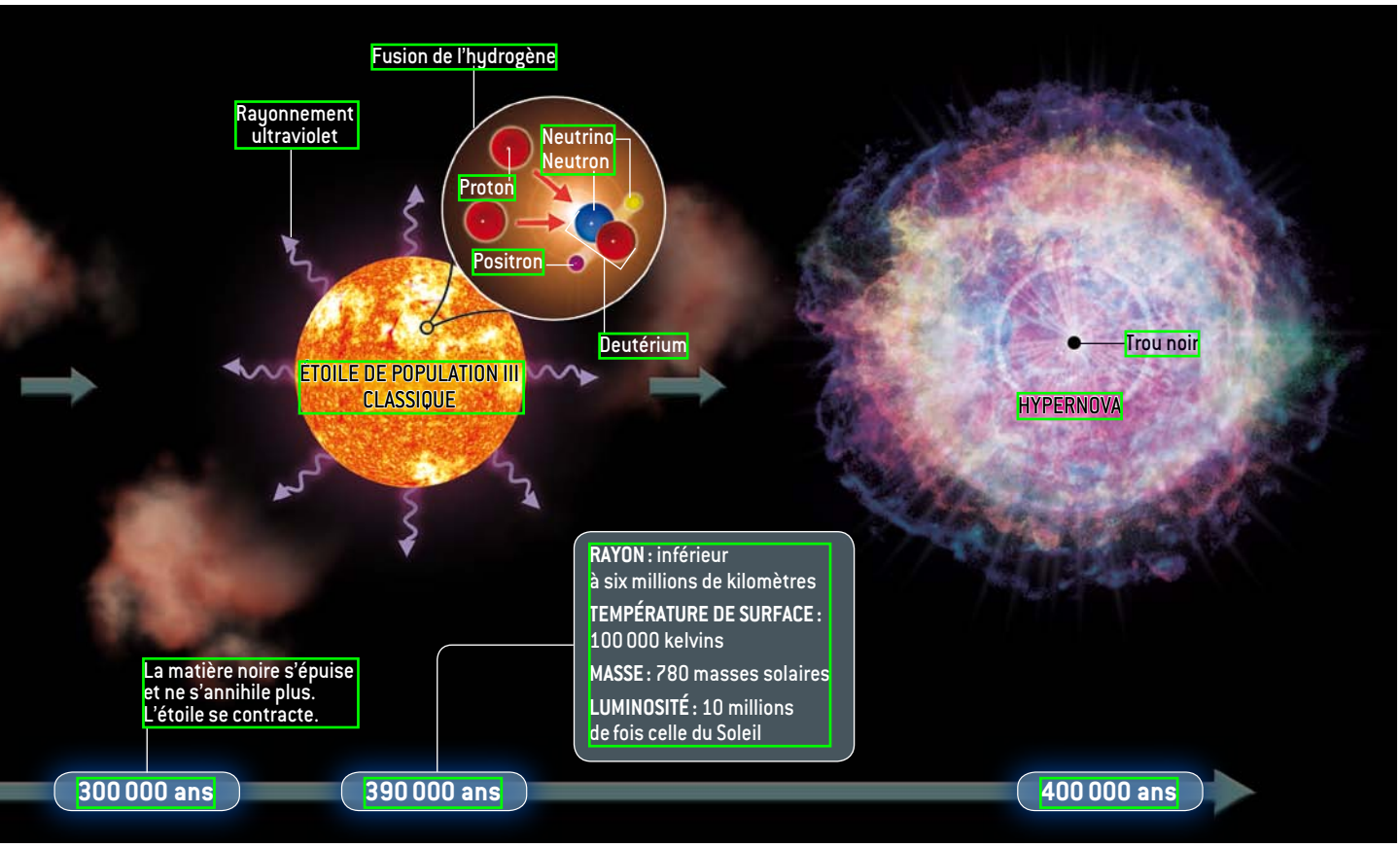
L'idée était d'étudier des régions susceptibles d'héberger des étoiles et où la densité de matière noire est forte. La piste que nous avons explorée a été de regarder dans le passé, lorsque la densité de l'Univers, donc la concentration de matières baryonique et noire, était plus élevée qu'aujourd'hui.

Des germes pour les premières étoiles

À la fin de l'âge sombre, la densité moyenne de la matière noire était 8 000 fois plus élevée. Les premières structures formées par la matière noire étaient des halos 200 fois plus denses encore, ayant une masse d'un million de fois celle du Soleil et un rayon de l'ordre de 300 années-lumière. Un tel halo offrit un site privilégié pour la formation des premières étoiles, le gaz de matière baryonique environnant y étant fortement attiré.

Les calculs hydrodynamiques effectués en 2001 par Tom Abel, au Centre d'astrophysique Harvard-Smithsonian aux États-Unis, et ses collègues, montrèrent qu'au centre d'un tel nuage de gaz froid, un cœur d'une centaine de masses solaires a commencé à se condenser, entraînant dans sa chute une partie du reste du nuage. La remarque

© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013



cruciale que nous avons faite en 2007 est que la condensation du gaz, déclenchée par la matière noire, a agi à son tour sur cette dernière. À mesure que le cœur protostellaire se formait, le champ gravitationnel central est devenu plus intense et a attiré progressivement les neutralinos vers l'intérieur, pendant que la masse du cœur augmentait.

Ce processus est la clef de l'existence des étoiles noires. Il repose sur la dynamique gravitationnelle de Newton et ne présuppose rien des propriétés intrinsèques de la matière noire. Il est possible d'obtenir un cœur de proto-étoile riche en matière noire à condition que la contraction soit adiabatique, c'est-à-dire suffisamment lente pour que les neutralinos réagissent de façon appropriée aux modifications du champ gravitationnel (la contraction adiabatique est bien vérifiée dans les simulations numériques). Si le gaz se condensait trop rapidement, des trajectoires initialement circulaires deviendraient elliptiques. La densification de la matière noire serait moins efficace, car les particules passeraient une partie de leur temps très loin du centre de la proto-étoile.

À ce stade, le cœur de la proto-étoile serait devenu riche en matière baryonique et en matière noire. La production d'énergie se serait amorcée. Dans le scénario classique de l'évolution d'une étoile, il s'agit de réactions de fusion thermonucléaire. Dans le cas des étoiles noires, c'est l'annihilation des neutralinos qui est à l'œuvre. Un tiers de l'énergie produite aurait été emportée par des neutrinos qui se sont échappés de l'étoile. Le reste se serait partagé entre photons, électrons et positrons qui ont produit de nouvelles particules et ont perdu progressivement leur énergie au sein du gaz, suffisamment dense pour les arrêter. Cette énergie aurait constitué une source de chaleur pour l'étoile en formation.

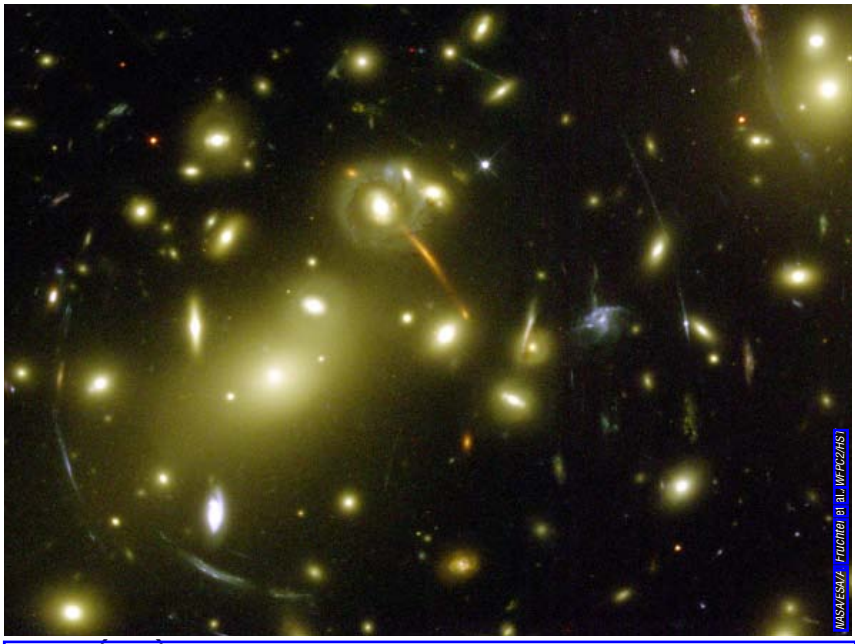
Une étoile noire est née

L'importante densité en neutralinos s'est traduite par une forte production d'énergie, qui a maintenu la température de l'étoile autour de 1 000 kelvins, la luminosité de l'astre étant équivalente à 140 fois celle du Soleil. Le cœur a cessé alors de se condenser. Il s'est alors comporté comme un objet stellaire qui rayonne, mais dont la particularité était que l'énergie provenait de l'annihilation des neutralinos. Une étoile noire venait de naître – noire non pas parce qu'elle ne brillait pas, bien au contraire, mais parce que sa source d'énergie était de la matière noire.

Pendant une grande part de sa vie, l'étoile a accumulé de la matière, ordinaire et noire, tandis que se poursuivait l'annihilation de neutralinos jusqu'à leur épuisement dans l'environnement de l'astre. Il est cependant possible de distinguer plusieurs étapes dans cette évolution.

Au début, la proto-étoile s'est contractée sous l'influence gravitationnelle de la matière. Lorsque l'annihilation est devenue importante, la pression de radiation exercée par la lumière a ralenti cette contraction. Le gaz environnant a continué de tomber vers l'astre à un rythme qui a évolué d'un centième à un millième de masse solaire par an au cours de la vie de l'astre.

Sous cette pluie d'hydrogène, l'objet est devenu plus lourd et la contraction a repris peu à peu. Après 100 ans, il avait une masse égale à trois fois celle du Soleil et un rayon de deux unités astronomiques. Sa luminosité était égale à 45 000 fois celle du Soleil et sa température de surface atteignait 4 100 kelvins. L'astre fonctionnait comme une étoile en équilibre thermique et hydrostatique. Ce stade est considéré comme l'instant initial de la phase noire.



4. LE PHÉNOMÈNE DE LENTILLE GRAVITATIONNELLE se matérialise par la déformation d'images d'objets brillants – des étoiles ou, comme ici, des galaxies – qui prennent la forme d'arcs. Le trajet de la lumière est dévié par la présence d'un objet massif situé entre la source et l'observateur. Cet effet peut amplifier la luminosité d'un objet très éloigné – par exemple une étoile noire.

La pression de radiation était désormais assez intense pour bloquer la contraction de l'étoile, dont le rayon et la masse ont augmenté par accumulation de matière. Au bout de 19 000 ans dans la phase noire, l'astre a atteint une centaine de masses solaires et une température de surface de 5 800 kelvins. L'étoile émettait un rayonnement électromagnétique dont le spectre était semblable à celui du Soleil, mais avec une luminosité un million de fois supérieure.

Température modérée, mais forte luminosité

Alimentée par la fusion thermonucléaire centrale, une étoile classique a un cœur porté à 200 millions de kelvins, un rayon de cinq millions de kilomètres et, surtout, une température de surface de 100 000 kelvins. Pour une même masse, le cœur d'une étoile noire est resté relativement froid, à une température d'à peine 400 000 kelvins. L'astre n'émettait pas non plus de rayonnement ultraviolet intense et ne détruisait pas les molécules du nuage de gaz qui l'entourait.

Pendant 200 000 ans, la masse de l'étoile noire a continué de croître, tout comme sa luminosité, sa température de surface et son rayon, qui a atteint un maximum de six unités astronomiques. L'augmentation de sa masse a entretenu une contraction adiabatique sur le nuage de neutralinos aux alentours, de sorte que de la matière noire était captée en continu et servait de carburant à l'étoile. C'est à ce stade que les réserves d'énergie étaient les plus hautes. Mais, petit à petit, elles se sont épuisées.

Il faudra attendre encore 100 000 ans pour que l'étoile noire atteigne 720 masses solaires. Son alimentation par l'annihilation des neutralinos s'est alors achevée et l'astre a entamé sa métamorphose. Sa luminosité n'a cependant pratiquement pas varié. Perdant toujours de l'énergie, fournie en moindre quantité par la matière noire, l'étoile a commencé à se contracter. Son rayon est devenu inférieur à une unité astronomique.

Pour évacuer à travers une surface plus petite l'énergie produite, la température a augmenté et a atteint 23 000 kelvins. Le cœur de l'objet s'est réchauffé fortement : la température y est passée à 15 millions de kelvins et le deutérium est entré en fusion pendant 50 000 ans. Toutefois, cela n'a pas suffi à stabiliser l'étoile, qui a continué de se contracter. Quand la source d'énergie formée par les neutralinos fut définitivement remplacée par la contraction gravitationnelle, le reste de matière noire a flambé une dernière fois et a produit, pendant 20 000 ans, un sursaut de luminosité. Mais l'étoile a continué à se contracter et les températures de cœur et de surface ont augmenté. L'intense rayonnement ultraviolet qui en a résulté a détruit l'hydrogène moléculaire du gaz environnant, qui cessa d'alimenter l'étoile.

La fusion thermonucléaire de l'hydrogène s'est déclenchée et a alimenté en énergie l'astre, qui n'avait désormais plus rien de noir : il n'y avait plus d'annihilation de matière noire en son sein. L'astre s'est transformé en étoile de population III classique, mais de masse bien supérieure à celle de ses congénères – 780 masses solaires contre une centaine pour les étoiles de population III ordinaires. Son rayon était de six millions de kilomètres, seulement huit fois celui du Soleil. Et les températures de surface et de cœur étaient respectivement de 100 000 et 300 millions de degrés. La phase noire, qui s'est étalée sur 400 000 ans, venait de s'achever.

Les étoiles de population III, du fait de leur masse importante, ont eu une vie brève. Elles ont consommé rapidement l'hydrogène. Après quelques millions d'années, elles ont pu exploser en hypernova – d'une puissance équivalente à celle d'une centaine de supernovae. Elles ont laissé en leur cœur un trou noir et ont éjecté de grandes quantités de matière qui ont constitué de nouvelles étoiles ordinaires.

Comment les observer ?

Pour confirmer le scénario que nous avons décrit, il est nécessaire d'observer des étoiles noires. Or ces astres sont situés à des distances cosmologiques. Le télescope spatial *James Webb* (JWST pour *James Webb Space Telescope*), que la NASA projette de lancer en 2018, pourrait les traquer. En plus du visible, le télescope est sensible à l'infrarouge. L'une de ses caméras couvre les longueurs d'onde comprises entre 0,6 et 5 micromètres. Or le pic de luminosité d'une étoile noire dont la température de surface est de 20 000 kelvins se situe vers 0,15 micromètre de longueur d'onde. Ce rayonnement ultraviolet est décalé vers le rouge en raison de l'expansion de l'Univers et serait détecté sur Terre avec une longueur d'onde de 1,5 à 3 micromètres.

En 2010, l'un de nous (P. Gondolo), Erik Zackrisson, de l'Université de Stockholm, et leurs collègues ont montré que la luminosité de ces objets, bien que dix millions de fois plus brillants que le Soleil, serait trop atténuée pour être détectable directement. Ils ont suggéré qu'une lentille gravitationnelle, tel un amas de galaxies, interposée entre une étoile noire et la Terre, résoudrait la difficulté. Au voisinage de l'amas, l'espace est courbé, ce qui dévie les rayons lumineux de l'étoile

© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013

noire passant à proximité. En concentrant la lumière vers l'observateur, la lentille amplifie la luminosité de la source. Il deviendrait alors possible d'observer les étoiles noires situées derrière l'amas, malgré la distance.

La probabilité de détecter une étoile noire dépend de la quantité de ces astres pendant l'âge sombre. Si les conditions de formation ont été propices, la fraction d'étoiles de population III passées par la phase noire serait élevée. Mais dans ce cas, le processus de réionisation serait à revoir. Lors de la réionisation, les étoiles de population III ont émis un fort rayonnement ultraviolet qui a détruit l'hydrogène moléculaire et empêché la condensation du gaz. Si les étoiles noires ont été nombreuses, le rayonnement ultraviolet a été moins intense et la condensation du gaz s'est poursuivie plus tardivement dans l'histoire de l'Univers.

La forme du halo de matière noire peut avoir des conséquences sur l'observation. Si le halo n'est pas sphérique mais triaxial, on montre que les neutralinos suivent des orbites chaotiques qui nourrissent sans cesse la région centrale. L'étoile, jamais à court de matière noire, peut alors atteindre des masses de plusieurs millions de masses solaires, et une luminosité un milliard de fois supérieure à celle du Soleil. Les observations de la sonde WMAP imposent le nombre de ces étoiles noires géantes que le télescope *James Webb* devrait être capable de détecter directement.

D'ici quelques années, les étoiles noires ne seront peut-être plus uniquement un sujet théorique et spéculatif. Elles seront utilisées pour la recherche de la matière noire, en complément des études au LHC (le Grand Collisionneur de hadrons à Genève) et des expériences de détection directe et indirecte. Ces astres permettraient aussi de résoudre l'énigme des trous noirs de plusieurs milliards de masses solaires qui peuplent le centre de certaines galaxies primordiales. Comme les étoiles noires finissent leur vie sous la forme de trous noirs de milliers à plusieurs millions de masses solaires, ces derniers pourraient être les briques élémentaires qui, en fusionnant, ont formé les trous noirs supermassifs. ■

BIBLIOGRAPHIE

E. Zackrisson *et al.*, **Finding high-redshift dark stars with the *James Webb* Space Telescope,** *Astrophysical Journal*, vol. 717, pp. 257-267, 2010.

K. Freese *et al.*, **Supermassive dark stars : detectable in JWST,** *Astrophysical Journal*, vol. 716, pp. 1397-1407, 2010.

D. Spolyar *et al.*, **Dark stars : a new look at the first stars in the Universe,** *Astrophysical Journal*, vol. 705, pp. 1031-1042, 2009.

F. Iocco, **Dark matter capture and annihilation on the first stars : preliminary estimates,** *Astrophysical Journal*, vol. 677, pp. L1-L4, 2008.

D. Spolyar *et al.*, **Dark matter and the first stars : a new phase of stellar evolution,** *Physical Review Letters*, vol. 100, 051101, 2008.

Des jardins mauresques à la Renaissance

Felix Arnold

L'étude archéologique d'une villa de l'époque califale, près de Cordoue, suggère que la conception des jardins orientaux a influencé celle des jardins d'agrément de la toute première Renaissance italienne, où se concrétisent des idées humanistes.

Quand Jean de Gorze, l'envoyé du roi de Francie orientale auprès du calife, parvient à Cordoue en 950, il est stupéfait, mais désapprobateur. La splendide capitale du royaume hispano-arabe Al-Andalus arbore en effet des rues pavées, des bains publics, une poste, des jardins… autant d'expressions, selon lui, de la coupable sensualité païenne. Tous les Européens ne réagissent cependant pas ainsi : vers 967, Gerbert d'Aurillac, le futur pape Sylvestre II, se rend en Espagne afin d'y profiter des écrits astronomiques et mathématiques des savants arabes, ce qui fit de lui plus tard le promoteur des « chiffres arabes » en Europe. La civilisation arabo-musulmane était alors à son apogée.

Parce qu'elle est européenne, *Qurtuba*, c'est-à-dire Cordoue, était l'un des hauts lieux de transmission du savoir musulman au monde chrétien, transmission qui s'opérait aussi dans les villes espagnoles reconquises par les princes chrétiens, telles Tolède ou Séville. La bibliothèque de Cordoue contenait des dizaines de milliers de manuscrits, dont des traductions arabes d'œuvres antiques, réalisées à Bagdad, qui donnaient accès au savoir oublié de l'Antiquité. C'est grâce à une traduction latine des œuvres d'Aristote, réalisée à Cordoue et parvenue à Paris, que Thomas d'Aquin créa la scolastique, à l'origine de la philosophie médiévale.

Cordoue attirait et produisait donc des intellectuels de toutes confessions : le médecin juif Moïse Maïmonides et le philosophe musulman Averroès y sont tous les deux nés ; le second y a aussi mené ses recherches philosophiques. Outre cette influence sur la pensée, les usages cordouans ont sans doute eu un impact sur d'autres pans de la culture européenne. Comme nous pensions que l'art du jardin d'agrément en fait partie, nous avons étudié de près les restes du parc privé de la villa de l'un des ministres du Calife. Sa disposition se révèle pour l'essentiel similaire à celle d'un jardin d'agrément florentin ou romain du XV^{e} siècle, ce qui suggère bien une influence.

L'art des jardins qui se pratiquait dans l'Espagne musulmane avait été importé d'Orient et d'Afrique du Nord. Les parcs et jardins se trouvaient en général près des palais, des maisons de maître et des riches villas des alentours de la ville. Comme tous les jardins orientaux, ils

© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013

L'ESSENTIEL

- Les jardins d'agrément du califat d'Espagne et leurs héritiers ont probablement influencé les jardins de la Renaissance italienne du XV^e siècle.
- Jusqu'à présent, cette impression ne résultait que des descriptions de jardins faites par des chroniqueurs musulmans.
- Pour la première fois, l'emplacement d'un jardin mauresque du X^e siècle a été fouillé.
- La structure mise en évidence évoque celle des tout premiers jardins de la Renaissance italienne.

akg-images / Gerard Degeorge

comportaient un réseau fermé d'unités de formes en général carrées. L'architecture en terrasses que l'on y rencontre est un apport espagnol inventé pour créer des aperçus sur le lointain.

Les chroniqueurs arabes ne se sont jamais lassés d'évoquer les jardins de Cordoue. Voici par exemple comment l'historien maghrébin Al Maqqari (1578-1632) décrit un beau jardin qui se situait probablement dans le quartier de la porte Nord de Cordoue : « Ce jardin est l'un des lieux les plus magnifiques et les plus réussis ; ondoyant tel un serpent, un ruisseau le traverse, qui se jette dans un bassin. Le toit, les murs et les parois de son pavillon sont ornés d'or et de lapis-lazuli. Ce jardin est organisé par des rangées de plantes disposées symétriquement, et dont les fleurs semblent sourire. Le soleil ne parvient guère à toucher sa terre humide, tandis que la brise disperse ses parfums la nuit comme le jour, comme si elle était faite de regards d'amour, ou en train de se séparer des jours de sa jeunesse. »

Des rangées de plantes disposées symétriquement

Pareille description nous semble familière, car dans l'organisation en « rangées de plantes disposées symétriquement », nous reconnaissons immédiatement le jardin baroque ; le ruisseau nous fait par ailleurs penser aux jardins-paysages anglais. Les symétries, la disposition de l'installation sur des terrasses reliées entre elles, les fontaines et les bassins… tout cela fait partie des canons régissant les jardins de la Renaissance, de sorte que les historiens en sont venus à penser que ces éléments fondamentaux du jardin de la Renaissance proviennent d'Al-Andalus.

Pour autant, les textes ne constituent nullement une preuve du phénomène, et les jardins de Cordoue du X^e siècle ont disparu… Nous avons bien des jardins

1. LE JARDIN MAURESQUE DE L'ALHAMBRA appartient à la culture hispano-musulmane tardive. Mais comme dans les jardins musulmans d'Espagne plus anciens, son dessin géométrique, ses plans d'eau et ses plantes tendent à reproduire sur Terre la sérénité du paradis.

dits mauresques, en Espagne, tel celui de l'Alhambra à Grenade *(voir la figure 1)*, mais ils ont été créés ou aménagés bien après. De tous les somptueux jardins d'agrément que comptait Cordoue, seul celui de la cité califale Madinat al-Zahra, située à huit kilomètres de la ville, nous est parvenu, mais il ne s'agit là que d'un espace en ruine ! Cependant, on peut lire dans ses ruines sa structure générale : au milieu d'une surface presque carrée de 150 mètres de côté, se trouvait un pavillon flanqué de quatre bassins ; de cet ensemble divergeaient dans les quatre directions cardinales quatre chemins longés par des canaux.

Les connaisseurs du jardin oriental voient immédiatement dans ce dessin en croix un *Chahar bagh*, c'est-à-dire un « jardin partagé en quatre », en persan. Malheureusement, il ne nous est guère possible de retrouver les traces d'éventuelles « rangées de plantes disposées symétriquement ». En effet, le jardin a été fouillé dès les années 1940, à une époque où l'étude des pollens par les méthodes de l'archéobotanique ne faisait pas partie des possibilités de l'archéologie espagnole. Pire : le jardin a été replanté, de sorte que même des études fragmentaires sont devenues impossibles, car nous ne pourrions distinguer les traces anciennes des nouvelles.

Le célèbre jardin mauresque du palais de l'Alcazar, à Séville, ne nous aide guère, lui non plus, à répondre à des questions du genre : les cours d'eau de jardin avaient-ils la forme de ruisseaux naturels ou celle de canaux ? Quels étaient les parfums du jardin ? Etc. Certes, le jardin mauresque de l'Alcazar date du XI^e siècle, mais il a été réaménagé à partir du XIII^e siècle, de sorte que de nouveaux bâtiments ont changé sa forme initiale. Quant aux jardins de l'Alhambra à Grenade, ils reflètent aujourd'hui la pensée d'une autre période de l'Espagne musulmane, même si leur origine remonte à l'époque de la cité califale de Cordoue.

© Biblioteca Apostolica Vaticana, MS. Vaticano Arabo 368 (riserva), fol. 3, recto

2. CETTE CALLIGRAPHIE ARABO-ANDALOUSE est tirée du *Hadîth Bayâd wa Riyâd*, un manuscrit incomplet conservé à la Bibliothèque vaticane, qui relate une histoire d'amour entre Bayâd, fils d'un marchand de Damas, et Riyâd, une esclave chanteuse et favorite du vizir. Un jardin oriental y est représenté, où se mêlent éléments d'architecture, eaux, plantes et animaux.

John Patterson/DR, Madrid

3. LE DOMAINE MUNYAT AL-RUMMANIYA accueille aujourd'hui la résidence d'été que se fit construire un aristocrate espagnol de 1923 à 1931. Depuis la vente de cette résidence en 1962, des taureaux de combat y sont élevés. Des restes du mur d'enceinte de la propriété d'époque califale sont visibles au fond.

La « villa de la vallée des grenadiers »

Comment documenter la structure véritable des jardins mauresques de la Cordoue du X^e siècle ? À l'automne 2006, une équipe hispano-allemande s'est formée pour étudier le parc d'agrément d'une ancienne villa mauresque située à dix kilomètres à l'Ouest de Cordoue. Une grande partie de la surface de ce jardin n'avait en effet pas été dérangée et les fondations des bâtiments de la propriété jamais détruites.

Outre l'auteur de ces lignes, Antonio Vallejo Triano, le conservateur de Madinat al-Zahra, et Alberto Canto Garcia, professeur d'archéologie médiévale à l'Université autonome de Madrid, font partie de l'aventure. Cette équipe a pris la suite de Ricardo Velázquez Bosco, l'historien de l'architecture espagnole qui avait déjà étudié en 1910 les bâtiments de la propriété d'époque califale, avant que, entre 1926 et 1931, le marquis de Murrieta ne s'y fasse construire une résidence d'été. Entre autres choses, R. Velázquez Bosco avait découvert des restes de la décoration en marbre, que l'on peut voir aujourd'hui au musée archéologique de Cordoue. Aujourd'hui, l'emplacement du jardin d'époque califale est parcouru par les taureaux de combat que l'on y élève *(voir la figure 3)*.

La propriété se trouve sur le versant Sud de la Sierra Morena, une chaîne de montagnes du Sud de l'Espagne située au Nord de la vallée du Guadalquivir. Dans les textes arabes, on la nommait Munyat al-Rummaniya, c'est-à-dire « villa de la vallée des grenadiers ». Elle comportait

© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013

Felix Arnold/DAI

4. CES RESTES DU MUR D'ENCEINTE D'AL-RUMMANIYA datent d'un millier d'années. Ce mur a été édifié suivant un principe qui rappelle la construction à colombages : les interstices qui séparent une série de piliers constitués de blocs de calcaire sont remplis de pisé. Les concepteurs de ce système ont ainsi associé la solidité de la pierre à la maniabilité du pisé et à son coût modéré.

plusieurs terrasses de 150 mètres par 50, dont trois étaient aménagées en jardins *(voir la figure 5)* ; leurs différents niveaux s'étagent sur une hauteur d'environ trois mètres. C'est sur la terrasse la plus élevée que se trouvaient les bâtiments de réception et d'habitation, ainsi qu'un grand bassin récoltant les eaux de pluie.

Le premier propriétaire de la villa fut le trésorier du calife Al-Hakam II. Surnommé Al-Durri (915-976), c'est-à-dire « le petit », d'une famille influente, il avait obtenu de grandes charges en peu d'années, et à partir de 965 se serait mis à consacrer toute sa richesse à la construction de sa villa de Munyat Al-Rummaniya. Malheureusement pour lui, il ne put en jouir longtemps : accusé d'avoir détourné des deniers publics pour ses projets, il tomba en disgrâce en avril 973. Le cas fut finalement classé à la suite d'un arrangement avec le calife : Al-Durri lui donnait son cher domaine après y avoir organisé une grande fête en son honneur. Après la mort du calife, le ministre fut victime d'une intrigue de cour et mourut pendant sa fuite.

Nous avons consacré le premier pan de nos recherches à l'étude des espaces d'habitation et d'apparat, et le second pan à celui du système d'alimentation en eau. Après avoir documenté les ruines encore visibles aujourd'hui, nous nous sommes intéressés au mur qui entourait la propriété. Particulièrement bien conservé par endroits *(voir la figure 4)*, sa curieuse structure ressemble à celle d'un mur à colombages : un réseau à base de blocs de calcaires dont les interstices ont été remplis de pisé.

Au X^e^ siècle, le grand bassin constituait sans nul doute une remarquable performance architecturale. Long de 50 mètres et large de 30 mètres pour quatre mètres de profondeur, il était l'un des plus grands de tout le monde musulman. Ses constructeurs ont creusé une fosse qu'ils ont entourée de murs de pierre, ces derniers ayant été ensuite étanchéifiés avec un enduit, puis polis. Des piliers portaient des arcades sur lesquelles étaient fixées des plaques de pierre, de sorte que l'on pouvait marcher à la surface du bassin et observer les poissons. Ces structures servaient aussi sans doute à procurer de l'ombre aux poissons dans une pièce d'eau dépourvue de plantes appropriées.

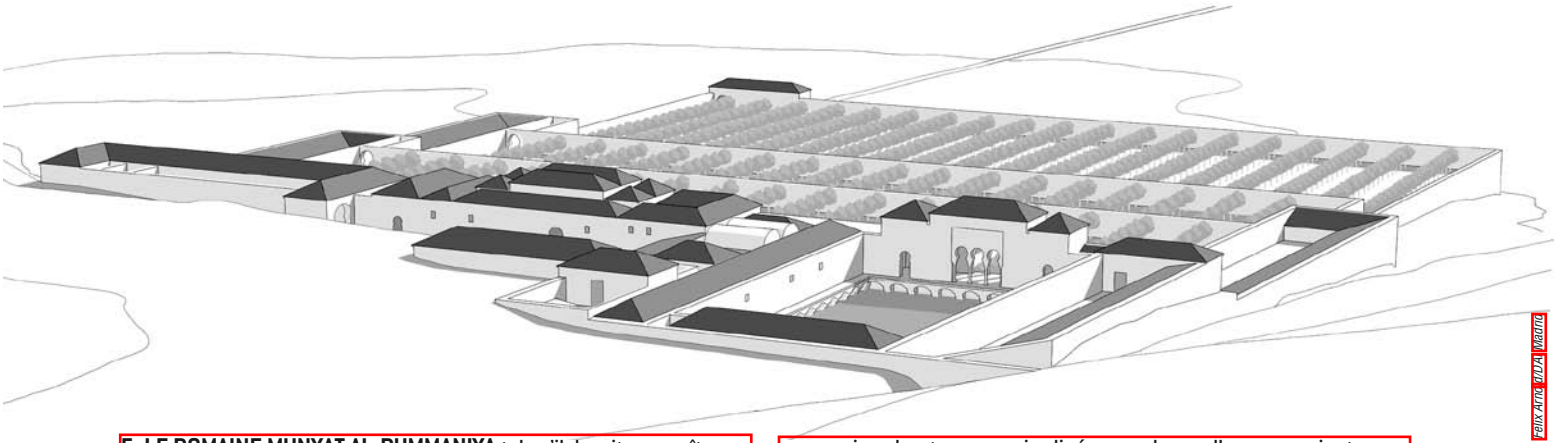
TANDIS QU'UNE CITERNE ACCUMULAIT de l'eau potable, le grand bassin servait à arroser les plantes et à rafraîchir en été la salle de réception qui le séparait des jardins en terrasses.

Le système de collecte des eaux nous a impressionnés. Certes, la plupart des techniques employées existaient déjà à l'époque romaine, mais leur mise en œuvre traduit une très grande compétence. Tout ce qui coulait en hiver dans l'un des ruisseaux de la montagne pouvait par exemple être dirigé vers le bassin, sans doute au moyen d'un barrage en travers d'un ruisseau dont partait un petit canal. Plusieurs sources naturelles existant sur le domaine ont été appareillées en pierre afin d'y faciliter le puisage. Une galerie souterraine destinée à recueillir les infiltrations d'eau était même présente, ainsi qu'une conduite amenant l'eau souterraine de la montagne voisine.

Tandis qu'une citerne accumulait de l'eau potable, le grand bassin servait à arroser les plantes et à rafraîchir en été la salle de réception qui le séparait des jardins en terrasses. L'eau conserve sa température plus longtemps que la terre ou la roche, de sorte qu'en cas de forte chaleur, un courant d'air frais devait s'établir dans la salle de réception à travers les arcades qui l'ouvraient vers le bassin comme vers les terrasses.

En 2008, nous avons étudié par les méthodes de l'archéobotanique les végétaux qui avaient été plantés sur les terrasses. Pour ce faire, nous avons prélevé de la terre dans des tranchées, afin que nos collègues de l'Université de Jaèn en Andalousie puissent y récolter tous les restes végétaux qui s'y trouvaient encore. Curieusement, c'est la terre provenant des environs immédiats du bâtiment qui a livré le plus d'informations, ce que l'histoire de Munyat al-Rummaniya explique facilement : au cours d'une guerre civile, le corps d'habitation du domaine a brûlé en 1009, de sorte que ses débris ont scellé le sol du jardin qui l'entourait…

Nous avons d'abord été étonnés de n'y retrouver aucune trace de lys, de roses, de



Felix Arte. @IDA| Madrid

5. LE DOMAINE MUNYAT AL-RUMMANIYA tel qu'il devait apparaître au X^e siècle. On distingue au premier plan le corps d'habitation *(à gauche)*, le grand bassin et les arcades de la salle de réception *(à droite)*, puis la succession des terrasses jardinées sur lesquelles poussaient sans doute des rangées d'oliviers, d'amandiers, de pruniers, de cerisiers et d'autres arbres fruitiers, mais, semble-t-il, pas de fleurs d'agrément.

Felix Arte. @IDA| Madrid

6. LES PLANS D'EAU ET LES FONTAINES sont une constante du luxe oriental tel qu'il s'exprime dans les jardins d'agrément et dans les intérieurs. Ce bassin semble avoir été l'un des plus grands jamais réalisés dans le monde musulman. On pouvait parcourir sa surface en marchant sur des piliers posés sur son fond. Des arcades le reliaient à la salle de réception de la villa.

marguerites, de violettes, de jacinthes… bref de toutes les fleurs que mentionnent les chroniqueurs arabes quand ils décrivent des jardins d'agrément orientaux. Cette partie du jardin qui, en raison de sa proximité avec les habitations, nous semblait devoir être décorative, s'est révélée être une oliveraie ! Nos collègues de l'Université de Jaèn ont par ailleurs découvert des traces d'amandiers, de pruniers, de cerisiers, mais – chose notable en un lieu nommé vallée des grenadiers – aucune trace de cet arbre. Il semble donc, à ce stade de nos recherches, que les jardins d'Al-Rummaniya étaient constitués de plantations d'arbres fruitiers et non de fleurs ornementales. Le fait que nous n'avons trouvé nulle part de traces de chemins pavés renforce cette impression.

Les descriptions de la villa d'Al-Durri confirment aussi cette impression, puisqu'il n'y est nulle part fait mention de fleurs. Cette absence gênait les historiens de l'art du jardin, influencés par les nombreuses allusions littéraires à des paradis sur terre, mais elle se révèle correspondre à la réalité. Nous n'avons malheureusement aucune description d'autres jardins de la même époque dans des villas rurales comparables.

Le cas des jardins d'Al-Rummaniya est important dans la mesure où il nous éclaire sur l'influence possible des jardins d'Al-Andalus sur ceux de la Renaissance italienne. Des similarités frappantes existent en effet entre les deux types de jardins, tout particulièrement avec les plus anciens jardins d'agrément de la région de Florence, ce qui suggère une filiation entre les jardins arabo-andalous et ceux de la Renaissance italienne. De fait, les Médicis, qui régnaient à Florence, aimaient se faire installer des jardins sur des terrains en pente où l'on pouvait aménager des terrasses, et il semble que les plantations de fleurs n'aient joué aucun rôle dans leurs efforts pour créer un ensemble harmonieux conforme aux nouveaux idéaux du classicisme, c'est-à-dire du retour à l'Antiquité.

Pour autant, on peut être étonné de l'idée même d'un rapport entre la Cordoue du X^e siècle et la Florence du XV^e siècle, alors que plus de 2 000 kilomètres et plus de 500 ans séparent les deux villes et les deux époques. Il est clair qu'aucun architecte florentin n'a contemplé de jardin andalou. Une influence musulmane sur Florence implique donc des transmissions indirectes de savoir-faire.

Quels ont pu être ces relais ? Les jardins que les rois des Baléares se firent installer à Palma au début du XII^e siècle pourraient avoir constitué une étape intermédiaire, car ces jardins ont été construits juste après la reconquête des îles, donc sous l'influence de la culture musulmane. De même, il est clair que Tolède, Séville et Cordoue, reconquises du XIII^e au XIV^e siècles, n'ont pas changé leurs traditions du jour au lendemain, mais les ont plutôt réinterprétées dans le cadre de la culture chrétienne.

Des traditions réinterprétées

Du reste, les nombreux points communs entre les deux religions du Livre facilitaient la chose : il en est ainsi de la croix formée dans les jardins de Madinat al-Zahra par les chemins partant vers les points cardinaux ; ou encore de la vision d'un paradis où quatre fleuves courent d'un point central aux quatre directions cardinales, qui existe dans les deux religions. Par ailleurs, la *Reconquista*, c'est-à-dire la reconquête de l'Espagne par des armées chrétiennes, a duré jusqu'en 1492, de sorte qu'à Grenade, par

© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013

exemple, il existait des jardins mauresques contemporains de ceux des Médicis.

On peut aussi souligner qu'une certaine parenté des âmes existait entre musulmans et chrétiens, qui pourrait expliquer pourquoi une culture de type oriental aurait fourni un modèle à partir duquel la culture européenne se serait développée. Les jardins de Florence étaient l'expression d'une nouvelle vision de l'homme, dans laquelle l'individu recevait une place centrale, que la sévère foi médiévale lui refusait. Dans ses nouveaux jardins, l'élite florentine recherchait son harmonie intérieure dans un accord avec la nature et un équilibre entre la vie à la ville et la vie à la campagne, qui était très certainement idéalisée.

Les villas de Cordoue sont le produit d'un phénomène comparable. Elles sont décrites dans les textes comme des lieux de loisir, où l'on se retirait l'été afin de fuir la chaleur de la ville, mais aussi pour se reposer après les campagnes militaires. D'importants événements sociaux s'y produisaient, tels les mariages et les circoncisions. C'était là, dans une nature maîtrisée et reproduite, que l'on faisait de la politique, ce qui explique la présence de salles de réception. Les rôles des jardins musulmans et celui des jardins de Rome et de Florence étaient donc comparables.

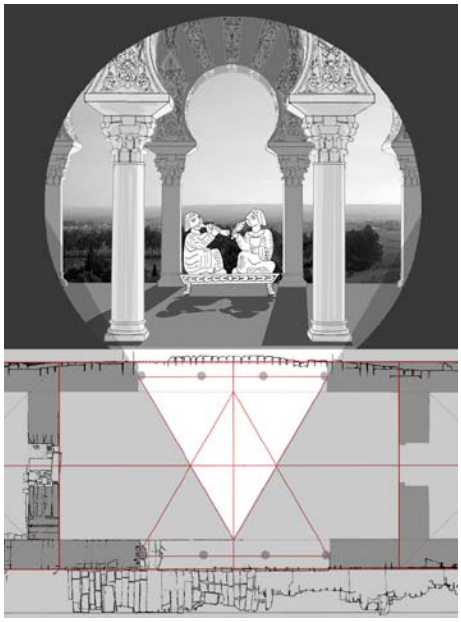
La salle attenante au grand bassin à Al-Rummaniya était une salle de réception. C'est en 2006 que nous en avons eu les premiers indices ; les fouilles de 2008 et 2009 nous ont ensuite livré sa forme, ainsi que des fragments de son toit ou de son décor en marbre. Il semble que les arcades portaient des reliefs et des représentations de plantes, telles des feuilles d'acanthe, de vigne et de grenades, ainsi que celles d'animaux tels des oiseaux, des lions ou des gazelles. Autant de thèmes typiques des représentations musulmanes du paradis, qui sont toujours à mi-chemin entre architecture et nature *(voir la figure 2)*.

Des arcades vues sous le bon angle

Les arcades par lesquelles cette grande salle communiquait avec l'extérieur révèlent certains aspects de la pensée des élites de Cordoue du X^e^ siècle. Au Nord, ces arcades ouvraient sur le grand bassin ; au Sud, vers les terrasses jardinées et le fleuve Guadalquivir au loin *(voir la figure 5)*. La mise en évidence des fondations de la salle suggère qu'un principe géométrique a été mis en œuvre lors du placement de ces arcades. Leur largeur correspond en effet à la base d'un triangle équilatéral dont le sommet touche les arcades opposées, placées de l'autre côté de la salle *(voir la figure 7)*. Or les angles d'un triangle équilatéral sont égaux à 60 degrés, valeur qui attire l'attention puisqu'elle correspond à l'angle de vue maximal d'une personne immobile. Tout architecte, peintre ou photographe doit tenir compte de cette donnée lorsqu'il élabore une perspective.

Les constructeurs d'Al-Rummaniya en avaient-ils connaissance ? À la cour du Caire où il travaillait, le mathématicien et astronome Ibn al-Haytham (965-1040), nommé aussi Alhazen, a formulé ce principe optique dans son livre *Kitab al-Manazir*, qui fut traduit sous les titres de *De Aspectibus* et de *Opticae Thesaurus*. Le fait qu'Alhazen, pionnier de l'étude scientifique de la vision, ait su rompre avec les notions antiques de l'optique et de la vision, passe aujourd'hui encore pour un exploit. Toutefois, le *Kitab al-Manazir*, qui a orienté les savants européens et préparé l'invention de la perspective à la Renaissance en Italie, a été écrit des dizaines d'années après la création des jardins en question.

Il est cependant probable qu'Alhazen ait profité des idées en cours chez les savants musulmans de son époque, par exemple celles du mathématicien de la Cordoue du X^e^ siècle Maslama al-Madjriti, un géomètre important. Même si ce n'est qu'une spéculation, les constatations faites à Al-Rummaniya suggèrent que Alhazen n'a pas été le premier à connaître la limitation du regard humain : les arcades de la salle donnent à un observateur un cadre fixe pour contempler le paysage. Si Al-Rummaniya avait été un bâtiment de la Renaissance, on aurait estimé que cette



Felix Arnold/DAI/Madrid

7. LES LOIS DE LA VISION ont été découvertes au sein du monde arabo-musulman, mais ont-elles été appliquées en architecture ? Le fait que les arcades de la salle de réception d'Al-Rummaniya permettent de profiter de l'angle de vision maximal de 60 degrés *(à gauche)* quand on se tient de l'autre côté de la salle de réception suggère que ce fut le cas, ou du moins que les architectes d'Al-Rummaniya ont appliqué ces lois.

John Patterson/UAI Madrid

8. L'APPAREILLAGE DU BASSIN DE LA VILLA D'AL-RUMMANIYA était réalisé en blocs de calcaire, sur lesquels avait été apposé un enduit d'étanchéité, ensuite poli. Il semble que le bassin accueillait des poissons et une structure sur piliers permettant de cheminer à sa surface.

Felix Arnold/UAI

9. LES DÉBRIS DE L'INCENDIE DE LA VILLA D'AL-RUMMANIYA ont recouvert le sol du jardin à proximité immédiate des bâtiments, ce qui l'a préservé. C'est là que les archéologues ont retrouvé le plus d'informations sur les espèces végétales cultivées à Al-Rummaniya.

disposition ne peut qu'avoir été un choix conscient de l'architecte.

Dans son livre *Florence et Bagdad, Une histoire du regard entre Occident et Orient*, l'historien allemand de l'art Hans Belting a avancé il y a quelques années l'idée que si on a établi correctement les principes de l'optique dans le monde musulman, on ne les a pas appliqués à l'art. Une telle volonté implique l'hypothèse de l'existence d'un observateur dans la représentation d'un espace, représentation mentale que H. Belting et ses confrères tiennent pour une étape caractéristique de la Renaissance liée à la nouvelle conception de l'humain qui se répandait alors. Sans la présence d'un spectateur observant depuis la salle de réception vers l'extérieur, les proportions des arcades de Al-Rummaniya ne peuvent être expliquées, puisqu'elles n'encadrent le champ de vision de façon exacte que depuis un seul point.

Le reflet d'une nouvelle valeur de l'individu

Il se pourrait ainsi que le jardin du domaine d'Al-Durri ait été un précurseur des jardins de la Renaissance et l'expression d'une nouvelle valeur accordée à l'individu dans le royaume d'Al-Andalus du Xe siècle. Une sorte de « Renaissance musulmane » aurait-elle débuté à Cordoue ? Cela semble d'autant plus plausible que les principes de construction qui y ont été mis en œuvre le furent à nouveau au XIe siècle dans le palais de l'Aljaferia, à Saragosse, et à l'Alcazaba d'Almeria (une citadelle), où les arcades attirent le regard de l'intérieur en direction des jardins.

Les circonstances politiques, notamment celles que créait la Reconquista, ont peut-être empêché le développement de cette Renaissance musulmane naissante. Au tournant du millénaire, les conflits ethniques se sont en effet aggravés dans le royaume d'Al-Andalus entre les habitants d'origine, les immigrants d'Afrique du Nord et les esclaves importés d'Europe. En 1009, une guerre civile éclata pendant laquelle de grandes parties de Cordoue furent détruites et abandonnées. La villa Al-Rummaniya elle-même fut détruite par un incendie. Les savants et les artistes quittèrent alors la ville pour se réfugier dans les cours des roitelets hispano-musulmans qui avaient cessé d'être inféodés à un pouvoir central.

Une nouvelle culture de cour persista certes dans les petits royaumes hispano-musulmans de Séville, Valence, Alméria ou encore Tolède, mais elle passait pour décadente chez les Almoravides et Almohades d'Afrique du Nord, voire pour non musulmane. Ces cultures furent donc marginalisées et ce fut l'Europe qui hérita des avancées culturelles du califat de Cordoue. Et quand Tolède, l'un des centres de la culture musulmane résiduelle d'Espagne, fut conquise par les troupes castillanes en 1085, elle devint un point d'entrée dans le monde chrétien des œuvres des savants, artisans et artistes de l'Espagne musulmane. ■

L'AUTEUR

Felix ARNOLD est archéologue et historien de l'architecture à l'Institut archéologique allemand du Caire. Il dirige des fouilles en Égypte et Espagne.

BIBLIOGRAPHIE

F. Arnold *et al.*, **Al-Rummaníya. Ein islamischer Landsitz bei Córdoba,** *Madrider Beiträge*, vol. 34, à paraître, 2013.

H. Belting, **Florence et Bagdad , Une histoire du regard entre Occident et Orient**, Gallimard, 2012.

D. Fairchild Ruggles, **Gardens, Landscape, and Vision in the Palaces of Islamic Spain,** Pennsylvania State University Press, 2000.

M. Barrucand et A. Bednorz, **Architecture maure en Andalousie,** Taschen, 1999.

© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013

Rendez-vous sur

POUR LA SCIENCE.fr

Le site de référence de l'actualité scientifique internationale

- Retrouvez gratuitement les actualités scientifiques quotidiennes.
- 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

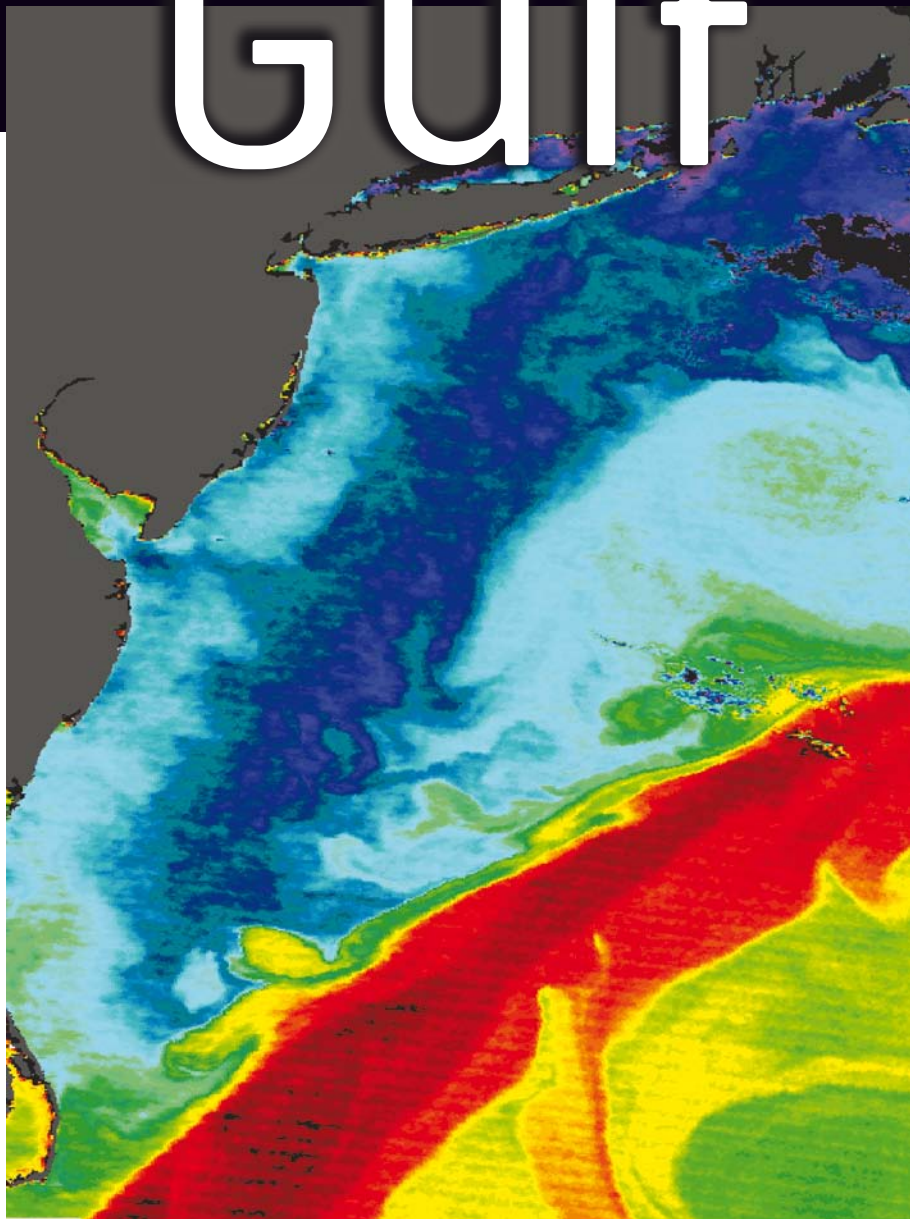
http://www.pourlascience.fr/pls-facebook + de 10000 fans

À très bientôt sur www.pourlascience.fr !

Le Gulf Stream, courant marin chaud en provenance des tropiques, est-il vraiment responsable de la relative douceur des hivers européens ? Plusieurs théories remettent en cause cette explication ou la précisent.

Le rôle controversé du Gulf

Stephen Riser et Susan Lozier



Pendant un siècle, on a enseigné dans les écoles qu'un puissant courant océanique nommé Gulf Stream charrie des eaux chaudes depuis la partie tropicale de l'océan Atlantique jusqu'au Nord-Ouest de l'Europe ; qu'à leur arrivée, ces eaux réchauffent l'atmosphère qui les surmonte ; que l'air chaud pénètre ensuite à l'intérieur des terres, rendant l'hiver moins rigoureux en Europe que dans le Nord-Est de l'Amérique.

Cette théorie est peut-être trop simple. Les recherches récentes sur les effets climatiques du Gulf Stream montrent que ces derniers ne sont pas aussi nets qu'on le pensait. Grâce aux simulations et aux mesures océaniques, de nouvelles explications émergent quant aux disparités entre les hivers américains et européens, à des latitudes équivalentes ; elles divergent parfois sur le rôle du Gulf Stream.

Une autre hypothèse émise il y a quelques années, selon laquelle la fonte de la calotte glaciaire du Groenland risquerait d'influer sur le Gulf Stream et d'avoir des conséquences désastreuses sur le climat européen, est remise en cause. Cependant, le changement climatique en cours pourrait tout de même modifier la puissance du Gulf Stream, ce qui atténuerait les effets du réchauffement climatique sur le Nord de l'Europe.

Les variations géographiques du climat résultent en premier lieu de la forme sphé-

© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013

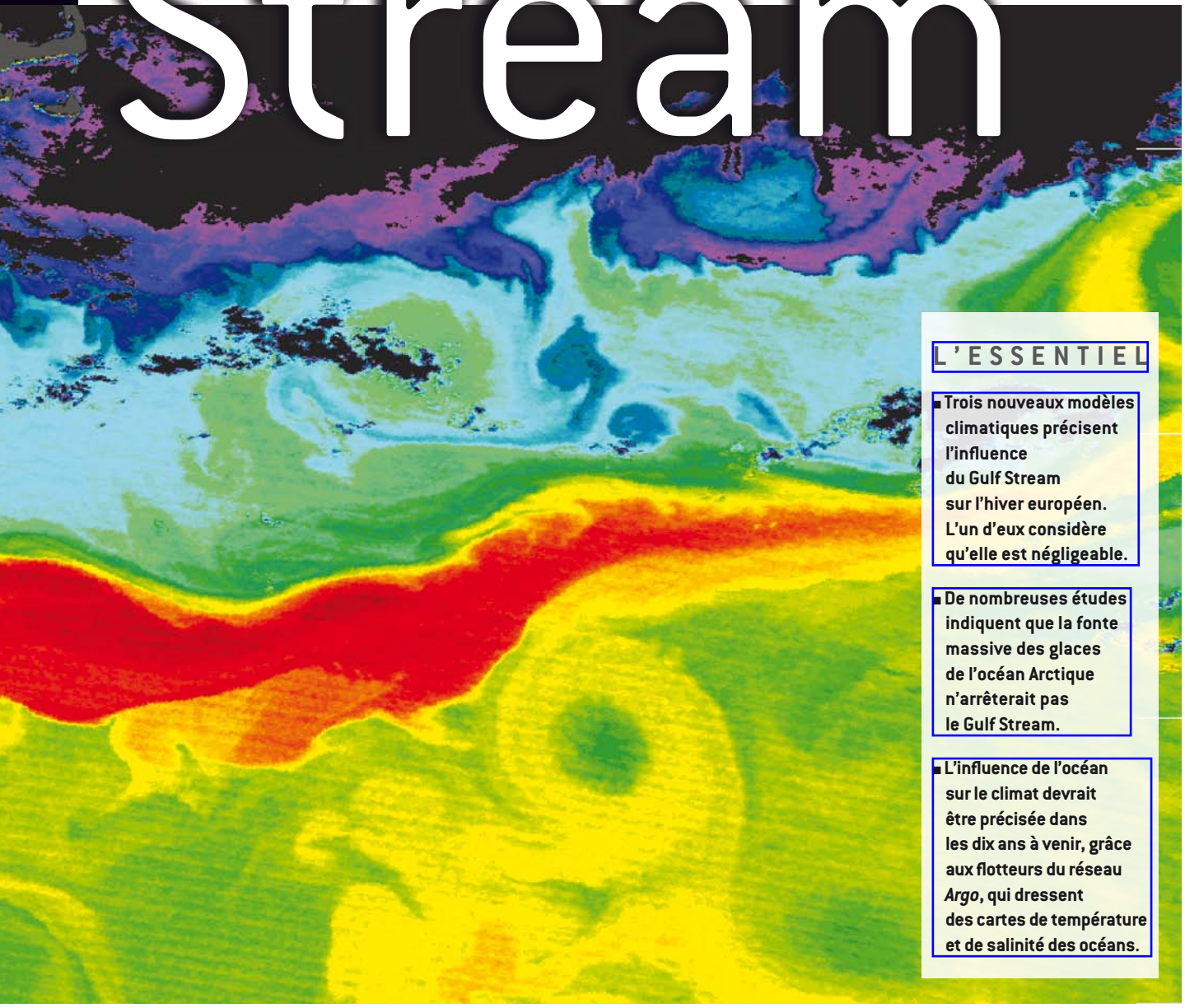
rique de la Terre. Aux basses latitudes, les rayons du Soleil frappent la surface de la Terre selon une direction bien plus proche de la perpendiculaire qu'aux hautes latitudes ; l'énergie reçue par unité de surface y est donc notablement plus importante. Ce réchauffement différentiel est à l'origine des vents dominants, qui redistribuent la chaleur des tropiques aux pôles. Les océans, qui recouvrent 70 pour cent de la planète, jouent aussi un rôle majeur dans cette redistribution. Les deux premiers mètres d'eau sous leur surface stockent davantage de chaleur que toute l'atmosphère au-dessus d'eux.

En effet, la capacité thermique (qui quantifie la faculté d'absorber de l'énergie) de l'eau est environ 4 000 fois supérieure à celle de l'air, et à peu près quatre fois supérieure à celle du sol. À des latitudes moyennes et jusqu'à 200 mètres de profondeur, la température de l'océan peut varier de 10 °C sur une année. Les mers emmagasinent et libèrent alors bien plus de chaleur que l'atmosphère ou les continents. Et comme les courants océaniques font circuler l'eau autour du globe, la chaleur accumulée l'été à un endroit donné peut être libérée dans l'atmosphère à des milliers de kilomètres de là.

Il semble donc naturel de supposer que les courants sont responsables des disparités de températures atmosphériques constatées à des latitudes identiques : à une latitude de 50° Nord, par exemple, la température hivernale en Irlande dépasse de presque 20 °C celle de Terre-Neuve, de l'autre côté de l'Atlantique. À la même

1. LES EAUX DU GULF STREAM *(en rouge)* sont les plus chaudes de l'océan Atlantique, comme le montre cette vue en infrarouge. La température décroît progressivement dans les zones jaunes, vertes et bleues.

Stream



L'ESSENTIEL

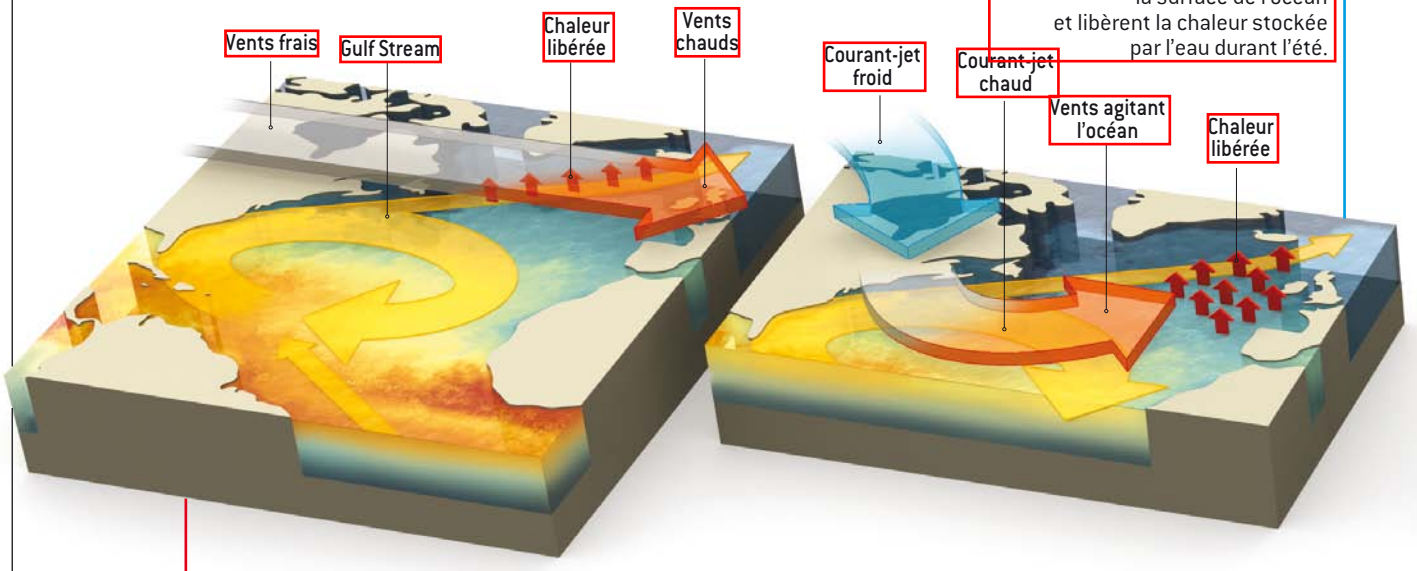
- Trois nouveaux modèles climatiques précisent l'influence du Gulf Stream sur l'hiver européen. L'un d'eux considère qu'elle est négligeable.
- De nombreuses études indiquent que la fonte massive des glaces de l'océan Arctique n'arrêterait pas le Gulf Stream.
- L'influence de l'océan sur le climat devrait être précisée dans les dix ans à venir, grâce aux flotteurs du réseau *Argo*, qui dressent des cartes de température et de salinité des océans.

Patel, Ymet et Bob Evans, Université de Miami/MODIS/NASA

© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013

POURQUOI L'HIVER EST PLUS DOUX EN EUROPE

À latitude égale, l'hiver est plus ou moins rigoureux de part et d'autre de l'Atlantique : il est doux en Europe et rude en Amérique du Nord. Depuis une centaine d'années, on attribue cette différence à l'influence du Gulf Stream, un courant marin chaud. De nouvelles théories mettent en avant le rôle du courant-jet (un flux d'air qui fait le tour de la planète) ou de l'air arctique.



Nouvelle théorie n° 1 : le courant-jet
Le courant-jet sinue dans la direction Nord-Sud, ce qui se traduit en Europe par des vents soufflant du Sud-Ouest. Ces vents agitent la surface de l'océan et libèrent la chaleur stockée par l'eau durant l'été.

L'explication classique
Le Gulf Stream véhicule des eaux tropicales chaudes vers le Sud-Est des États-Unis, puis traverse l'océan Atlantique. En arrivant près de l'Europe, il réchauffe l'air au-dessus de lui. Les vents transportent cet air doux jusqu'au continent.

LES AUTEURS

Stephen RISER est professeur d'océanographie à l'Université de Washington, aux États-Unis, et membre du Comité de pilotage du programme *Argo*.

Susan LOZIER est professeure d'océanographie physique à l'Université Duke, aux États-Unis.

latitude, mais côté Pacifique, la température à Vancouver est supérieure d'environ 20 °C à celle de la pointe Sud de la péninsule russe du Kamchatka.

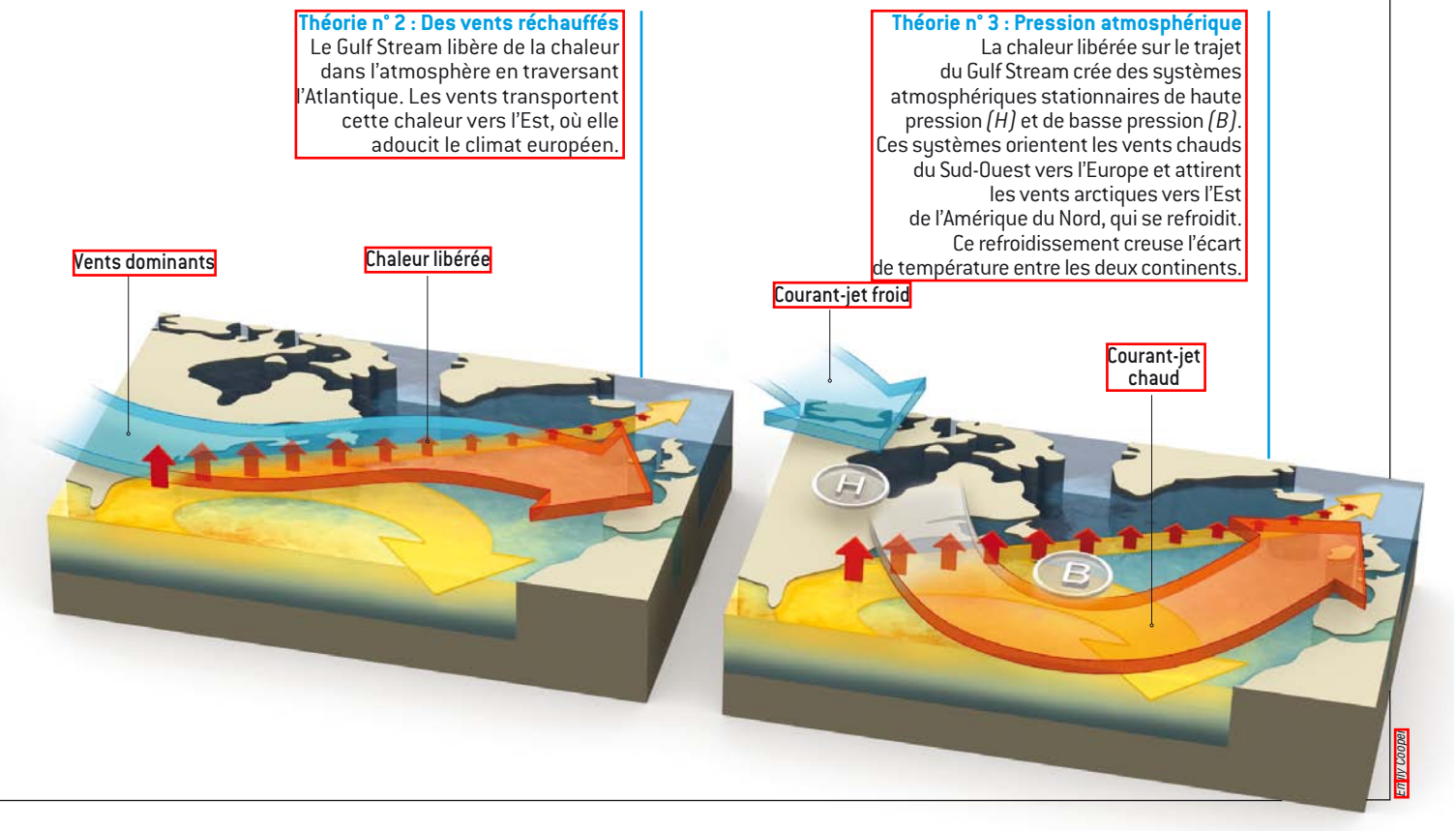
Au XIXe siècle, l'océanographe américain Matthew Fontaine Maury fut le premier à attribuer au Gulf Stream le climat relativement doux dont jouit le Nord-Ouest de l'Europe. Ce puissant courant océanique en direction du Nord provient des régions chaudes subtropicales et tropicales et longe la côte Sud-Est des États-Unis. Il bifurque ensuite vers le Nord-Est et poursuit sa route dans l'océan Atlantique. Maury a supposé que le Gulf Stream alimente en chaleur les vents d'Ouest qui le surmontent et qui traversent l'Atlantique en direction du Nord-Ouest de l'Europe. Il pensait également que si le Gulf Stream s'affaiblissait, les vents hivernaux deviendraient beaucoup plus froids et l'Europe connaîtrait des hivers de type arctique.

Au fil du temps, la théorie de Maury a pris valeur d'axiome ; elle a pourtant très peu été mise à l'épreuve, du moins jusqu'à une période récente.

Il y a dix ans, Richard Seager et ses collègues de l'Université Columbia, à New York, ont effectué une simulation qui expliquait la douceur de l'hiver européen sans faire appel au Gulf Stream. Leur étude incriminait plutôt le courant-jet (ou *jet-stream*), un flux d'air circulant autour de la Terre d'Ouest en Est. Après s'être heurté aux montagnes Rocheuses, dans l'Ouest américain, ce flux d'air se met à osciller selon une direction Nord-Sud. Ce phénomène produit des vents qui soufflent du Nord-Ouest de l'Amérique jusqu'à la partie occidentale du bassin Atlantique, puis qui remontent jusqu'au Nord-Ouest de l'Europe *(voir l'encadré ci-dessus)*. Ils amènent alors de l'air froid continental au Nord-Est des États-Unis, avant d'apporter de l'air marin chaud en Europe.

Selon cette étude, ce n'est pas la chaleur transportée par le Gulf Stream qui tempère le climat de l'Europe, mais plutôt celle accumulée par l'océan sur 100 mètres

© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013



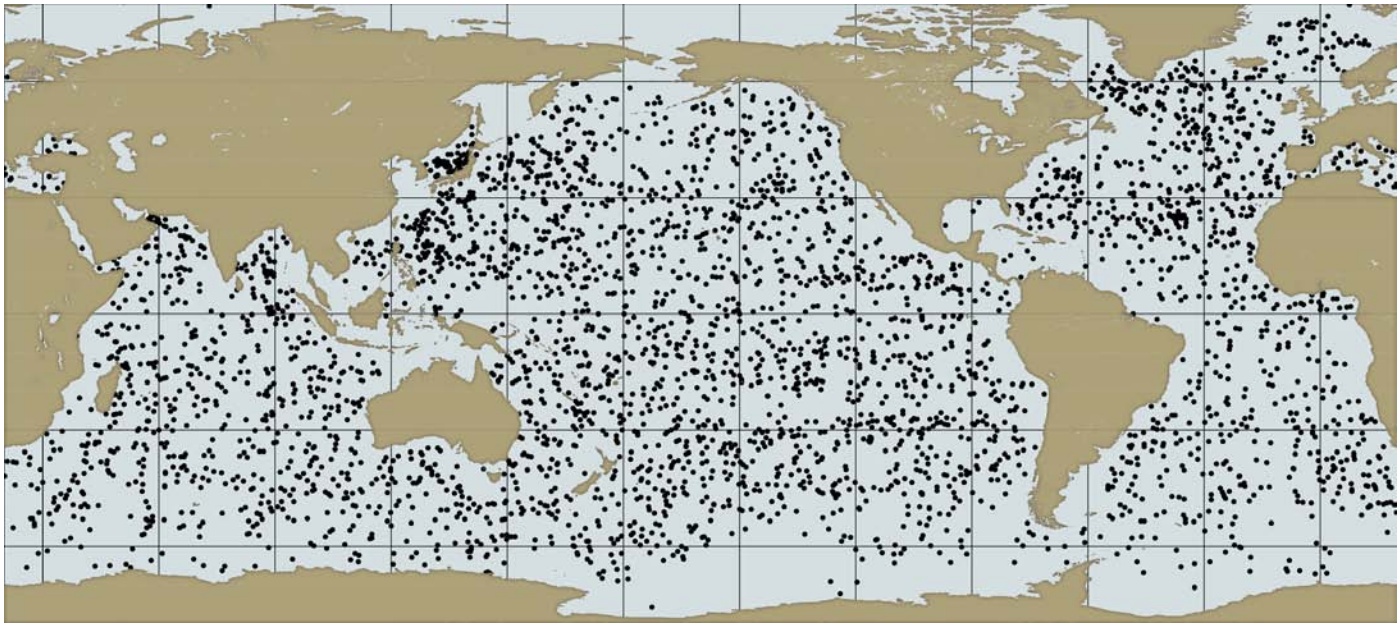
de profondeur pendant l'été, au large des côtes européennes : cette chaleur serait libérée dans l'atmosphère au cours de l'hiver, lorsque les vents du Sud-Ouest viennent brasser les eaux de surface. Ainsi, les différences de température de part et d'autre de l'océan Atlantique seraient dues au schéma de circulation des vents à grande échelle, influencés par les chaînes de montagnes, et au stockage de chaleur par l'océan à proximité des côtes européennes.

Toutefois, le modèle de R. Seager ne prend pas explicitement en compte le transport de chaleur par l'océan. Cet aspect a été étudié peu de temps après par Peter Rhines, de l'Université de Washington, et Sirpa Häkkinen, du Centre de vol spatial Goddard de la NASA. Les deux océanographes ont analysé de multiples relevés de température, effectués à la surface des océans et conservés dans les archives. Ils ont conclu que la quantité de chaleur accumulée dans la couche supérieure de l'océan Atlantique, au niveau de l'Europe du Nord, ne peut adoucir le climat que pour le seul mois de décembre. Pour le reste de l'hiver, un apport calorifique supplémentaire est nécessaire. Le Gulf Stream en est la source la plus probable.

À la recherche de la chaleur perdue

Des mesures ont montré qu'au 35e degré de latitude Nord – vers le milieu de la côte Est des États-Unis –, l'océan Atlantique transporte vers le pôle une puissance calorifique de 0,8 pétawatt (un pétawatt valant 10^{15} watts), principalement par le biais du Gulf Stream. Or, 20 degrés plus au Nord – au niveau du Labrador, au Canada –, l'océan ne véhicule presque plus de chaleur. Qu'est devenue cette dernière ? P. Rhines et S. Häkkinen ont montré qu'elle est relâchée dans l'atmosphère sur le trajet du Gulf Stream. Les vents dominants la poussent ensuite vers l'Est, où elle adoucit le climat européen. Ces résultats rejoignent la théorie de Maury, contre laquelle R. Seager s'élève en mettant l'accent sur le rôle du courant-jet.

En 2011, Yohai Kaspi, de l'Institut Weizmann en Israël, et Tapio Schneider, de l'Institut de technologie de Californie, ont émis une troisième hypothèse, fondée sur de nouvelles simulations numériques de l'atmosphère et de l'océan. Concédant une part de vérité aux scénarios de R. Seager et de P. Rhines, ils se sont intéressés à la pression atmosphérique, notamment à la façon dont elle est influencée par l'apport de chaleur du Gulf Stream à l'atmosphère. Ils ont montré que cet apport crée une dépression à l'Est, vers les côtes européennes, et une zone de haute pression à l'Ouest, au-dessus de la côte Est de l'Amérique du Nord. Pour des raisons complexes, le système dépressionnaire fournit alors de l'air chaud à l'Ouest de l'Europe, *via* les vents du courant-jet, qui viennent du Sud-Ouest en ayant récupéré la chaleur relâchée durant l'hiver par le Gulf Stream. Et la zone de haute pression attire l'air glacial de l'Arctique, refroidissant



l'Est de l'Amérique du Nord. Ainsi, le contraste entre les températures hivernales s'accroît de chaque côté de l'Atlantique. Ce contraste s'expliquerait donc par une circulation atmosphérique particulière, dont le moteur serait la chaleur communiquée à l'atmosphère par l'océan.

Dans les zones tempérées, l'Atlantique n'accumule pas assez de chaleur durant l'été pour déclencher cette circulation. La chaleur transportée par le Gulf Stream, provenant de latitudes plus basses, est donc nécessaire, ce qui rejoint les idées de Maury. Cette nouvelle étude met l'accent sur l'importance des vents du Sud-Ouest dans l'apport de chaleur à l'Europe – mais n'invoque pas l'influence des Rocheuses, contrairement aux travaux de R. Seager.

Le modèle de Y. Kaspi et T. Schneider explique aussi pourquoi le Nord-Ouest de l'Amérique connaît des hivers plus doux que la péninsule du Kamchatka. Dans l'océan Pacifique circule le Kuroshio, un courant similaire au Gulf Stream. On ne lui avait pas attribué les différences de température transpacifiques jusque-là, car il ne remonte pas autant vers le Nord que le Gulf Stream et parce que le Pacifique est plus vaste que l'Atlantique. Mais la chaleur restituée par le Kuroshio pourrait créer des différences de pression atmosphérique similaires à celles de l'océan Atlantique. De l'air polaire pénétrerait alors en Asie, tandis que de l'air plus doux réchaufferait le Nord de la côte Pacifique des États-Unis.

SUR LE WEB

Pour plus d'informations sur le réseau océanique *Argo* et ses 3 000 flotteurs profileurs répartis dans le monde entier, voir : ScientificAmerican.com/feb2013/rise

BIBLIOGRAPHIE

V. Masson-Delmotte, D Swingedouw *et al.*, **Greenland climate change : from the past to the future**, *WIREs Climate Change*, vol. 3, pp. 427- 449, 2012.

Y. Kaspi et T. Schneider, **Winter cold of eastern continental boundaries induced by warm ocean waters**, *Nature*, vol. 471, pp. 621-624, 2011.

D. Roemmich et J. Gilson, **The 2004-2008 mean and annual cycle of temperature, salinity, and steric height in the global ocean from the Argo program**, *Progress in Oceanography*, vol. 82, n° 2, pp. 81-100, 2009.

R. Seager, **Gulf Stream et douceur du climat européen**, *Pour la Science*, n° 348, pp. 40-46, 2006.

Reste à déterminer le meilleur scénario – celui de Y. Kaspi et T. Schneider nous semblant assez plausible. Il est aussi possible que tous les mécanismes décrits apportent une contribution. En outre, de nombreuses recherches portent sur la seconde partie de la théorie de Maury, à savoir que le Nord-Ouest de l'Europe connaîtrait des hivers bien plus rigoureux en cas d'interruption du Gulf Stream. Si le réchauffement provoque la fonte des glaces du Groenland, l'excédent d'eau froide déversé dans l'Atlantique Nord interrompra-t-il le Gulf Stream et privera-t-il le Nord-Ouest de l'Europe d'une importante source de chaleur ?

Une interruption du Gulf Stream ?

On craint en effet que cette eau douce ne ralentisse la circulation thermohaline (aussi qualifiée de « tapis roulant » océanique), à laquelle participe le Gulf Stream : des eaux de surface chaudes remontent vers le pôle Nord, se refroidissent et plongent aux hautes latitudes (au niveau du Labrador et de la mer du Nord), avant de revenir vers le Sud sous forme d'un courant profond. Elles remontent vers la surface ailleurs après s'être réchauffées, compensant la plongée dans l'Atlantique Nord.

Dans de nombreux scénarios climatiques, le réchauffement fait fondre les glaces du Groenland, ce qui entraîne un afflux d'eau douce à de hautes latitudes.

© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013

© Provor Argo

2. PLUS DE 3 000 FLOTTEURS ont été placés sur les océans dans le cadre du réseau international *Argo* (la carte de gauche montre leur répartition). Dotés de capteurs et d'un système leur permettant de plonger jusqu'à 2 000 mètres de profondeur puis de remonter, ils établissent presque en temps réel des profils de température et de salinité.

Cette eau moins salée (et donc moins dense) que l'eau de mer pourrait rester en surface et ainsi empêcher la plongée des eaux dans l'Atlantique Nord. Cela pourrait ralentir la circulation thermohaline, et donc le Gulf Stream. D'autres scénarios évoquent la possibilité que l'apport d'eau douce à de hautes latitudes dévie le Gulf Stream vers le Sud ou réduise sa puissance.

Dans les deux cas, l'Europe bénéficierait d'un moindre apport thermique pendant l'hiver. Selon de nombreuses études, une diminution de la circulation thermohaline correspondrait à un refroidissement de l'Atlantique Nord et du Nord-Ouest de l'Europe.

Toutefois, des résultats récents – et controversés – suggèrent que la majeure partie de l'eau issue de la fonte des glaces pourrait se déverser dans des courants cantonnés en bordure des côtes. Elle aurait donc peu d'influence au large, où s'effectue l'essentiel de la plongée des eaux. Et même si l'apport d'eau douce réduisait notablement la quantité d'eau plongeant dans l'Atlantique Nord, il ne provoquerait probablement pas l'arrêt du Gulf Stream. En effet, la trajectoire et la puissance de ce dernier dépendent surtout de la vitesse et de la direction des vents dominants aux latitudes moyennes. Dans la plupart des scénarios envisagés, la direction des vents dominants est peu modifiée par la fonte des glaces du Groenland, de sorte que le Gulf Stream ne change pas beaucoup. Cependant, la dérive Nord-Atlantique (un petit courant de surface qui prolonge le Gulf Stream au Nord-Est et transporte des eaux chaudes vers les régions subpolaires) pourrait s'interrompre. En outre, si le Gulf Stream devait persister, on ignore quelle quantité d'eau chaude il charrierait vers le Nord dans le futur.

Une arrivée massive de mesures océaniques

Jusqu'à présent, l'influence du changement climatique sur les conditions météorologiques européennes a surtout été étudiée à l'aide de simulations sur ordinateur. Or celles-ci comportent un grand nombre d'incertitudes, qui ne peuvent être levées qu'en disposant de davantage de mesures dans les océans. Peu d'observations remontent à plus d'un siècle, et les mesures par satellites n'ont qu'une trentaine d'années.

La situation devrait s'améliorer grâce au réseau international *Argo* et à ses plus de 3 000 flotteurs. Déployé et géré par plus de 30 pays, ce réseau dresse, presque en temps réel, des cartes de température et de salinité des eaux jusqu'à 2 000 mètres de profondeur, et ce sur l'ensemble des océans. Le réseau est achevé depuis moins de dix ans et est exploité depuis peu pour étudier les interactions du changement climatique et des océans.

Ainsi, Dean Roemmich et John Gilson, de l'Institut d'océanographie Scripps, en Californie, ont comparé les données d'*Argo* avec les observations menées à partir des années 1980. Ils ont montré que la couche supérieure de l'océan (jusqu'à quelques centaines de mètres sous la surface) s'est réchauffée d'environ 0,2 °C au cours des deux dernières décennies, tandis que la salinité y a augmenté de 0,1 pour cent. En revanche, à plus grande profondeur, l'eau s'est notablement rafraîchie. Reste à déterminer si ces variations sont dues au changement climatique (la variabilité naturelle est importante dans l'Atlantique Nord) et si elles suffiront à altérer localement le climat.

Les données du réseau *Argo* fournissent quelques indices. Pour que la planète garde une température constante, elle doit émettre vers l'espace une quantité de chaleur égale à celle apportée par le flux solaire. L'accumulation de gaz à effets de serre dans l'atmosphère semble perturber cet équilibre. Le réchauffement de 0,2 °C sous la surface de l'océan correspond à un excès de rayonnement incident d'environ un watt par mètre carré.

Ces premiers résultats permettront d'améliorer les modèles climatiques et d'entrevoir ce qui nous attend dans les prochaines décennies. Nous étudions les données de surface obtenues par satellites, les mesures effectuées par le réseau *Argo* dans la couche superficielle de l'océan, et les modèles numériques. Dans les dix ans à venir, nous pourrons probablement préciser l'influence du Gulf Stream sur le climat et, plus généralement, le rôle joué par les océans dans la régulation du climat. ■

La physique de la natation

© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013

© Steve Christo/Steve Christo Corbis

L'ESSENTIEL

- Au plus haut niveau, les performances d'un nageur dépendent de son habileté technique.
- Le mécanisme de propulsion du nageur fait encore l'objet de débats.
- Tourbillons, traînée, portance, frottements, vagues, turbulences : nombre de facteurs influent sur la vitesse du nageur. Lequel prédomine ?
- Pour le savoir, physiciens et ingénieurs décortiquent chaque mouvement des athlètes à l'aide de capteurs et de simulations numériques.

Nunzio Lanotte et Sophie Lem

Le corps humain est de forme si peu régulière que l'explication physique de la propulsion d'un nageur fait toujours débat. Traînée, portance, tourbillons, etc. : plusieurs mécanismes distincts seraient en jeu.

La natation est l'un des sports les plus populaires au monde. Lors des dernières Olympiades de Londres, des athlètes des cinq continents ont remporté 34 médailles d'or, et leurs performances ont captivé des centaines de millions de téléspectateurs. Et dès le 19 juillet prochain, à Barcelone, 2 500 athlètes issus de 180 pays tenteront leur chance lors de la 15e édition du championnat du monde de natation. Si un tel engouement entoure ce sport, c'est peut-être parce qu'il requiert non seulement des qualités physiques exceptionnelles, mais aussi une technique raffinée. Les nageurs se soumettent à des entraînements exigeants : un athlète de haut niveau parcourt en moyenne 15 kilomètres par jour, répartis sur deux sessions, et suit un programme de préparation poussée. Néanmoins, sa résistance physique est inutile si elle ne s'accompagne pas d'une maîtrise parfaite de chaque geste.

La traînée, frein et propulseur

La science et la technologie s'intéressent depuis des années aux mouvements des nageurs et contribuent à l'amélioration de leurs performances. Cette synergie n'a rien d'étonnant, si l'on songe qu'une victoire ou une défaite se jouent à quelques centièmes de seconde. Nous brosserons ici un panorama des lois physiques qui peuvent s'appliquer à la natation, des théories proposées pour décrire le mode de propulsion du nageur et des techniques employées dans les centres de recherche les plus avancés. Ce qui pourrait sembler à première vue un mécanisme simple est en réalité un casse-tête passionnant, que maints chercheurs tentent de résoudre.

Aussi surprenant que cela puisse paraître, aucune théorie ne fait l'unanimité parmi les scientifiques pour expliquer le mécanisme propulsif des nageurs, c'est-à-dire la façon dont ils avancent dans l'eau. Pourtant, le mouvement des corps immergés est régi par des lois connues depuis des siècles (le principe d'action-réaction de Newton, le théorème de Bernoulli, au fondement de la mécanique des fluides, les équations de Navier-Stokes, qui décrivent l'écoulement des fluides, ou le théorème de Kutta–Joukowski, fondamental en aérodynamique), voire depuis des millénaires dans le cas de la poussée d'Archimède. Toute la difficulté est

TRAÎNÉE, PORTANCE ET COUCHE LIMITE

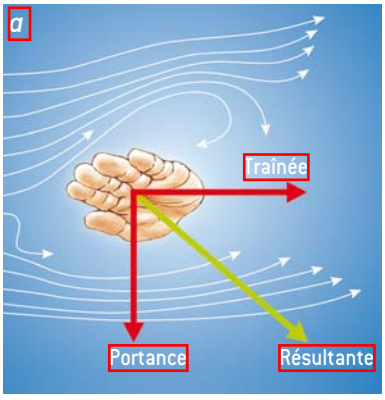
Pour comprendre comment un nageur se propulse dans l'eau, il faut prendre en compte l'ensemble des forces exercées par l'eau sur le corps en mouvement. La somme – ou plus exactement l'intégrale de ces forces, nommée résultante des forces hydrodynamiques – présente deux composantes, l'une parallèle à la vitesse du corps, mais orientée dans le sens contraire, dite traînée ou résistance, l'autre dans n'importe quelle direction du plan perpendiculaire à la traînée, dite portance. Dans le cas d'une barque motorisée, par exemple, c'est la portance exercée sur les pales qui produit une poussée parallèle à l'axe de rotation de l'hélice et fait avancer l'embarcation.

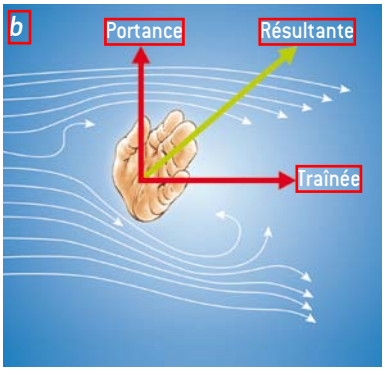
Un autre phénomène physique joue un rôle important durant la nage : la couche limite. Cette strate de particules fluides d'une fraction de millimètre d'épaisseur se forme au contact de la surface de l'objet en mouvement. À l'intérieur de la couche limite, les particules qui adhèrent à la paroi se déplacent à la même vitesse que l'objet – leur vitesse relative est donc nulle. Les particules les plus éloignées ont, elles, une vitesse proche de celle du fluide.

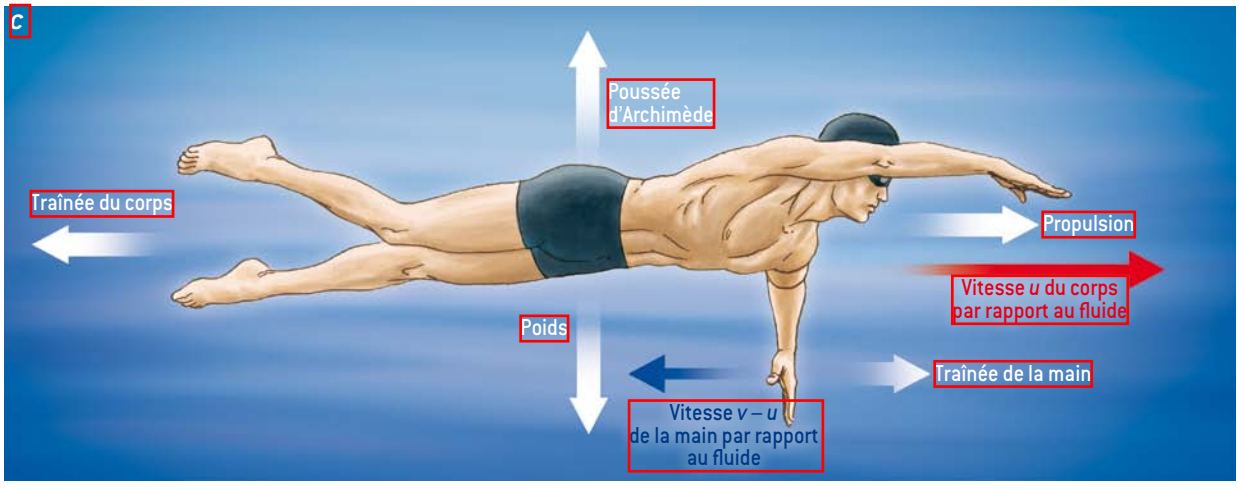
Si les particules de fluide se déplacent de façon ordonnée, l'écoulement est dit laminaire. Dans ce régime, les forces dues à la viscosité du fluide prévalent. Si les particules se déplacent de façon désordonnée, l'écoulement est turbulent et, dans ce cas, les forces d'inertie prévalent sur les forces visqueuses.

En natation, le régime turbulent domine et les forces de type visqueux ont peu d'importance. Lorsque le nageur avance, la couche limite adhère à la partie antérieure de son corps, mais s'en détache en un certain point. En aval du point de décollement se forme alors une zone de basse pression dite sillage, où les mouvements des particules fluides sont désordonnés. La différence de pression entre les parties antérieure et postérieure du corps augmente, ainsi que la traînée, engendrée en grande partie par cette différence de pression. En outre, plus le décollement de la couche limite intervient tôt en amont, plus le sillage, et donc la traînée, est important.

Le décollement de la couche limite intervient plus tard si l'écoulement est turbulent. Si l'on réussit à transformer un écoulement laminaire en écoulement turbulent, on retarde ainsi le décollement de la couche limite et l'on réduit la traînée. C'est la raison pour laquelle une balle de golf va plus loin qu'une balle lisse : ses aspérités perturbent l'écoulement dans la couche limite et engendrent une turbulence.







Les principales forces qui s'exercent sur un nageur sont, outre le poids et la poussée d'Archimède, la propulsion et la traînée *(c)*. Lorsque la main se déplace vers l'arrière, elle produit elle aussi une traînée, opposée à celle du corps. Si la vitesse *v* de la main par rapport au corps est supérieure à la vitesse *u* du corps, la traînée de la main contribue à la propulsion. Sinon, elle freine le corps. En laissant dépasser la main par la fenêtre d'une voiture en mouvement, on obtient, outre la traînée, une portance dirigée vers le haut *(a)* ou vers le bas *(b)* selon l'orientation de la main. Sur la modélisation ci-dessus *(d)*, une couche limite laminaire s'écoulant de gauche à droite *(rouge-jaune)* rencontre une perturbation et se décolle, subissant alors des instabilités tourbillonnaires. Quand la couche limite se décolle, la portance disparaît.

© Eur. J. Phys. Avec la permission de H. Hazard et al., Physics Of Fluids, Vol. 21, 064106, (2009), American Institute of Physics, par Jean-Bruno Vacant

© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013

de déterminer quelles équations s'appliquent et dans quelle mesure.

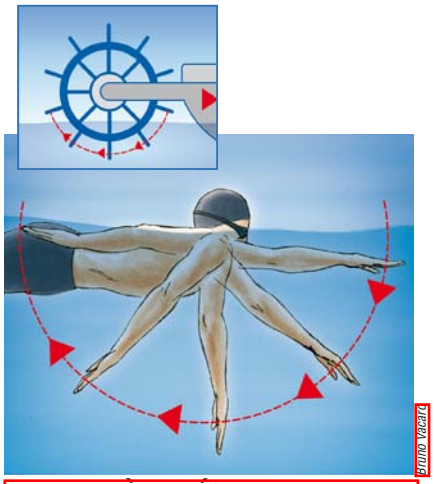
Tout le monde s'accorde cependant sur quelques principes fondamentaux. Un corps qui se meut dans l'eau à une vitesse constante est soumis à quatre forces principales : son poids, la poussée d'Archimède, la propulsion et la traînée engendrée par le mouvement. Les deux premières agissent dans une direction verticale ; elles sont liées à la masse du corps et à sa densité. Les deux autres s'exercent horizontalement et sont celles sur lesquelles le nageur peut agir : pour avancer plus vite, un athlète doit augmenter la propulsion et réduire la traînée.

La traînée, une résistance qui s'exerce dans le sens opposé à celui de la vitesse, est bien décrite. C'est un phénomène complexe, rassemblant plusieurs facteurs, dont les plus importants sont la traînée de frottement, la traînée de vague et la traînée de forme. La traînée de frottement – la plus faible des trois contributions – est due au contact entre la surface du corps et le fluide. Elle disparaît là où la mince couche de fluide qui adhère au corps – la couche limite – s'en détache (on parle de décollement de la couche limite, *voir l'encadré ci-contre*).

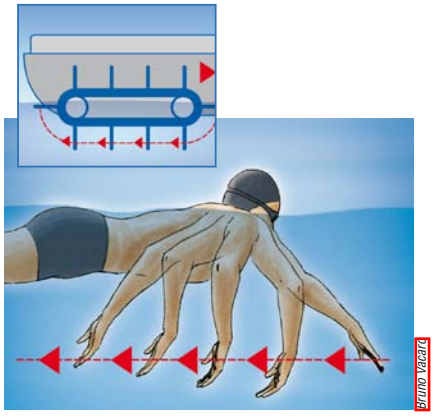
La traînée de vague est créée tant par des ondes externes (qui proviennent par exemple d'une ligne de nage voisine durant une épreuve) que par des ondes que le nageur a lui-même produites. Ce type de traînée caractérise les activités qui se situent à l'interface de deux fluides, ici l'eau et l'air. Elle augmente considérablement avec la vitesse, mais tend à diminuer lorsqu'on s'éloigne de l'interface : à un mètre de profondeur, ses effets sont déjà quasi nuls. Les nageurs cherchent donc à maximiser la phase subaquatique, qui ne doit pas dépasser 15 mètres par longueur de bassin selon la réglementation.

Enfin, le facteur le plus important est de loin la traînée de forme, qui dépend des dimensions et de la forme du corps du nageur, de son assiette, de sa vitesse et des mouvements qu'il effectue. La traînée de forme est proportionnelle à la densité du fluide, à la section frontale du corps, et au carré de sa vitesse.

Ainsi, la traînée augmente avec le carré de la vitesse. Plus le nageur avance vite, plus la résistance qu'il rencontre augmente. La densité de l'eau étant presque 1 000 fois supérieure à celle de l'air, contrôler parfaitement ses mouvements afin de réduire le plus possible la traînée est bien plus important que dans le cas d'un coureur, qui se déplace dans l'air. Néanmoins, la traînée ne se limite pas à freiner le nageur : paradoxalement, elle l'aide aussi à avancer. Lorsque le bras se dirige vers l'arrière, il rencontre une résistance qui s'exerce en sens inverse de la vitesse du bras, c'est-à-dire vers l'avant. Dans ce cas, le nageur a intérêt à ce que la traînée soit importante : s'il essayait de la réduire, en fermant le poing ou en plaçant sa main en couteau, sa poussée vers l'avant diminuerait notablement.



1. LA PREMIÈRE THÉORIE de la propulsion, avancée au début du XX^{e} siècle, est fondée sur une analogie avec la roue à aubes : en pivotant, raide, autour de l'épaule, le bras déplace une masse d'eau vers l'arrière. En réaction, la masse d'eau pousse la main – donc le corps – vers l'avant.



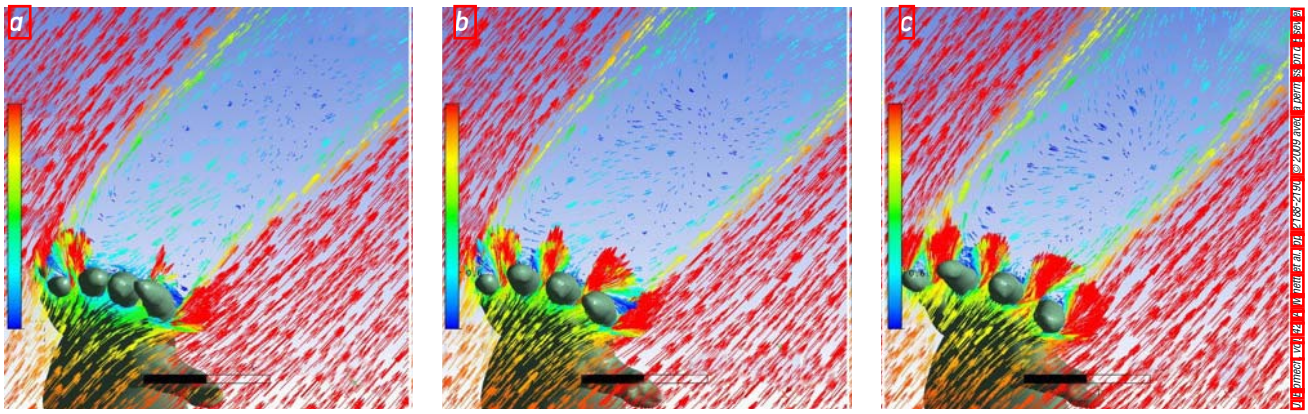
2. DANS CETTE VERSION AMÉLIORÉE de la première théorie de la propulsion, on tient compte de la flexibilité du coude à l'aide d'une analogie avec la chenille d'un tank : le mouvement de la main n'est plus circulaire, mais linéaire.

En général, la traînée dépend de la vitesse relative entre le corps et le fluide. Il n'y a donc pas de différence entre un corps qui se déplace dans un fluide immobile et un corps immobile dans un fluide qui s'écoule. Cette propriété permet d'analyser les mouvements des nageurs dans un bassin de nage à contre-courant, un type particulier de bassin hydrodynamique où l'eau circule en boucle à une vitesse contrôlée (en général, la vitesse maximale de l'eau y est de trois mètres par seconde) grâce à des hélices actionnées par des moteurs électriques. Le bassin de nage à contre-courant est à l'eau ce que la soufflerie est à l'air. Il permet d'effectuer des tests fluidodynamiques, mais également des prises de vue de bonne qualité ou des mesures métaboliques difficiles à réaliser dans une piscine classique.

La main : roue à aubes ou aile d'avion ?

Une autre force, négligée dans le bilan des forces s'exerçant sur le corps, mais qui pourrait avoir un impact plus important lors du mouvement de certaines parties du nageur, est la portance – la composante perpendiculaire à la vitesse de la force exercée par le fluide sur le corps. Dans le bilan global des forces, la portance intervient peu, car elle ne se manifeste qu'en présence de la couche limite. Or le décollement de cette couche est presque immédiat dans le cas du corps humain, tant sa forme est irrégulière. Néanmoins, certains physiciens, nous le verrons, s'interrogent sur le rôle de la portance dans la propulsion, à l'échelle de la main ou du pied.

De façon générale, les divergences entre chercheurs sur le mécanisme de la propulsion se résument ainsi : le nageur avance-t-il en exploitant la traînée ou la portance ? S'il utilise les deux, dans quelles proportions ? Comment cette traînée ou cette portance sont-elles produites ? Pour simplifier, les



3. QUELQUES SIMULATIONS NUMÉRIQUES DE LA MAIN DU NAGEUR. Selon une étude réalisée en 2009 par Alberto Minetti, de l'Université de Milan, en Italie, et ses collègues, l'écartement optimal des doigts – de 12 degrés *(b)* – est celui qui trace le sillage le plus large.

physiciens s'intéressent principalement aux mouvements des bras, qui fournissent jusqu'à 80 pour cent de la propulsion.

La première théorie de la propulsion en natation, qui remonte au début du XX^{e} siècle, repose sur une analogie simple : la roue à aubes *(voir la figure 1)*. Dans cette hypothèse, le bras, raide, pivote autour de son axe (l'épaule) et la main, en repoussant une masse d'eau vers l'arrière, crée une traînée vers l'avant : selon le principe d'action-réaction ou troisième loi de Newton, la masse d'eau déplacée repousse la main, donc le corps du nageur, vers l'avant. La chenille est une variante qui tient compte de la flexion du coude du nageur et réduit la dispersion d'énergie vers le bas lorsque la trajectoire du bras décrit un arc de cercle *(voir la figure 2)*.

Aujourd'hui encore, la plupart des physiciens admettent que la traînée produite lorsque le bras se dirige vers l'arrière joue un rôle fondamental dans le mécanisme de la propulsion. Mais d'autres hypothèses ont aussi été émises pour expliquer certaines observations. James Counsilman, entraîneur à l'Université de l'Indiana, aux États-Unis, dans la seconde moitié du XX^{e} siècle, fut le premier à mettre en doute la théorie newtonienne. En 1968, il réalisa une série d'expériences qui sont entrées dans l'histoire. Il a placé de petites sources lumineuses entre les doigts de nageurs de haut niveau et filmé leur évolution dans une piscine plongée dans le noir. Il a ainsi visualisé la trajectoire subaquatique des mains de l'athlète.

Cette trajectoire est bien loin de s'inscrire dans un plan, comme pour la roue à aubes ou la chenille. Elle présente au contraire une série de mouvements latéraux – de godille – dirigés vers l'extérieur ou l'intérieur. Cela poussa Counsilman à proposer une théorie de la propulsion des nageurs qui donne un plus grand rôle à la portance : durant ces mouvements latéraux, les mains se comporteraient comme les ailes d'un avion.

Le profil d'une aile d'avion est tel que, lorsque l'avion avance, l'écoulement de l'air autour de l'aile crée une force verticale dirigée vers le haut, la portance, qui permet à l'avion de voler. Cette force est due à l'asymétrie de l'aile : lorsque l'aile avance, les particules d'air s'écoulent au-dessus et au-dessous. Toutefois, la courbure plus élevée de la face supérieure fait accélérer les particules qui la longent par rapport à celles qui passent sous l'aile. L'accélération diminue la pression exercée sur la face supérieure de l'aile. Cette différence de pression est une manifestation d'une propriété de la dynamique des fluides observée et quantifiée dès le XVII^{e} siècle par le savant italien Evangelista Torricelli, puis formalisée au XVIII^{e} siècle par le physicien suisse Daniel Bernoulli : lorsque la vitesse d'un fluide augmente, sa pression diminue, et *vice versa*. Cette loi porte aujourd'hui le nom de théorème de Bernoulli.

Un rôle pour la portance...

La différence de pression entre les faces supérieure et inférieure de l'aile se traduit en une force verticale : la portance. La théorie bernoulliste de la propulsion des nageurs est séduisante : élégante, elle explique les résultats observés lors des expériences et s'appuie sur une loi physique connue de tous. Jusque dans les années 1990, les physiciens de la natation se sont divisés entre newtoniens et bernoullistes.

Le théorème de Bernoulli ne s'applique qu'à une condition : la couche limite doit adhérer au corps. Même dans le cas d'un

LES AUTEURS

Nunzio LANOTTE est ingénieur en mécatronique de l'Université de Rome La Sapienza. Il dirige à Rome le bureau d'études APLab, spécialisé dans les technologies appliquées au sport. Sophie LEM est auteur d'articles et d'ouvrages de vulgarisation scientifique.

BIBLIOGRAPHIE

N. Lanotte et S. Lem, **Sportifs high tech,** Belin, 2012.

G. Gatta *et al.*, **Power production of the lower limbs in flutterkick swimming**, *Sports Biomech.*, vol. 11, pp. 480-491, 2012.

S. Parnell, **Slippery business,** *The Australian*, 31 mai 2008.

R. Arellano, **Hydrodynamics of swimming propulsion,** dans M. Sidney *et al.*, *Actes des IV^{e} Journées spécialisées de natation*, Université de Lille, 2008.

J. M. Stager et D. A. Tanner, **Swimming,** Blackwell Science, 2005.

© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013

objet profilé comme une aile d'avion, si l'angle entre l'aile et la direction du déplacement devient trop important, la couche limite se décolle : c'est le décrochage. Une zone de turbulence apparaît autour de l'objet et la différence de pression s'annule. La main d'un nageur est-elle assez fuselée, et présente-t-elle un angle d'attaque assez petit pour empêcher le décollement de la couche limite ? Plusieurs expériences conduites dans les années 1990 montrent le contraire.

En 1991, en attachant des fils de laine à une main artificielle en résine immergée selon des angles d'attaque variés, Michael Ferrel, au Collège Cortland, aux États-Unis, a constaté que les fils se meuvent de façon chaotique. La couche limite s'est donc décollée, et un écoulement désordonné entoure la main. Il en est de même quels que soient la vitesse de la main ou son angle d'attaque. En 2002, l'ingénieur américain Barry Bixler a obtenu des résultats analogues en utilisant une autre technique : une simulation numérique, à l'aide des équations de la mécanique des fluides, de l'interaction eau-main.

Contester l'applicabilité du théorème de Bernoulli à la propulsion du nageur ne signifie pas pour autant nier tout rôle à la portance. L'inclinaison de la main par rapport à la direction de la vitesse donne nécessairement à la résultante des forces de pression une composante orthogonale à la vitesse. Et si un autre phénomène donnait une importance particulière à la portance ? Au moment où les bernoullistes perdent du terrain, une nouvelle idée retient l'attention : la théorie du vortex. Les enregistrements vidéo subaquatiques ont en effet mis en évidence les tourbillons importants que produisent les nageurs.

Principalement défendue par Cecil Colwin (1984), entraîneur olympique en Afrique du Sud, puis au Canada, cette théorie est fondée sur une analogie avec le mode de propulsion des poissons : il se formerait, autour de la main et des jambes de l'athlète, des tourbillons similaires à ceux produits par la nageoire caudale d'un poisson en mouvement *(voir la figure 5)*. Le cycle du bras du nageur (ou de la nageoire caudale) est divisé en deux phases.

Durant la première, la main (ou la nageoire) se comporte comme une aile d'avion. D'après les lois de l'aérodynamique, il se forme à l'arrière de l'aile un tourbillon dit de démarrage, dû à l'écoulement de l'air de la zone de haute pression (sous l'aile) vers la zone de basse pression (au-dessus). Ce tourbillon de démarrage engendre autour de l'aile un autre tourbillon de sens de rotation opposé, nommé tourbillon lié. En raison de son sens de rotation, le tourbillon lié augmente la vitesse de l'air situé sur l'aile et diminue celle de l'air situé sous l'aile, rendant encore plus importante la différence de pression entre le dessus et le dessous de l'aile et, par conséquent, la portance. Selon les tenants de la théorie du vortex, il se forme autour de la main du nageur un système tourbillonnaire de ce type, et la propulsion dériverait essentiellement de la portance.

...ainsi que pour le vortex

Un tourbillon lié ne peut toutefois être maintenu à l'infini. La seconde phase du mécanisme entre alors en action : lorsque la main change de direction, le tourbillon de démarrage se détache et se dirige vers l'arrière. En vertu de la troisième loi de Newton, il se produit alors, en réaction au détachement de cette masse vers l'arrière, une accélération du corps vers l'avant.

La théorie du vortex a suscité des objections. Il est difficile de démontrer la présence de tourbillons liés autour de la main du nageur. Cette théorie implique aussi l'existence d'accélérations lorsque la main change de direction. Or les mesures ont au contraire montré que le barycentre de l'athlète décélère durant les changements de direction de la main, et que les accélérations se produisent à peu près à la moitié de la phase propulsive.

Ces mesures sont effectuées à partir d'enregistrements vidéo d'athlètes, au moyen de logiciels d'analyse biomécanique, ou encore grâce à des capteurs microélectromécaniques (MEM). Ces minuscules dispositifs de mesure, qui contiennent un accéléromètre et un gyroscope triaxiaux, sont placés dans une ceinture ou un bracelet. Les données mesurées, c'est-à-dire les accélérations le long des trois axes et les vitesses angulaires autour de ces axes, sont traitées par des algorithmes complexes pour fournir d'autres informations utiles : vitesse, fréquence du cycle du bras, roulis, symétrie droite-gauche, etc.

Les profils d'accélération et de décélération obtenus par ces mesures semblent cohérents avec la théorie de la traînée : dans ce modèle, lors d'un changement de

DÉPART ET VIRAGE

Le départ, le virage et la phase de glisse subaquatique sont trois phases fondamentales et souvent décisives lors d'une compétition. Certains champions, tel Michael Phelps, se détachent de leurs concurrents grâce à leur maîtrise parfaite de ces trois gestes techniques. Les entraîneurs et les techniciens accordent donc une attention toute particulière à la mesure, l'analyse et l'amélioration de ces moments.

L'un des dispositifs les plus avancés, tel celui de Canberra, en Australie *(ci-contre)*, comporte deux caméras synchronisées placées au-dessus et en dessous de la surface de l'eau. Le plot de départ est équipé d'une plate-forme de force, c'est-à-dire de capteurs capables de mesurer, dans les trois directions de l'espace, les forces que le nageur transmet au plot au moment du plongeon. Ces forces sont visualisées en temps réel sur un diagramme et peuvent être superposées aux enregistrements vidéo, sous la forme d'un vecteur. Les grandeurs cinématiques telles que l'angle de pénétration dans l'eau ou la distance parcourue sont aussi mesurées directement sur la vidéo grâce à des logiciels d'analyse biomécanique. Une série de barrières magnétiques situées à intervalles réguliers dans la ligne de nage permet de mesurer les temps de passage. Au total, plus de 30 paramètres sont pris en compte et enregistrés dans une base de données qui contient des informations sur les performances de centaines d'athlètes.

Le système prévoit enfin une visualisation en temps réel ou après un bref intervalle sur un écran en bord de piscine, afin que l'athlète puisse revoir quasi immédiatement sa performance. La mémoire exacte du geste effectué reste en effet imprimée dans le cerveau du sportif moins d'une minute.

Le plot de départ (ici à l'Institut australien du sport, à Canberra) est équipé de capteurs de force. Des points sur le corps de l'athlète facilitent l'analyse biomécanique des enregistrements vidéo.

direction, la main cesse de repousser l'eau vers l'arrière, et produit donc une traînée moins efficace pour propulser le corps, qui décélère. En outre, c'est à la moitié de la phase propulsive que la vitesse de la main est la plus élevée – et c'est bien à ce moment-là que l'on observe les accélérations.

Décrochage retardé

Une autre tentative d'explication du mécanisme de propulsion du nageur, enfin, a été proposée en 2000, en particulier par le Hollandais Huub Toussaint, du Centre de recherche sur la natation d'Amsterdam. Cette théorie part d'un constat : la dynamique des bras du nageur implique de tels changements de vitesse et de direction qu'il est impossible de l'analyser avec les lois utilisées jusqu'alors. Ces mêmes lois ont d'ailleurs montré leurs limites, se révélant incapables d'expliquer le vol des insectes (le paradoxe du bourdon, qui ne devrait pas voler d'après cette théorie, en est un exemple célèbre) et de certains petits oiseaux. Durant les années 1990, divers travaux ont mis en évidence, lors de la natation, une série d'effets complexes dits non stationnaires, parmi lesquels le décrochage retardé et le tourbillon de bord d'attaque, qui produisent, chez certains insectes, une portance supplémentaire leur permettant de voler.

Le décrochage retardé a été observé dès les années 1930 lors d'expériences visant à étudier le vol des insectes : lorsque l'angle d'attaque d'une aile modèle placée dans un écoulement fluide est grand, le décrochage est retardé. Ce décrochage retardé entraîne la formation d'un tourbillon sur le bord d'attaque de l'aile (la partie la plus en amont) qui réduit la pression au-dessus de l'aile, augmentant ainsi la portance. Selon H. Toussaint, les mêmes effets sont à l'œuvre durant le mouvement du bras en crawl, et les meilleurs nageurs seraient ceux qui réussissent instinctivement à les exploiter pour se propulser.

Roue à aubes, godille, ailes d'avion, poissons, insectes et oiseaux : pourquoi est-il aussi difficile de fournir une explication qui satisfasse la majorité des chercheurs ? Il y a plusieurs raisons à cela. En premier lieu, le mouvement d'un nageur est bien plus complexe que celui d'une roue, d'une hélice ou même d'un poisson ou d'un oiseau. Il suffit de penser aux degrés de liberté du bras humain pour s'en convaincre. Il est donc difficile de créer des simulations fluidodynamiques ou des mécanismes qui reproduisent avec exactitude le mouvement de l'athlète et, par conséquent, celui de l'eau.

La plupart des simulations utilisées en ingénierie sont conçues pour des corps rigides et recourent à des simplifications (vitesse constante, symétrie axiale ou planaire, etc.) qui ne conviennent pas aux dynamiques en œuvre en natation. Les méthodes de simulation numérique en mécanique des fluides étant toutefois de plus en plus raffinées et les ordinateurs de plus en plus puissants, certaines simulations se rapprochent étonnamment de la réalité. Les simulations et mesures expérimentales montreront d'ailleurs probablement, quand elles auront encore

LE SECRET DES SUPERCOMBINAISONS DE NATATION

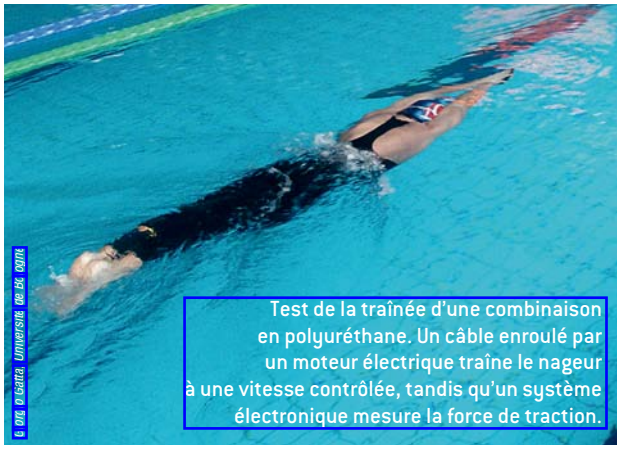
Les combinaisons intégrales en polyuréthane, les « supercombinaisons », ont révolutionné le monde de la natation. Elles sont apparues en 2008, quelques mois avant les jeux Olympiques de Pékin. Entre 2008 et 2009, elles ont notablement amélioré les performances des athlètes : plus de 100 records mondiaux ont été battus, certains avec une marge déconcertante (le record du 4 × 200 mètres féminin en petit bassin a été pulvérisé de huit secondes !). Les supercombinaisons menaçaient l'essence même de la natation, au point que la Fédération internationale de natation (FINA) décida de les interdire fin 2009, malgré les énormes intérêts économiques en jeu.

Quelle est la différence entre une supercombinaison et une combinaison intégrale classique ? Quel avantage procure-t-elle au nageur ? La supercombinaison est née du travail d'ingénieurs de l'aérospatiale, de physiologistes, de biomécaniciens et de fluidodynamiciens de trois continents. Plus de 100 matériaux différents ont été testés, les corps de plus de 400 athlètes ont été scannés en trois dimensions, et les modèles ainsi obtenus ont été insérés dans des simulations numériques de mécanique des fluides *(voir la figure)*. Des essais en soufflerie et en bassin hydrodynamique ont aussi été réalisés.

À l'origine, la supercombinaison était constituée de deux matériaux : un tissu semblable au nylon qui sert de base, et des inserts en polyuréthane soudés par ultrasons pour éviter les coutures, qui produisent une traînée. Depuis, certains modèles concurrents sont fabriqués uniquement en polyuréthane. Les expériences menées en bassin hydrodynamique mettent en évidence une réduction de la traînée par rapport aux combinaisons traditionnelles. À quoi est due cette différence ? Probablement à trois facteurs :

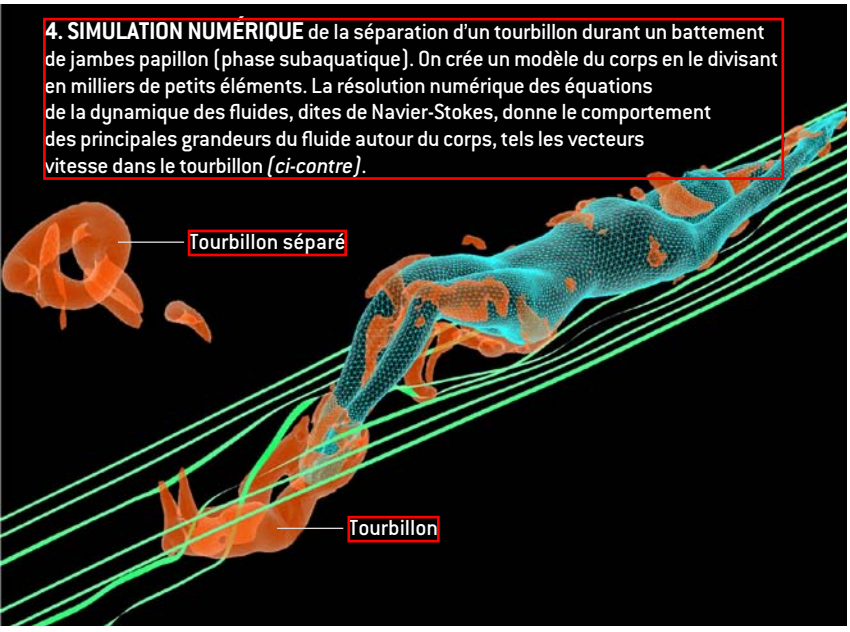
Le premier est la réduction de la traînée de frottement. Même si cette composante est moins importante que la traînée de forme, présenter au contact de l'eau la surface la plus lisse possible a une influence. Les combinaisons en polyuréthane sont plus lisses que les autres. Le deuxième facteur est la réduction de la traînée de forme. Les supercombinaisons sont beaucoup plus serrées que les autres. Il faut près de 30 minutes pour enfiler certains modèles. Elles réduisent par conséquent la section frontale de l'athlète. Elles tendent en outre à aplatir les plis formés par les muscles en suspension dans l'eau, rendant la forme de l'athlète plus régulière et retardant le décollement de la couche limite. Des tentatives ont même été faites (sans succès pour l'instant) pour parsemer la surface des combinaisons d'irrégularités (type peau de requin) et favoriser la transition laminaire-turbulent.

Le troisième facteur est physiologique : la contention rend les muscles plus « compacts » en favorisant la circulation du sang, et diminue le temps et le coût énergétique des contractions musculaires nécessaires aux mouvements de l'athlète. Les tests de laboratoire n'ont pas mis en évidence une amélioration de la flottabilité, qui est du reste expressément interdite par le règlement de la FINA.

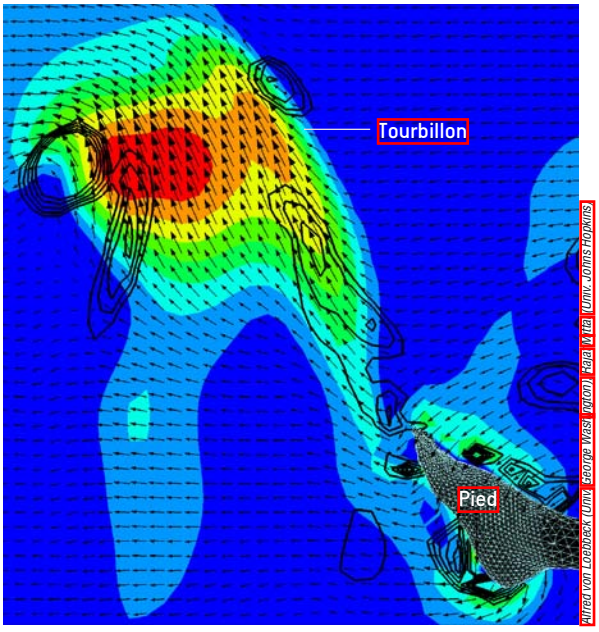


Test de la traînée d'une combinaison en polyuréthane. Un câble enroulé par un moteur électrique traîne le nageur à une vitesse contrôlée, tandis qu'un système électronique mesure la force de traction.

© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013



4. SIMULATION NUMÉRIQUE de la séparation d'un tourbillon durant un battement de jambes papillon (phase subaquatique). On crée un modèle du corps en le divisant en milliers de petits éléments. La résolution numérique des équations de la dynamique des fluides, dites de Navier-Stokes, donne le comportement des principales grandeurs du fluide autour du corps, tels les vecteurs vitesse dans le tourbillon *(ci-contre)*.

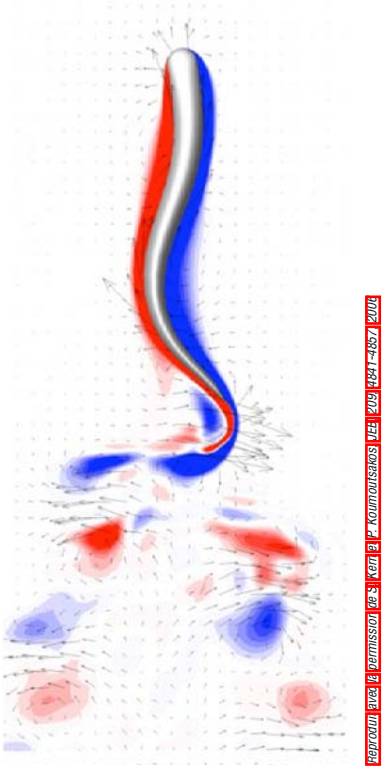


gagné en finesse, que tous les mécanismes décrits ici interviennent dans la propulsion du nageur, dans des proportions variables en fonction des nages et de la division bras-jambes. Par exemple, lors de la nage papillon, les tourbillons produits par les jambes pourraient avoir un rôle prédominant, tandis que, côté mains, la traînée l'emporterait.

Si la compréhension des mécanismes de la nage est lente, c'est aussi pour des raisons pratiques : les physiciens et ingénieurs qui s'intéressent à la natation sont peu nombreux et ne disposent pas des moyens techniques et financiers des secteurs aéronautique et naval. Enfin, leurs recherches visent souvent à mesurer et à améliorer les performances des nageurs plutôt qu'à approfondir les bases théoriques du mouvement des athlètes dans l'eau.

Améliorer la théorie... et le matériel

Aujourd'hui, les scientifiques suivent deux principales lignes directrices. L'une est la mise au point de simulations plus fines et de méthodes de mesure plus précises afin de démontrer expérimentalement les diverses théories de la propulsion. En effet, aucune équipe n'a jusqu'ici pu fournir des preuves irréfutables à l'appui de ses thèses. L'autre ligne directrice consiste à appliquer des connaissances théoriques et des avancées technologiques à l'amélioration de la technique des nageurs. L'évolution des différentes théories a poussé les entraîneurs



5. SIMULATION DES TOURBILLONS produits par la nageoire caudale d'un poisson vu de dessus et des vecteurs vitesse du fluide autour de l'animal. En bout de course d'un côté du corps, la nageoire amorce son mouvement vers l'autre côté. Le tourbillon bleu se détachera alors de la nageoire, tandis qu'un tourbillon dans l'autre sens *(en rouge)* apparaîtra à sa place. Ces tourbillons augmentent la vitesse du poisson. Un phénomène similaire pourrait intervenir aux pieds du nageur.

à proposer plusieurs modifications dans l'exécution du mouvement de bras, sur la longueur de la phase de glisse subaquatique, la trajectoire à adopter sous l'eau, la rotation des épaules ou la position de la tête. Enfin, malgré l'interdiction des supercombinaisons, les simulations et expériences visant à mettre au point des matériaux plus performants ont toujours le vent en poupe : costumes en fibres de carbone et lunettes intégrées au bonnet de bain pour réduire la traînée sont les dernières marottes du moment *(voir l'encadré page ci-contre)*.

Les aptitudes de l'homme à se mouvoir dans l'eau semblent limitées : ses «nageoires» sont trop longues et trop fines et sa technique discutable. Son efficacité propulsive – rapport entre la puissance utile à la propulsion et la puissance totale produite (la puissance utile et celle qui s'est dissipée dans l'eau) – est faible comparée à celle des poissons. Calculée de façon indirecte à l'aide de mesures expérimentales et de modèles hydrodynamiques de l'homme dans l'eau, elle serait d'environ 50 pour cent, tandis que celle des poissons est estimée à 80 pour cent. Cela signifie que l'homme disperse la moitié de son potentiel propulsif et que sa technique, même si elle s'améliore d'année en année (les records en natation progressent bien plus vite qu'en athlétisme), n'a pas encore trouvé son point d'aboutissement. ■

Retrouvez plus d'informations sur www.pourlascience.fr

Quand les accordent

1. LES ÉLÉPHANTS D'AFRIQUE vivent en sociétés matriarcales. Ils émettent des cris variés et sont capables d'imiter des sons entièrement nouveaux.

© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013

animaux leurs cris

Kendra Sewall

Les animaux de plusieurs espèces sociales imitent les cris de leurs congénères. Ce phénomène renforce les liens entre individus et favorise la survie de l'espèce.

Nous devinons souvent d'où vient notre interlocuteur juste en l'entendant parler. Pour ce faire, nous nous fondons sur des indices tels que l'accent et le vocabulaire, qui caractérisent les dialectes régionaux. De même, au sein d'un dialecte, les inflexions et les intonations diffèrent parfois selon la classe socio-économique.

Le partage de caractéristiques vocales par des individus d'une région géographique ou d'un groupe social n'est pas propre aux humains. Il se rencontre aussi chez d'autres animaux capables d'apprentissage vocal. La plupart des espèces émettent leurs cris de façon innée, sans lien avec leurs expériences sociales, mais quelques-unes les apprennent : c'est notamment le cas de certains oiseaux, des cétacés, des chauves-souris et des éléphants. Nombre d'espèces capables d'un tel apprentissage effectuent une convergence vocale : les individus modifient légèrement certains de leurs cris pour les rendre similaires à ceux de leurs congénères (les membres de leur couple, de leur famille, de leur groupe social...) ; on dit que leurs vocalisations deviennent concordantes. Ainsi, les cris concordants refléteraient l'appartenance sociale.

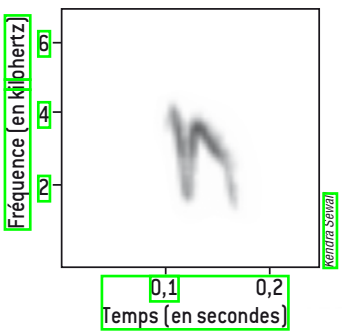
L'ESSENTIEL

- **De nombreux animaux sociaux émettent tout un répertoire de cris aux fonctions variées.**
- **Certains modifient légèrement leurs cris pour les rendre semblables à ceux de leurs congénères. Les cris concordants refléteraient ainsi une appartenance sociale.**
- **La concordance vocale augmenterait la valeur adaptative des individus, en facilitant des coopérations dont résultent des bénéfices mutuels.**

Les orques (*Orcinus orca*), par exemple, sont capables de convergence vocale. Ces baleines chassent en groupes stables, nommés pods. Tous les pods d'une même région sont génétiquement apparentés et forment un clan. Volker Deecke, de l'Université de Cumbrie, en Angleterre, ainsi que John Ford et ses collègues de l'Université de la Colombie-Britannique, au Canada, ont montré que les orques d'un même clan émettent des vocalisations ayant de multiples caractéristiques communes, comme si elles avaient le même accent. Cet accent reflète la lignée des animaux et leur appartenance au clan. Les vocalisations sont encore plus similaires au sein d'un pod, ce qui permet de déterminer précisément à quel groupe social appartient une orque, ainsi que sa région d'origine.

Pour que la concordance vocale perdure, elle doit augmenter les chances de survie et de reproduction des individus, ou, selon la terminologie évolutionniste, la valeur sélective des individus. En effet, leurs caractéristiques sont modelées par la sélection naturelle et sexuelle. En quoi un animal favorise-t-il sa survie ou sa reproduction en imitant ou en répondant à

© Gerry Ellis/Minden Pictures/Corbis



2. LES VOCALISATIONS des animaux sont représentées sous forme de spectrogrammes, qui montrent la variation de la fréquence sonore au cours du temps *(ici un cri de bec-croisé des sapins)*.

des appels similaires à ceux de ses congénères ? C'est ce que nous examinerons ici.

Les animaux utilisent des vocalisations à des fins variées *(voir l'encadré ci-dessous)* : l'écureuil émet un caquetage coléreux avertissant ses congénères quand il détecte un prédateur, le lion de mer (la plus grosse des otaries) produit un aboiement agressif pour défendre son territoire… Les appels de contact forment une catégorie particulière de vocalisations, grâce auxquelles les animaux maintiennent le contact avec leurs congénères pendant qu'ils se déplacent, ou le rétablissent après une séparation.

De nombreuses espèces émettent des appels de contact. Au sein de certaines, les individus accordent leurs appels avec ceux de leurs compagnons. Les espèces manifestant ce comportement sont presque toutes hautement sociales : elles coopèrent pour trouver ou défendre leur nourriture, élever les petits et éviter les prédateurs.

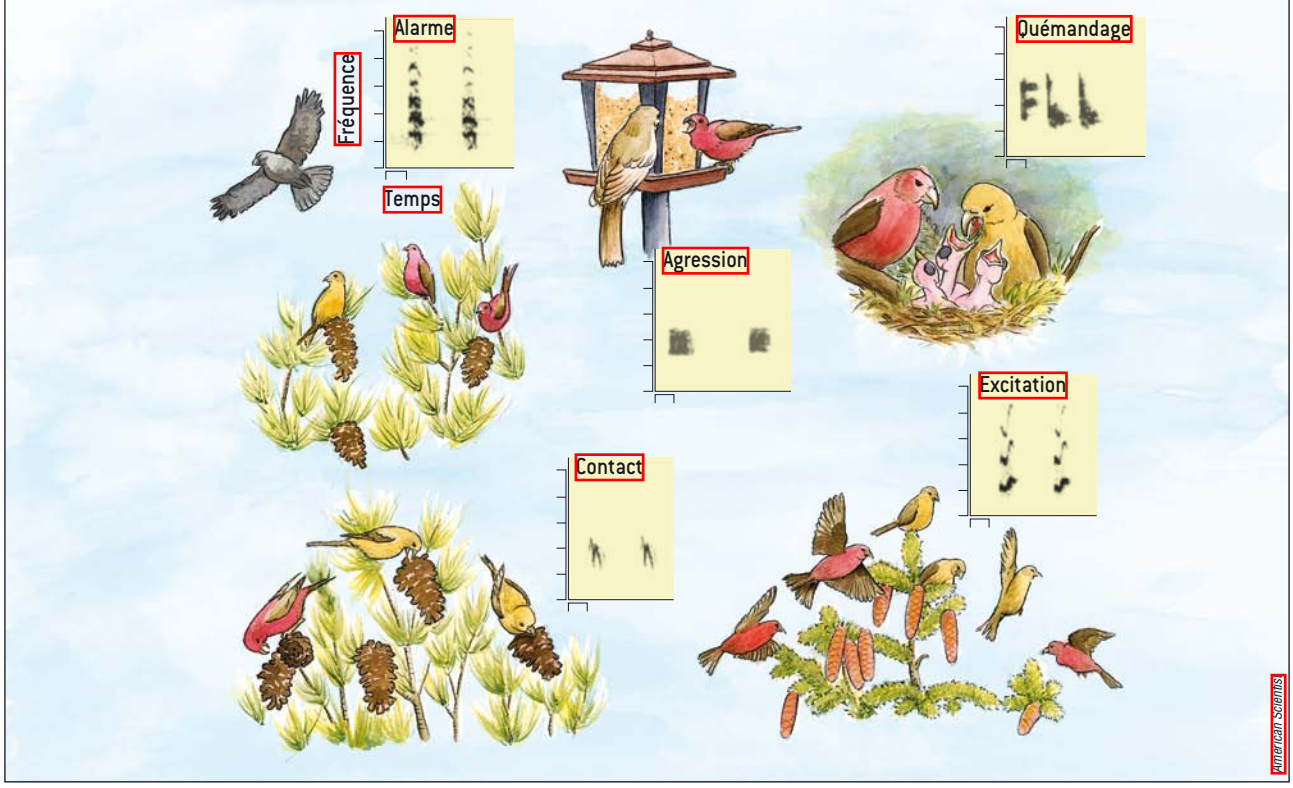
L'association entre concordance vocale et coopération peut paraître évidente, car nous-mêmes imitons les accents et les schémas d'expression des autres. Cette accommodation vocale, comme on la désigne en linguistique, mettrait celui qui écoute en confiance, faciliterait la compréhension du message et refléterait les intentions coopératives et l'appartenance au même groupe. Mais chez les animaux, comment la concordance vocale augmente-t-elle la valeur sélective ?

DES CRIS AUX FONCTIONS VARIÉES

Les cris jouent un rôle essentiel dans les interactions de nombreux animaux sociaux : baleines, dauphins, phoques, éléphants, primates… Ces animaux ont tout un répertoire de cris, chacun ayant une fonction spécifique : alarme (en cas de détection d'un prédateur), agression (pendant les conflits), excitation (par exemple pour signaler une source de nourriture abondante), quémandage (lorsqu'un oisillon demande de la nourriture), etc. Les cris correspondant à ces fonctions sont présentés ci-dessous pour le bec-croisé des sapins *(Loxia curvirostra)*, un passereau.

On a longtemps pensé que les cris étaient déterminés génétiquement, sans influence du contexte social. On sait aujourd'hui que certains animaux les apprennent. On distingue deux types d'apprentissage vocal. Le premier, qualifié de contextuel, consiste à apprendre à quel moment émettre tel ou tel cri : pour les cris d'alarme, par exemple, les jeunes savent les produire de façon innée, mais les émettent parfois au mauvais moment ou pour le mauvais prédateur (le cri peut être différent pour un prédateur terrestre ou aérien). Dans ce type d'apprentissage, les cris n'évoluent pas ; seule change la situation où chacun est émis.

Le second type d'apprentissage est dit de production. Les animaux imitent des cris totalement nouveaux, ou modifient légèrement leurs cris pour les faire ressembler à ceux de leur congénère. Dans ce dernier cas, on parle de convergence vocale. Ce phénomène concerne souvent les appels de contact, utilisés pour maintenir le contact (ou se retrouver après une séparation) au sein d'un couple, d'une famille ou d'un groupe social plus vaste.



© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013

Un bénéfice quasi universel semble être une meilleure détection des appels. En effet, le système auditif d'un individu serait plus sensible aux signaux similaires à ceux qu'il émet. Selon certains scientifiques, cette sensibilisation sélective favorise la détection des appels concordants et pousse ceux qui écoutent à y prêter attention, un peu comme quand on entend son nom prononcé au milieu d'une foule bruyante : notre système sensoriel perçoit cette information importante malgré le bruit ambiant.

Un système auditif plus sensible aux cris concordants

Plusieurs études sur le toui à lunettes *(Forpus conspicillatus)*, un petit perroquet d'Amérique du Sud, accréditent cette thèse. Le toui à lunettes vit en groupes de 10 à 25 individus, souvent apparentés ou en couple. Ralf Wanker et ses collègues de l'Université de Hambourg, en Allemagne, ont observé que chaque perroquet produit à la fois un appel de contact spécifique – son appel de signature – et des imitations des appels de signature de ceux avec qui il interagit. Grâce à des cris diffusés par un haut-parleur, ces biologistes ont montré que les oiseaux répondent plus fortement à un appel si ce dernier imite leur propre appel de signature : cette imitation attire donc leur attention.

La perruche ondulée *(Melopsittacus undulatus)*, ou perruche commune, manifeste un comportement similaire. Steven Brauth et ses collègues de l'Université du Maryland ont montré que l'activité cérébrale d'une perruche entendant un appel diffère selon que cet appel est similaire au sien ou non. Ce résultat suggère que les appels concordants sont traités différemment par le cerveau et étaye l'idée que les individus sont plus sensibles aux appels similaires aux leurs.

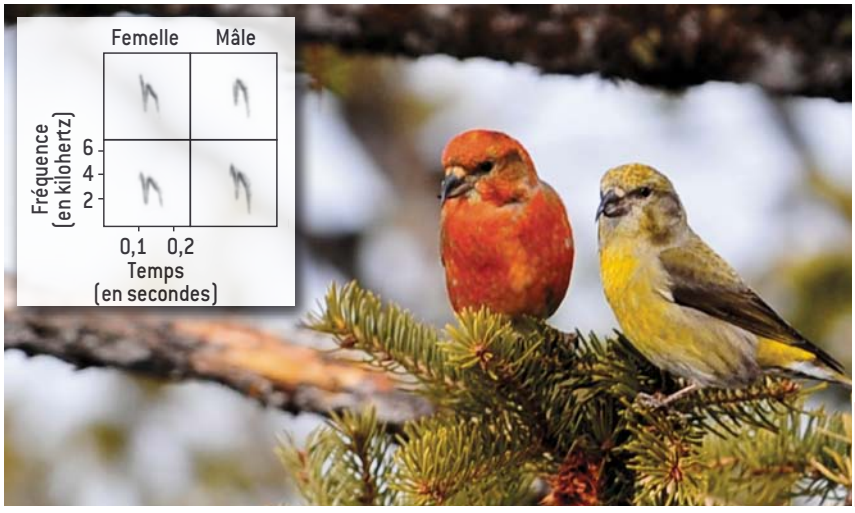
La concordance vocale apporterait donc un bénéfice aux animaux qui émettent les appels, les « signaleurs », en leur assurant une meilleure écoute. Toutefois, pour qu'elle persiste au sein d'une espèce, il faut que les appels concordants bénéficient aussi aux « destinataires », les individus qui écoutent les appels puis y répondent. Si l'imitation exploitait la sensibilité sensorielle des destinataires en permettant aux signaleurs de les manipuler sans gain pour eux, la valeur sélective de ceux qui répondent aux appels concordants serait diminuée par rapport à ceux qui les ignorent, de sorte que ce comportement de réponse finirait par disparaître.

La plupart des cas de concordance des appels connus concernent des couples d'animaux. La concordance favoriserait alors l'acceptation d'un partenaire sexuel, et donc les chances de se reproduire. Ainsi, les mâles de plusieurs espèces, notamment le ouistiti pygmée *(Callithrix pygmaea)*, l'éléphant d'Afrique *(Loxodonta africana)* et plusieurs oiseaux, modifient leurs appels pour imiter les femelles. Arla Hile et ses collègues de l'Université Irvine, en Californie, ont observé ce phénomène chez des perruches

L'AUTEUR

Kendra SEWALL est biologiste à l'Université Duke, à Durham, et à l'Université de Caroline du Nord, à Chapel Hill, aux États-Unis.

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



Christine Pellecos

© Kevin Schafer/CORBIS

3. LA CONVERGENCE DES CRIS s'effectue souvent dans le cadre du couple. Dans la plupart des cas, le mâle imite les cris de la femelle, qui l'accepte alors plus facilement. En haut à gauche sont représentés les appels de contact de becs-croisés des sapins avant *(rangée du haut)* et après *(rangée du bas)* la formation du couple : ils sont devenus plus ressemblants. Lors de la couvaison, ces vocalisations concordantes aideront le mâle à distinguer son nid de ceux des autres oiseaux et à rentrer nourrir la femelle. On retrouve cette convergence des cris dans les couples chez plusieurs espèces, tels le ouistiti pygmée *(en bas)* et l'éléphant d'Afrique.

Un continuum de capacités d'apprentissage

La plupart des espèces décrites dans cet article sont capables d'imiter des sons entièrement nouveaux, une faculté rare dans le monde animal : elle n'est avérée que chez les humains, les cétacés, les éléphants, les chauves-souris et certains oiseaux. Chez ces espèces, la convergence vocale est fréquente : elle consiste à modifier légèrement la fréquence, la durée, le rythme, etc. des vocalisations, afin de les faire ressembler à celles de leurs congénères. On découvre de plus en plus d'espèces aux capacités d'apprentissage moins élaborées, mais qui sont tout de même capables de convergence vocale. C'est le cas de certains primates, des souris, des chèvres et sûrement de beaucoup d'autres mammifères.

L'apprentissage vocal, même rudimentaire, semble requérir une organisation cérébrale particulière. Cette dernière inclut un contrôle des vocalisations par les aires motrices du lobe frontal (le cortex moteur chez l'homme), qui doivent avoir des connexions directes avec les neurones moteurs du tronc cérébral. En outre, un retour auditif est nécessaire à l'ajustement des vocalisations.

On retrouve ces caractéristiques chez l'homme et chez les oiseaux qui apprennent leurs vocalisations. On les a aussi récemment découvertes chez la souris. Elles restent à déceler chez les autres espèces capables d'apprentissage vocal. Chez celles qui en sont incapables, les cris seraient contrôlés par des aires cérébrales plus profondes et un animal sourd dès la naissance émet les mêmes vocalisations que s'il entendait.

Ainsi, la capacité d'apprentissage vocal serait fréquente au sein du règne animal et ne serait pas binaire (soit nulle, soit très élaborée), comme on le croyait auparavant. Elle formerait plutôt un continuum : d'abord des espèces n'ayant aucune flexibilité vocale, puis d'autres pouvant ajuster légèrement certains paramètres en fonction de leur environnement social (telles les chèvres), ensuite des espèces ayant un peu plus de flexibilité (souris et primates), et enfin, les espèces capables d'imiter des sons nouveaux. Les humains sont à l'extrémité de ce continuum, avec une capacité d'imitation presque infinie, uniquement conditionnée par les sons que peut produire leur appareil vocal.

Élodie Briefer
École polytechnique fédérale de Zurich

mâles pendant la période de formation des couples, qui dure plusieurs semaines ; une fois le couple constitué, les deux partenaires émettaient des appels similaires, spécifiques de leur couple, durant toute la saison de reproduction. Dans de tels cas, les mâles (les signaleurs) bénéficient de la concordance vocale, qui leur assure l'acceptation d'une femelle ; selon certains éthologues, les femelles (les destinataires) en retirent aussi un bénéfice, car la concordance indique la volonté du mâle de s'engager dans le couple.

Chez certaines espèces, les femelles modifient aussi leur appel ; les deux membres d'un couple convergent alors progressivement vers un nouvel appel, qui diffère de ceux d'origine. J'ai notamment montré ce phénomène en 2009 chez le bec-croisé des sapins *Loxia curvirostra (voir la figure 3)*. Dans ce cas, la convergence peut refléter un investissement mutuel dans le lien social, plutôt que l'effort de l'un pour attirer l'autre.

Chez les couples, la concordance des appels servirait aussi à coordonner les soins dispensés aux jeunes. En effet, elle est fréquemment associée à des soins biparentaux. Ainsi, la reproduction est plus souvent couronnée de succès, les poussins étant plus nombreux à survivre. Le cas du chardonneret (espèces du genre *Carduelis*) est un exemple classique, décrit par Paul Mundinger, du *Queens College* à New York. Comme de nombreux autres oiseaux chanteurs des climats tempérés, les mâles nourrissent leur partenaire pendant la couvaison, puis les petits après l'éclosion. Lorsqu'ils reviennent vers le nid avec de la nourriture, ils émettent des appels de contact similaires à ceux de leur partenaire, et les femelles se rendent brièvement à la sortie du nid pour être alimentées. P. Mundinger a exposé des femelles chardonnerets aux appels de leurs partenaires et à ceux d'autres mâles, préalablement enregistrés : les femelles ne se sont rapprochées que du haut-parleur émettant les appels de leurs partenaires et ont quémandé de la nourriture en réponse.

Chez certains animaux, l'appel est familial : les petits apprennent à émettre des appels similaires à ceux de leurs parents, ce qui aide ces derniers à les retrouver lorsqu'ils rapportent de la nourriture. Parents et poussins en bénéficient, les premiers parce qu'ils augmentent leur succès reproductif, les seconds parce qu'ils accroissent leur chance de survie. En 1980, Ian Rowley, du CSIRO (Organisation de recherche scientifique et industrielle du Commonwealth), en Australie, a observé ce phénomène chez les cacatoès rosalbins *(Eolophus roseicapilla)*. Ces oiseaux australiens vivent en grandes colonies et nichent dans des cavités, de sorte que les parents ont parfois du mal à identifier l'entrée de leur nid. Les poussins répondent aux parents lorsqu'ils les entendent approcher, ce qui les aide à se diriger et stimule le nourrissage. Quand les oisillons quittent le nid et se déplacent dans la zone de perchage en l'absence des parents, les appels concordants permettent aux familles de se retrouver dans un environnement social bruyant et densément peuplé.

Un mot de passe pour les membres du groupe

La concordance vocale procure donc un avantage sélectif dans un contexte familial. Qu'en est-il au sein d'un groupe social plus large ? Des biologistes ont montré qu'elle offre aussi différents bénéfices aux individus. Elle facilite par exemple la recherche et la protection coopérative des ressources, telle la nourriture, contre des groupes concurrents, d'où un meilleur accès individuel à ces ressources.

BIBLIOGRAPHIE

G. Arriaga *et al.*, **Of mice, birds, and men : the mouse ultrasonic song system has some features similar to humans and song-learning birds,** *PLoS One*, vol. 7, pp. 1-15, 2012.

K. Sewall, **Early learning of discrete call variants in red crossbills : Implications for reliable signaling,** *Behavioral Ecology and Sociobiology*, vol. 65, pp. 157-166, 2011.

V. Deecke, **The structure of stereotyped calls reflects kinship and social affiliation in resident killer whales *(Orcinus orca)*,** *Naturwissenschaften*, vol. 97, pp. 513-518, 2010.

K. Sewall, **Social experience modifies behavioural responsiveness to a preferred vocal signal in red crossbills, *Loxia curvirostra*,** *Animal Behaviour*, vol. 77, pp. 123-128, 2009.

W. Searcy et S. Nowicki, **Un chant d'oiseau honnête,** *Pour la Science*, n° 370, août 2008.

© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013

Résultant d'un apprentissage par imitation, les appels concordants sont le reflet des expériences sociales du signaleur. Ils permettent alors à un individu d'identifier rapidement les membres de son groupe, même s'ils sont nombreux et s'il ne les connaît pas tous. On parle d'hypothèse du badge ou du mot de passe.

Janette Boughman et Gerald Wilkinson, de l'Université du Maryland, l'ont étudiée chez la grande chauve-souris fer de lance *(Phyllostomus hastatus)*. Les femelles se rassemblent en de grandes colonies, dont les membres émettent des appels concordants durant leurs excursions nocturnes à la recherche de nourriture. Une nouvelle arrivante ajuste ses cris à ceux du groupe en quelques mois. En utilisant des appels enregistrés, les éthologues ont montré que lorsqu'elles trouvent une source de nourriture, les chauves-souris rameutent les membres de leur groupe grâce à ces appels concordants, puis défendent collectivement leur butin. Cet exemple illustre un autre avantage des appels concordants : ils informent les animaux extérieurs au groupe sur la taille et la capacité défensive d'un groupe social.

Tandis que chez les chardonnerets et les chauves-souris fer de lance, chaque individu produit un appel de contact unique, les dauphins (les espèces du genre *Tursiops*) émettent au moins deux signaux de contact. Les mâles adultes forment des groupes de deux ou trois individus, qui passent jusqu'à 80 pour cent de leur temps ensemble, souvent jusqu'à la mort d'un des membres. À l'intérieur d'un tel groupe, les dauphins convergent lentement vers un sifflement commun – une sorte de badge de membre –, mais chacun conserve aussi un sifflement de signature reflétant son identité individuelle. Selon certains chercheurs, les dauphins, et probablement d'autres animaux, utiliseraient ce dernier pour communiquer avec leurs compagnons et l'appel de groupe en présence de concurrents qui ne leur sont pas familiers.

Dans un groupe, les appels concordants augmentent donc la valeur sélective des membres pour deux raisons : en émettant le « bon » appel, ils ont accès aux ressources, et en y répondant, ils peuvent mieux protéger leurs ressources ou leur territoire contre les animaux extérieurs au groupe.

Plus rarement, la convergence des vocalisations se produit à l'échelle de populations entières. On a découvert ce phénomène chez l'orque et le grand cachalot *(Physeter macrocephalus)*, ainsi que chez des oiseaux tels que le perroquet amazone à nuque d'or *(Amazona auropalliata)* et le bec-croisé des sapins *(voir la figure 4)*.

Des appels concordants à l'échelle de populations entières

Lorsqu'un individu s'établit dans une nouvelle population, il adopte en général son ou ses cris communs, un peu comme quand on prend l'accent d'une région en y arrivant. Le même phénomène se produit à l'échelle inférieure, où un individu qui arrive dans un groupe apprend l'appel de celui-ci. Timothy Wright, de l'Université d'État du Nouveau-Mexique, à Las Cruces, et ses collègues ont déduit d'études génétiques que les perroquets amazones à nuque d'or se dispersent au-delà des zones où est utilisé leur « accent ». Ils apprennent alors

Offrez ou offrez-vous le livre *Maux d'artistes*

Ce livre est un recueil des articles que l'auteur a publiés dans la rubrique Art et pathologies du magazine *Cerveau & Psycho*.

Dans cet ouvrage, l'auteur s'interroge sur les liens cachés entre une œuvre d'art – une peinture, une sculpture, une composition musicale ou une œuvre littéraire – et une maladie de l'esprit que présentait son auteur.

Examinant divers chefs-d'œuvre avec un regard de psychologue, neurologue, voire psychiatre, Sebastian Dieguez analyse plus d'une vingtaine d'œuvres 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 ou sur www.cerveauetpsycho.fr

© John Cancalosi/Nature geographic Society/corbis

© Shutterstock/Monika Wieland

4. CHEZ CERTAINES ESPÈCES, LA CONVERGENCE DES CRIS se fait à l'échelle d'une population entière : un ou plusieurs de leurs cris deviennent similaires, comme si les animaux adoptaient le même accent. Les populations sont séparées soit géographiquement, comme dans le cas des perroquets amazones à nuque d'or *(à gauche)* et des orques *(à droite, une bande d'orques, ou pod, une population étant composée de plusieurs pods)*, soit par leur niche écologique, comme chez les becs-croisés des sapins. Chez ces derniers, un accent est associé à une classe de taille, où les oiseaux ont une forme de bec spécifique et bien adaptée à un type particulier de pommes de pin.

à la fois les cris de leur nouveau groupe de perchage et ceux partagés par la population locale. Ils obtiendraient ainsi l'autorisation d'accéder aux ressources : nourriture, sites de perchage, partenaires sexuels… Les destinataires ont aussi intérêt à accepter une offre – sexuelle ou de coopération pour la recherche de nourriture – si celui qui la formule maîtrise les cris caractéristiques de leur population, car ils savent qu'il pourra obtenir des ressources.

À l'inverse, quelques espèces dotées d'accents sont incapables d'apprendre de nouveaux accents à l'âge adulte. Dans ce cas, la communication entre les populations est restreinte, ce qui diminue le brassage social et génétique au sein de l'espèce.

Chez le bec-croisé des sapins, Jeff Groth, du Muséum d'histoire naturelle de New York, et Craig Benkman, de l'Université du Wyoming, ont découvert que les accents sont associés à différentes classes de taille. Au sein de chaque classe, les individus ont un bec de taille et de forme spécifiques, adapté au type particulier de pommes de pin dont ils se nourrissent. Les becs-croisés d'une même classe, qui ont des préférences alimentaires identiques, s'informent alors mutuellement du succès ou de l'échec de leur recherche de nourriture, ce qui la rend plus efficace.

Avec des chercheurs du laboratoire de C. Benkman, j'ai montré que les becs-croisés apprennent les accents de leur classe de taille à un stade précoce de leur vie, avant de quitter le nid, et qu'ils n'en changent presque jamais par la suite. Ces accents sont donc des indicateurs fiables de la classe de taille et du type de pommes de pin consommées. Les appels de contact étant essentiels à la formation et la cohésion d'un groupe, les accents permettent aux individus de s'assembler par classe de taille et par préférence alimentaire. Cependant, ils entravent la communication et l'établissement de liens entre les classes, qui seraient en train de se transformer en espèces distinctes.

Un reflet fiable de l'investissement social

Si la concordance vocale bénéficie aux individus, pourquoi des « tricheurs » n'en profitent-ils pas ? Autrement dit, y a-t-il des animaux qui imitent les cris d'un groupe pour exploiter ses ressources sans rien lui apporter en retour ? Pour répondre, examinons les arguments qui suggèrent que les appels concordants sont le reflet fiable de l'investissement du signaleur dans un lien social ou de son engagement à coopérer.

L'apprentissage d'appels demande du temps et de l'énergie, notamment parce qu'il requiert des circuits cérébraux spécialisés et énergivores. Il indiquerait donc qu'un individu s'est investi dans une relation coopérative. En outre, l'apprentissage de nouveaux appels est favorisé par l'implication de l'individu dans le groupe. Chez des espèces telles que les mésanges (espèces du genre *Poecile*) et le ouistiti pygmée, la mise en place d'une vocalisation concordante prend plusieurs semaines et des liens sociaux se forment parfois pendant la période de convergence. C'est aussi le cas chez les tarins des aulnes européens *(Carduelis spinus)* mâles : les oiseaux qui convergent le plus vite vers un appel commun sont aussi ceux qui forment des groupes le plus rapidement et le plus souvent. En d'autres termes, la vitesse et le degré de la concordance vocale reflètent assez fidèlement la fréquence et l'intensité des liens sociaux établis. Cette corrélation s'explique par le fait que les interactions sociales accélèrent l'apprentissage, en particulier si l'individu qui tente d'imiter l'autre reçoit une réaction positive en retour.

La concordance des appels, observée chez un grand nombre d'animaux ayant une capacité d'apprentissage vocal, procure donc des bénéfices multiples. Elle accroît la valeur sélective des signaleurs et des destinataires – dans des proportions dépendant du degré d'organisation sociale –, en augmentant leur succès reproductif et leur survie. En particulier, elle peut aider à trouver un partenaire sexuel, à coordonner les soins dispensés aux petits, à accéder à des ressources ou à identifier des compagnons adéquats. Elle sert aussi à maintenir le contact au sein d'un groupe, dans des environnements sociaux complexes, changeants et souvent bruyants. ■

© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013

puf

POUR LA SCIENCE

Éditions Le Pommier

Depuis seize ans, *Le Monde* soutient les jeunes chercheurs et la recherche.
Lancé en 1997, le Prix *Le Monde* de la recherche universitaire entend valoriser les premiers travaux de jeunes chercheurs francophones susceptibles d'influencer notre environnement scientifique, économique, social et/ou artistique.

Cette année, à l'issue du concours présidé par le philosophe Edgar Morin pour les sciences humaines et sociales et par l'académicien Pierre Léna pour les sciences dites «dures», ce prix offrira la possibilité à cinq docteurs récemment diplômés en sciences humaines et sociales de publier leur thèse aux Presses universitaires de France et à cinq docteurs en sciences dites «dures» de publier un résumé de leurs travaux dans *Pour la Science* et dans un ouvrage publié aux Éditions Le Pommier.
Par ailleurs le quotidien *Le Monde* présentera l'ensemble de ces thèses dans un cahier spécial. Les thèses à fortes composantes interdisciplinaires seront les bienvenues.

16e édition

PRIX Le Monde DE LA RECHERCHE UNIVERSITAIRE

Pour sa seizième édition, le Prix *Le Monde* de la recherche universitaire est ouvert aux :

Doctorats de sciences humaines et sociales (toutes disciplines) soutenus entre le 31 octobre 2011 et le 31 décembre 2012.
Les inscriptions seront enregistrées jusqu'au 1er mai 2013 inclus.

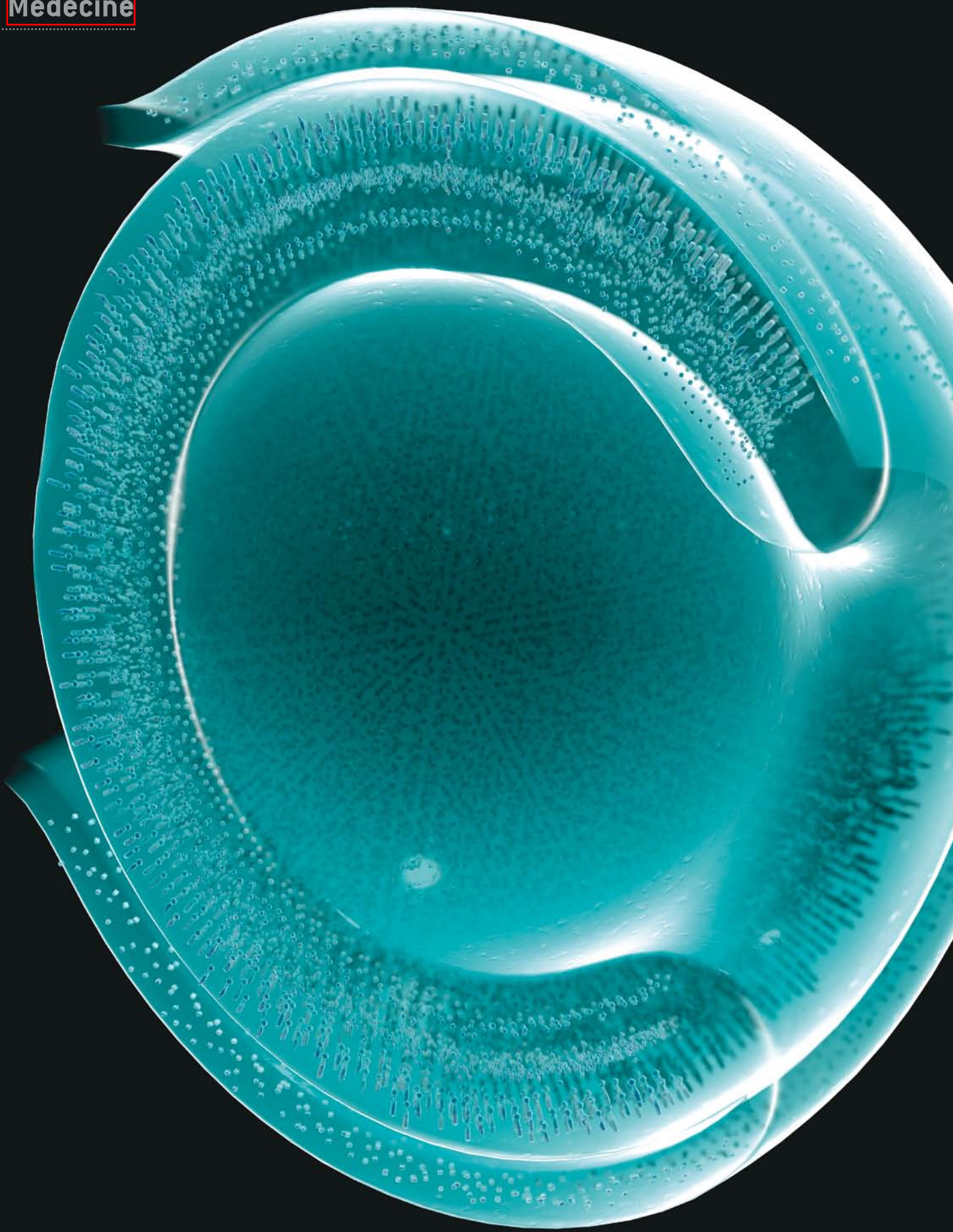
Doctorats de sciences mathématiques, mécaniques, informatiques, physiques, chimiques, sciences de la Terre et de l'univers, sciences du vivant, neurosciences, médecine (doctorats de recherche uniquement), etc., ainsi que dans les technologies correspondantes soutenus entre le 31 octobre 2011 et le 31 décembre 2012.
Les inscriptions seront enregistrées jusqu'au 1er mai 2013 inclus.

RENSEIGNEMENTS COMPLEMENTAIRES ET INSCRIPTIONS
Site internet : www.lemonde.fr/prix-recherche/
Email : prixrecherche@lemonde.fr

Le Monde

FONDATION CREDIT COOPERATIF
FONDATION D'ENTREPRISE

fph Fondation Charles Léopold Mayer pour le Progrès de l'Homme



© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013

UNE RÉTINE EN CULTURE

Yoshiki Sasai

Des biologistes ont créé une rétine à partir de cellules souches : une étape vers la culture, à l'extérieur du corps, d'organes de remplacement.

Lors du développement embryonnaire, dans l'utérus, un petit amas de cellules identiques donne naissance aux divers types de cellules du corps humain. Elles s'arrangent en structures variées et finissent par former les organes. Un « programme » interne dirige cette progression depuis des éléments simples jusqu'à des tissus de forme et de taille appropriées.

Les biologistes aimeraient reproduire le développement embryonnaire en laboratoire, à la fois pour mieux comprendre ses mécanismes et pour élaborer des moyens de réparer et remplacer des tissus endommagés. Le succès est peut-être proche : de récents progrès laissent envisager la « culture » d'organes de remplacement à l'extérieur du corps ; ils pourraient être disponibles pour les opérations chirurgicales d'ici dix ans.

Mon optimisme se fonde sur des études sur les cellules souches – des cellules capables de se différencier en divers types de cellules. Nous avons montré que des cultures de cellules souches peuvent donner naissance à une rétine ; cette structure clef de l'œil traduit la lumière en signaux électriques et chimiques, qui sont ensuite transmis au cerveau. Dans d'autres travaux, nous avons « fait pousser » du tissu cérébral (cortex) et une partie de l'hypophyse (une petite glande située à la base du cerveau). Pour ce faire, nous avons placé une mince couche de cellules dans une boîte de Pétri, où nous avons ajouté un cocktail de molécules présentes dans l'organisme. Ces cellules se sont développées en une structure tridimensionnelle. Nous espérons que du tissu rétinien produit de la sorte permettra de traiter plusieurs maladies de l'œil, telle la dégénérescence maculaire (la macula est la partie centrale de la rétine).

L'ESSENTIEL

- Les cellules souches embryonnaires sont à l'origine de tous les organes du corps.
- En cultivant des cellules souches en suspension dans une boîte de Pétri, des biologistes ont recréé des rétines de souris et d'homme.
- Ces travaux renseignent sur le développement des tissus nerveux et pourraient aider à traiter certaines maladies des yeux.

Sauf mention contraire, les illustrations sont de Bryan Christie

À l'origine, nous cherchions à mieux comprendre la formation de la rétine. Nous savions qu'elle provient d'une partie du cerveau embryonnaire nommée diencéphale. Durant les premiers stades du développement embryonnaire, un segment du diencéphale s'étend pour former la vésicule optique, une structure en forme de ballon. Celle-ci s'invagine, formant la « cupule optique », qui deviendra la rétine *(voir l'encadré ci-dessous)*.

Depuis plus d'un siècle, les biologistes débattent sur le mécanisme de formation de la cupule optique. Une question importante concerne le rôle des structures voisines, telles que le cristallin et la cornée. Certains chercheurs pensent que le cristallin façonne la cupule optique en exerçant une pression sur la vésicule, tandis que d'autres affirment que la cupule peut se former sans lui et sans les autres tissus voisins.

Il est difficile d'observer les mécanismes physiologiques sous-tendant le développement sur des animaux vivants. Il y a environ dix ans, nous avons donc décidé de reproduire le développement de l'œil dans une boîte de Pétri. Pour ce faire, nous avons utilisé des cellules souches embryonnaires, que nous avons exposées à diverses substances chimiques connues pour être impliquées dans la formation de l'œil. Les cellules souches embryonnaires constituent le type le plus immature de cellules souches. Elles sont capables de se différencier en tous les types cellulaires du corps, des neurones jusqu'aux cellules musculaires.

Aucune technique existante ne permettait d'engendrer des organes à partir de cultures de cellules souches. Des essais avaient été réalisés en plaçant les cellules sur une sorte d'échafaudage artificiel, qui imitait la forme de l'organe ciblé (en l'occurrence une vessie ou un œsophage), mais ils n'avaient remporté qu'un succès mitigé. Nous avons donc tenté une approche différente.

En 2000, nous avons élaboré une méthode pour transformer des cellules souches embryonnaires de souris en différents types de neurones. Nous avons ensuite placé une monocouche de ces cellules souches dans une boîte de Pétri, avec des cellules dites nourricières : ces dernières transmettaient des signaux chimiques déclenchant la différenciation des cellules souches embryonnaires. Cette couche mince ne reproduisait pas les organes tridimensionnels réels, mais nous désirions déjà savoir si les molécules sélectionnées suffisaient à obtenir les types particuliers de neurones apparaissant précocement lors du développement de l'œil.

Après des débuts difficiles, nous avons développé une nouvelle méthode en 2005, qui nous a permis de dépasser le stade bidimensionnel : nous avons créé une suspension de cellules souches dans un milieu liquide, qualifiée de culture flottante. L'intérêt d'une telle culture tridimensionnelle est double. Tout d'abord, un agrégat de cellules est mieux à même de prendre la forme des tissus s'il est tridimensionnel que s'il est plat. Ensuite, la formation de structures complexes requiert de multiples communications entre cellules, et ces dernières interagissent plus facilement dans une culture tridimensionnelle.

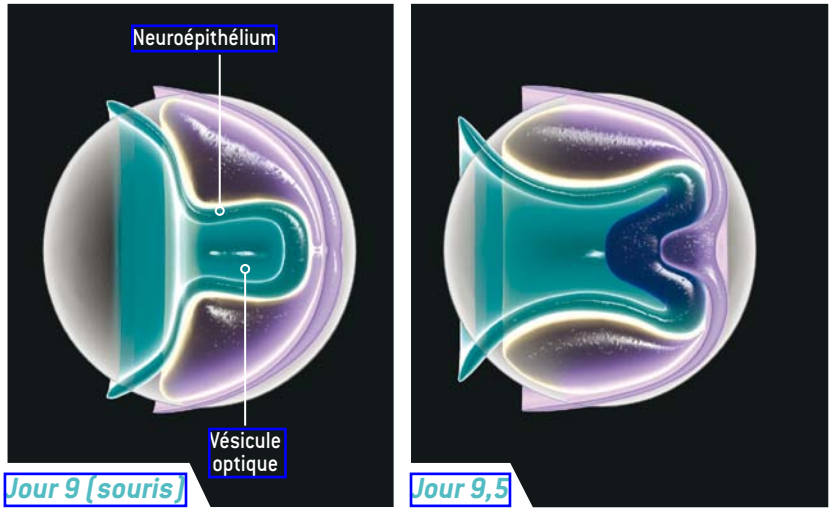
Nous avons placé des cellules en suspension dans de petits réservoirs – comptant chacun en moyenne 3000 cellules – au sein d'une boîte de Pétri. Initialement séparées les unes des autres, les cellules se sont liées avec leurs voisines. Nous avons ensuite déclenché la différenciation de ces petits agrégats de cellules en des progéniteurs neuronaux (des cellules neuronales immatures) présents à l'avant du cerveau. Les cellules ont alors commencé à échanger des signaux.

Trois à quatre jours plus tard, elles se sont organisées spontanément en une sphère creuse formée d'une couche cellulaire ; on parle de neuroépithélium. Nous avons nommé SFEBq cette méthode de culture (pour *Serum free floating culture of embryoid body-like aggregate with quick reaggregation*, littéralement culture sans sérum flottante d'agrégats embryonnaires se réagrégeant rapidement).

LA FORMATION DE LA RÉTINE
est un phénomène auto-organisé, fondé sur un programme interne des cellules.

LA NAISSANCE DE LA RÉTINE CHEZ L'EMBRYON

L'œil se forme à partir d'un petit amas de cellules embryonnaires. Au début, une couche de tissu, le neuroépithélium, se replie vers l'extérieur, donnant naissance à la vésicule optique (jour 9). La paroi de ce bourgeon s'incurve ensuite vers l'intérieur (jour 9,5), et la vésicule du cristallin se développe (jour 10). Une partie de la vésicule optique engendre la cupule optique, à l'origine de la rétine et du nerf optique (jour 10,5). La rétine contient trois couches distinctes de cellules *(à l'extrême droite)*, l'une d'elles étant constituée des photorécepteurs (les bâtonnets et les cônes). La rétine représentée ici, d'une taille de 250 micromètres, est celle d'une souris. La rétine humaine est similaire, mais plus grosse, et sa formation est plus longue.



© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013

Dans l'embryon, les cellules neuroépithéliales forment des structures cérébrales spécifiques, après avoir reçu des signaux chimiques externes. L'un de ces signaux déclenche le développement du diencéphale, qui engendrera la rétine et l'hypothalamus (une aire cérébrale contrôlant l'appétit et de nombreuses fonctions physiologiques fondamentales). Après avoir fait s'agréger les cellules en sphères, nous avons provoqué leur différenciation en progéniteurs rétiniens – les précurseurs des cellules rétiniennes matures. Pour ce faire, nous avons ajouté à notre culture un mélange de protéines, incluant celles qui assurent ce rôle chez l'embryon.

Quelques jours plus tard, des structures semblables à la vésicule optique ont spontanément « bourgeonné » sur les sphères, avant de changer de forme : la structure finale ressemblait à la cupule optique de l'œil embryonnaire *(voir l'encadré page 62)*. Comme la cupule optique des animaux vivants, cette structure issue de cellules souches embryonnaires se composait de deux parois (deux épithéliums), l'une extérieure et l'autre intérieure ; c'est cette dernière qui est à l'origine de la rétine.

Ainsi, une structure ordonnée est née de la seule agrégation de cellules souches dans un récipient. Contrairement à ce qui se passe chez l'embryon, il ne se formait pas de cristallin ou de lentille au voisinage de la cupule optique. Nos travaux montrent donc qu'aucune force exercée par des tissus voisins (tel le cristallin) n'est nécessaire à la formation de la protorétine. Au moins *in vitro*, c'est un phénomène auto-organisé, fondé sur un programme interne des cellules. Ce programme est encodé dans leur ADN, et nous travaillons à préciser ses mécanismes d'action.

L'AUTEUR

Yoshiki SASAI est directeur du groupe d'organogenèse et de neurogenèse au Centre de biologie du développement du RIKEN, à Kobe, au Japon.

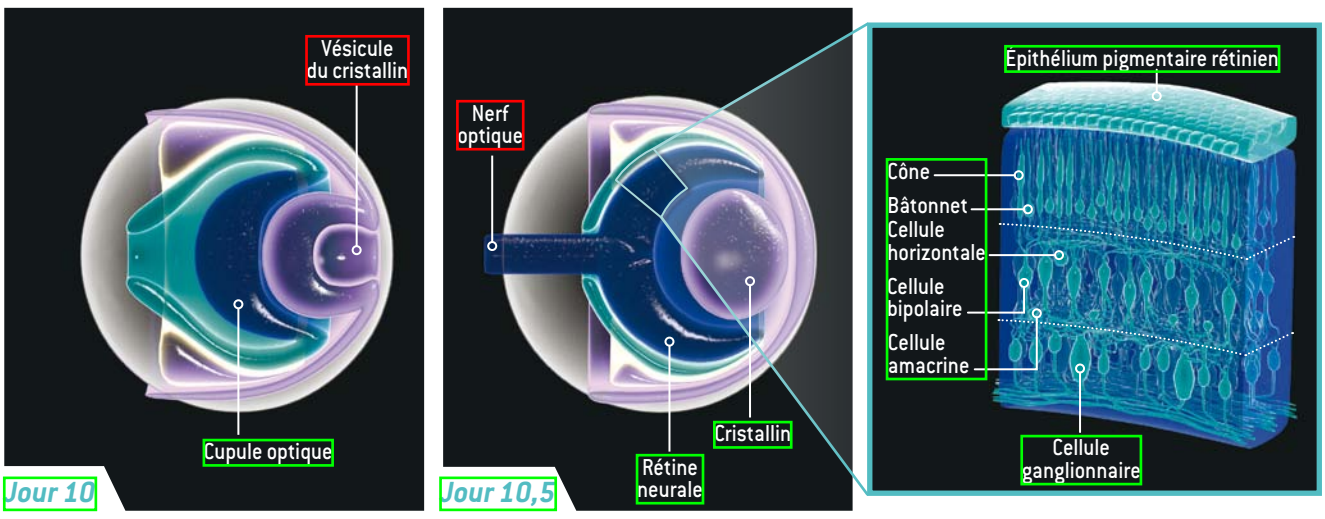
SUR LE WEB

Plus d'information sur Y. Sasai et ses recherches :
www.ScientificAmerican.com/nov2012/sasai

L'apparition spontanée d'une structure stratifiée

Le développement normal de la rétine, tel qu'on l'observe chez les embryons, s'est poursuivi dans nos cultures. En deux semaines supplémentaires, la cupule optique a grandi jusqu'à environ deux millimètres de diamètre, et l'épithélium monocouche interne est devenu une structure stratifiée, contenant les six catégories de cellules d'une rétine naturelle après la naissance. L'une des couches extérieures de cette structure était constituée de photorécepteurs et l'autre de cellules dites ganglionnaires, qui, dans le corps, relient la rétine au cerveau. Entre les deux se trouvaient plusieurs couches de cellules de liaison, nommées interneurones.

De nombreuses questions demeurent, notamment sur la façon dont une boule de cellules entre dans un programme de différenciation, qui aboutit à des tissus distincts. Tout au long du développement embryonnaire, des formes complexes apparaissent spontanément à partir d'amas de matière homogène – on parle de brisure



de symétrie. En l'absence de ce phénomène, les divisions cellulaires de l'œuf fécondé n'engendreraient qu'une masse indifférenciée de cellules. Nos cultures de cellules souches embryonnaires qui s'auto-organisent devraient aider à mieux comprendre les mécanismes en jeu dans les brisures de symétrie.

On cherche également à mieux comprendre comment s'effectue le modelage de la cupule optique à partir d'une simple couche de cellules (l'épithélium rétinien). La force qui s'applique sur les cellules et la rigidité varient dans l'épithélium. En mesurant *in vitro* la direction de la force et la rigidité du tissu en différents endroits, nous avons découvert que la cupule optique se forme en plusieurs étapes. Tout d'abord, la rigidité de la protorétine diminue, ce qui accroît sa flexibilité. Dans le même temps, les cellules qui se trouvent à la jonction de l'épithélium (la boule dont a bourgeonné la rétine) et de la protorétine adoptent une forme en coin. Finalement, la protorétine commence à se replier vers l'intérieur en raison de sa rapide extension. Nous avons appliqué les conditions mécaniques correspondantes à une simulation sur ordinateur, et la forme de la cupule optique est apparue !

Des essais cliniques de thérapie cellulaire pour un type de dégénérescence rétinienne ont débuté aux États-Unis.

Pour y voir plus clair…

Nos travaux aideront-ils à lutter contre les troubles oculaires humains ? Nous avons progressé dans cette voie. En particulier, mon équipe a récemment recréé une cupule optique et un tissu neuronal à couches multiples à partir de cellules souches embryonnaires humaines. La même méthode de culture devrait être applicable à des cellules souches humaines dites pluripotentes induites – des cellules matures et différenciées dont on a « inversé » le développement pour qu'elles se comportent comme des cellules souches embryonnaires. Nous avons également inventé une méthode fiable de cryoconservation, qui permet de stocker du tissu rétinien issu de cellules embryonnaires humaines dans de l'azote liquide.

Ces travaux promettent des applications médicales. Par exemple, nous pourrions créer des rétines artificielles, qui aideront à étudier les maladies de l'œil et, peut-être, à développer des médicaments et des thérapies géniques pour inverser la dégénérescence rétinienne.

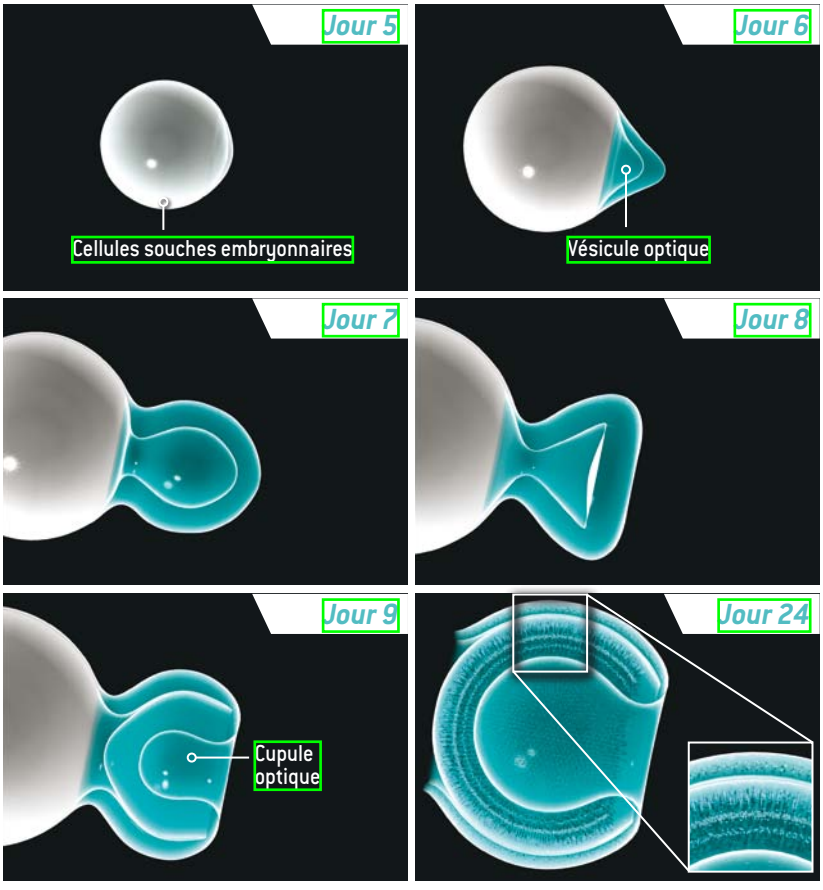
Trois catégories de dégénérescence rétinienne pourraient bénéficier de nos recherches : la dégénérescence maculaire, la rétinopathie pigmentaire et le glaucome. Ces maladies touchent des millions d'individus à travers le monde et altèrent des couches différentes de la rétine.

Dans la dégénérescence maculaire, un tissu nommé épithélium pigmentaire rétinien est endommagé : ce tissu tapisse le fond de la rétine et supporte les photorécepteurs, qui se détériorent également, en particulier dans la région centrale de la rétine.

Dans la rétinopathie pigmentaire, les bâtonnets (un type de photorécepteurs) disparaissent progressivement pendant plusieurs années. La maladie se manifeste d'abord par une cécité nocturne, ou héméralopie, puis le champ visuel se réduit jusqu'à se limiter à une petite zone au centre, avant que le patient ne devienne totalement aveugle.

UNE RÉTINE À PARTIR DE CELLULES SOUCHES

La formation d'une rétine à partir d'une culture de cellules souches embryonnaires ressemble à ce qui se produit dans l'utérus. Les cellules s'agrègent et commencent à former la vésicule optique « primitive » environ cinq jours après avoir été mélangées avec des substances nommées facteurs de croissance. Cette vésicule gonfle, puis forme la cupule optique.
Le 24e jour, toutes les couches de la rétine sont visibles.



© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013

Les alternatives thérapeutiques aux cellules souches

Si les cellules souches ouvrent de nouvelles perspectives thérapeutiques pour les patients aveugles, une autre technique en est déjà au stade commercial : celle des prothèses rétiniennes. Ces dispositifs visent à stimuler artificiellement une rétine ayant perdu ses photorécepteurs. Les images, filmées par une caméra fixée sur une paire de lunettes, sont d'abord transformées en matrices d'impulsions électriques. Celles-ci sont ensuite transmises à des électrodes implantées sur la rétine résiduelle *(voir la figure ci-contre)*.

Commercialisée depuis deux ans en Europe, la première prothèse rétinienne opérationnelle a reçu l'autorisation de mise sur le marché aux États-Unis en février 2013. En France, quatre patients aveugles ont participé aux essais cliniques. Cependant, les images perçues ne sont constituées que de 60 points ou pixels, puisque l'implant n'a que 60 électrodes : c'est insuffisant pour bien voir une image complexe, tel un visage, mais suffisant pour une image simple, de sorte que certains patients sont capables de lire des lettres d'environ 10 centimètres de hauteur.

De nombreux chercheurs tentent d'augmenter le nombre de pixels, chaque électrode devant activer une zone disjointe de sa voisine. Ainsi, à l'Institut de la vision, on poursuit plusieurs objectifs : le développement de nouvelles formes tridimensionnelles pour les implants, avec l'ESIEE (École supérieure d'ingénieurs en électrotechnique et électronique) et le CEA ; l'utilisation de matériaux semi-conducteurs différents, tels le graphène et le diamant (projet européen NEUROCARE) ; l'amélioration du codage des informations visuelles.

Une piste alternative, la thérapie optogénétique, est inspirée d'algues unicellulaires et de bactéries dotées de protéines photosensibles. Ces protéines sont des canaux ioniques dont l'ouverture est contrôlée par la lumière. L'idée est d'insérer le gène qui les code dans les neurones non photosensibles de la rétine, qui pourraient alors être activés par la lumière. Ainsi, chaque cellule produisant les protéines jouerait le rôle d'un pixel. Ces protéines étant moins performantes que nos pigments visuels, les aveugles devront porter des lunettes rehaussant la luminance.

Le système Argus II *(à droite)* est la première prothèse rétinienne commercialisée. Les images captées par une caméra sont traduites en signaux envoyés à un récepteur *(sur l'œil, à droite)*, puis transformées en impulsions électriques qui stimulent la rétine. Ce système n'a pour l'instant que 60 électrodes, donc 60 pixels. Les patients implantés voient donc mal les visages *(ci-dessus à droite, le visage de George Clooney tel qu'il serait vu avec 64 pixels)* mais peuvent lire des lettres. C'est un progrès notable.

Argus II, Second Sight ; schulerstock/fotolia

Ainsi, dans le cadre du projet européen RETICIRC, nous avons rendu la vue à des souris aveugles grâce à une protéine bactérienne. Nous avons ensuite montré que cette protéine permet l'activation de cellules rétiniennes humaines par la lumière, grâce à des cultures de cellules prélevées *post mortem*. Avant de passer à une application clinique, nous devrons vérifier que la thérapie génique visant à faire exprimer la protéine bactérienne n'entraîne pas d'inflammation ou de rejet chez le primate.

Serge Picaud et José Sahel
Institut de la vision, Paris

Enfin, le glaucome endommage les cellules ganglionnaires, qui relient la rétine au cerveau *via* le nerf optique.

De ces trois maladies, la dégénérescence maculaire semble la plus susceptible d'être traitée par une thérapie cellulaire. Pour obtenir les cellules nécessaires au remplacement de l'épithélium pigmentaire rétinien endommagé, on transforme des cellules souches embryonnaires humaines ou des cellules souches pluripotentes induites, au sein de cultures conventionnelles ou flottantes. Des essais cliniques à petite échelle ont débuté aux États-Unis et sont prévus dans d'autres pays : les cellules d'épithélium pigmentaire issues de cellules souches sont injectées sous la rétine avec une fine aiguille, afin de remplacer au moins une partie du tissu endommagé.

Pour la rétinopathie pigmentaire, la thérapie cellulaire est une perspective plus lointaine. À l'inverse d'une culture classique, notre méthode peut engendrer une couche dense de bâtonnets facilement transplantable. En revanche, ces photorécepteurs doivent s'intégrer dans le circuit neuronal de l'œil – ce qui n'était pas nécessaire pour l'épithélium, simple tissu de soutien. Ainsi, ils doivent se connecter à un autre type de cellules sensorielles, les cellules bipolaires, et nous ne savons pas encore comment réaliser cette connexion.

Le glaucome pourrait être la plus difficile des trois maladies à traiter par thérapie cellulaire. Des cultures de cellules souches embryonnaires peuvent produire les cellules ganglionnaires nécessaires, mais dans l'œil postnatal, le nerf optique ne se reforme pas spontanément. Autrement dit, une fois les cellules ganglionnaires transplantées, on ne sait pas connecter leurs axones (les prolongements des neurones qui forment le nerf optique) aux cellules cérébrales.

Notre méthode a décuplé les possibilités des tissus formés à partir de cellules souches embryonnaires. Reste à découvrir ce qu'elle peut nous apprendre sur les mécanismes qui conduisent d'une cellule unique à un organe aussi complexe que l'œil... ■

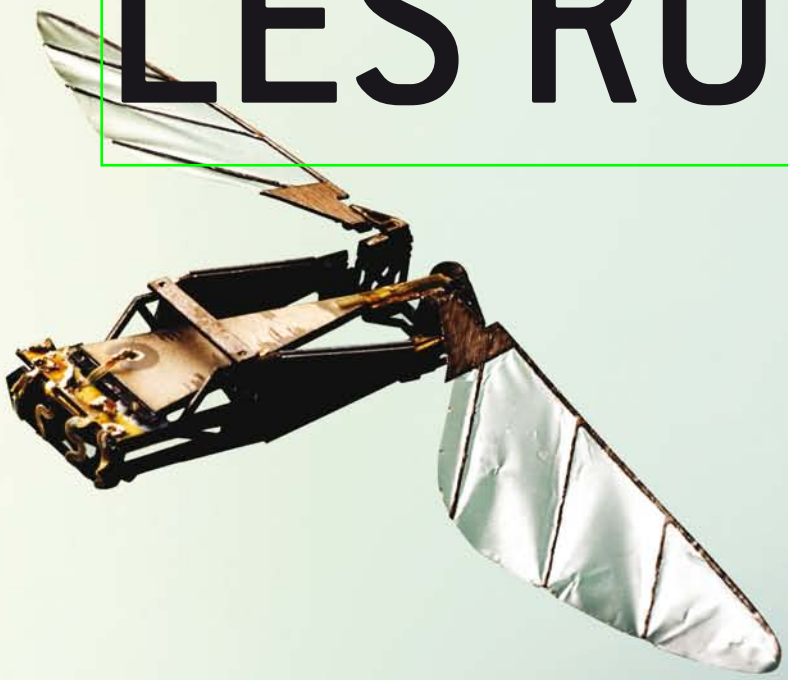
BIBLIOGRAPHIE

T. Nakano *et al.*, **Self-formation of optic cups and storable stratified neural retina from human ESCs,** *Cell Stem Cell*, vol. 10, pp. 771-785, 2012.

D. Schwartz *et al.*, **Embryonic stem cell trials for macular degeneration : a preliminary report,** *Lancet*, vol. 379, pp. 713-720, 2012.

M. Eiraku *et al.*, **Self-organizing optic-cup morphogenesis in three-dimensional culture,** *Nature*, vol. 472, pp. 51-56, 2011.

LES ROBOTS



L'ESSENTIEL

- Pour mettre au point des robots de la taille d'un insecte, l'emploi de composants ordinaires (moteurs, paliers, etc.) est exclu.
- Ces minirobots doivent utiliser des muscles artificiels spécialement conçus pour actionner et commander le vol.
- Ils agiront de façon autonome, en utilisant des capteurs miniaturisés et des microprocesseurs traitant l'information ainsi recueillie.
- Dans des essaims de milliers d'individus, leurs actions devront se coordonner sans agents centralisateurs, ce qui nécessite la conception de nouveaux langages de programmation.

travis Hammond

© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013

-ABEILLES

Robert Wood, Radhika Nagpal et Gu-Yeon Wei

Un essaim de milliers de robots volants de la taille d'un insecte et se partageant les tâches pour réaliser un objectif commun : ce projet constitue un défi mécanique, électronique et informatique.

1. LE ROBOT-ABEILLE conçu par les auteurs et leurs collègues est ici agrandi. Sa largeur réelle (ailes non comprises) est celle d'un doigt.

Il n'y a pas si longtemps, un mal mystérieux, le « syndrome d'effondrement des colonies d'abeilles », a commencé à décimer les ruches dans le monde entier. Les abeilles sont responsables d'une bonne partie de la pollinisation des plantes, et leur déclin nourrit la crainte que l'agriculture en pâtisse. Serons-nous un jour contraints d'utiliser des dispositifs artificiels si elles venaient à disparaître ?

En 2009, avec des collègues de l'Université Harvard et de la *Northeastern University*, nous avons entrepris de créer une colonie d'abeilles robotisées. Nous nous demandions si des abeilles mécaniques pourraient reproduire non seulement le comportement d'insectes pris séparément, mais aussi le comportement unique qui émerge de milliers d'abeilles en interaction. À l'heure actuelle, nous avons déjà créé les premières *RoboBees* (robots-abeilles) – des robots volants de la taille d'une abeille – et nous travaillons sur des méthodes qui permettraient de faire coopérer des milliers de ces robots-abeilles comme les abeilles le font dans une ruche.

À première vue, la tâche semble presque impossible. Des millions d'années d'évolution ont modelé les abeilles, insectes qui sont devenus de fantastiques machines volantes. Leur minuscule corps peut voler des heures durant, maintenir sa stabilité en vol au cours des tempêtes, rechercher des fleurs et éviter les prédateurs. Essayez donc de réaliser cela avec un robot de la taille d'une pièce de monnaie !

Un essaim sans agents centralisateurs

Considérons maintenant la ruche. Une colonie d'abeilles semble ne pas avoir de dirigeant ou d'autorité centralisée. Et pourtant, des colonies de dizaines de milliers d'abeilles se répartissent intelligemment le travail pour accomplir des tâches indispensables au groupe. Quand la ruche a besoin de plus de pollen, des abeilles supplémentaires partent à la recherche de nourriture ; quand la ruche a besoin d'être entretenue, les abeilles ne sortent pas et s'en occupent. Et lorsque quelque chose va mal – par exemple une reine qui meurt inopinément –, les abeilles s'adaptent rapidement.

Comment, en l'absence d'agents centralisateurs, une colonie aussi importante prend-elle ces décisions complexes si vite

© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013

et évite-t-elle les risques d'une mauvaise communication ?

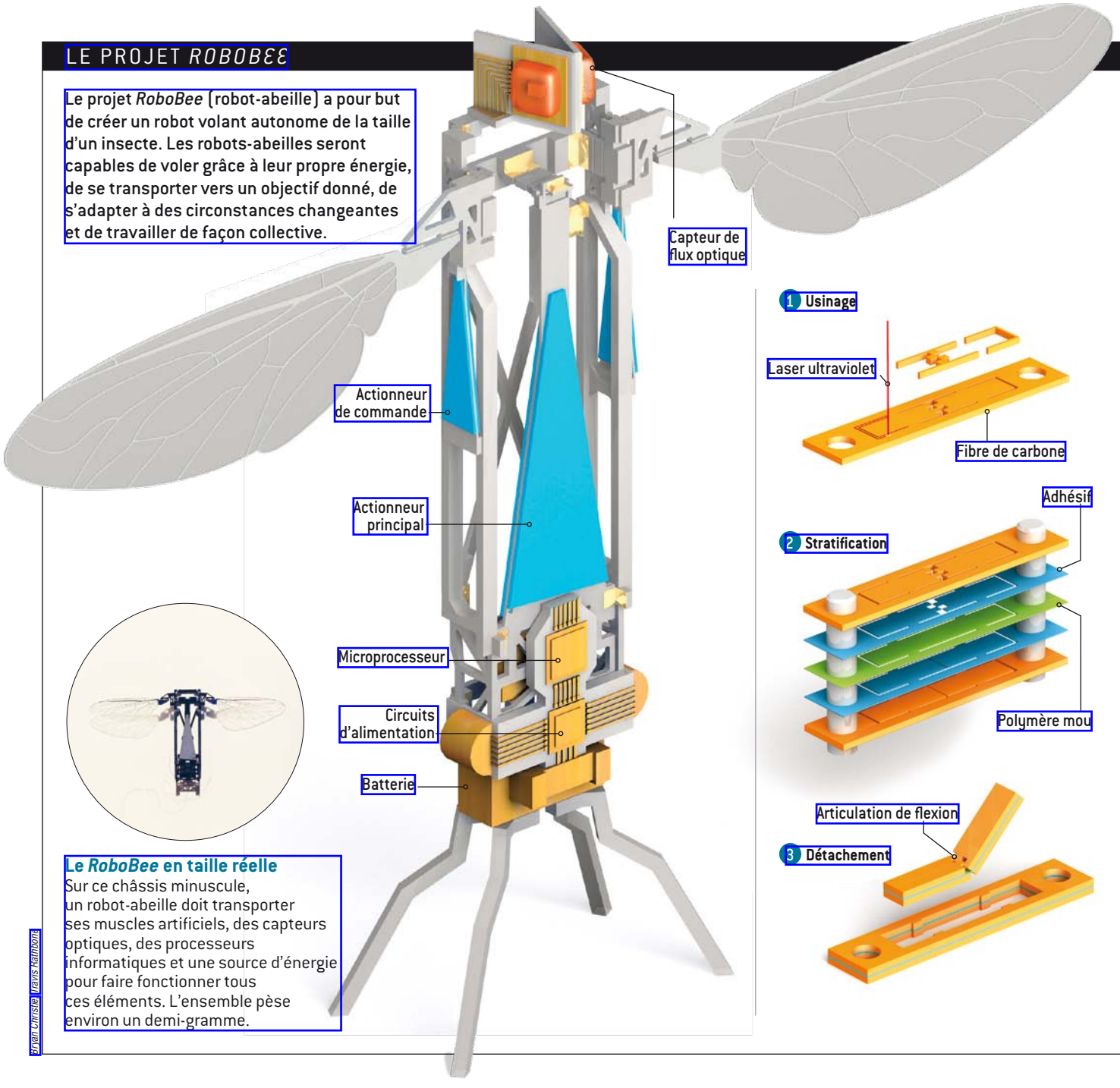
Une ruche de robots pourrait faire bien plus que de la pollinisation des fleurs (bien que l'agriculture soit une utilisation potentielle). Des robots petits, agiles, simples et peu coûteux pourraient effectuer de nombreuses tâches plus efficacement qu'un petit nombre de robots très performants.

Par exemple, imaginons un secouriste équipé d'une boîte remplie de 1 000 robots-abeilles – un ensemble qui pèserait moins d'un kilogramme. Ces robots-abeilles pourraient être lâchés sur un site ravagé par un tremblement de terre pour rechercher de la chaleur, des voix ou du dioxyde de carbone, qui signalent la présence de survivants. Si seulement trois de ces robots menaient leur mission à bien tandis que tous les autres échouaient, l'essaim aurait réussi à atteindre son objectif. On ne peut pas en dire autant de la génération actuelle de robots secouristes, qui sont bien plus encombrants et coûtent chacun près de 10 000 euros !

Cependant, la réalisation d'une colonie de minirobots volants nécessite de surmonter une kyrielle de défis technologiques. Ces robots ne devront pas mesurer plus de quelques centimètres et peser environ un demi-gramme – environ 100 fois moins que le plus léger appareil volant autonome existant aujourd'hui. Ce dispositif minuscule doit renfermer le système de vol de chaque robot-insecte, son cerveau électronique et son système de vision, ainsi que les commandes qui régissent ses interactions avec les autres membres

LE PROJET *ROBOBEE*

Le projet *RoboBee* (robot-abeille) a pour but de créer un robot volant autonome de la taille d'un insecte. Les robots-abeilles seront capables de voler grâce à leur propre énergie, de se transporter vers un objectif donné, de s'adapter à des circonstances changeantes et de travailler de façon collective.



Le *RoboBee* en taille réelle
Sur ce châssis minuscule, un robot-abeille doit transporter ses muscles artificiels, des capteurs optiques, des processeurs informatiques et une source d'énergie pour faire fonctionner tous ces éléments. L'ensemble pèse environ un demi-gramme.

Evan Christie, Travis Rainbow

© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013

de sa ruche. De récents progrès dans les domaines de la science des matériaux, de la technologie des capteurs et des architectures informatiques mettent ces objectifs à notre portée.

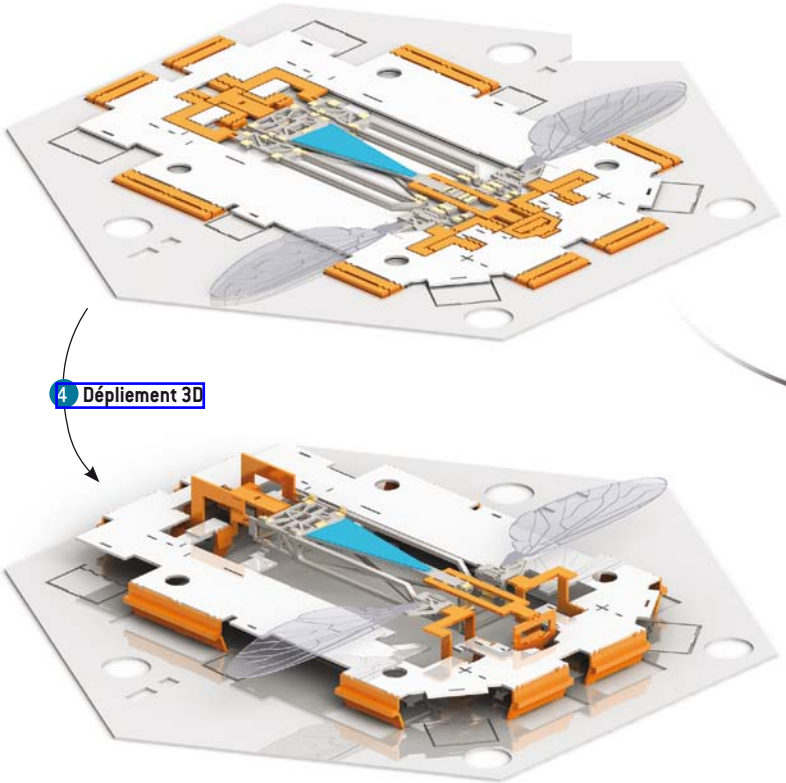
Imiter les muscles alaires d'un insecte

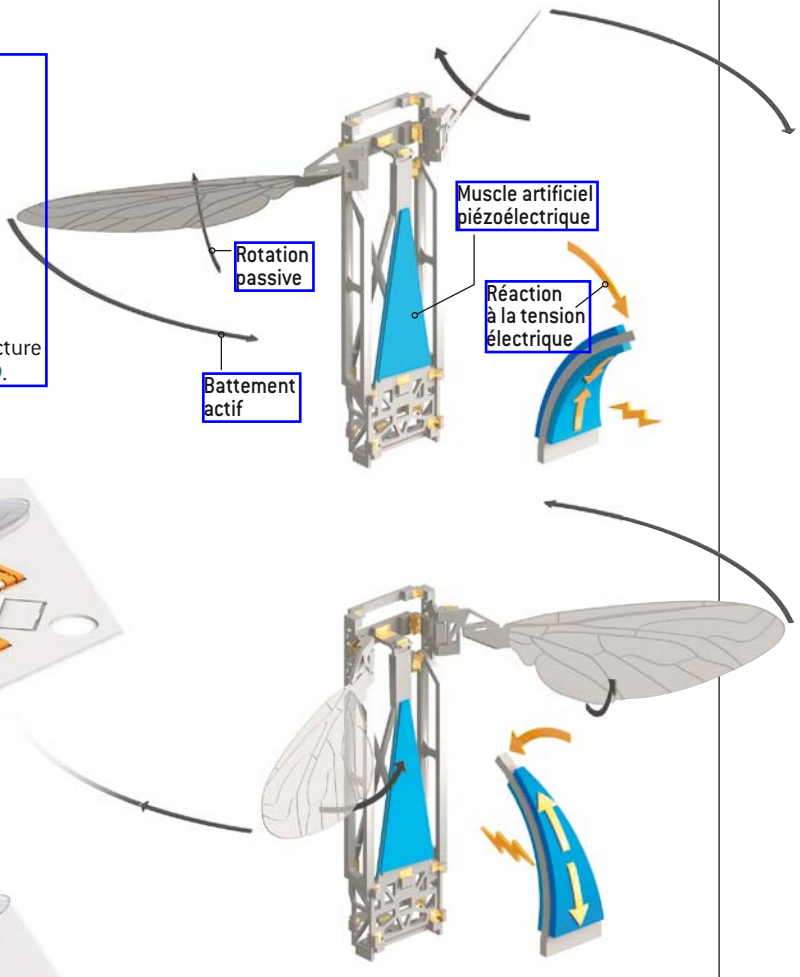
Le défi le plus évident pour la création d'un minirobot volant est de trouver une façon de le faire voler. Malheureusement, les progrès continus réalisés dans la miniaturisation des robots ces dix dernières années ne nous sont pas d'une grande aide, car la petite taille du robot-abeille modifie la nature des forces en jeu. Les forces de surface telles que le frottement commencent à prédominer par rapport aux forces volumiques telles que la gravité ou l'inertie. Ce problème d'échelle exclut la plus grande partie de la boîte à outils usuelle des ingénieurs mécaniciens, notamment les paliers rotatifs, les engrenages et les moteurs électromagnétiques – des composants universels dans les robots plus grands, mais inefficaces pour un robot-abeille.

À la place de moteurs rotatifs et d'engrenages, nous avons conçu un robot-abeille dont l'anatomie reflète au plus près un insecte volant – les ailes de ce dernier étant actionnées par des muscles artificiels *(voir l'encadré ci-dessous)*. Notre dispositif utilise deux types de « muscles » agissant à l'articulation entre les ailes et le corps. Des actionneurs de puissance relativement grands font osciller le mécanisme aile-thorax pour faire battre l'aile, tandis que

La chaîne de montage

La fabrication de robots aussi petits présente de nombreux défis. Chaque *RoboBee* est construit à partir de couches de matériau dur, en fibre de carbone par exemple, intercalées avec des polymères plus mous. Des trous dans la fibre de carbone permettent aux polymères de fléchir, créant ainsi une articulation de flexion. Cette méthode de stratification a l'avantage de se prêter à une chaîne de montage efficace *(ci-dessous à gauche)*. On réalise d'abord des découpes précises à l'aide d'un laser ultraviolet ❶. Puis on aligne les couches et on les assemble avec un adhésif ❷. On détache ensuite les composants du substrat ❸. Enfin, la structure tridimensionnelle est montée grâce à un dépliement approprié ❹.





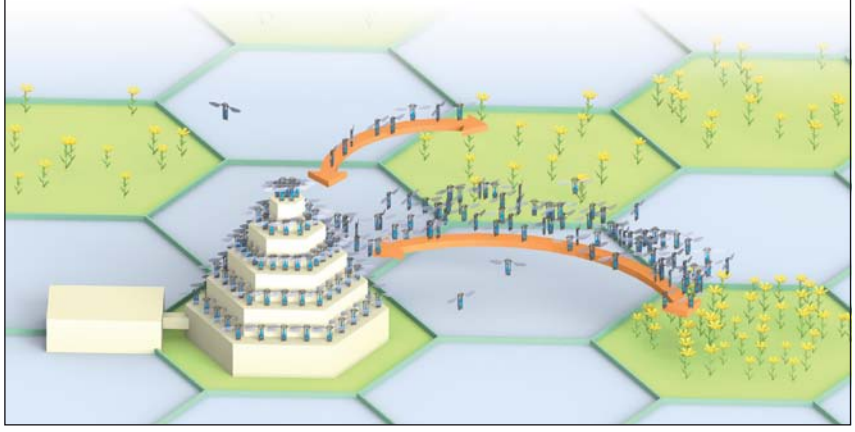
Le battement de l'aile

Le vol du *RoboBee* est assuré par des muscles artificiels, formés de matériaux piézoélectriques qui se contractent sous l'effet d'une tension électrique. Les ailes peuvent se mouvoir de deux façons : un battement d'avant en arrière et une rotation sur elles-mêmes (comme quand on flotte dans une piscine à l'aide des bras). Les muscles artificiels commandent le battement, mais la rotation est passive (elle est régie par l'inertie de l'aile, l'interaction de l'aile avec l'air et l'élasticité de la charnière de l'aile).

© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013

LA COLONIE AU TRAVAIL

Une colonie de milliers de robots-abeilles devra assigner, avec efficacité, des tâches aux différents individus qui la composent, même en l'absence d'une vision globale de l'environnement. Dans le scénario illustré ci-dessous, la ruche a pour tâche de trouver et polliniser des champs de fleurs. Pour commencer, des robots-abeilles explorent différentes régions. À leur retour à la ruche munis d'informations sur les endroits où les fleurs abondent, ces nouvelles informations sont utilisées pour déterminer les zones où se rendront les futures ouvrières. Davantage de robots seront assignés aux zones où il y a plus de travail. Cette stratégie fondée sur la ruche permet aux abeilles de faire montre d'une intelligence collective, même si les contraintes énergétiques limitent la communication entre individus.



des actionneurs de commande plus petits règlent avec précision les mouvements de l'aile pour engendrer un couple destiné aux contrôles et manœuvres de vol.

Le muscle artificiel est constitué de matériaux piézo-électriques qui se contractent quand leur épaisseur est soumise à une tension électrique. Ces actionneurs présentent quelques inconvénients – par exemple, ils nécessitent une tension élevée et sont fragiles –, cependant, ils constituent un cas où la physique de « l'effet d'échelle » est de notre côté. En effet, plus ces actionneurs sont petits, plus ils vont se mouvoir rapidement. Et comme la quantité de travail fournie par cycle (et par unité de masse) reste à peu près constante, un battement plus rapide conduit à une plus grande puissance. De fait, ces muscles développent une puissance comparable à celle des muscles d'insectes de taille similaire.

Au cours de ces dernières années, nous avons expérimenté des dizaines de configurations différentes d'actionneurs et d'articulations. Pour chacune, nous avons notamment cherché à déterminer la facilité avec laquelle nous pouvions la réaliser concrètement, puisque des ruches de robots-abeilles nécessiteront de la production en masse.

Les meilleures ébauches que nous ayons trouvées jusqu'à présent sont fondées sur un sandwich de trois couches : deux plaques dures enserrant un film mince de polymère. Nous créons des articulations en découpant du matériau des couches supérieure et inférieure, ce qui permet à la couche intermédiaire de polymère de fléchir, créant ainsi une articulation de flexion *(voir l'encadré pages 66-67)*.

La source d'énergie, un problème encore non résolu

Nous avons bien progressé dans la construction d'un robot de la taille d'une abeille, mais nous essayons toujours de trouver la meilleure façon de l'actionner. Pour surmonter les fortes contraintes énergétiques du vol à ces petites échelles, une grande partie de la masse du robot doit être consacrée à l'actionneur principal et à la source d'énergie (on peut penser « batterie » ou « piles », bien que nous étudiions aussi la possibilité d'utiliser une micropile à combustible à base d'oxyde solide). Ce problème d'énergie a tout d'un cercle vicieux : une importante unité d'alimentation stocke plus d'énergie, mais nécessite un système de propulsion plus important pour compenser l'augmentation de poids, système qui nécessite à son tour une source d'énergie encore plus volumineuse.

Bien que nous ne puissions pas encore faire voler un robot-abeille grâce à sa propre énergie, nous avons fait la démonstration d'un minirobot de 100 milligrammes capable de produire assez de poussée pour décoller (nous l'avons relié à une source externe d'énergie). Le robot-abeille était également capable de se stabiliser en utilisant une combinaison de mécanismes actifs et passifs. Avec les technologies les plus en pointe en matière de densité d'énergie des piles et au vu de l'efficacité de tous les composants du corps, nous estimons que la durée de vol ne dépasserait pas quelques dizaines de secondes. Pour accroître cette durée, nous cherchons à réduire la masse et à renforcer l'efficacité de chacun des composants du robot.

L'énergie n'est pas le seul facteur qui bride notre robot-abeille. Un cerveau électronique embarqué constitue un autre problème non résolu. Sur le terrain, un robot-abeille devra constamment évaluer son environnement, décider de la meilleure ligne de conduite et commander ses mécanismes de vol. Un dispositif électronique externe fonctionne comme une solution d'appoint dans le laboratoire, mais un robot-abeille en plein travail aura besoin de son propre cerveau.

À un niveau supérieur, le cerveau n'est pas seulement responsable de la commande d'un robot-abeille individuel, mais aussi de la gestion de ses interactions avec les autres robots-abeilles de la colonie. Nous avons entrepris de construire ce cerveau en couches – des capteurs permettant d'interpréter l'environnement physique, un système nerveux électronique qui traite les fonctions de commande de base et un cortex électronique programmable pour prendre des décisions.

Dans une première étape, nous cherchons à mettre au point un sous-système cérébral permettant de voler de façon autonome. Réaliser ce défi suppose une boucle de commande bien ajustée qui englobe des capteurs, des processeurs dont le rôle est de traiter les informations issues des capteurs, mais aussi de commander les actionneurs piézoélectriques. Ce sont ces derniers qui font bouger les différentes parties du corps du robot.

© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013

Pour imaginer quels capteurs utiliser et comment structurer le circuit cérébral, nous nous sommes, une fois encore, inspirés de la nature. Les mouches (et d'autres animaux) utilisent deux grands types de capteurs pour se diriger. Les capteurs proprioceptifs donnent à une mouche des informations sur son état interne – la vitesse de battement de ses ailes, par exemple, ou la configuration de ses pattes. Les capteurs extéroceptifs livrent, eux, des informations sur le monde extérieur.

Un système visuel simple, mais efficace

La technologie moderne nous offre des systèmes de géolocalisation, des accéléromètres et des gyroscopes multiaxes, mais ces différents capteurs sont trop lourds ou consomment trop d'énergie pour être utiles. C'est pourquoi nous recherchons un système de vision électronique analogue à celui des vraies abeilles – un système qui analyse le « flux optique », le mouvement apparent des objets dans le champ visuel d'un capteur d'images. Imaginez ce que voit le passager d'une voiture à travers une vitre latérale : les objets proches semblent se déplacer rapidement dans son champ de vision, tandis que les objets éloignés se déplacent lentement. Un système visuel qui utilise cette information peut créer une représentation tridimensionnelle détaillée de son environnement, même s'il n'est équipé que d'un petit capteur d'images simple.

Toutefois, le cerveau de notre robot-abeille doit être suffisamment puissant pour traiter le flux de données provenant de ses capteurs d'images et prendre les décisions appropriées pour diriger les actionneurs du corps. Ici encore, les composants disponibles les plus perfectionnés ne nous sont d'aucune utilité, car trop lourds et gourmands en énergie. En conséquence, nous avons envisagé un nouveau type d'architecture informatique pour le cerveau du robot-abeille, en associant une informatique polyvalente à des circuits spécialisés qualifiés d'accélérateurs.

Contrairement aux microprocesseurs polyvalents (les puces à tout faire qui font tourner les ordinateurs personnels classiques), les circuits accélérateurs sont des blocs de circuits précisément réglés qui ne font qu'une seule chose, mais qui la font bien. Il nous fallait des circuits intégrés accélérateurs pour effectuer les calculs rapides, en temps réel, de la boucle de rétroaction qui assure la stabilité du vol, tout en limitant strictement la consommation d'énergie.

Un défi majeur a été de trouver quels compromis nous pouvions faire. Par exemple, nous aimerions utiliser une caméra à haute résolution. Cependant, une haute résolution (un grand nombre de pixels) nécessite des capteurs d'images plus grands, donc plus de puissance informatique pour traiter les images. Où se situe l'optimum ?

Pour répondre à ce type de questions, nous avons développé une salle de test spéciale. Nous avons monté un corps de robot-abeille sur un capteur de forces et de couples, et nous lui avons fait battre des ailes. Sur les parois de cette chambre de test, nous projetons des images de l'environnement physique où le robot-abeille devrait voler. Nous pouvons ainsi étudier comment le système visuel, le cerveau et le corps prototypes fonctionnent de conserve pour orienter le minirobot.

Le contrôle du vol n'est qu'un début, bien sûr. Nous étudions aussi d'autres types de capteurs qui permettront aux robots-abeilles d'accomplir des tâches particulières, par exemple localiser une personne emprisonnée dans les décombres à la suite d'un tremblement de terre.

Une capacité que nous ne prévoyons malheureusement pas pour nos robots-abeilles actuels est la communication directe d'un minirobot à l'autre – les coûts énergétiques liés à des communications sans fil sont tout simplement trop élevés. Cependant, cela ne signifie pas que les robots-abeilles devront agir seuls.

De l'intelligence en essaim

Pris isolément, un robot-abeille sera minuscule et limité par rapport au monde dans lequel nous espérons le faire fonctionner ; de plus, les contraintes en termes d'énergie et de poids restreignent fortement les types de matériel de détection et de communication qu'un tel minirobot peut transporter. C'est pourquoi il nous faut aussi trouver comment construire une colonie. Comme avec les vraies abeilles, un seul robot-abeille ne peut pas accomplir grand-chose. Mais une ruche ? Un comportement de groupe permettrait aux robots-abeilles d'explorer de grandes étendues, de sélectionner les zones intéressantes en y effectuant de nombreuses observations simples, de se

LES AUTEURS

Robert WOOD est professeur d'ingénierie et de sciences appliquées à l'Université Harvard (États-Unis), où il est membre de l'Institut Wyss d'ingénierie bio-inspirée.

Radhika NAGPAL est professeur d'informatique à l'Université Harvard et membre de l'Institut Wyss.

Gu-Yeon WEI est professeur de génie électrique et d'informatique à l'Université Harvard.

BIBLIOGRAPHIE

M. Rubenstein *et al.*, **Kilobot : A low cost scalable robot system for collective behaviors,** *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 3293-3298, 14-18 mai 2012.

R. J. Wood *et al.*, **Progress on « pico » air vehicles,** *International Journal of Robotics Research*, vol. 31(11), pp. 1292-1302, septembre 2012.

D. Cox-Foster et D. van Engelsdorp, **Sauvons les abeilles,** *Pour la Science*, n° 379, mai 2009 (http://bit.ly/pls379 abeilles).

2. LE PROTOTYPE DE ROBOT-INSECTE du projet français OVMI (projet ANR *Objet Volant Mimant l'Insecte*, http://ovmi.iemn.univ-lille1.fr/, de 2005 à 2008) a une envergure de 3,5 centimètres. Le mode d'actionnement de ses ailes est électromagnétique. Les programmes de l'ANR intitulés EVA *(Entomoptère Volant Autonome)* et IN-ART *(Insecte ARtificiel volanT)* poursuivent ces travaux en utilisant des muscles artificiels.

répartir efficacement les tâches et de prospérer même si une partie des individus échouent. Des essaims de petits robots agiles et éventuellement jetables donneraient lieu à de nombreuses applications nouvelles – inspection de lieux dangereux ou difficiles d'accès, pollinisation, localisation de rescapés, etc.

Depuis le début des années 1990, les chercheurs informaticiens travaillant dans le domaine de « l'intelligence en essaim » ont conçu de nombreux algorithmes de coordination puissants inspirés par les insectes sociaux – depuis les stratégies de recherche coordonnée jusqu'au partage intelligent du travail. Mais même avec ces algorithmes, des essaims de robots ne peuvent pas être gérés à la façon d'un robot unique.

La programmation et le raisonnement au niveau des individus deviennent impossibles avec des milliers d'entités. Ce serait comme demander à un développeur de logiciels de s'asseoir à son bureau et de rédiger des instructions gérant chaque bit physique d'un ordinateur. Au lieu de cela, tout comme les compilateurs traduisent les instructions d'un programme informatique écrit dans un langage compréhensible par un humain en une suite de 0 et de 1 qui commandent les transistors d'un microprocesseur, il nous faut un moyen de programmer à un niveau supérieur, c'est-à-dire de programmer la colonie comme un tout – une façon de traduire des instructions globales en programmes comportementaux individuels. Autrement dit, nous avons besoin d'un langage de programmation pour colonies.

Quel est le bon langage capable de saisir ce que font les colonies d'abeilles domestiques et ce que nous souhaitons faire avec les colonies de robots-abeilles ? Il n'existe pas encore de réponse simple, mais, pour débuter, nous avons développé deux langages abstraits. Dans le langage *Karma*, on peut spécifier un organigramme de tâches que doit accomplir la colonie. Cet organigramme contient des liens représentant des conditions qui déclenchent de nouvelles tâches. Le système *Karma* utilise des informations en provenance des individus pour ajuster l'affectation des ressources aux différentes tâches, d'une façon qui reproduit le rôle de la ruche dans les colonies d'abeilles réelles.

IL DEVIENT IMPOSSIBLE
de programmer, à l'échelle des individus, une ruche de plusieurs milliers de minirobots.

Une approche différente, nommée OptRAD (pour *Optimizing Reaction-Advection-Diffusion*), traite la colonie de robots aériens comme un fluide qui diffuse dans l'environnement. Chaque robot-abeille utilise un algorithme probabiliste pour déterminer s'il va exécuter une tâche, en se fondant sur l'état actuel de l'environnement. Traiter le système comme un fluide permet à OptRAD de raisonner, à un niveau supérieur, sur les résultats attendus et d'ajuster le comportement du système pour qu'il s'adapte à de nouvelles circonstances.

Nous avons aussi beaucoup à apprendre sur la construction et la mise en service d'une grande colonie de robots, qui ne contient pas des dizaines ou des centaines de robots autonomes, mais des milliers. Avec de tels nombres, faire fonctionner ces robots au niveau des individus devient impossible. Imaginons que chaque robot ait un interrupteur marche-arrêt : s'il fallait cinq secondes pour allumer chacun d'eux, alors mettre en marche 1 000 robots prendrait près d'une heure et demie. Des contraintes similaires s'appliquent à chaque élément, du coût jusqu'à la maintenance – chaque robot doit être bon marché, facile à fabriquer et à faire fonctionner de façon collective. Idéalement, chaque opération doit être mesurable – elle devrait nécessiter une durée constante, qui n'augmente pas avec la taille de la ruche (ou du moins qui n'augmente que très lentement).

Ces défis nous ont incités à créer le système *Kilobot* – un ensemble d'une centaine de robots, chacun de la taille d'une pièce de monnaie, qui se déplacent par vibration et qui communiquent avec d'autres Kilobots voisins. Nous pouvons utiliser cet essaim de minirobots pour tester l'efficacité de nos langages de programmation et de nos modèles mathématiques de comportement émergent. Après tout, si nous n'agissons pas avec du matériel bien réel, nous avons peu de chances de comprendre le comportement émergent des systèmes physiques.

L'essaim de Kilobots peut être utilisé pour tester de nombreux comportements collectifs que nous souhaiterions finalement voir adopter par nos colonies de robots-abeilles. Par exemple, nous pouvons demander à l'essaim de rechercher des cibles dans un environnement donné, puis, une fois que l'un des Kilobots a trouvé une cible, lui demander de rapporter sa localisation à l'ensemble de l'essaim. Nous avons aussi fait en sorte que notre conception du Kilobot soit disponible pour d'autres équipes de chercheurs souhaitant construire leurs propres robots. On peut également se procurer des Kilobots préfabriqués auprès de

© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013

K-Team, une société de robotique. Nous espérons que ce type de « kit » robotique standardisé fera émerger de nouvelles idées et amènera des progrès scientifiques qu'une seule équipe ne peut pas réaliser seul – après tout, nous aussi, nous dépendons d'une énergie collective pour devenir plus que la somme de nos constituants.

Une technologie mûre d'ici une quinzaine d'années ?

Bien que de nombreux progrès aient été accomplis, il nous reste encore beaucoup de travail. Nous pensons que d'ici quelques années, nous disposerons de robots-abeilles volant dans des conditions de laboratoire étroitement contrôlées. Cinq à dix ans plus tard, vous pourrez sans doute les voir couramment utilisés.

En 1989, le roboticien d'origine australienne Rodney Brooks a écrit un article sur les avantages des petits robots pour l'exploration spatiale, intitulé *Fast, Cheap, and Out of Control : A Robot Invasion of the Solar System* (solide, bon marché et autonome : une invasion du Système solaire par des robots). Il s'agit, bien sûr, d'un clin d'œil au vieil adage des ingénieurs selon lequel les produits de grande consommation peuvent être caractérisés typiquement par deux – mais pas trois – des adjectifs suivants : solide, bon marché et fiable. Avec de nombreux individus, l'absence d'une de ces caractéristiques n'a guère d'importance.

R. Brooks était prophétique dans son interprétation de ce concept dans le domaine de la robotique. À condition que nous puissions fabriquer de nombreux robots simples qui collaborent avec efficacité, peu importe si certains individus échouent de temps en temps. La seule façon d'assurer le succès des explorateurs robotisés est de leur permettre, occasionnellement, de tomber du ciel ! ■

SUR LE WEB

Envol de ***Robobees*** :
www.ScientificAmerican.com/mar2013/robobees

Vidéos *YouTube* du Laboratoire de microrobotique de Harvard :
www.youtube.com/MicroroboticsLab

universcience présente

conférences

Palais DECOUVERTE

cité des sciences & de l'industrie

journées masse des corps

à la Cité des sciences et de l'industrie

Vendredi 19 avril à 18h

Masse des corps : du Higgs à la matière noire

En quoi la découverte du boson de Higgs modifie notre compréhension de la masse. Étienne Klein et Marc Lachièze-Rey vous l'expliquent.

→ Auditorium de la Cité des sciences et de l'industrie

au Palais de la découverte

entrée libre

Samedi 20 avril à 14h

Boson de Higgs : la genèse d'une découverte

Jean Iliopoulos et Achille Stocchi retracent l'épopée de la découverte du boson de Higgs. Des démonstrations effectuées en direct sur les détecteurs du Palais de la découverte illustreront leurs propos.

→ Salle de conférence du Palais de la découverte

Avec le soutien de

POUR LA SCIENCE SCIENCE & VIE culture plus

programme complet sur www.universcience.fr

HISTOIRE DES SCIENCES

L'instinct maternel sous la IIIe République

L'amour maternel est-il inné ? Tandis que les Républicains puisaient dans le règne animal des exemples en faveur du rôle nourricier de la femme, d'autres études révélaient la fragilité de ces explications biologisantes…

Marion THOMAS

L'amour maternel est-il un instinct ou un sentiment ? Le souci de son enfant est-il inné chez la femme ? Ou devient-elle femme en suivant les injonctions prescrites par les valeurs de son époque, valeurs qui servent l'image de la « bonne mère » avec son cortège de qualificatifs : dévotion, sacrifice et abnégation ? En d'autres termes, l'instinct maternel est-il naturel ou mythique, inventé par une société en vue de justifier, voire renforcer, certaines conventions sociales liées au sexe, telles que le rôle des femmes dans la société ou la division sexuelle des tâches ?

La question fait toujours l'objet de débats aujourd'hui. Mais dans la France de la fin du XIXe siècle, elle constituait un enjeu politique majeur. Pour les Républicains, la femme devait obéir à sa nature de nourricière et d'éducatrice afin d'assurer la reproduction des générations à venir et donc le futur de la République. Qu'en pensaient des naturalistes tels que Jean-Henri Fabre, Edmond Perrier et Alfred Giard, dont les recherches visaient justement à décrire des comportements rencontrés dans la nature ? Nous allons voir que chacun fut, d'une façon ou d'une autre, influencé dans ses études sur l'instinct maternel animal par l'idéologie politique du moment. L'un d'eux, Perrier, a même mis ses travaux au service de la politique dominante…

Le plus modéré des trois était sans doute Fabre. Passionné d'entomologie, le naturaliste a publié entre 1879 et 1907, sous le titre *Souvenirs entomologiques*, un recueil en dix volumes d'observations sur les mœurs et les instincts des insectes, et de méditations sur la nature. Fabre a écrit cette œuvre à la fin de sa vie, à un moment où, après de longues années dédiées à l'enseignement des sciences, il s'est consacré à l'écriture de textes d'histoire naturelle pour le grand public. Peu enclin à fréquenter la communauté scientifique et encore moins les milieux parisiens (il vivait en Provence), Fabre avait cependant développé une amitié forte avec un homme politique, Victor Duruy.

Fabre, partisan de l'instruction des femmes

Ministre de l'Instruction publique sous le régime de Napoléon III et réformateur de l'éducation primaire et secondaire, Duruy avait lancé l'idée d'une éducation laïque pour les jeunes filles, dont l'instruction avait été jusqu'alors le monopole des cléricaux. Son combat avait abouti en décembre 1880 avec la loi Camille Sée, qui non seulement assurait une formation scolaire au-delà d'une alphabétisation en voie d'achèvement, mais proposait aussi d'« arracher les filles à l'Église » en établissant un enseignement secondaire laïque pour elles. Fervent partisan du programme de Duruy, Fabre affirme dans ses *Souvenirs*, au détour d'une réflexion sur la part sauvage de l'homme (après avoir comparé la méthode de chasse des carabes dorés à un abattoir de Chicago), son engagement pour l'instruction féminine : « On a reconnu enfin que la femme possède une âme pareille à la nôtre, supérieure même en tendresse et en dévouement. On lui a permis de s'instruire, ce qu'elle fait avec un zèle au moins égal à celui de son concurrent. Mais le Code, caverne d'où ne sont point encore délogées bien des sauvageries, continue à la regarder comme une incapable, une mineure. Le Code, à son tour, finira par céder sous la poussée du vrai. L'abolition de l'esclavage, l'instruction de la femme, voilà deux pas énormes dans la voie du progrès moral. »

À l'instar de Duruy, Fabre partageait l'idéal d'émancipation du peuple par l'éducation et le travail. Il était convaincu qu'il était possible d'éveiller l'intérêt des jeunes garçons et des jeunes filles à des sujets divers, spécialement l'histoire naturelle, tout autant que de les éduquer moralement grâce à la science. Cette mission d'éducation populaire, qui s'inscrivait dans une dynamique de sécularisation de la société, ne se fit pas sans tensions. Duruy comme Fabre furent malmenés par les cléricaux pour leurs hardiesses laïques et leurs atteintes aux privilèges de l'Église quant à l'éducation des filles.

Dans ce contexte, si Fabre n'extrapole jamais de description d'insecte au modèle féminin, ses idées progressistes transparaissent néanmoins dans ses observations sur l'instinct maternel animal. À travers le portrait des mœurs de mères insectes, Fabre fait osciller l'image de la femme entre deux pôles : la mère dévouée et, à l'opposé, négligente. Sous sa plume, c'est la femelle scarabée qui incarne le mieux l'image de la mère dédiée à sa progéniture, au point « dans sa tendresse », de « perdre le besoin de manger » et de rester « au fond d'un terrier, quatre mois durant, à veiller sur sa nichée ».

© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013

Même dévotion frisant l'abnégation chez l'araignée-crabe *Thomisus onustus* qui, « très émaciée pour avoir pondu ses œufs et utilisé toutes ses soies pour la protection du nid », après avoir « eu la joie de voir naître sa famille » et être « venue en aide aux faibles pour franchir l'opercule », « ses devoirs accomplis, tout doucement, est morte ». À travers ces portraits d'insectes femelles, Fabre suggère qu'il existe une « bonne » façon de s'occuper de sa progéniture et donne une leçon de morale au lecteur des *Souvenirs* : « Ainsi éclatait, chez un humble consommateur de bouse, une des plus belles manifestations de l'instinct maternel. »

Cependant, la nature joue des tours : de mère dévouée, la lycose de Narbonne, une tarentule, peut devenir une mère insouciante, qui confond sa ponte avec une bille de liège que Fabre a placée à côté de l'animal *(voir l'encadré page 74)*. Ainsi, d'un côté Fabre valorise l'image d'une mère naturellement dévouée, voire sacrificielle, faisant écho à une théologie naturelle (la connaissance de Dieu à travers l'étude de la nature) dont il est un éminent représentant ; de l'autre, il malmène l'idée du merveilleux et de l'harmonieux dans la nature en pointant les « aberrations » ou les « dissonances » du règne animal. Oscillant entre ces deux positions, Fabre en tire une leçon d'humilité : « En dévoilant à nos yeux le spectacle de si nombreux malheurs, l'Intelligence Souveraine nous exhorte à nous regarder vraiment en nous-mêmes et tend à nous disposer à un plus grand amour, une plus grande pitié et une plus haute résignation. »

Une mère dévouée avant tout

Figure centrale de la biologie française de la fin du XIX^{e} siècle, Perrier était quant à lui le chef de file du mouvement néolamarckien français. Reprenant les idées du naturaliste Jean-Baptiste Lamarck (1744-1829), les partisans de ce mouvement pensaient que le principal moteur de l'évolution était la transmission des caractères acquis et l'adaptation au milieu. Perrier a occupé des positions institutionnelles importantes, telle celle de directeur du Muséum national d'histoire naturelle, pendant plus de 20 ans. Aux antipodes de Fabre, il usait de son autorité scientifique pour appuyer l'ordre établi dans les débats sociopolitiques de son temps. Dans son œuvre, la biologie, la philosophie et le politique s'influencent mutuellement. Ainsi, dans *La Femme devant la biologie et les caractères généraux du sexe féminin* (1908), ses réflexions sur la maternité mêlent physiologie, psychologie et critiques à l'encontre des féministes de son époque. Parmi elles, Nelly Roussel s'oppose avec virulence à la vision de la femme promulguée par la société républicaine française – une femme qui, au prix de tous les sacrifices, doit obéir à sa

L'AUTEUR

Marion THOMAS est maître de conférences en histoire des sciences à la Faculté de médecine de l'Université de Strasbourg et rattachée au DHVS (Département d'histoire des sciences de la vie et de la santé).

© Hulton-Deutsch Collection/CORBIS

1. *RÉVOLUTION DE 1953*. *Le bataillon de la suprématie féminine arrivant aux barricades*, par Albert Robida (1848-1926). Caricaturiste, Robida s'était spécialisé dans les visions du futur. Parmi elles, les femmes quitteraient leur rôle nourricier pour prendre le pouvoir…

La lycose, mère dévouée… et insouciante

Trois semaines et plus, la lycose traîne la sacoche des œufs appendue aux filières. Que le lecteur veuille se rappeler les épreuves racontées dans le précédent volume, en particulier celles de la bille de liège et de la pelote de fil stupidement acceptées en échange de la vraie pilule [contenant les œufs]. Eh bien, cette mère si obtuse, satisfaite de n'importe quoi lui battant les talons, va nous émerveiller de son dévouement.

[…] jamais elle ne quitte la chère sacoche, objet bien encombrant dans la marche, l'escalade, le bond. Si quelque accident la détache du point de suspension, elle se jette affolée sur son trésor, amoureusement l'enlace, prête à mordre qui voudrait le lui enlever.

Dans les premiers jours de septembre, les jeunes, éclos depuis quelque temps, sont mûrs pour la sortie […]. En une seule séance, la famille entière émerge du sac. Tout aussitôt les petits grimpent sur le dos de la mère […]. Étroitement groupés l'un contre l'autre, parfois en une couche double et triple, suivant leur nombre, les jeunes occupent toute l'échine de la mère, qui, pendant sept mois, nuit et jour, va désormais porter sa famille […].

Parler ici d'amour maternel serait, je crois, excessif. La tendresse de la lycose pour ses fils ne dépasse guère celle de la plante qui, étrangère à tout sentiment affectueux, a néanmoins, à l'égard de ses graines, des soins d'une exquise délicatesse. La bête, en bien des cas, ne connaît pas d'autre maternité. Qu'importe à la lycose sa marmaille ! Elle accepte celle d'autrui non moins bien que la sienne ; elle est satisfaite pourvu qu'une foule grouillante lui charge le dos, foule venue de ses flancs ou d'ailleurs. Le réel amour maternel est ici hors de cause.

Jean-Henri Fabre,
Souvenirs entomologiques,
tome II, 1879-1907

nature de nourricière et d'éducatrice afin d'assurer la reproduction des générations à venir et donc le futur de la République.

Contre ces féministes, Perrier affirme que la « femme saine et normale » est « essentiellement une mère ». « La Femme, créatrice et gardienne jalouse du foyer, tout entière dévouée à sa double tâche d'épouse et de mère » doit assurer l'économie et le bonheur de la maison, tandis que « l'homme, voué aux besognes extérieures que l'état trop variable de la santé de la femme ne lui permet pas d'accomplir d'une façon régulière, assurerait par son courage, son activité, le bien-être de sa famille ». Une telle répartition des rôles offre une « division du travail » entre hommes et femmes qui permet de perpétuer le modèle familial, l'unité de base de la société.

Si Perrier est persuadé de la nécessité d'éduquer les femmes, c'est avant tout pour en faire « des épouses accomplies, des mères informées et prévoyantes ». Profitant de la loi Sée, qui stipule de distinguer l'enseignement pour les femmes de celui pour les hommes, il retire la physiologie humaine des programmes, car elle « touche de trop près à des problèmes qu'il convient d'écarter complètement de l'esprit des jeunes filles ». De même, il trouve préjudiciable et contre-nature le fait que les femmes puissent se tracer un chemin dans des territoires professionnels occupés par les hommes, car elles prennent alors le risque de « déféminiser » leur organisme en le soumettant à une suractivité cérébrale, la plus coûteuse pour l'organisme à ses yeux.

Merveilleuses guêpes

Les études de Perrier sur les comportements maternels animaux reflètent particulièrement sa vision des femmes et de la maternité. Les exemples qu'il met en avant confortent la femme dans son rôle de gardienne du foyer et de mère nourricière. Perrier montre comment l'instinct maternel chez les insectes se décline en une double tâche : la construction d'un abri pour la progéniture et la nutrition de la jeune famille. Il trouve chez les guêpes un modèle exemplaire. Sur une courte période de leur vie, les mères guêpes travaillent sans relâche à approvisionner leurs larves, de même que, « sans autre outil que de grêles et faibles pattes, elles creusent le sable de longues galeries » dans lesquelles « chaque ver a sa logette approvisionnée par la mère ». Aux yeux de Perrier, cet approvisionnement est une « merveille » et les guêpes incarnent de façon idéale les instincts de « dévouement sans limite, de prévoyance infinie, de sollicitude délicate et vigilante » qui valent aux mères une « pieuse admiration et le respect ».

Passant des insectes aux vertébrés, Perrier identifie les mêmes preuves de dévotion et de sacrifice chez les femelles, au point d'affirmer que le règne des vertébrés n'aurait pu survivre à des changements climatiques drastiques sans leur rôle actif. Ainsi, hormis quelques exceptions (les poissons de haute mer qui peuvent abandonner leurs œufs, mais sur lesquels Perrier n'insiste pas), la nature montre que « l'amour maternel, que, par l'ingéniosité de sa tendresse et par l'étendue de son abnégation, la femme a su faire si noble et si grand est répandu, sous les formes les plus diverses, dans tout le règne animal ».

Pour Perrier, le règne animal révèle donc que s'adonner aux soins des enfants et à l'économie du foyer est un devoir naturel et que s'y refuser est une trahison des femmes à leur nature. Sa thèse est aussi chargée politiquement. En faisant de l'instinct maternel un pilier de la société républicaine, Perrier rend les féministes responsables de son déclin et contribue à faire d'elles une menace pour la « vitalité de la nation ». L'attaque de Perrier contre le mouvement féministe est aussi liée au problème de la dénatalité en France à l'époque. À l'instar de démographes alarmistes, Perrier accuse les femmes, mécontentes de leur place dans la société, de voir les enfants comme une gêne dans leur combat pour l'égalité des droits et en conséquence de négliger leur devoir social : procurer des enfants à la société pour la défense de la République.

À la même époque, le faible nombre de naissances fut aussi un des facteurs qui favorisa la diffusion des idées eugénistes. Nommé président de la Société française d'eugénique en 1913, Perrier se fit le chantre des idées du médecin obstétricien Adolphe Pinard, qui assimilait eugénisme et puériculture. Encouragement des naissances, éducation des enfants, amélioration des conditions de vie et lutte contre les maladies fléaux, tel était le *credo* des eugénistes

© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013

français du début du XXe siècle. Cet eugénisme républicain donnait à la mère un rôle central. Grâce à son attention bienveillante sur l'éducation et le soin des enfants, la mère dévouée et aimante devenait la garante d'une société régénérée et forte.

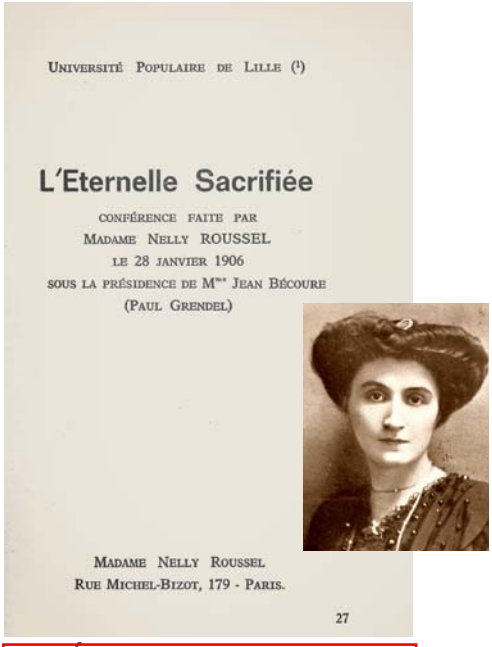
Un instinct maternel égoïste

Si Alfred Giard est une autre figure emblématique du néolamarckisme français de la fin du XIXe siècle, il arriva cependant à de tout autres conclusions que Perrier. Professeur de zoologie à la Faculté des sciences de Lille, puis de Paris, il fut aussi le défenseur d'une biologie expérimentale et participa au mouvement de création de stations de biologie marine le long des côtes françaises.

C'est à la station maritime de Wimereux (Pas-de-Calais), à la fin des années 1880, que Giard se consacra à des études sur la castration parasitaire. Travaillant sur des invertébrés marins, Giard constata qu'un jeune crabe mâle *(Carcinus maenas)*, lorsqu'il est parasité par un crustacé nommé sacculine, montre des caractères sexuels femelles : sa queue est transformée en une queue femelle. Chez d'autres crustacés marins, la castration parasitaire, cette fois-ci l'œuvre de bopyriens, conduit, chez la femelle infestée, à une perturbation des instincts sexuels : l'animal « paraît éprouver sous l'influence du parasite les mêmes modifications qu'il éprouverait sous l'influence de ses propres œufs. Par suite, l'instinct maternel dévoyé s'applique à la protection du parasite ».

Difficile alors d'admettre que les femelles des crustacés soient dévouées à leur seule progéniture dans la mesure où elles confondent le parasite avec leurs propres œufs. À partir de ces travaux, Giard posa un regard différent sur le comportement maternel : « De nombreux animaux disséminent leurs œufs librement au dehors dans le milieu ambiant ; c'est le cas de beaucoup d'animaux inférieurs et même de quelques animaux d'une organisation assez élevée, tels que les poissons. » Et de conclure : « Chez ces êtres, il ne peut être question d'amour maternel. » Même les mères araignées, supposées dévouées au point de rester isolées dans leur nid avant et après la ponte, adoptent sans difficulté une progéniture étrangère. Giard en conclut que l'attachement supposé à la progéniture pouvait être un simple attachement au nid.

Mais c'est en portant son attention sur les mœurs maternelles des mammifères que Giard se fit plus provocateur. Loin de l'image d'une mère dévouée, la femelle qui allaite est décrite, sous la plume de Giard, comme un animal qui se fait du bien en instrumentalisant sa progéniture *(voir l'encadré page 76)*. Compensation à des appétits


UNIVERSITÉ POPULAIRE DE LILLE (1)

L'Eternelle Sacrifiée

CONFÉRENCE FAITE PAR
MADAME NELLY ROUSSEL
LE 28 JANVIER 1906
SOUS LA PRÉSIDENCE DE Mme JEAN BÉCOURE
(PAUL GRENDEL)

MADAME NELLY ROUSSEL
RUE MICHEL-BIZOT, 179 - PARIS.

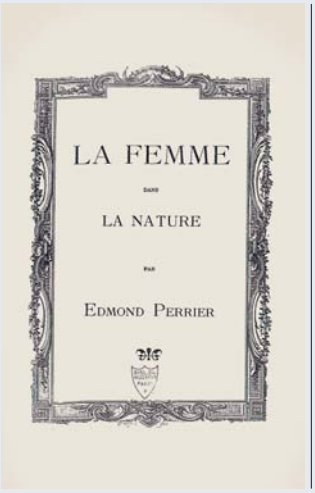
27

2. LA FÉMINISTE Nelly Roussel *(médaillon)*, contre laquelle Perrier se positionnait, revendiquait une « maternité consciente et désirée » qui fût reconnue comme une fonction sociale. Dans ses conférences, elle pourfendait l'image d'une femme « éternelle sacrifiée » par Dieu, la nature et la société républicaine française. Roussel brandissait le modèle d'une femme sportive et active dans une profession valorisante.

La science au service de la politique

Or, la science nous montre dans tout le règne animal une psychologie très nette du sexe féminin, une psychologie en quelque sorte physiologique, faite d'un ensemble d'idées nécessaires que rien ne peut effacer parce qu'elles sont issues de deux fonctions essentielles, la transmission de la vie, liée elle-même, dans sa forme, au mode de nutrition de l'individu, et la protection d'une progéniture débile dont la mère assure les premiers pas dans la vie. C'est autour de cette psychologie fondamentale, constituant un pivot fixe, inébranlable, que se construit et qu'évolue la psychologie de la femme. Cette psychologie, ainsi enchaînée à la nature des choses, ne saurait être identique à celle de l'homme qui tourne autour d'un tout autre pivot.

Laquelle de ces deux psychologies est supérieure à l'autre ? La question n'est pas à poser. Elles sont différentes, voilà tout. […] Peut-on dire, par exemple, parce qu'il étale avec orgueil son luxueux plumage, que le paon soit supérieur à la paonne qui couve ses œufs et élève ses petits ? […] Si le paon charme nos yeux par son éclat, la paonne émeut notre cœur par les soins qu'elle donne à ses poussins, et la noblesse de cette émotion ne vaut-elle pas le plaisir que peut nous donner l'étincellement d'un plumage ? On accordera volontiers, d'autre part, que l'organisme supérieur doit être le plus durable, le plus utile à la conservation de la race ; or, cet organisme est sans conteste l'organisme féminin. […] Si les femmes appréciaient ce privilège incontestable, si elles s'enorgueillissaient de la maternité qui est leur rôle essentiel, elles puiseraient dans cet orgueil les plus puissants motifs pour ne pas envier le rôle de l'homme, plus passager, plus égoïste et par cela même infiniment moins noble.


LA FEMME

dans

LA NATURE

par

EDMOND PERRIER

Edmond Perrier,
La femme dans la nature, *1908*

© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013

Maternelle pour son propre plaisir

Le petit, en léchant et suçant cette sécrétion dont il tire sa première nourriture, produit un soulagement de la gêne éprouvée par la femelle. Il devient pour sa mère un instrument de bien-être et le bénéfice que celle-ci en retire est tel qu'elle atténue ou même supprime entièrement les instincts les plus énergétiques de la race. On a vu maintes fois les femelles des grands carnassiers adopter de jeunes chiens comme nourrissons et on ne compte plus les exemples de chattes allaitant de jeunes lapins ou même de jeunes rats. Le besoin de se débarrasser d'une sécrétion gênante est assez puissant pour déterminer parfois la femelle qu'on a privée de ses petits à voler la progéniture d'une autre femelle.

Alfred Giard, Les origines de l'amour maternel, *La revue des idées 2, 1905*

sexuels inassouvis, l'allaitement, qui nourrit l'enfant, apporte aussi des plaisirs à la mère – quelque chose, selon Giard, que la nature a lié aux douleurs et peines de la maternité, cela afin de maintenir la conservation des espèces. Ailleurs, Giard durcit le trait : lors du premier mois de la grossesse, « l'œuf humain est un parasite de bien petite taille et cependant l'action qu'il exerce sur l'organisme maternel est assez puissante pour empêcher les autres œufs de mûrir et arrêter la menstruation ».

La misère des corons

Ainsi, par des exemples variés, Giard remet en cause l'image d'une mère dévouée, voire sacrificielle, promue par Perrier et dépeint une femelle égoïste, davantage soucieuse de son bien-être que de celui de ses petits. S'appuyant sur l'étude des perversions sexuelles animales du médecin aliéniste Charles Féré (1852-1907), il invoque même l'infanticide animal. Féré avait établi que, sous l'influence du rut, mâles et femelles tuaient leur progéniture quand elle représentait une gêne. Pourquoi un tel revirement de Giard ? Perrier et lui défendaient tous deux les mêmes thèses néolamarckiennes en biologie ; les facteurs scientifiques semblent donc avoir joué ici un moindre rôle, et c'est du côté des facteurs culturels et personnels que se dessinent des réponses.

Engagé politiquement, Giard fut député socialiste de la région de Valenciennes entre 1882 et 1885. Dans cette région minière, théâtre de conflits sociaux majeurs à l'époque, Giard rencontra les ouvriers des corons et fut sensibilisé à leurs conditions de travail. Homme de terrain, Giard se faisait aussi le porte-parole du monde ouvrier dans la presse progressiste locale et dans des articles scientifiques. Ce fut lui aussi qui guida Émile Zola dans les corons d'Anzin et de Denain, deux lieux de grèves importantes, et lui permit, en favorisant des enquêtes avec les ouvriers, d'accumuler le matériel documentaire qui constituerait le cœur de *Germinal*. Ces déplacements aiguisèrent la conscience sociale de Giard et lui montrèrent l'impact destructeur de plusieurs grossesses sur des corps déjà affaiblis. Face à ce constat, il envisagea la maternité comme une contrainte, d'où l'idée d'une relation parasitaire entre la mère et l'embryon ne favorisant pas l'émergence de l'amour maternel.

La sensibilité de Giard à la question de l'amour maternel a sans doute aussi été influencée par des facteurs personnels. Entre 1893 et 1896, Giard perdit ses trois enfants, tous morts en bas âge d'une méningite tuberculeuse. Sa femme, une jeune Anglaise qualifiée d'intellectuelle par ses beaux-parents, fut accusée par eux de ne pas s'être assez occupée de ses enfants au point de les avoir laissés mourir…

Les travaux de Fabre, Perrier et Giard montrent des liens étroits entre théorie de l'instinct maternel et idéologie politique. Ces savants n'ont toutefois pas tous nourri le discours social dominant. Perrier s'est appuyé sur le règne animal pour justifier le caractère maternel de la femme, conforme à l'image idéale de la femme républicaine. Mais de leur côté, Fabre et Giard ont affiché des vues davantage en porte-à-faux avec l'idéologie dominante de leur temps. Le premier a ébranlé le mythe d'une mère dévouée et sacrificielle dans une époque conservatrice et sous forte influence religieuse, tandis que le second a insisté sur l'origine égoïste de l'amour maternel, conception en désaccord avec la représentation de la femme dévouée à sa vie de mère, portée aux nues par les Républicains. À la fin du XIXe siècle, les explications biologisantes de l'instinct maternel, en cherchant à poser un nouvel ordre de la nature, ont davantage participé à la construction d'un nouvel ordre politique. ■

À ÉCOUTER:

En avril, dans la partie Actualités d'une émission **La marche des sciences**, sur *France Culture* le jeudi de 14h à 15h, Marion Thomas reviendra sur la façon dont, sous la IIIe République, les études naturalistes sur l'instinct maternel ont été influencées par l'idéologie politique, et inversement. **www.franceculture.com**

BIBLIOGRAPHIE

M. Thomas, **Les femmes sont-elles dévouées naturellement ? Étude sur l'instinct maternel animal en France sous la Troisième République,** *Revue d'histoire des sciences humaines*, à paraître.

N. Hulin, **Les femmes dans l'enseignement scientifique,** PUF, 2002.

G. Fraisse et M. Perrot (dir.), **Histoire des femmes en Occident, Tome IV : le XIXe siècle**, Plon, 1991.

L. Klejman et Fl. Rochefort, **L'égalité en marche. Le féminisme sous la Troisième République,** Presses de la Fondation nationale des sciences politiques, 1989.

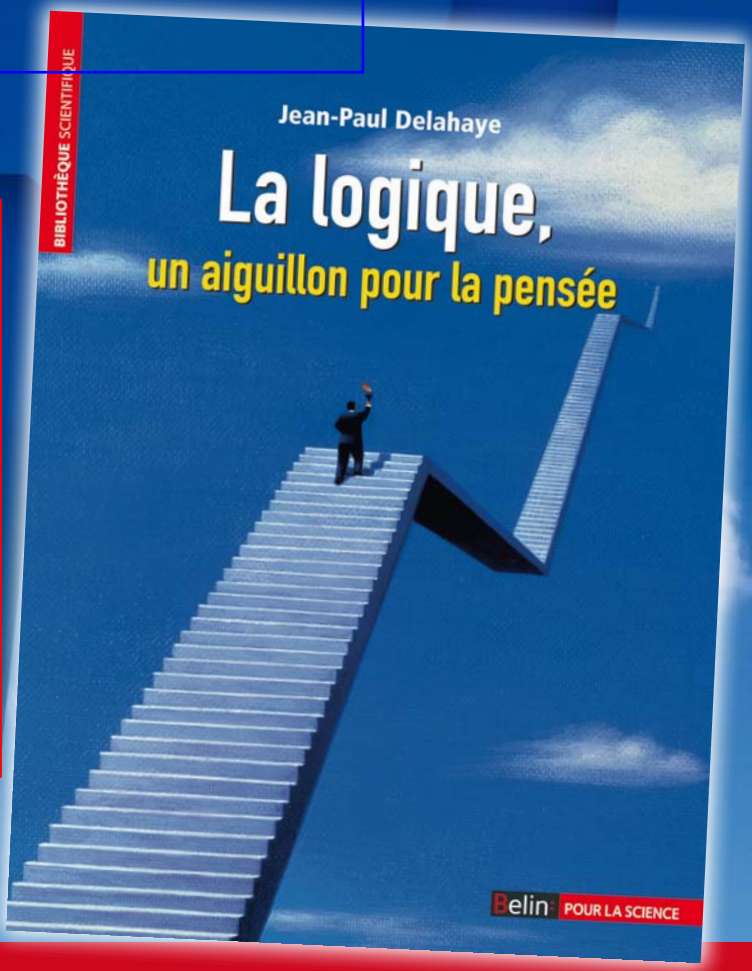
E. Badinter, **L'amour en plus. Histoire de l'amour maternel au XVIIe-XXe siècle,** Flammarion, 1980.

© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013

La logique,

un aiguillon pour la pensée

Jean-Paul Delahaye



La logique – prise au sens large – 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 intéressera 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

BON DE COMMANDE

POUR LA SCIENCE

à découper ou à photocopier et 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 : pourlasciencevpc@daudin.fr

❑ Oui, je commande l'ouvrage *La logique, un aiguillon pour la pensée* de J.-P. Delahaye.

..... exemplaires × 27,00 € (Réf. 075115) = ... €
Frais de port (4,90 € France – 12 € étranger) + ... €
TOTAL À REGLER = ... €

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

J'indique mes coordonnées :
Nom :
Prénom :
Adresse :
C.P. : Ville :
Pays : Tél. : (facultatif)

E-mail pour recevoir la newsletter *Pour la Science* (à remplir en majuscules) : @

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 ❑.**

LOGIP426
Offre valable jusqu'au 30/04/13 dans la limite des stocks disponibles.

La sélection de livres POUR LA SCIENCE

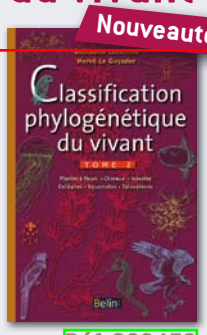
Ce mois-ci explorez, à votre guise, le monde du vivant avec des ouvrages qui font référence dans le domaine, ou les mathématiques à travers des livres riches en théories, images et anecdotes.

Classification phylogénétique du vivant

Tome 2

Guillaume Lecointre, Hervé Le Guyader

Nouveauté



Réf. 003456

Cet ouvrage très attendu vient compléter le tome 1, désormais une référence sur le sujet. Six grands groupes y sont présentés sur la base des connaissances les plus récentes : les plantes à fleurs, les oiseaux, les insectes, les lézards et serpents, les cnidaires et les poissons osseux.

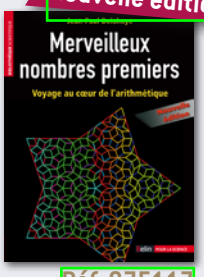
Editions Belin
608 pages – 39,90 euros – ISBN 978-2-7011-3456-7

Merveilleux nombres premiers

Voyage au cœur de l'arithmétique

Jean-Paul Delahaye

Nouvelle édition



Réf. 075117

Les nombres premiers fascinent. Connus dès les débuts de l'arithmétique, ils ont excité la curiosité de milliers de mathématiciens. Ils sont au cœur de la science des nombres, car tout entier se décompose de façon unique en un produit de facteurs premiers. Dans cet ouvrage, l'auteur mêle éclaircissements théoriques et anecdotes piquantes.

Editions Belin / Pour la Science
296 pages – 28 euros – ISBN 978-2-8424-5117-2

50 expériences pour épater vos amis au jardin

Jacques Guichard, Kamil Fadel et Guy Simonin

Nouveauté

Réf. 090618*

Voici 50 nouvelles expériences pour surprendre vos amis à la campagne ou sur votre terrasse : marcher sur l'eau, tirer la nappe sans faire tomber ce qui est sur la table, créer un double arc-en-ciel, transpercer un ballon sans qu'il explose ! Des expériences faciles à réaliser avec du matériel simple et la façon de réussir à coup sûr. Et aussi des compléments scientifiques et des indications sur les lieux où l'on peut observer ces phénomènes à grande échelle.

Editions Le Pommier
168 pages – 18,90 euros – ISBN 978-2-7465-0618-3

Surprenantes images de mathématiques

Georg Glaeser et Konrad Polthier

Nouveauté

Réf. 005695

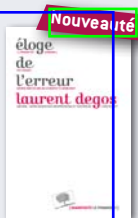
Est-il possible de déformer un polyèdre, voire de le retourner ? Existe-t-il des bulles de savon qui ne soient pas sphériques ? Comment peut-on arriver à mieux comprendre les tourbillons et la structure complexe des courants ? Ce livre propose une approche visuelle des mathématiques grâce à des images fascinantes et inédites qui illustrent les réponses à toutes ces questions.

Éditions Belin / Pour la Science
324 pages – 24 euros – ISBN 978-2-7011-5695-8

Éloge de l'erreur

Laurent Degos

Nouveauté



Réf. 090650*

Nous construisons un monde nouveau dont nous découvrons les règles et auquel nous devons donner un sens. La multiplication des règles, protocoles, sanctions et procédures ne nous y aide pas. Sans l'erreur, moteur de l'évolution et de l'adaptation dans la vie comme dans la société, nous risquons de nous figer tandis que le monde continuera ses perpétuelles métamorphoses. Le tout est de savoir accepter l'erreur tout en minimisant les risques connus et attendus…

Éditions Le Pommier
128 pages – 12 euros – ISBN 978-2-7465-0650-3

En partenariat avec les éditeurs

Belin ÉDITEUR INDÉPENDANT DEPUIS 1777

Éditions Le Pommier

Tous ces livres sont également disponibles en librairie.

Classification phylogénétique du vivant

Tome 1 – 3e édition

Guillaume Lecointre, Hervé Le Guyader

Réf. 004273

Savez-vous que vous êtes plus proches d'un bolet que d'une pâquerette ? Que les crocodiles sont plus proches des oiseaux que des lézards ? Ce livre, très illustré, présente l'arbre de la vie et une synthèse des connaissances sur le sujet.

Éditions Belin
560 pages – 43 euros – ISBN 978-2-7011-4273-9

Comprendre et enseigner la classification du vivant

Guillaume Lecointre (dir.)

Réf. 004798

Cette seconde édition revue et augmentée du livre de référence pour l'enseignement de la classification du vivant propose un rappel synthétique des connaissances essentielles, ainsi que des outils pédagogiques développés à partir de collections rigoureusement sélectionnées d'organismes vivants.

Éditions Belin
360 pages - 27,90 euros – ISBN 978-2-7011-4798-7

Les gènes voyageurs

Éric Bapteste

Nouveauté

Réf. 005885

L'ADN est doué d'une incroyable capacité à se déplacer, sautant souvent d'un organisme vivant à l'autre. L'ouvrage montre en quoi ces nouvelles connaissances modifient profondément notre vision de l'évolution. Le lecteur y découvrira les nouvelles idées sur les origines du monde vivant et son devenir.

Editions Belin/Pour la Science
192 pages – 19,50 euros – ISBN 978-2-7011-5885-3

Vive l'AGRO-RÉVOLUTION française !

Vincent Tardieu

Réf. 005973

Alors que la Terre comptera 9 milliards de bouches à nourrir en 2050, nombreux sont ceux qui pensent qu'il n'y a pas d'alternative à l'agriculture chimique et industrielle. Et pourtant... Oui, on peut nourrir la planète tout en préservant l'environnement ! Oui, nos paysans peuvent vivre mieux et être plus nombreux !

Éditions Belin
480 pages – 22 euros – ISBN 978-2-7011-5973-7

LA SÉLECTION POUR LA SCIENCE C'EST AUSSI...

Guide critique de l'évolution

Guillaume Lecointre (dir.)

Éditions Belin
576 pages – 36,05
ISBN 978-2-7011-4797-0

Réf. 004797

La logique, un aiguillon pour la pensée

Jean-Paul Delahaye

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

Réf. 075115

Mathématiques pour le plaisir

Jean-Paul Delahaye

Éditions Belin / Pour la Science
208 pages – 25,40 euros
ISBN 978-2-8424-5104-2

Réf. 075104

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)

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 : pourlasciencevpc@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	=	€

J'indique mes coordonnées :

Nom :
Prénom :
Adresse :
C.P. : Ville :
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

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 ❑.**

DPL426 Offre valable jusqu'au 30/04/2013 dans la limite des stocks disponibles.

LOGIQUE & CALCUL

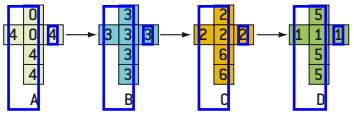
Les dés affreux d'Efron

Les rapports de force entre dés différents sont parfois étranges et trompent fortement l'intuition. Ils peuvent même s'inverser si on lance les dés deux fois au lieu d'une.

Jean-Paul DELAHAYE

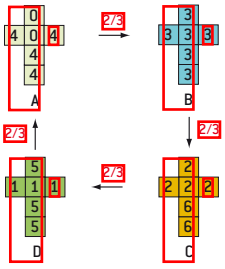
Si 1 est meilleur que 2, si 2 est meilleur que 3, ..., et si $N-1$ est meilleur que N, alors bien sûr 1 est meilleur que N ! Eh bien, pas toujours ! Dans certaines circonstances, il y a non-transitivité : 1 est battu par N.

Martin Gardner aimait s'amuser de ce qui trouble l'esprit et choque le bon sens. Il a notamment fait une large publicité aux dés intransitifs d'Efron, dont la descendance remarquable perfectionne et démultiplie le paradoxe initial. En 1970, dans sa rubrique mensuelle de *Scientific American*, Gardner présentait les quatre dés que venait d'inventer Bradley Efron, statisticien à l'Université de Stanford :



Nous les noterons A = [0, 0, 4, 4, 4, 4], B = [3, 3, 3, 3, 3, 3], C = [2, 2, 2, 2, 6, 6], D = [1, 1, 1, 5, 5, 5]. Nous supposerons que chaque face tombe avec la probabilité 1/6 : les dés ne sont pas truqués. Lorsqu'on jette simultanément le dé A et le dé B et en considérant que le résultat supérieur désigne le gagnant, il y a 36 = 6 × 6 cas possibles équiprobables. Douze cas donnent « 0 pour A et 3 pour B », et 24 cas donnent « 4 pour A et 3 pour B ». Le dé A gagne donc 24 fois et le dé B 12 fois. L'avantage est au dé A, qui gagne dans deux tiers des cas.

La comparaison de B et C montre que B gagne aussi contre C dans deux tiers des cas. De même, C gagne contre D dans deux tiers des cas, et – surprise – D gagne contre A dans deux tiers des cas aussi. Nous parlerons de « chaîne intransitive de longueur 4 » et nous représenterons les résultats ainsi :



C'est étonnant. L'explication de l'apparent paradoxe est simplement que nous avons tort de croire que la relation « Le dé X est plus fort que le dé Y » est transitive. La force d'un dé n'est pas mesurable par un paramètre unique comme la vitesse lors d'une comparaison de coureurs à pied ou de la valeur en euros pour l'évaluation des voitures. La force d'un dé est spécifique de chaque rencontre, elle dépend du contexte créé par les dés opposés.

Le résultat moyen d'un dé, la somme des faces divisée par 6, qui aurait pu être ce paramètre unique mesurant la force d'un dé, ne convient pas. En effet, ces résultats moyens sont : 2,66 pour A, 3 pour B ; 3,33 pour C ; et 3 pour D. Or le dé A, qui a une moins bonne moyenne que le dé B, le bat dans deux tiers des cas ! De même, B, qui a une moins bonne moyenne que C, est meilleur que lui dans une rencontre à deux (le signe > signifie ici « gagne contre ») :

A $>_{2/3}$ B $>_{2/3}$ C $>_{2/3}$ D $>_{2/3}$ A

2,66 3 3,33 3 2,66

Ni le résultat moyen d'un dé ni aucun paramètre global ne mesurent ici de manière absolue la force d'un dé.

Profiter du paradoxe

Les dés d'Efron vous serviront peut-être à arrondir vos fins de mois. Proposez le jeu suivant à votre ami qui aime tant parier : « Voici quatre dés A, B, C et D ; nous allons en choisir chacun un ; je te laisse choisir en premier ; ensuite nous lancerons les dés cinq fois de suite simultanément, et celui qui aura gagné le plus souvent recevra 100 euros de l'autre. »

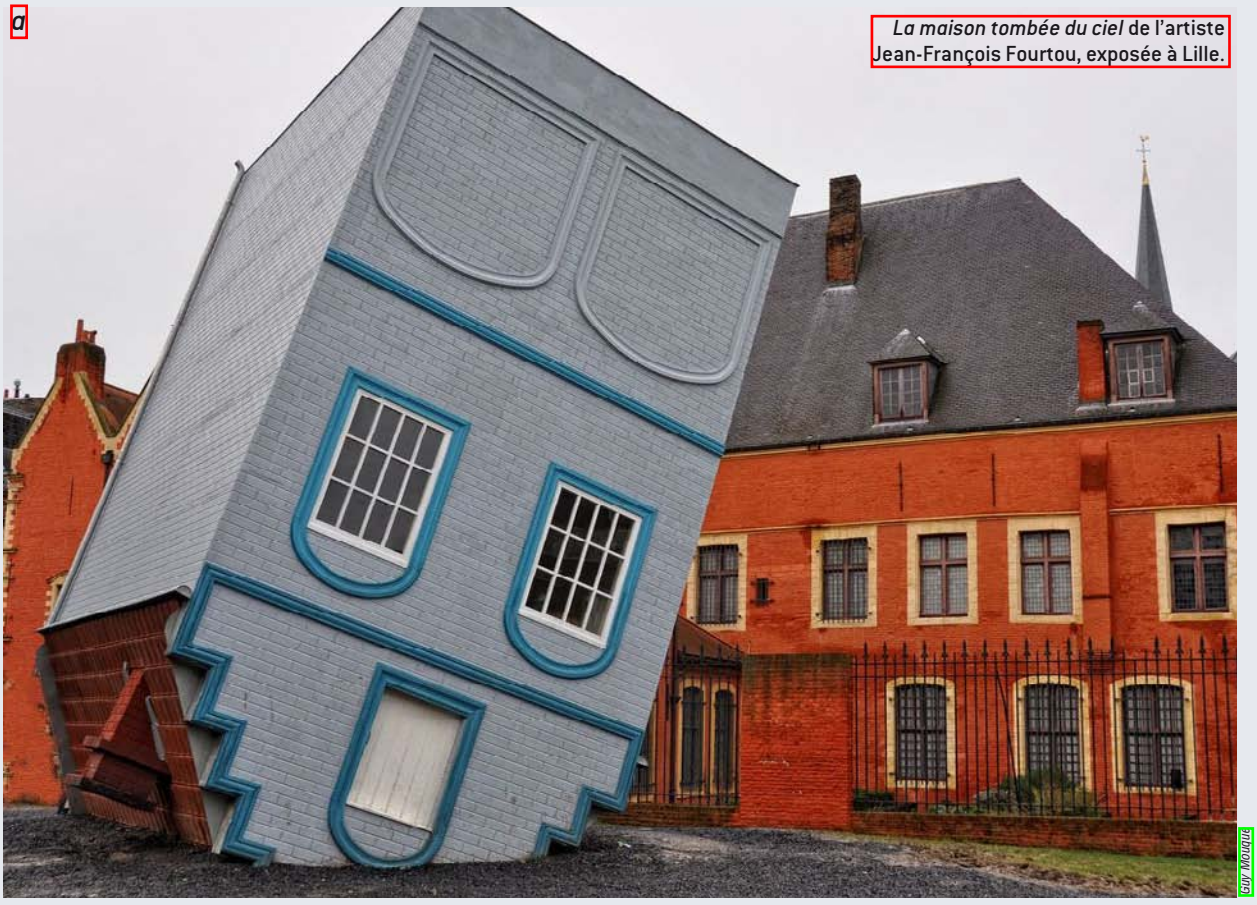
Si votre ami choisit A, vous choisirez D, plus fort que A ; s'il choisit B, vous choisirez A, plus fort que B, etc. La chaîne intransitive vous assure de toujours trouver un dé plus fort que celui de votre victime.

À chaque lancer, vous aurez deux chances sur trois de gagner, ce qui vous fera gagner dans exactement 79,01 % des cas en faisant le bilan des cinq lancers. Si vous trouvez que c'est encore trop risqué, proposez de lancer les dés 25 fois au lieu de 5 fois. Vous gagnerez alors dans 95,84 % des cas. Le calcul se fait, à partir du 2/3 favorable à votre dé, en additionnant les probabilités de gagner 25 fois sur 25, 24 fois sur 25, 23 fois sur 25,..., jusqu'à 13 fois sur 25. La loi binomiale indique que dans une telle situa-

© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013

Le monde à l'envers de l'intransitivité

a



La maison tombée du ciel de l'artiste Jean-François Fourtou, exposée à Lille.

Guy Mouquin

L'intransitivité vous met la tête à l'envers *(a)* ! En sport, il n'est pas rare que l'équipe A batte l'équipe B, qui bat l'équipe C, qui bat l'équipe A. La propriété de transitivité (si a > b et b > c, alors a > c) n'est pas satisfaite.

Cela peut résulter d'une méforme de l'équipe A, qui a mal joué le jour où elle a rencontré l'équipe C. Pourtant, il existe en mathématiques plusieurs situations de ce type où aucune méforme ne peut être invoquée pour expliquer l'intransitivité constatée. Bien que tout soit constant d'une partie à la suivante, tout se passe comme au jeu pierre-feuille-ciseaux *(b)* : les ciseaux sont plus forts que la feuille (ils la découpent), la feuille bat la pierre (elle l'enveloppe), la pierre gagne contre les ciseaux (elle les fracasse).

Le paradoxe de Condorcet est classique. Imaginons la situation où on a 60 électeurs et trois candidats A, B et C. On trouve que 23 électeurs classent les candidats A > B > C, 17 classent B > C > A, 2 classent B > A > C, 10 classent C > A > B et 8 classent C > B > A.

Ainsi, 33 électeurs préfèrent A à B contre 27 pour l'inverse ; 42 préfèrent B à C et 18 l'inverse ; 35 préfèrent C à A contre 25 pour l'inverse. Les préférences exprimées par les électeurs forment une chaîne intransitive : A > B > C > A. Les quatre dés d'Efron A = [0, 0, 4, 4, 4, 4], B = [3, 3, 3, 3, 3, 3], C = [2, 2, 2, 2, 6, 6], D = [1, 1, 1, 5, 5, 5] forment de façon analogue une chaîne intransitive.

D'autres jeux de dés ont été inventés dont les propriétés paradoxales sont encore plus contraires à l'intuition que le paradoxe de Condorcet ou que l'escalier impossible d'Escher *(c)* qui monte, mais revient pourtant à son point de départ.

b

Federation Internationale de pierre-feuille-ciseaux

c

pi.Vaughan.org/tag/sm

L'inversion miraculeuse

Tim Rowett a proposé un nouveau paradoxe : l'inversion des gagnants. Si l'on considère par exemple les dés $R_1 = [6, 3, 3, 3, 3, 3]$ et $R_2 = [5, 5, 5, 2, 2, 2]$, on a l'invraisemblable propriété suivante :

En lançant chaque dé une fois, R_1 bat R_2 avec la probabilité 7/12. Il semble plus fort. Si on lance le dé R_1 deux fois, qu'on fait la somme des résultats et de même avec le dé R_2, cette fois c'est le dé R_2 qui gagne, avec une probabilité 765/1296, soit 0,5903 %. En lançant deux fois un dé gagnant, il devient perdant !

Le paradoxe découvert est en réalité encore plus fort, puisque si l'on considère en plus le dé $R_3 = [1, 4, 4, 4, 4, 4]$, on a alors une chaîne intransitive $R_1 > R_2 > R_3 > R_1$, qui s'inverse complètement lorsqu'on double les lancers et devient $R_1 < R_2 < R_3 < R_1$.

tion, la probabilité de gagner exactement p fois quand les dés sont lancés n fois est $n!/((n-p)!\,p!)\,(2/3)^p\,(1/3)^{n-p}$. On en tire les 79,01 % et 95,84 % indiqués.

L'utilisation des dés d'Efron pour gagner de l'argent ne marche que si votre ami n'est pas trop méfiant. Le milliardaire américain Warren Buffet proposa un jour au fondateur de *Microsoft*, Bill Gates, de parier en utilisant les dés d'Efron. Il l'invitait bien sûr à choisir un dé en premier. B. Gates, méfiant, examina les dés et suggéra à W. Buffet de commencer lui-même à prendre un dé. L'histoire ne précise pas le montant de l'enjeu envisagé !

Ce que l'on fait avec quatre dés peut-il être fait avec trois dés ? Peut-on éviter les inélégantes et inquiétantes répétitions de numéros sur les faces ? Se peut-il, ce qui serait plus joli et rassurant pour un parieur, que les trois dés aient la même somme des faces (et donc la même moyenne quand on les lance seuls) ?

Trois dés moins suspects

La réponse est oui. Un exemple de tels triplets intransitifs de dés se trouve dans le livre de Gabor Székely paru en 1986. Ces dés sont : $A' = [5, 7, 8, 9, 10, 18]$, $B' = [2, 3, 4, 15, 16, 17]$, $C' = [1, 6, 11, 12, 13, 14]$. Chaque nombre de 1 à 18 n'est utilisé qu'une seule fois, et tous sont utilisés. Chaque dé totalise 57 points et donne donc en moyenne 9,5.

Les calculs montrent que le dé A' gagne contre B' dans 21 cas sur 36 (soit 7/12). Il en est de même pour le dé B' contre C', et pour C' contre A'. Bien que les trois dés soient différents, il semble régner une symétrie parfaite entre eux : d'une part, chacun, utilisé seul, donne la même moyenne 9,5 ; d'autre part, chacun est gagnant contre un autre avec une probabilité de 7/12, et perdant contre un autre avec la même probabilité. Les dés forment une chaîne intransitive de longueur 3, comme au jeu pierre-feuille-ciseaux :

A'	$>_{7/12}$	B'	$>_{7/12}$	C'	$>_{7/12}$	A'
9,5		9,5		9,5		9,5

Pourtant, et c'est un nouveau paradoxe, si les trois dés sont lancés simultanément, le dé B' se montre nettement meilleur. En effet, il y a 216 résultats équiprobables possibles, et leur examen montre que le dé B' l'emporte 90 fois, alors que le dé A' ne gagne que 63 fois, comme le dé C'. L'équivalence des trois dés quand ils jouent seuls ou à deux n'est plus vérifiée quand ils jouent tous ensemble !

Un calcul exhaustif mené en 2010 par Gadin Black pour connaître la liste de tous les triplets de ce type montre qu'il existe huit solutions au problème de trouver trois dés intransitifs ayant les mêmes moyennes individuelles, gagnant avec la même probabilité quand ils gagnent contre un autre et utilisant, à eux trois, une et une seule fois chacun des nombres de 1 à 18. Aucune des solutions ne fait mieux que 7/12 et aucune des solutions ne produit un équilibre entre les trois dés quand on les lance tous ensemble. La dissymétrie constatée pour A', B' et C' est inévitable. Ces huit triplets solutions sont donnés dans l'encadré ci-dessous, avec leurs scores (en indice) quand ils jouent à trois :

Les huits triplets de dés équivalents

$[5, 7, 8, 9, 10, 18]_{63}, [2, 3, 4, 15, 16, 17]_{90}, [1, 6, 11, 12, 13, 14]_{63}$;
$[1, 2, 9, 14, 15, 16]_{81}, [3, 4, 5, 10, 17, 18]_{81}, [6, 7, 8, 11, 12, 13]_{54}$;
$[1, 2, 11, 12, 13, 18]_{81}, [3, 4, 5, 14, 15, 16]_{75}, [6, 7, 8, 9, 10, 17]_{60}$;
$[1, 6, 7, 8, 17, 18]_{81}, [2, 9, 10, 11, 12, 13]_{60}, [3, 4, 5, 14, 15, 16]_{75}$;
$[1, 7, 10, 12, 13, 14]_{63}, [2, 3, 4, 15, 16, 17]_{90}, [5, 6, 8, 9, 11, 18]_{63}$;
$[1, 8, 9, 12, 13, 14]_{63}, [2, 3, 4, 15, 16, 17]_{90}, [5, 6, 7, 10, 11, 18]_{63}$;
$[1, 8, 10, 11, 13, 14]_{63}, [2, 3, 4, 15, 16, 17]_{90}, [5, 6, 7, 9, 12, 18]_{63}$;
$[1, 9, 10, 11, 12, 14]_{63}, [2, 3, 4, 15, 16, 17]_{90}, [5, 6, 7, 8, 13, 18]_{63}$.

Le maximum de gain

Peut-on faire mieux qu'un avantage de 2/3 quand on prend quatre dés, ou de 7/12 quand on en prend trois (sans imposer la condition d'utilisation des nombres de 1 à 18) ? Que sait-on de l'avantage maximum possible dans une chaîne intransitive de dés lorsqu'on s'autorise à prendre plus de quatre dés et des dés ayant plus de six faces ?

Assez étrangement, les réponses à ces questions générales avaient été données dans un article de Zalman Usiskin paru en 1964, avant même qu'Efron ne fasse connaître ses dés. L'article se plaçait dans un cadre un peu plus général, mais incluant les jeux de plusieurs dés. Pour trois dés, on ne peut faire mieux que l'inverse du nombre d'or $1/\phi = (\sqrt{5} - 1)/2 = 0{,}6180\ldots$ Pour quatre dés, le maximum possible (atteint par les dés d'Efron) est $2/3 = 0{,}6666\ldots$ Pour cinq dés, on ne peut dépasser 0,692, solution de l'équation $b^3 + 3b^2 - 4b + 1 = 0$. Z. Usiskin expliquait comment calculer le résultat pour un nombre de dés supérieur à cinq et il démontrait aussi que lorsque le nombre de dés augmente dans une chaîne intransitive, l'avantage de chaque dé sur celui qu'il bat peut être amené aussi près qu'on le veut de 3/4, mais sans jamais l'atteindre.

Un beau résultat, lié encore au nombre d'or, a été démontré en 1994 par Richard Savage à propos des jeux de trois dés intransitifs. R. Savage s'intéresse aux dés à n faces et s'impose (comme pour les dés A', B' et C') de numéroter les faces avec les entiers allant de 1 à $3n$, chacun utilisé une et une seule fois. R. Savage calcule le minimum M de l'avantage qu'un dé a de gagner sur celui qu'il bat et il cherche à rendre ce minimum le plus grand possible, de sorte que le jeu de trois dés soit le plus favorable possible au parieur

© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013

Les dés admissibles

	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9	A_{10}	A_{11}	A_{12}
A_1	1/2	1/2	1/2	1/3	2/5	2/3	1/2	3/5	1/2	2/5	3/5	1/2
A_2	1/2	1/2	1/2	7/17	3/7	10/17	1/2	4/7	1/2	10/23	13/23	1/2
A_3	1/2	1/2	1/2	9/19	8/17	10/19	1/2	9/17	1/2	10/21	11/21	1/2
A_4	2/3	10/17	10/19	1/2	4/9	4/7	5/9	12/23	1/2	8/19	1/2	10/21
A_5	3/5	4/7	9/17	5/9	1/2	12/23	13/24	9/19	1/2	8/17	5/11	11/23
A_6	1/3	7/17	9/19	3/7	11/23	1/2	4/9	5/9	1/2	1/2	11/19	11/21
A_7	1/2	1/2	1/2	4/9	11/24	5/9	1/2	13/24	1/2	5/11	6/11	1/2
A_8	2/5	3/7	8/17	11/23	10/19	4/9	11/24	1/2	1/2	6/11	9/17	12/23
A_9	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
A_{10}	3/5	13/23	11/21	11/19	9/17	1/2	6/11	5/11	1/2	1/2	3/7	9/19
A_{11}	2/5	10/23	10/21	1/2	6/11	8/19	5/11	8/17	1/2	4/7	1/2	10/19
A_{12}	1/2	1/2	1/2	11/21	12/23	10/21	1/2	11/23	1/2	10/19	9/19	1/2

Il n'existe pas de dé équitable à cinq faces, mais en prenant un dé équitable à dix faces (construit par exemple à partir de deux pyramides à base pentagonale collées l'une à l'autre) et en répétant chaque face deux fois, on dispose d'un équivalent physique de dé équitable à cinq faces.

Il existe 12 dés admissibles à cinq faces. Par définition, la somme des faces d'un dé admissible donne la même somme que le dé standard à cinq faces $1+2+3+4+5=15$, et chaque face n'utilise que les entiers de 1 à 5. Il existe 32 dés admissibles à six faces, 94 pour sept faces, 289 pour huit faces.

Les 12 dés admissibles à cinq faces, représentés par des étoiles dans le tableau ci-dessus, sont :
$A_1=[3,3,3,3,3]$; $A_2=[4,3,3,3,2]$; $A_3=[4,4,3,2,2]$; $A_4=[4,4,3,3,1]$; $A_5=[4,4,4,2,1]$; $A_6=[5,3,3,2,2]$; $A_7=[5,3,3,3,1]$; $A_8=[5,4,2,2,2]$; $A_9=[5,4,3,2,1]$; $A_{10}=[5,4,4,1,1]$; $A_{11}=[5,5,2,2,1]$; $A_{12}=[5,5,3,1,1]$.

Le tableau indique, à l'intersection de la ligne i et de la colonne j, la probabilité que le dé A_i gagne contre le dé A_j. On remarque plusieurs choses intéressantes : a) le dé standard (le dé A_9) fait jeu égal avec tous les autres dés admissibles ; b) chaque dé admissible est battu par un autre ; c) il existe de nombreuses chaînes intransitives, par exemple $A_1 > A_8 > A_5 > A_1$ ou $A_{10} > A_4 > A_1 > A_8 > A_{10}$.

L'étude générale des familles de dés admissibles à n faces effectuée par Mark Finkelstein et Edward Thorp en 2006 montre que les propriétés (a), (b) et (c) sont générales pour tout $n > 3$, et donc en particulier qu'il existe des chaînes intransitives de dés à n faces pour tout entier n.

© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013

Les dés de Sicherman

George Sicherman, un colonel américain, s'est posé l'étrange question : « Est-ce que deux dés différents des dés habituels (dont les faces portent les nombres 1, 2, 3, 4, 5, 6) pourraient, si on les lance ensemble, conduire aux mêmes sommes que les dés usuels et cela avec les mêmes probabilités ? ». Les probabilités que l'on doit obtenir sont 1/36 pour 2, 2/36 pour 3, 3/36 pour 4, 4/36 pour 5, 5/36 pour 6, 6/36 pour 7, 5/36 pour 8, 4/36 pour 9, 3/36 pour 10, 2/36 pour 11 et 1/36 pour 12.

Contre toute attente, G. Sicherman réussit à trouver deux dés qui font l'affaire : [1, 2, 2, 3, 3, 4] et [1, 3, 4, 5, 6, 8]. Le tableau ci-contre permet de vérifier que les 36 sommes possibles sont exactement les mêmes que celles données par deux dés habituels.

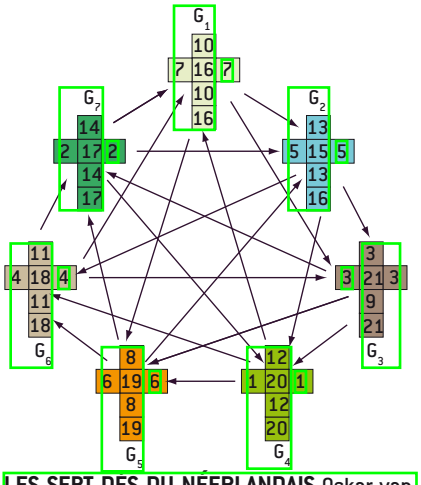
La solution de G. Sicherman est unique pour les dés à six faces, mais des généralisations des dés de Sicherman ont été proposées (voir Duane Broline, « Renumbering of the faces of dice », *Mathematics Magazine*, vol. 52 (5), pp. 312-315, 1979).

+	1	2	2	3	3	4
3	4	5	5	6	6	7
4	5	6	6	7	7	8
5	6	7	7	8	8	9
6	7	8	8	9	9	10
8	9	10	10	11	11	12

qui offre un pari comme celui de W. Buffet et B. Gates. R. Savage démontre qu'à condition de prendre des dés ayant beaucoup de faces, on peut s'approcher autant qu'on le souhaite de la limite $1/\phi$ démontrée indépassable par Z. Usiskin (et cela en respectant la contrainte d'utilisation de chaque entier de 1 à $3n$). La valeur optimale $7/12 = 0{,}5833$ trouvée pour les dés à six faces peut donc être améliorée et s'approcher de $1/\phi = 0{,}618033...$ d'aussi près qu'on le veut... si l'on prend des triplets de dés à plus de six faces.

Un autre résultat général mérite d'être mentionné. Mark Finkelstein et Edward Thorp se sont intéressés aux dés qu'ils nomment admissibles. Un dé à n faces est admissible si, sur ses faces, n'apparaissent que des nombres compris entre 1 et n (éventuellement plusieurs fois et pas forcément tous), et si la somme des faces d'un dé est la même que celle du dé standard à n faces marquées de 1, 2, 3, ..., n (dont la somme vaut $n(n+1)/2$). Le beau théorème de M. Finkelstein et E. Thorp affirme que si n est supérieur à 3, alors tout dé admissible à n faces, différent du dé standard à n faces, est battu par un autre dé admissible à n faces ; de plus, le dé standard à n faces fait jeu égal contre tout dé admissible à n faces. Une conséquence de ce théorème est que pour tout $n > 3$, il existe des chaînes intransitives de dés admissibles.

Pour $n = 4$ (dés tétraédriques), en plus du dé standard [1, 2, 3, 4], il n'existe que quatre dés admissibles : $F_1 = [3, 3, 2, 2]$, $F_2 = [4, 2, 2, 2]$, $F_3 = [4, 4, 1, 1]$, $F_4 = [3, 3, 3, 1]$. Les combats entre eux donnent : $F_1 >_{6/10} F_2 >_{8/14} F_3 >_{8/14} > F_4 >_{6/10} F_1$; $F_4 >_{9/16} F_2 >_{8/14} F_3 >_{8/14} F_4$; $F_3 \approx F_1$.



LES SEPT DÉS DU NÉERLANDAIS Oskar van Deventer, un inventeur de jeux. La direction des flèches indique quel est le dé gagnant dans une confrontation entre deux dés. Par exemple, G_1 est gagnant contre G_2.

Il n'existe, dans ce cas extrême, que deux chaînes intransitives : l'une, de longueur 4, est composée de F_1, F_2, F_3, F_4 ; l'autre, de longueur 3, est composée de F_2, F_3, F_4.

On aurait pu penser qu'avec les huit triplets de type A', B', C' ou avec les chaînes intransitives de trois et quatre tétraèdres admissibles, on avait atteint les sommets de la beauté paradoxale. Ce n'est pas le cas, et la série de trois dés $R_1 = [6, 3, 3, 3, 3, 3]$, $R_2 = [5, 5, 5, 2, 2, 2]$, $R_3 = [1, 4, 4, 4, 4, 4]$, inventés en 2002 par Tim Rowett, perfectionne encore le paradoxe. Nous allons voir qu'en plus de composer une chaîne intransitive, elle a une propriété inattendue très intéressante pour faire un pari... même avec B. Gates.

Un pari renversant

Il s'agit bien d'un triplet intransitif : R_1 bat R_2 avec la probabilité 7/12, R_2 bat R_3 avec la probabilité 7/12 et R_3 bat R_1 avec la probabilité 25/36. Rien de bien nouveau jusqu'ici. Pourtant, il se produit quelque chose d'incroyable que je n'ai cru qu'après avoir fait un programme pour le vérifier. Si, au lieu de jeter chaque dé une fois, on choisit de le jeter deux fois et de faire la somme des faces tombées, alors tout s'inverse : R_2 bat R_1 avec la probabilité $765/1\,296 = 0{,}5903$; R_3 bat R_2 avec la probabilité $765/1\,296 = 0{,}5903$; R_1 bat R_3 avec la probabilité $671/1\,296 = 0{,}5177$.

Cette propriété inouïe montre, là encore, que notre intuition en matière de probabilité est illusoire. Elle suggère une nouvelle façon de piéger votre ami le parieur... et cela même s'il est aussi malin que B. Gates et s'il sait que des dés peuvent être intransitifs.

© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013

Vous commencez par lui présenter les dés. Il les examine, repère la chaîne intransitive. Il est alors prêt à parier si vous acceptez de choisir le dé en premier. Vous acceptez de choisir en premier et prenez un dé quelconque (mais de préférence R_2 ou R_3 pour éviter le 0,5177). Il choisit le dé qui bat votre dé dans la chaîne intransitive.

Vous lui proposez alors de doubler l'enjeu, à la condition de lancer chaque dé deux fois et de comparer les sommes obtenues (cela 25 fois de suite, comme auparavant). Croyant comme tout le monde que lancer deux fois le dé augmente encore son avantage, il acceptera… alors qu'en réalité, l'avantage sera maintenant pour vous et que vous gagnerez le pari (dans précisément 82,10 % des cas). Ahurissant !

Pourquoi y a-t-il inversion de la chaîne intransitive ? Pour voir que l'inversion est possible, étudions le cas des deux dés les plus simples : $R_1 = [6, 3, 3, 3, 3, 3]$ et $R_3 = [1, 4, 4, 4, 4, 4]$.

Quand ils sont lancés une seule fois, R_3 bat R_1, car 4 bat 3 et que cela se produit 25 fois sur les 36 cas possibles. Calculons les sommes possibles de deux faces de R_1 et de deux faces de R_3 :
– Pour R_1 : 6 + 3 = 9, 10 fois ; 3 + 3 = 6, 25 fois ; 6 + 6 = 12, 1 fois.
– Pour R_3 : 1 + 1 = 2, 1 fois ; 4 + 4 = 8, 25 fois ; 1 + 4 = 5, 10 fois.

Il y a $1\,296 = 36 \times 36$ cas possibles quand on lance deux fois R_1 et deux fois R_3. Le dé R_3 ne gagne que si la somme qu'il obtient est 8. Quand c'est le cas, il ne gagne que si R_1 lancé deux fois fait 6. Le dé R_3 dans la compétition avec double lancer ne gagne donc que $25 \times 25 = 625$ fois sur les $36 \times 36 = 1\,296$ cas possibles. C'est moins de la moitié des cas, donc R_3 perd contre R_1 dans une compétition avec des doubles lancers. L'inversion est possible, nous l'avons sous les yeux !

Tentons une explication en quelques mots. Le dé R_3 gagne contre R_1 quand le lancer est simple, mais il gagne en général d'assez peu : 4 contre 3. Cela a pour conséquence que quand on considère les sommes de deux faces de R_3, celles-ci (2, 8 ou 5) sont assez mauvaises comparées à celles de R_1 (9, 6 ou 12), ce qui le conduit à perdre dans une épreuve constituée de lancers doubles.

Quand on lance chaque dé trois fois au lieu de deux, R_2 bat R_1, R_3 bat R_2 et R_3 bat R_1. Le dé R_3 est donc cette fois dominant, il n'y a plus de chaîne intransitive, celui qui choisit R_3 a toujours l'avantage. C'est étrange, car lorsqu'on fait une compétition directe entre les trois dés (lancer simultané des trois dés), on obtient 51-90-75 : le dé R_2 est le meilleur !

Contre deux adversaires

Pour terminer la présentation des descendants superparadoxaux des dés d'Efron, mentionnons les sept dés d'Oskar van Deventer, qui permettent de parier contre deux adversaires à la fois :
$G_1 = [7,7,10,10,16,16]$, $G_2 = [5,5,13,13,15,15]$, $G_3 = [3,3,9,9,21,21]$, $G_4 = [1,1,12,12,20,20]$, $G_5 = [6,6,8,8,19,19]$, $G_6 = [4,4,11,11,18,18]$ et $G_7 = [2, 2, 14, 14, 17, 17]$. Le graphe indiquant qui gagne quand deux dés s'opposent est donné page précédente.

Chaque dé a un total des faces de 66, soit 11 points en moyenne. Pour chaque combat, la probabilité de gagner pour le vainqueur est 20/36 = 5/9. En observant le graphe, vous constaterez que pour toute paire de dés choisis parmi les sept, il y a toujours un troisième dé qui les bat tous deux.

Vous pouvez donc proposer le pari suivant à deux de vos amis simultanément. Le premier choisit un dé, le second en choisit un autre. Vous prenez un dé en dernier, qui sera celui qui domine les deux dés choisis par vos amis. Ensuite, vous engagez une partie avec votre premier ami (par exemple en 25 lancers). Le jeu vous est favorable, vous le battez le plus souvent. Sans changer de dé, vous jouez avec votre autre ami (toujours en 25 lancers). À nouveau, les chances seront de votre côté !

Attention toutefois : quand le jeu vous est favorable ou que les chances sont de votre côté, cela ne signifie pas une certitude de victoire à 100 %, mais seulement que vous gagnerez dans plus de la moitié des cas. Ici, le calcul indique qu'avec l'avantage de 5/9 et 25 lancers par confrontation, vous gagnerez dans 71 % des cas. Si vous souhaitez gagner plus sûrement, proposez des confrontations en opérant un plus grand nombre de lancers. ■

L'AUTEUR

Jean-Paul DELAHAYE est professeur à l'Université de Lille et chercheur au Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille (LIFL).

BIBLIOGRAPHIE

J. Grime, **Non-transitive dice**, 2012, sur http://singingbanana.com/dice/article.htm

M. Criton, **Les jeux de dés**, *Gazette des Mathématiciens*, vol. 128, pp. 47-61, avril 2011.

M. Finkelstein et E. Thorp, **Nontransitive dice with equal means**, dans *Optimal Play : Mathematical Studies in Games and Gambling*, pp. 293-310, 2006 : http://www.math.uci.edu/~mfinkels/dice9.pdf

M. Gardner, **The Colossal Book of Mathematics : Classic Puzzles, Paradoxes, and Problems**, W. W. Norton & Company, pp. 286-311, 2001.

R. Savage, **The paradox of nontransitive dice**, *The American Mathematical Monthly*, vol. 101(5), pp. 429-436, 1994.

G. Széleky, **Paradoxes in Probability Theory and Mathematical Statistics**, Reidel Publishing Company, 1986.

M. Gardner, **The paradox of the nontransitive dice and the elusive principle of indifference**, *Scientific American*, n° 223, pp. 110-114, décembre 1970.

Z. Usiskin, **Max-min probabilities in the voting paradoxe**, *The Annals of Mathematical Statistics*, vol. 35, pp. 857-862, 1964.

© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013

SCIENCE & FICTION

Les dinosaures de la science-fiction

Parmi les héros des films de science-fiction, à côté des inventions des scénaristes, figurent en bonne place les dinosaures, dont la « dinodiversité » est immense !

J. Sébastien STEYER et Roland LEHOUCQ

Apparus il y a environ 230 millions d'années, les dinosaures sont généralement définis comme des archosaures (groupe rassemblant aujourd'hui les crocodiles et les oiseaux), partageant des caractères liés notamment à leur posture érigée, c'est-à-dire que leurs membres sont disposés sous le corps – comme la plupart des mammifères – et non latéralement – comme chez beaucoup d'autres « reptiles ». Contrairement à une idée tenace, les dinosaures n'ont pas tous disparu il y a 65 millions d'années. Ainsi, les oiseaux sont de petits dinosaures à plumes (du groupe des théropodes), comme le montrent de nombreux fossiles, tel l'*Archaeopteryx*, mi-dinosaure mi-oiseau.

En 1842, le paléontologue britannique Richard Owen fut le premier à donner un nom à ces grands animaux fossilisés : il les nomma « terribles lézards ». Ces animaux disparus, souvent gigantesques, ont stimulé l'imagination des écrivains d'abord, des cinéastes ensuite. Ainsi, Jules Verne a imaginé, dans son *Voyage au centre de la Terre* (1864), des dinosaures vivant dans les profondeurs de la Terre. Considéré comme l'un des pères de la science-fiction, Verne est aussi le précurseur d'un genre à part entière que l'on pourrait nommer « dinofiction », tant les histoires faisant interagir des dinosaures et des hommes ont été nombreuses après lui !

Ces dinosaures sont-ils toujours fidèlement reconstitués ? Examinons d'abord l'origine de ces dinosaures fantastiques : dans *King Dinosaur* (Bert Gordon, 1955), des astronautes explorent une planète mystérieusement apparue dans l'espace (mais à quelques heures de fusée de la Terre !) et rencontrent des dinosaures. Dans *L'Arche de Monsieur Servadac*, film poétique du Tchèque Karel Zeman (1970) adapté d'un roman de Jules Verne, une comète frôlant la Terre arrache un morceau d'Afrique du Nord et s'écrase sur une planète peuplée d'étranges animaux dont... un dinosaure !

S'échouer sur une planète ou une île, explorer le centre de la Terre, mais aussi remonter le temps pour de curieux safaris (*Un coup de tonnerre*, Ray Bradbury, 1952 ou la série *Prehistoric Park*), ou encore cloner des dinosaures (Michael Crichton, 1990), les subterfuges sont nombreux pour présenter ces monstres à l'écran. Notons que la solution du clonage relève encore du fantasme : même si les oiseaux portent en eux une partie du patrimoine génétique de leurs ancêtres reptiliens, nous serions incapables de reconstruire un dinosaure entier. Tout au plus obtenons-nous, en greffant du tissu dentaire de lézard sur un embryon de poulet, un poussin génétiquement modifié... avec des dents !

Pour reconstituer ces animaux, l'imagination a été fertile : costumes plus ou moins désuets revêtus par des acteurs (*L'île Inconnue*, 1948) ou prises de vue au ralenti de vrais reptiles grimés (*Voyage au Centre de la Terre*, 1959). La technique la plus répandue restait, avant l'ère du numérique, le *stop motion* consistant à filmer des figurines de dinosaures image par image (*Le Monde Perdu*, 1925 ; *King Kong*, 1933). Hélas, certains modèles réduits ont beaucoup vieilli. C'est le cas de l'*Allosaurus* (théropode du Jurassique rarement mis en scène) dans

1. DANS *JURASSIC PARK*, les dinosaures règnent en maîtres. Ici, des vélociraptors menacent le paléontologue Alan Grant, même si... plus de 65 millions d'années les ont séparés.

© Bureau L.A. Collection Sygma Corbis

© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013

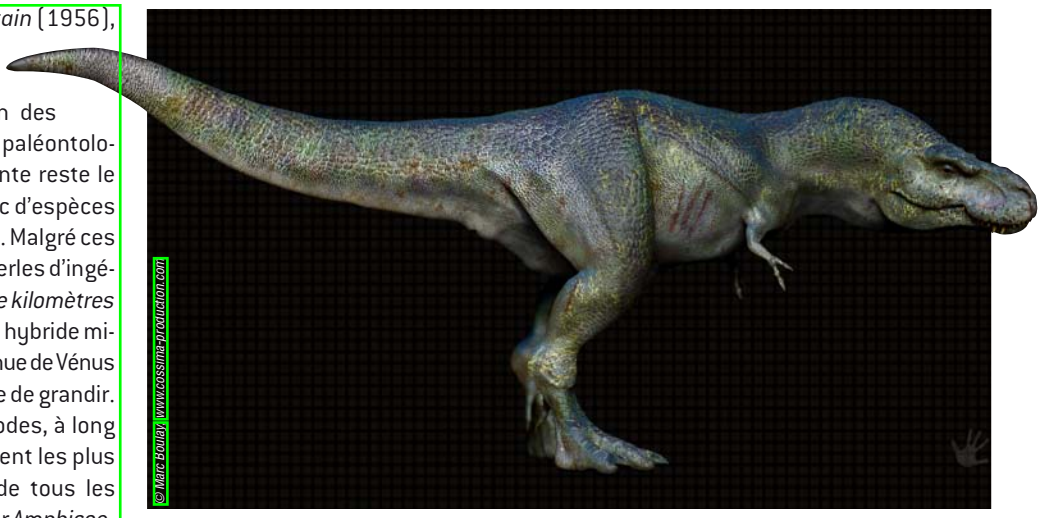
The Beast of the Hollow Mountain (1956), premier film mélangeant cowboys et dinosaures ! Ainsi, les résultats varient en fonction des moyens et de la pertinence paléontologique. L'erreur la plus fréquente reste le mélange des périodes, et donc d'espèces qui ne se sont jamais croisées. Malgré ces obstacles, notons quelques perles d'ingéniosité comme *À des millions de kilomètres de la Terre* (1957) où une bête hybride mi-dinosaure mi-stégocéphale, venue de Vénus et recueillie sur Terre, ne cesse de grandir.

Il est vrai que les sauropodes, à long cou et longue queue, demeurent les plus grands animaux terrestres de tous les temps. Le record est détenu par *Amphicoelias*, dont la longueur est estimée entre 40 et 60 mètres. En raison de leur taille, ces paisibles herbivores deviennent souvent des monstres sanguinaires dans les films. Certains théropodes, tels le *Tyrannosaurus rex* ou le spinosaure à museau de crocodile, atteignaient des longueurs tout aussi respectables (respectivement 12 et jusqu'à 18 mètres).

Quand les scientifiques font du cinéma

Mais ne s'arrêter qu'à ces « stars », c'est sous-estimer toute la dinodiversité (plus de 1 000 genres connus) ! La majorité des dinosaures ne dépassait pas quelques mètres de hauteur, les plus petites mesurant environ 35 centimètres (oiseaux exclus). Cette surenchère de taille, qui fait souvent de la paléontologie la science du superlatif, est omniprésente, par exemple, dans *Godzilla* (et ses nombreux dérivés) qui, faut-il le préciser, n'est pas un dinosaure : c'est un varan qui a muté à la suite d'une explosion atomique.

Notons que les différentes versions illustrent bien le contexte ou les tensions géopolitiques de l'époque : le film original japonais (Ishiro Honda, 1954) incrimine les États-Unis responsables d'Hiroshima et de Nagasaki, tandis que la version hollywoodienne plus récente (Roland Emmerich, 1998) pointe du doigt la France et ses essais nucléaires dans le Pacifique…



2. *TYRANNOSAURUS REX* (*Roi des lézards tyrans*, en grec), alias *T. rex* est l'un des plus gros dinosaures carnivores. Atteignant quatre mètres de hauteur (dans cette position non redressée) et vieux de quelque 66 millions d'années, c'est un des favoris des auteurs de science-fiction.

Il faut attendre les années 1990, avec notamment le premier *Jurassic Park* (1993), pour voir les réalisateurs s'entourer de conseillers scientifiques. Mais déjà nombre d'artistes, tel le Tchèque Zdeněk Burian, peignaient des dinosaures en étroite collaboration avec les paléontologues (Joseph Augusta et Zdeněk Špinar de Prague). À l'écran, ces efforts de réalisme sont encouragés par l'avènement des images de synthèse et en 3D, représentant des dinosaures plus vrais que nature. Pour *Jurassic Park*, Spielberg est aidé du paléontologue Jack Horner de l'Université du Montana : ce dernier, au fait des découvertes de dinosaures à plumes (en Chine notamment), a ajouté, dans le troisième opus (2001), quelques protoplumes sur les raptors. Depuis, d'autres raptors emplumés ont été mis au jour. Aujourd'hui encore, pour tenter d'être réalistes, de nombreux scénaristes s'entourent de *creature designers*, des concepteurs de créatures, souvent diplômés en zoologie ou en anatomie.

L'évolution des représentations des dinosaures au cinéma illustre donc bien l'évolution des idées et des représentations que les paléontologues et le grand public s'en faisaient. Monstres stupides et « mal adaptés » hier (*Le Dernier Dinosaure*, 1977), les dinosaures sont aujourd'hui considérés comme des archosaures dynamiques et intelligents, capables d'ouvrir les portes ou de communiquer. Enfin, l'idée de « terribles lézards » qui leur collait étymologiquement à la peau et en faisait des monstres destructeurs a été partiellement revisitée : l'artiste James Gurney par exemple a créé en 1992 *Dinotopia*, monde utopique et baroque où les dinosaures ne sont plus les méchants de l'histoire, mais vivent en harmonie avec les humains. Une autre utopie consiste aussi à croire que certains dinosaures non aviens seraient encore vivants aujourd'hui, cachés au cœur de forêts profondes ou autres régions inaccessibles du globe. Ainsi le Mokèlé-mbèmbé, rhinocéros de légende, serait encore pour certains nostalgiques un sauropode hantant le bassin du Congo… ■

J.-S. STEYER est paléontologue au CNRS-MNHN, à Paris. R. LEHOUCQ est astrophysicien au CEA, à Saclay.

Retrouvez les articles de J.-S. Steyer et R. Lehoucq sur www.pourlascience.fr

ART & SCIENCE

Thèbes, victime d'Œdipe ou… d'une bactérie ?

Des médecins athéniens ont identifié l'agent pathogène responsable du mal qui ravage Thèbes dans Œdipe roi, *la pièce de Sophocle.*

Loïc MANGIN

Les fruits de la terre périssent, encore enfermés dans les bourgeons, les troupeaux de bœufs languissent, et les germes conçus par les femmes ne naissent pas. Brandissant sa torche, la plus odieuse des déesses, la peste, s'est ruée sur la ville et a dévasté la demeure de Kadmos. Le noir Hadès s'enrichit de nos gémissements et de nos lamentations.

Œdipe roi, Sophocle (trad. Leconte de Lisle).

Dès l'ouverture de la pièce du dramaturge grec Sophocle (495-406 avant notre ère), un prêtre se plaint en ces termes à Œdipe, le roi de Thèbes, de la malédiction qui s'est abattue sur la cité. Rappelons brièvement l'intrigue. Après avoir triomphé du Sphinx qui terrorisait la ville, Œdipe épousa Jocaste qui venait de perdre son mari, l'ancien roi Laïos, assassiné au détour d'un chemin lors d'une rixe. L'oracle de Delphes annonce que la maladie disparaîtra lorsque le régicide sera puni. À mesure des révélations, on apprend que le meurtrier n'est autre qu'Œdipe. Il a ainsi accompli la prophétie à laquelle il pensait échapper en fuyant Polybe et Mérope, qu'il croyait ses parents : ils n'avaient fait que l'adopter. Œdipe a bien tué son père et épousé sa mère. Cette dernière, en l'apprenant, se suicidera. Le roi de Thèbes sera alors banni après s'être crevé les yeux.

Revenons au fléau qui ravage la ville. Sophocle parle de peste, un nom générique pour une épidémie importante. Mais de quelle maladie s'agit-il précisément ? Pour le savoir, Antonis Kousoulis et ses collègues, de l'École de médecine de l'Université d'Athènes, se sont penchés sur le texte et l'ont analysé d'un point de vue médical. Leur conclusion est que l'épidémie est probablement due à la bactérie *Brucella abortus* et qu'elle est inspirée d'un événement historique.

Plusieurs éléments, sporadiques, principalement dans le premier tiers de la pièce, permettent de dresser un tableau clinique. Dans les premières lignes de la pièce *(voir la citation au début de l'article)*, Sophocle révèle que la maladie est une zoonose, c'est-à-dire transmise par les animaux. Plusieurs passages mettent en évidence un taux de mortalité important chez les habitants : « Toute la ville est pleine de l'encens qui brûle et du retentissement […] des lamentations. » ; « La ville est épuisée par les funérailles sans nombre. »

L'épidémie évoquée dans *Œdipe roi* serait inspirée d'un événement réel.

Sophocle écrit aussi que « la multitude non pleurée et qui donne la mort gît sur la terre », illustrant la contagiosité de la maladie. Les fausses couches et l'infertilité sont aussi des symptômes : « Les germes conçus par les femmes ne naissent pas. » ; « Les femmes n'enfantent point et souffrent des douleurs lamentables. »

L'agent pathogène responsable de l'épidémie décrite dans la pièce est très contagieux, entraîne une mortalité importante du bétail et des humains. Les médecins ont établi une liste de micro-organismes associés à ces diverses caractéristiques : le protozoaire *Leishmania*, les bactéries *Leptospira*, *Brucella abortus* et *Francisella tularensis*, ainsi que les virus de la famille de celui de la variole (poxvirus).

Parmi les maladies humaines dues à ces germes, la tularémie est transmise essentiellement par les lapins, la variole n'atteint pas le bétail, la leishmaniose est très peu contagieuse et la leptospirose est associée à la pullulation des rats. Seule reste en lice la bactérie *Brucella abortus* qui entraîne la brucellose. Elle se transmet de l'animal à l'homme par ingestion et par contact.

Le diagnostic établi, on peut s'interroger sur les sources d'inspiration du dramaturge. La maladie décrite dans la pièce est-elle celle relatée par l'historien Thucydide dans son *Histoire de la guerre du Péloponnèse* ? La proximité des dates semble l'indiquer : l'épidémie a frappé Athènes en –430 et –429, tandis que la pièce a été écrite entre –430 et –420. Par ailleurs, les deux auteurs utilisent des termes similaires pour décrire les réactions des populations. Enfin, l'évocation d'Arès – le dieu de la guerre – est un autre argument, car selon l'historien, l'épidémie est bien une conséquence des guerres qui opposèrent de –431 à –404 la ligue du Péloponnèse, dirigée par Sparte, à celle de Délos, sous l'égide des Athéniens.

Certains exégètes ont remis en cause la culpabilité d'Œdipe et préfèrent lui attribuer un rôle de victime expiatoire. Le coupable serait-il *Brucella abortus* ? ■

A. Kousoulis *et al.*, **The plague of Thebes, a historical epidemic in Sophocles' *Oedipus Rex***, *Emerging Infectious Diseases*, vol. 18, pp. 153-157, 2012.

© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013

Laurence Olivier (Œdipe) et Sybil Thorndike (Jocaste) dans *Œdipus Rex*, en 1945.

© Hulton-Deutsch Collection/Corbis

© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013

IDÉES DE PHYSIQUE

La fontaine de Héron

Pour transvaser un liquide, rien de tel qu'un siphon : gravité et pression atmosphérique font le travail à notre place !

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Au Ier siècle de notre ère, dans son traité *Pneumatica*, le savant grec Héron d'Alexandrie a décrit un étonnant dispositif composé de deux récipients clos et d'une coupelle *(voir la figure 3)*. Le fond du récipient le plus bas est relié par un tuyau au fond de la coupelle (ou d'un bassin dans la version grand modèle). Un autre tuyau relie les parties supérieures des deux récipients, toujours pleines d'air. Enfin, un troisième tube s'ouvre au-dessus de l'eau de la coupelle et plonge jusqu'au fond du récipient du haut.

Lorsqu'on remplit d'eau la coupelle, de l'eau jaillit du tube qui émerge au-dessus, tandis que la coupelle se vide progressivement dans le récipient du bas. Au bout de quelque temps, la fontaine s'arrête.

Que s'est-il passé ? D'où vient ce jet d'eau alors qu'aucune pompe n'est présente ? La complexité du dispositif ne doit pas cacher qu'avec sa succession de vases communicants, la fontaine de Héron joue avec les mêmes principes que les siphons – où, dans leur plus simple expression, de l'eau s'élève dans un tuyau avant de descendre plus bas *(voir la figure 2)*. Aussi, pour comprendre la fontaine de Héron, un bon physicien aura le réflexe de revenir à ces dispositifs hydrauliques plus élémentaires, connus et utilisés depuis des milliers d'années pour transporter et distribuer de l'eau.

Tentons de transvaser l'eau d'un récipient, par exemple un aquarium, au moyen d'un siphon *(voir la figure 2)*. Cela se révèle nécessaire quand le récipient est trop lourd à déplacer. Pour ce faire, plongeons dans le récipient une extrémité d'un tuyau déjà rempli d'eau et abaissons l'autre extrémité sous le niveau d'eau. L'eau du récipient est alors siphonnée : elle se vide en remontant dans le tuyau avant de redescendre. Qu'est-ce qui met en mouvement la colonne d'eau ?

Le plus simple des siphons : la paille

Pour le comprendre, considérons une situation encore plus simple : ce qui se passe lorsque nous buvons un liquide (de l'eau, par exemple…) avec une paille *(voir la figure 1)*. L'aspiration de la bouche crée une dépression et nous avons l'impression de tirer sur l'eau. Ce n'est qu'une impression.

1. EN « ASPIRANT » AVEC UNE PAILLE, on diminue la pression de l'air dans la bouche. La pression dans le gobelet, égale à la pression atmosphérique, lui est alors supérieure. Par conséquent, la pression atmosphérique pousse le liquide, qui monte dans la paille : il n'est pas aspiré.

2. L'AQUARIUM EST FACILEMENT VIDÉ avec un siphon, si l'extrémité libre du tuyau est placée au-dessous du niveau de la surface de l'eau dans l'aquarium. Quant au siphon inversé installé sous le lavabo, son coude rempli d'eau empêche la remontée d'odeurs nauséabondes.

Dessins de Bruno Vacaro

© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013

Du côté supérieur, tant que l'eau n'a pas rempli entièrement la paille, ce liquide demeure en contact avec de l'air qui exerce toujours, sous l'effet de l'agitation moléculaire, une pression sur sa surface, donc une force qui s'oppose à sa montée. L'eau monte dans la paille uniquement parce qu'à son extrémité inférieure, l'atmosphère exerce une pression supérieure. En résumé, si l'eau monte, ce n'est pas parce que l'on tire sur elle et qu'elle est mise sous tension comme le serait une corde, mais parce qu'on établit une différence de pression entre ses deux surfaces libres.

La hauteur atteinte traduit alors l'équilibre entre le poids de la colonne d'eau soulevée et les forces de pression qui s'exercent à ses extrémités. Au sein d'un fluide incompressible et immobile, la pression hydrostatique est le produit de la masse volumique du fluide (un kilogramme par litre pour l'eau), de l'accélération de la pesanteur et de la profondeur : c'est le poids de la colonne d'eau rapporté à sa section. La différence de pression imposée pouvant être arbitrairement grande, il n'y a pas de limite à l'élévation possible : dix mètres d'eau avec une atmosphère de pression (en faisant le vide d'un côté), mais beaucoup plus si, à l'entrée, l'eau est sous forte pression comme dans une pompe à refoulement.

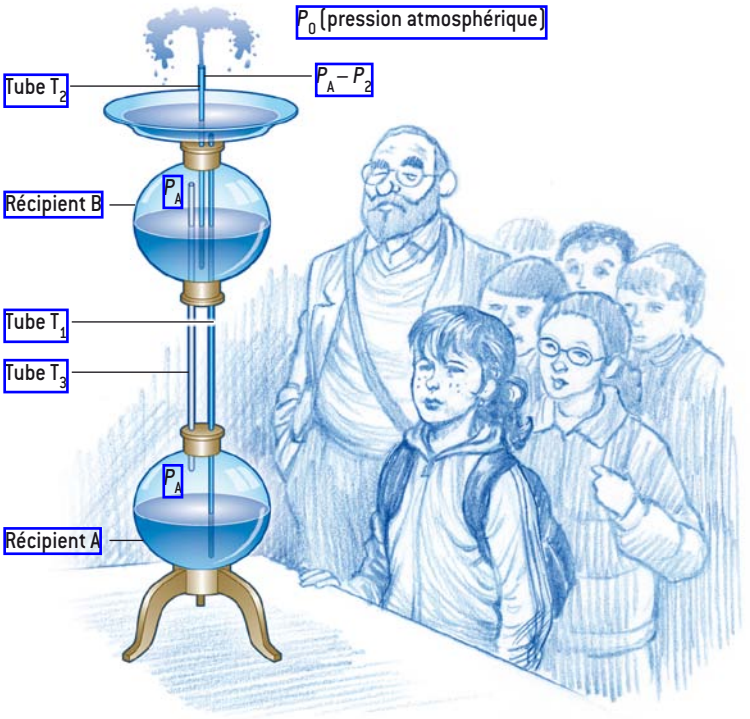
Une question de hauteurs d'eau

Le siphon fonctionne comme une paille, mais l'aspiration est inutile parce que la pression au point le plus haut du tuyau en ∩ est réduite. On s'en rend compte en analysant comment varie la pression dans la partie descendante (gauche) du tuyau en ∩. Bouchons avec la main l'extrémité du tuyau qui est dans le récipient *(l'aquarium de la figure 2)*. L'eau s'arrête alors de couler (à condition que le diamètre du tuyau ne soit pas trop grand ; sinon, des bulles d'air s'infiltrent aisément dans le conduit). Pourquoi ?

À l'extrémité ouverte, l'eau est en contact avec l'air et subit donc la pression atmosphérique. La pression au sommet du tuyau est ainsi diminuée de la pression hydrostatique de la colonne d'eau de la partie gauche du tuyau en ∩. Au niveau de la main, la pression est égale à la pression hydrostatique de la colonne d'eau de la partie droite du tuyau, mais, cette colonne étant plus courte que celle de gauche, sa pression hydrostatique demeure inférieure à la pression atmosphérique : il s'ensuit qu'au niveau de la main, il y a dépression. On peut ainsi affirmer que c'est le poids de la colonne de gauche, supérieur à celui de la colonne de droite, qui est responsable de la montée à droite.

Dans le cas d'un siphon inversé, où le tuyau est en forme de ∪, on obtient la conclusion contraire : c'est le poids de la colonne la plus haute qui appuie pour faire jaillir l'eau à l'extrémité la plus basse. C'est ainsi que fonctionne le pont-siphon, un ouvrage d'art qui, comme le siphon de l'Yzeron à Sainte-Foy-lès-Lyon, fait franchir à l'eau, grâce à un dénivelé, une vallée encaissée.

Qu'advient-t-il lorsqu'on retire la main et que l'eau s'écoule de nouveau ? Une analyse énergétique s'impose : il faut alors prendre en compte le travail des forces de pression, le travail du poids, les variations de l'énergie cinétique du fluide et la dissipation d'énergie due à la viscosité et aux turbulences, que



3. DANS LA FONTAINE DE HÉRON, la pression P_A dans le récipient clos A est égale à $P_0 + P_1$, où P_0 est la pression atmosphérique et P_1 la pression hydrostatique due à l'eau contenue dans le tube T_1. Dans le récipient clos B, la pression est aussi égale à P_A, grâce au tube d'air T_3 reliant A à B. La pression de l'eau à l'extrémité supérieure du tube T_2, si cette extrémité est fermée, est alors égale à $P_A - P_2 = P_0 + P_1 - P_2$, où P_2 est la pression hydrostatique due à l'eau contenue dans le tube T_2. Le tube T_1 étant plus long que T_2, on a $P_1 > P_2$, donc $P_A - P_2$ est supérieure à P_0, la pression atmosphérique ; c'est pourquoi l'eau jaillit du tube T_2.

■ 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.idphys.fr

Retrouvez les articles de J.-M. Courty et E. Kierlik sur
www.pourlascience.fr

BIBLIOGRAPHIE

J. J. Ramette et R. W. Ramette, **Siphonic concepts examined : A carbon dioxide gas siphon and siphons in vacuum**, *Physics Education*, vol. 46(4), pp. 412-414, 2011 (en accès libre sur http://iopscience.iop.org/0031-9120/46/4).

S. Shakerin, **Water fountains with special effects**, *American Scientist*, vol. 93(5), pp. 444-451, 2005.

P.-M. Binder et A. Richert, **The explicit siphon**, *Physics Education*, vol. 46(6), pp. 710-711, 2011.

l'on regroupe sous le terme de « pertes de charge ». Quand ces dernières sont faibles et que le fluide s'écoule avec un débit constant dans un tuyau de diamètre constant, on retrouve les mêmes différences de pression qu'en hydrostatique, donc les mêmes conclusions quant à la direction du mouvement du fluide.

On peut maintenant comprendre le mécanisme de la fontaine de Héron. Pour ce faire, commençons par boucher le tube vertical d'où jaillit l'eau. La pression à la surface de l'eau du récipient du bas est la pression atmosphérique additionnée de la pression hydrostatique de la colonne d'eau située entre la surface de la coupelle et la surface de ce récipient. Cette pression est intégralement transmise à la surface de l'eau du récipient du haut par l'air qui communique entre les deux récipients. Au niveau de la main, la pression est égale à cette dernière, diminuée de la pression hydrostatique du tube vertical reliant le récipient supérieur et la coupelle. Ce tube étant plus court que le premier, la pression à son sommet reste plus importante que la pression atmosphérique : grâce à cette surpression, l'eau jaillit si on enlève notre main. On peut montrer qu'en l'absence de pertes de charge, elle s'élèvera à une hauteur égale à la différence de longueur entre les deux colonnes d'eau dans les tubes.

A-t-on inventé un mouvement perpétuel ? Hélas non. Le récipient du haut se vide progressivement dans la coupelle, qui elle-même se vide dans le récipient du bas. Tout s'arrête donc quand le récipient du haut s'est vidé. Malgré son apparente complexité, la fontaine de Héron est bien un siphon : le récipient du haut se vide dans celui du bas, avec l'eau qui monte d'abord, puis descend. ■

© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013

SCIENCE & GASTRONOMIE

Nous mangeons nos souvenirs

La sensation d'être rassasié dépend à la fois de la quantité et de l'apparence des aliments que nous avons ingérés.

Hervé THIS

Jean-Anthelme Brillat-Savarin, le juriste qui popularisa en 1825 le mot « gastronomie », introduit par le poète Joseph Berchoux en 1801, fut l'un de ceux qui eurent raison de dire que nous mangeons trop vite. Il oublia toutefois d'écrire que nous mangeons trop. Inversement, Pierre Combris, de l'INRA de Vitry, montre que le déterminisme économique a conduit les habitants des États-Unis à atteindre une proportion d'obèses de 30 pour cent, et estimée à 45 pour cent pour les prochaines années. L'obésité est une pandémie, et il est urgent de trouver des moyens d'aider les individus à adapter leur régime alimentaire à leur mode de vie. Oui, nos choucroutes, nos cassoulets sont merveilleux... mais ils ne conviennent pas à nos vies souvent sédentaires, urbanisées.

La science peut-elle identifier des phénomènes qui nous aideraient à changer nos comportements ? Pourquoi mangeons-nous trop ? Les quantités ingérées sont déterminées par des signaux endocriniens et neuronaux détectés par l'hippocampe et le cortex frontal. Il est aussi apparu que le système nerveux central a une contribution essentielle, car des récepteurs de l'insuline et de la leptine y sont présents, et que l'hippocampe reçoit des informations de l'hypothalamus.

Or l'hippocampe intervient notablement dans l'apprentissage et la mémoire. En 2011, Suzanne Higgs et ses collègues de l'École de médecine de Birmingham ont, en outre, montré que le souvenir des repas récents peut diminuer la quantité consommée lors des repas suivants (l'effet persiste plusieurs heures). Pour interpréter ce phénomène, on s'est souvenu que les patients qui souffrent d'« amnésie rétrograde », avec une lésion bilatérale de l'hippocampe, souffrent aussi d'hyperphagie : après avoir mangé à satiété, un patient se remet à manger.

À l'Université de Bristol, Jeffrey Brunstrom, Danielle Ferriday et leurs collègues ont testé l'influence de la mémoire des aliments récemment consommés sur la faim et sur le sentiment de rassasiement. Ils se sont adjoint le concours de 100 volontaires, dont 22 en surpoids et 5 obèses ; les végétariens étaient exclus du groupe, ainsi que les personnes ayant des allergies ou des intolérances. Pour une telle étude, où les biais sont une menace constante, mille précautions avaient été prises, pour servir des aliments dans des conditions constantes, bien connues, reproductibles.

Avant le déjeuner, on montrait à la moitié des participants un potage de 30 centilitres, tandis que l'autre moitié voyait un potage de 50 centilitres. Ces potages n'étaient qu'affichés, et les sujets ne pouvaient pas voir ce qu'ils mangeaient. Dans chacun des deux groupes, une moitié (25 sujets) consommait 30 centilitres de potage, et l'autre moitié 50 centilitres.

Les résultats sont clairs : immédiatement après le déjeuner, les sujets déclaraient leur sentiment de rassasiement d'après leur consommation réelle, et non d'après leur consommation perçue. Deux heures, puis trois heures après le déjeuner, les sujets inversaient leur jugement : leur faim était fondée sur ce qu'ils avaient perçu, et non sur ce qu'ils avaient effectivement mangé. Les physiologistes ont également observé une augmentation du « rassasiement perçu » 24 heures après la consommation. Ces résultats confortent ceux de Birmingham et montrent que les perceptions, les attentes, la faim physiologique, voire les mots que nous mettons sur les mets, interviennent dans notre alimentation.

Pourquoi l'évolution biologique nous a-t-elle conféré ce comportement ? De plus en plus de travaux montrent que nos perceptions permettent à l'organisme de bien fonctionner. Par exemple, notre appareil sensoriel détecte les nutriments (calcium, saccharides, sources d'énergie, etc.), et prépare aussi la digestion, mettant fin... à la faim. Ces adaptations expliquent pourquoi les manipulations des goûts doivent être prudentes. Les modifications des saveurs sucrées, de la viscosité ou de la teneur en matière grasse ont ainsi des conséquences postingestives : les animaux que l'on expose à une alimentation « incohérente » grossissent. À la lumière des travaux de Bristol, on peut se demander si les phénomènes de mémoire et d'attente résultant de l'évolution ne sont pas oblitérés par les nourritures modifiées, amenant l'obésité. ■

Hervé THIS est chimiste dans le Groupe INRA de gastronomie moléculaire, professeur à AgroParisTech et directeur scientifique de la Fondation Science & Culture Alimentaire (Académie des sciences).

Retrouvez les articles de H. This sur www.pourlascience.fr

© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013

➜ SCIENCE ET SOCIÉTÉ

Alterscience

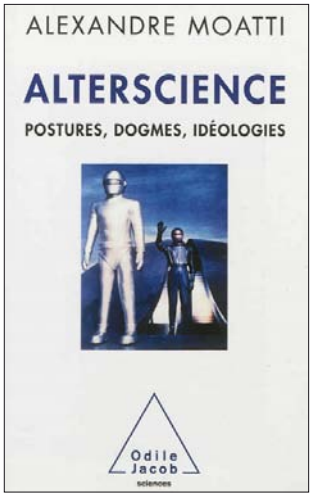
Alexandre Moatti
Odile Jacob, 2013
(336 pages, 23,90 euros).

Les divers dévoiements et autres détournements de la science ont des caractéristiques communes. L'auteur regroupe ces errements sous la dénomination d'« alterscience », qui n'est pas une autre science comme les illuminés le prétendent, mais une altération de la science.

Le phénomène est ancien et il donne froid dans le dos, car la force de coercition des faussaires scientifiques est d'autant plus étonnante que la construction logique de leur sujet est faible. Et ces fanatiques de leur propre théorie, pour expliquer le manque d'intérêt de la communauté scientifique à leur égard, invoquent des complots iniques contre leurs idées « trop révolutionnaires pour être acceptées » ou en conflit avec les grandes puissances industrielles, dont l'utilisation des inventions qu'ils déclarent miraculeuses « annihilerait les profits ».

Leurs exposés sont tout entiers de théories et d'opinions, sans guère de chiffres et d'expériences probantes, et les discours délirants passent très vite de l'explication à la vitupération. Beaucoup sont empreints de mysticisme, leurs tenants voulant inclure une spiritualité dans le froid et matérialiste discours des sciences. Les théories sont heureusement de courte durée, quelques décennies, et disparaissent avec leurs inventeurs dans les poubelles de la science, mais renaissent sous d'autres masques.

Pourquoi ? Parce que la science est de compréhension ardue et les preuves de son authenticité difficiles à saisir ; aussi, pour nombre d'entre nous, l'acceptation résulte de la croyance. La démarche amenant une étonnante crédulité naît quelquefois, dans le monde des ingénieurs, de notions mal assimilées. Par exemple, dans la découverte de nouvelles particules élémentaires, les raisonnements sont indirects et fondés partiellement sur la cohérence des théories existantes. Cette impalpabilité a amené des dérives : pourquoi



ne pas croire à de nouveaux rayonnements, à de nouvelles particules qui sont tout aussi « invisibles » que les autres (personne n'a vu un électron) ? Ainsi, vers 1977, l'invention fantaisiste d'une particule aux propriétés adéquates a semblé crédibiliser la détection du pétrole souterrain (affaire des avions renifleurs), comme les rayons X révèlent les os sous la peau.

A. Moatti décrit des relents d'alterscience plus fétides encore, comme l'assimilation des OGM au nazisme, amenant le terrorisme et le meurtre pour une « bonne cause antitechnique ».

Cet excellent livre aura-t-il l'effet d'assainissement escompté ? On peut s'interroger. Les médias, notamment la télévision, sont les alliés naturels des excentriques et accordent plus de place aux arguments déstabilisateurs épisodiques qu'aux mille confirmations de la science. Ainsi a-t-on pu lire « Einstein s'est trompé ! » quand certains chercheurs, ayant mal mesuré la vitesse des neutrinos, l'ont prétendue supérieure à la vitesse de la lumière…

Il n'empêche : clamons *Klaatu barada nikto* pour arrêter les destructeurs de la pensée, comme tentèrent de le faire Gort et Klaatu, les héros robotique et humain du film culte *Le jour où la Terre s'arrêta* représentés sur la couverture…

➜ Philippe Boulanger

➜ ÉTHIQUE

No steak

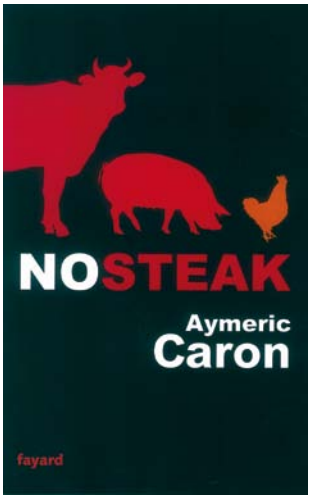
Aymeric Caron
Fayard, 2013
(358 pages, 19 euros).

Il paraît aujourd'hui un grand nombre de livres pour ou contre un régime végétarien. Le présent ouvrage, écrit dans un style très vivant, prédit que l'humanité entière deviendra bientôt végétarienne pour des raisons à la fois économiques et morales.

Il est faux de dire, comme l'auteur, que « l'amour de la viande est culturel, pas naturel ». La physiologie de l'homme et sa dentition montrent qu'il est, comme le porc, adapté à un régime alimentaire très varié, qu'on appelle « omnivore ». Il n'en reste pas moins que l'homme peut, dans une certaine mesure, modifier culturellement son alimentation, soit vers davantage de viande, comme les Inuits, qui ne disposent que de rares végétaux, soit pour réduire, voire éliminer, la viande.

Sur les idées de ce livre militant, que peut confirmer le scientifique ? Que le sujet occidental mange trop de viande, et, par suite, trop peu de fibres végétales, et que cela a des conséquences graves sur sa santé (maladies cardio-vasculaires, cancers du côlon, etc.). En outre, que les circuits économiques mondiaux favorisent la consommation carnée des pays riches au prix de la faim des pays pauvres, qui exportent leurs ressources végétales pour engraisser notre bétail, et de la destruction des écosystèmes par une agriculture trop peu diversifiée.

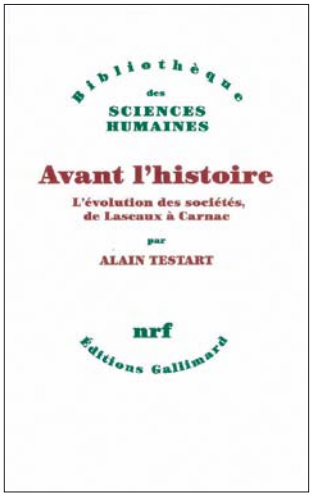
Enfin, que l'espèce humaine se targue d'une morale et, à ce titre, ne peut qu'être choquée par les horreurs du traitement des animaux de consommation, êtres conscients et sensibles, dans les élevages industriels, lors de leur transport ou lors de leur abattage. « Considérez-vous comme normal que l'on émascule à vif un porcelet ou que l'on égorge une vache pleinement consciente ? », demande l'auteur. De tous ces constats, deux points majeurs semblent émerger : notre santé et notre vie seraient meilleures si nous réduisions considérablement notre consommation carnée et, sur le plan moral, nous nous comporterions mieux, en tant que société, si nous suppri-



© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013

mions nos méthodes d'élevage les plus abominables. Au-delà de ces positions « minimales », le présent ouvrage ne clora pas le débat entre ceux qui, au nom de la nature humaine, souhaitent consommer de la viande tout en réduisant et en moralisant sa production, et ceux qui, au nom de la morale, souhaitent aller, comme A. Caron, vers une société dont la viande serait exclue.

➜ Georges Chapouthier
Centre Émotion, USR 3246, CNRS, UPMC-Pitié-Salpêtrière, Paris



➜ ANTHROPOLOGIE

Avant l'histoire

Alain Testart
Gallimard, 2012
(550 pages, 25 euros).

Ce livre fera date. Impressionnant d'érudition et de rigueur, Alain Testart y brosse un panorama de l'évolution des sociétés, de part et d'autre de la transition néolithique, en croisant les données de l'histoire, de l'ethnologie et de l'archéologie. Et il le fait en maintenant une distance salutaire vis-à-vis des modes intellectuelles et des idées reçues. Il réfute l'idée d'une évolution des sociétés du simple au complexe. Il admet un ordre de succession global des sociétés de chasseurs-cueilleurs aux sociétés d'agriculteurs, mais le pense non nécessaire. Sur les causes proposées pour en rendre compte, il juge qu'il manque dans tous les cas les conditions sociales nécessaires à leur mise en œuvre.

Malgré les limites documentaires, il parvient à extraire les matériaux de propositions extrêmement stimulantes. Il distingue deux catégories de sociétés de chasseurs-cueilleurs : les nomades et les stockeurs, ces derniers ayant un potentiel plus élevé en termes d'innovations sociales et techniques pour l'adoption d'une économie agricole. L'art paléolithique est interprété selon la grille du totémisme, comme la représentation d'un état du monde au temps du mythe, pendant lequel les différences entre espèces animales sont accomplies, mais pas encore celles entre humains et animaux, les grottes étant de bons symboles pour penser une origine.

Le stockage permet la richesse, mais, à long terme, l'agriculture produit sur ce point des effets laissant loin derrière les chasseurs-cueilleurs stockeurs. Elle aurait été inventée parce que le milieu social portait alors à des expérimentations de toutes sortes. Selon A. Testart, la richesse dépend des structures sociales locales fondées sur la quête du partenaire sexuel. Elle sert avant tout à payer pour les femmes (prix de la fiancée, puis dot). Autre élément crucial, à ses yeux, les deux formes de la propriété : l'une fondée sur le droit d'usage, l'autre pleinement foncière, dans laquelle on peut investir. Le pouvoir serait en somme fondé sur la propriété, le capital financier (pour des prêts et dons), la guerre (butin) et l'esclavage. Les organisations sociales observables seraient de trois sortes : ploutocratie ostentatoire, démocratie primitive, société lignagère.

Cet ouvrage très dense et d'une grande cohérence s'achève sur une autre hypothèse novatrice : la grande ancienneté de l'institution démocratique spécifique à l'Europe. Même en cas de désaccord sur tel ou tel point, ce livre restera un indispensable outil pour penser les sociétés.

➜ Patrice Brun
Archéologie, Université de Paris I-Panthéon-Sorbonne

➜ ARCHÉOLOGIE

Archéologie de la mort en France

Lola Bonnabel (dir.)
INRAP/La Découverte, 2012
(173 pages, 22 euros).

Quand on lit, en quatrième de couverture, que « l'archéologie de la mort s'est développée, à partir des années 1980, grâce à l'essor de l'archéologie préventive », on est tenté de remettre le livre dans les rayons. On aurait tort, car c'est un ouvrage de qualité, et parce que c'est l'éditeur, et non les auteurs, qui rejette dans un passé sans gloire nombre de grandes fouilles...

Historiquement, c'est surtout depuis l'époque de l'hypogée des Mournouards par André Leroi-Gourhan, en 1960, que le projecteur est braqué sur les morts plus que sur leur mobilier. Il est vrai que subsiste, tout au long du livre, un certain parti pris en faveur des fouilles de l'Institut national des fouilles archéologiques préventives (INRAP), coéditeur du livre. C'est par moments injuste, voire agaçant, mais pas bien grave.

Un bon livre donc. Le chapitre « Concepts et mise en œuvre »,

Brèves

Henri IV L'énigme du roi sans tête

St. Gabet et Ph. Charlier
Vuibert, 2013
(160 pages, 16,90 euros).

Une fois mort et enterré, le Bon Roy a été décapité à la Révolution, puis sa tête a disparu. Où ? Comment ? Par où est-elle passée ? Qui l'a retrouvée ? En est-on sûr ? L'un est journaliste, l'autre paléopathologiste, mais tous les deux sont enquêteurs et nous narrent ici comment ils ont reconstitué son histoire. Et en prime, puisqu'il s'agit de la vraie tête du Vert Galant, son vrai visage à l'âge de sa mort a aussi été reconstitué.

Supraconductivité

Ph. Mangin et R. Kahn
EDP Sciences, 2013
(388 pages, 59 euros).

Présenté comme une « introduction » à la supraconductivité, ce manuel est destiné à des étudiants déjà familiers avec l'électromagnétisme de Maxwell et la mécanique quantique. Théorie de London, équations de Pippard, supraconducteurs de types I et II, théorie BCS, SQUID et jonctions Josephson... : introductif en comparaison des recherches actuelles, l'ouvrage n'en est pas moins un cours de bon niveau sur un phénomène physique passionnant. Il comble une lacune de l'édition française en s'ajoutant au premier livre de vulgarisation paru en français sur ce thème (aux éditions Belin, en 2011).

Rêves et combats d'un enseignant-chercheur

Pierre Sabatier
L'Harmattan, 2012
(325 pages, 33,50 euros).

Promoteur en France de la physique mathématique appliquée aux « problèmes inverses », l'auteur fut un modeste jeune Français du Maroc que ses brillants résultats ont propulsé à l'École normale supérieure de la rue d'Ulm. Sa réussite lui a ouvert une vocation d'enseignant-chercheur au service de ses étudiants universitaires et provinciaux. Il livre ici un témoignage très affectif sur sa trajectoire où, chez ce pragmatique, perce de l'amertume vis-à-vis de l'élitisme régnant dans la recherche et des absurdités de la vie universitaire française.

© Pour la Science - n° 426 - Avril 2013

Brèves

Le labyrinthe des jours ordinaires

Pierre Rosenstiehl
Seuil, 2013
(304 pages, 21 euros).

Le fil d'Ariane de ce récit… est le fil d'Ariane, cette pelote que, sur les conseils de la jeune femme, Thésée déroula et rembobina pour débusquer et tuer le Minotaure dans son labyrinthe. Mais c'est aussi l'histoire d'un mathématicien qui interroge les Anciens pour éclairer l'informatique actuelle. Et celle d'un homme dont la vie ressemble à un fil d'Ariane dans un labyrinthe… Dans ce dédale savoureux, prenez garde de ne pas perdre le fil. Quand un oulipien s'empare d'une pelote, il faut s'attendre à tout.

Une histoire des médecines populaires : herbes, magie, prières

Yvan Brohard et Jean-François Leblond
La Martinière, 2013
(224 pages, 35 euros).

La figue au miel contre les morsures, les toiles d'araignée pour refermer une blessure, et, contre les otites, des cloportes taillés menus, chauffés dans de l'huile et coulés dans l'oreille… Du Moyen Âge à la Première Guerre mondiale, dans les campagnes européennes, tout était bon pour se soigner ou se protéger de la maladie. Entre remèdes de bonnes femmes, croyances et charlatanisme, les auteurs de ce bel ouvrage illustré, ethnohistoriens, explorent avec force détails la face cachée des pratiques médicales populaires d'antan.

Les semences

Michael Turner
Quæ, 2013
(224 pages, 25 euros).

Comment les semences sont-elles produites ? En quoi consiste la filière des semences ? De l'amélioration et la sélection des variétés aux différents réseaux de distribution (grandes entreprises semencières, mais aussi petites coopératives), en passant par la biologie des semences, leur multiplication, stockage, récolte, préparation et évaluation, cet ouvrage offre un panorama complet sur la technologie des semences. Destiné avant tout aux agriculteurs, agronomes et étudiants, il donne aussi au néophyte des clés pratiques pour mieux comprendre l'enjeu actuel de l'amélioration des plantes.

signé par Bruno Boulestin, est un morceau d'anthologie : il devrait avoir été lu et médité par tous les fouilleurs de sépultures. La partie sur les crémations montre à quel point les os brûlés, longtemps négligés, peuvent se révéler des documents archéologiques à part entière. D'autres chapitres sont de bonne facture, notamment « Le corps : un témoignage objectif », ainsi que « Déchiffrer l'organisation des sociétés », assez prudent, ce qui n'est pas sans mérite en une telle matière. Je serai plus critique sur « Pratiques funéraires au fil du temps », trop ambitieux : il y aurait fallu tout un livre. On

y voit, entre autres, les grandes sépultures collectives du Néolithique récent-final traitées en cinq lignes et demie (vous avez bien lu). Il est complété par un tableau chronologique, où lesdits sépulcres sont illustrés... par un site non publié (Bazoches-sur-Vesle), comme s'il n'y en avait pas d'autres.

Ce *caveat* mis à part, l'ouvrage est bien au fait des méthodes les plus récentes. Il est agréablement écrit, sans jargon de spécialiste. La bibliographie, assez étendue, est sélectionnée selon des critères obscurs. Les illustrations sont nombreuses ; petites, mais claires, bien choisies, bien commentées. Bref, on tirera profit de cet ouvrage… si on ne se laisse pas assourdir par l'hymne à la gloire de l'INRAP.

→ Claude Masset
Arscan, UMR 7041, Maison René Ginouvès, Université de Nanterre

→ ÉTHOLOGIE

Kamala, une louve dans ma famille

Pierre Jouventin
Flammarion/NBS, 2012
(344 pages, 21 euros).

Voici un ouvrage inclassable, mais dont la préface de Boris Cyrulnik annonce la qualité et la profondeur. Pierre Jouventin, éthologue et écologue, longtemps chercheur au CNRS, nous livre une expérience affective à la source d'une authentique réflexion scientifique et ontologique : au milieu des années 1970, cet amoureux de la nature sauvage en arrive, presque malgré lui, à recueillir une jeune louve dans son appartement au cœur de Montpellier.

Il ne peut alors s'empêcher de noter ses observations éthologiques, à commencer par la primauté des relations sociales et affectives sur le besoin d'espace dans la vie d'un loup, d'où la justesse du titre. Kamala ne semble pleinement épanouie que si les membres de sa famille humaine sont dans leur logement de moins de 100 mètres carrés et elle se méfie longtemps du grand enclos moins familier de la nouvelle maison de banlieue.

P. Jouventin mène une réflexion sur la nature de l'homme, du loup et du chien, et sur leurs relations interspécifiques. Il souligne et cherche à expliquer pourquoi les animaux avec qui l'homme a le plus d'affinités sont ces descendants d'un carnivore que sont les chiens, et non pas les grands singes avec qui nos différences génétiques sont minimes.

Pour éviter de faire des émules, il témoigne avec beaucoup de recul, mais non sans une émotion encore intense 30 ans après la fin de Kamala. L'idée forte qui ressort est que la frontière entre les humains et les autres animaux est très relative. Certes, l'originalité de l'homme est manifeste, mais, souligne l'auteur qui s'inscrit dans un humanisme élargi aux animaux, les différences ne sont qu'une question de degré. Enfin, il s'agit aussi d'une histoire d'amour et d'un rappel aux scientifiques que le point de départ de leurs vocations réside souvent dans une sensibilité dont ils s'éloignent ensuite sous l'effet des pratiques.

→ Farid Benhammou
Biogéographe

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 – Avril 2013 – N° d'édition 077426-01 – Commission paritaire n° 0912K82079 – Distribution : NMPP – ISSN 0 153-4092 – N° d'imprimeur 101/180 566 – Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé.

QSR International | NVIVO

RITME présente

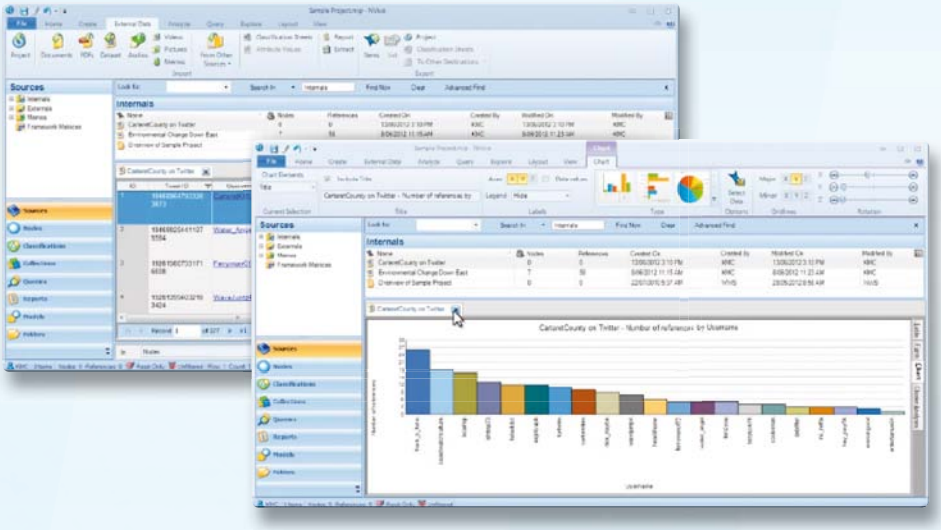
NOTRE MÉTIER : FACILITER LE VÔTRE

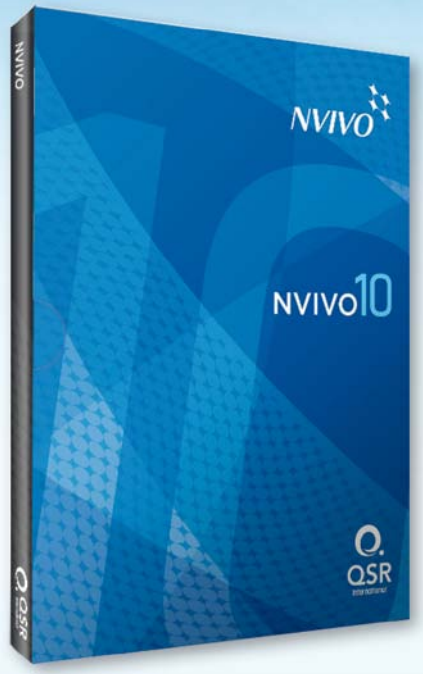
NVIVO 10

Avez-vous besoin d'analyser les informations contenues dans des documents, des sondages, des fichiers audio, des vidéos, des photos, des réseaux sociaux et des pages internet ?

NVivo est un logiciel d'analyse qualitative qui vous aide à organiser et à analyser facilement vos données.

Quel que soit votre matériel, quel que soit votre projet, NVivo vous aide à trouver rapidement des solutions, à justifier vos conclusions et à prendre des décisions basées sur une connaissance des faits.





Disponible pour Windows (32/64 bits)

www.ritme.com/fr/product/nvivo

RITME - Distributeur Officiel • 34, bd Haussmann • 75009 Paris • France
Tél. : +33 (0)1 42 46 00 42 • Fax : +33 (0)1 42 46 00 33
info@ritme.com • www.ritme.com

Sauf indication contraire : logiciel et documentation en anglais, et livraison par téléchargement ou par CD-Rom.
© Copyright 2012 RITME. NVivo est une marque déposée de QSR International.
Toutes les marques déposées sont la propriété de leurs sociétés respectives.

RITME
NOTRE MÉTIER : FACILITER LE VÔTRE
Distributeur officiel en France

CASDEN Banque Populaire - Société Anonyme Coopérative de Banque Populaire à capital variable - Siège social : 91 Cours des Roches - 77186 NOISIEL
Siret n° 784 275 778 00842 - RCS Meaux. Immatriculation ORIAS n° 07 027 138. BPCE - 50 rue Pierre Mendès France - 75013 Paris - RCS 493 455 042.

Et si plus d'1 million de personnes soutenaient vos projets ?

● Avis de Tempête - Illustration : Killoffer

Quand les enseignants se mobilisent pour réaliser leurs projets, ils créent leur propre banque. *En permettant à l'épargne de tous ses Sociétaires de financer les projets de chacun, la CASDEN démontre depuis 60 ans la performance d'un système bancaire coopératif.*

Rejoignez-nous sur ***casden.fr*** *ou contactez-nous au* ***0826 824 400***

(0,15 € TTC/min en France métropolitaine)

BANQUE POPULAIRE

L'offre CASDEN est disponible en Délégations Départementales et également dans le Réseau Banque Populaire.

casden
BANQUE POPULAIRE

CASDEN, la banque coopérative de l'éducation, de la recherche et de la culture