MONNAIE VIRTUELLE : les *bitcoins* bouleverseront-ils l'économie ?

POUR LA SCIENCE

Décembre 2013 - n° 434

www.pourlascience.fr

Édition française de Scientific American

Les fleurs de glace

Quand le froid sculpte la sève

Les structures cachées du langage

Migrer la nuit : une prouesse des oiseaux

Les volcans radiographiés avec des rayons cosmiques

M 02687 - 434 - F: 6,20 € - RD

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.

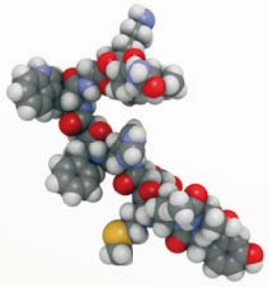
1ER CENTRE MONDIAL DE RESSOURCES EN PARFUMERIE-COSMÉTIQUE

COSMETIC VALLEY
FRANCE

PeReNE:
UNE PLATEFORME DE RECHERCHE ET D'INNOVATION SUR LES PEPTIDES POUR LA COSMETIQUE

Vous souhaitez utiliser les peptides pour vos activités ?
Vous êtes à la recherche de nouveaux ingrédients bioactifs ?

La Plateforme rassemble toutes les compétences nécessaires...
pour un partenariat d'innovation gagnant



Contact : Christophe Masson (PhD) - cmasson@cosmetic-valley.com - www.cosmetic-valley.com
1 place de la cathédrale 28000 Chartres - France - Tél: +33 2 37 211 211

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 H.S. Pour la Science
Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin
Cerveau & Psycho
Rédactrice en chef : Françoise Pétry
Rédacteur : Sébastien Bohler
L'Essentiel Cerveau & Psycho H.S.
Rédactrice : Bénédicte Salthun-Lassalle
Directrice artistique : Céline Lapert
Secrétariat de rédaction/Maquette : Sylvie Sobelman, Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy, Caroline Vanhoove
Site Internet : Philippe Ribeau-Gésippe
Marketing : Élise Abib et Ophélie Maillet assistées de Anaïs Grelet
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 : Christophe Coupé, Thierry Dauxois, Philippe Delorme, Sophie Gallé-Soas, Evelyne Host-Platret, Maël Lebreton, Matthieu Leclair, Éric Lingueglia, Egidio Marsico, François Pellegrino, Christophe Pichon, Jim Reid, Daniel Tacquenet, Richard Taillet, Pascale Thiollier-Dumartin

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

SERVICE ABONNEMENTS
Ginette 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 : Fred Guterl, Ricky Rusting, Philip Yam, Mark Fischetti, Christine Gorman, Anna Kuchment, Michael Moyer, Gary Stix, Kate Wong. President : Steven Inchcoombe. Executive Vice President : Michael Florek.

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 2012 www.ojd.com

Structures cachées

La théorie de la Gestalt, ou théorie de la forme, a été proposée à la fin du XIX^e siècle. S'intéressant à la psychologie de la perception, elle applique l'aphorisme attribué à Aristote : le tout est davantage que la somme de ses parties. Ainsi, un film est plus que la succession des images qui le constituent, une mélodie plus que la simple juxtaposition des notes qui la composent. L'étude des parties ne renseigne pas toujours sur le tout. Mais, à l'inverse, peut-on déduire d'une forme des informations sur ses composants ? C'est précisément ce que font les géophysiciens qui étudient la Soufrière de Guadeloupe. Ils sondent l'intérieur de ce massif volcanique en suivant comment les muons, des particules élémentaires issues des rayons cosmiques, sont atténués lorsqu'ils le traversent, et comment cette atténuation évolue. Ils radiographient, quasi en direct, les entrailles du volcan, espérant un jour déceler dans une modification les prémices d'une éruption *(voir Sonder les volcans avec des rayons cosmiques, page 44)*.

Une mélodie est plus que la simple juxtaposition des notes qui la composent.

Ainsi, la structure est l'agencement des parties d'un système complexe qui confère sa cohérence à l'ensemble. Cette définition s'applique notamment au langage. Structuré en plusieurs niveaux (phonèmes, syllabes, mots, phrases, etc.), le langage est organisé en réseaux, les mots étant situés aux nœuds d'un maillage, dont l'étude précise l'origine et l'évolution *(voir La structure en réseaux du langage, page 36)*.

Relier une structure et ses constituants, c'est également ce que font les biologistes et les naturalistes qui s'intéressent aux fleurs de glace. Ces sculptures éphémères apparaissent quand un liquide, mélange d'eau et de sève, est extrudé par les pores de la tige de certaines plantes et se fige au contact de l'air froid *(voir Les fleurs et les rubans de glace, page 20)*. Ou encore les physiciens qui étudient les écoulements chaotiques : ils ont ainsi montré que, dans les océans notamment, des structures cachées, des « frontières invisibles », servent d'« autoroutes » aux polluants ou aux débris *(voir L'ordre caché des écoulements chaotiques, page 28)*. Une nouvelle preuve de l'ordre qui se dissimule derrière le chaos ! ■

SOMMAIRE

1 ÉDITO

4 BLOC-NOTES
Didier Nordon

Actualités

6 **Une jumelle brûlante de la Terre**

7 **Une souris insensible à la douleur**

7 **Des pumas au fond du lac Titicaca**

10 **Des terres rares essentielles à certaines bactéries**

... et bien d'autres sujets.

Opinions

16 POINT DE VUE
Cigarette électronique et santé publique
Marion Adler

17 DÉVELOPPEMENT DURABLE
Comment refroidir de façon durable ?
Didier Coulomb

Ce numéro comporte deux encarts d'abonnement *Pour la Science* brochés sur la totalité du tirage.
En couverture : © James R. Carter

À LA UNE

20 BIOPHYSIQUE
Les fleurs et les rubans de glace
James R. Carter

Quand les conditions météorologiques sont favorables, les tiges de certaines plantes donnent naissance à de magnifiques structures de glace. Un phénomène rare et partiellement élucidé.

28 PHYSIQUE
L'ordre caché des écoulements chaotiques
Thomas Peacock et George Haller

De nouvelles techniques d'analyse en mécanique des fluides permettent d'identifier des lignes de séparation. Elles promettent de meilleures prévisions du déplacement des polluants dans les océans ou dans l'atmosphère.

36 LINGUISTIQUE
La structure en réseaux du langage
Ricard Solé, Bernat Corominas-Murtra et Jordi Fortuny

Des techniques d'analyse issues des mathématiques et de la physique révèlent les structures du langage et renseignent ainsi sur son origine et son évolution.

© Pour la Science - n° 434 - Décembre 2013

44 SCIENCES DE LA TERRE
Sonder les volcans avec des rayons cosmiques
N. Lesparre, D. Gibert et J. Marteau

Prévoir les éruptions volcaniques reste un défi pour les scientifiques. La solution viendra-t-elle des muons, issus du rayonnement cosmique, qui permettent de radiographier l'intérieur des volcans ?

52 BIOLOGIE ANIMALE
La migration nocturne des oiseaux, une épreuve extrême
Paul Bartell et Ashli Moore

De nombreux oiseaux migrateurs parcourent plusieurs milliers de kilomètres en voyageant la nuit. Comment surmontent-ils une telle épreuve ?

62 ENVIRONNEMENT
La Grande Muraille verte
René Bally et Robin Duponnois

Le projet de la Grande Muraille verte vise à implanter ou à stabiliser une bande végétale en bordure du Sahara à travers tout le continent africain, afin d'endiguer la progression du désert vers le Sud.

Regards

70 HISTOIRE DES SCIENCES
Les dessous de la gamme cosmétique *Tho-Radia*
Thierry Lefebvre et Cécile Raynal

Fin 1932, un pharmacien opportuniste fait fortune en créant des produits de beauté à base de radium.

76 LOGIQUE & CALCUL
Bitcoin, la cryptomonnaie
Jean-Paul Delahaye

La cryptographie et la puissance des réseaux ont rendu possible l'existence de monnaies purement numériques et dépourvues d'une autorité centrale de contrôle.

84 SCIENCE & FICTION
Matière à fiction
J. Sébastien Steyer et Roland Lehoucq

86 ART & SCIENCE
Le retour de la Grande Comète de 1680 ?
Loïc Mangin

88 IDÉES DE PHYSIQUE
Tomber plus vite qu'en chute libre
Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

93 SCIENCE & GASTRONOMIE
Et si la cuisine traditionnelle était la vraie malbouffe ?
Hervé This

94 À LIRE

Nouveautés numériques

POUR LA SCIENCE .fr
Le site de référence de l'actualité scientifique internationale

■ L'application *Pour la Science*
Retrouvez dès leurs sorties *Pour la Science* + son hors-série *Dossier Pour la Science* en version numérique optimisée.

■ Les Petits Thématiques
Des compilations numériques fiables et pratiques sur l'actualité scientifique.

■ www.SciLogs.fr
La nouvelle plateforme de blogs scientifiques francophones.

SCIENCE LES PETITS THÉMATIQUES SciLogs

© Pour la Science - n° 434 - Décembre 2013

➜ BIEN JOUÉ !

Nous retenons mieux, en général, les formules que les raisonnements, et nous nous laissons subjuguer par elles. Les démagogues et les sophistes le savent, et savent en tirer profit.

Même dans le domaine de la pensée, les raisonnements, qui devraient pourtant régner sans partage, peuvent être mis en échec par les formules. Ainsi, j'ai beau avoir été convaincu par certains textes critiquant la thèse de Popper selon laquelle « un énoncé, pour être scientifique, doit être réfutable », il n'y a rien à faire : la formule de Popper, simple et frappante, me reste en mémoire, alors que les arguments qui la mettent à mal s'estompent.

Quand le bien dit se met au service du bien pensé, tant mieux. Sinon, nous sommes, dans l'ensemble, plus réceptifs au bien dit qu'au bien pensé. Tant pis !

➜ PERFIDES ANALOGIES

« Le cerveau ne doit pas être autre chose, à notre avis, qu'une espèce de bureau téléphonique central : son rôle est de "dopper la communication", ou de la faire attendre » écrivait Bergson (*Matière et mémoire*). D'autres auteurs, à la fin du XIX^e^ siècle, voyaient des analogies entre le système nerveux et le télégraphe. Ces rapprochements datent, aujourd'hui. C'est à un ordinateur que nous comparons le cerveau. Ou, mieux encore, à des ordinateurs en parallèle, puisque le modulaire est à la mode.

Comparer un organe naturel à la dernière en date des réalisations techniques est frappant, mais est-ce pertinent ? Que la technique trouve dans la nature une source d'inspiration toujours renouvelée n'implique pas qu'elle ait pour mouvement de concevoir des objets ressemblant de plus en plus à ceux de la nature. Les hommes regardent les oiseaux, ont envie de voler, ont l'idée de fabriquer des ailes. Suite à quoi, les caractéristiques des avions sont sans rapport avec celles des oiseaux. Le fait que, comme les cerveaux, les ordinateurs calculent et aient de la mémoire ne prouve pas que leurs fonctionnements soient apparentés. Peut-être même, au contraire : puisque la vitesse et la mémoire des ordinateurs surpassent tellement celles des cerveaux, c'est qu'aucune analogie entre eux n'est significative.

Les nouveautés techniques ne sont pas le dernier cri de la nature ! Plus on colle à elles pour décrire la nature, plus vite on risque d'avoir l'air vieillot.

➜ DE CAUSE À EFFET

Chacun le constate, la créativité de la nature est impressionnante. Les termes luxuriance, profusion inouïe, incroyable foisonnement, etc., sont courants dans les descriptions des écrivains et des voyageurs, les embranchements sont innombrables dans les classifications des scientifiques. La nature, dirait-on, met en œuvre une inventivité débridée pour explorer jusqu'en ses moindres interstices tout le champ des possibles.

Appliquer un principe de parcimonie pour expliquer les phénomènes naturels est une espèce de pari contre l'évidence, puisque ce principe enjoint de porter à son maximum la disproportion entre l'énorme variété des effets observés et le petit nombre des causes auxquelles on tente de les ramener. Certes, les automates cellulaires prouvent que des règles simples et peu nombreuses peuvent faire surgir des configurations d'une infinie diversité. Mais, à cause justement de leur propension à engendrer du complexe à partir du simple, les automates cellulaires sont intrigants. Alors, si on parvient à rendre compte de la multiplicité de la nature à partir de peu de facteurs, on ne fera peut-être qu'ajouter à son mystère.

➜ RESPECTER LE PROTOCOLE

Lorsqu'ils expliquent quel protocole est désormais appliqué contre telle ou telle maladie, les médecins manifestent souvent une rassurante satisfaction. À les en croire, ce protocole est enfin le bon : s'approchant au plus près de ce qu'il faut faire, il a su tirer les leçons des erreurs qu'on commettait encore il y a seulement 10 ou 20 ans. Voilà qui est rassérénant. Quitte à être malade, mieux vaut l'être maintenant que par le passé.

C'est rassérénant... sauf si on imagine le discours que leurs confrères tiendront dans 10 ou 20 ans. Il est vraisemblable que, *mutatis mutandis*, ce sera à peu près le même. Il y a en effet des chances que le protocole dont les médecins sont contents aujourd'hui révèle des failles cachées : l'histoire est tissée de telles déconvenues. Mais la médecine saura sans doute y remédier – au moins provisoirement. Ainsi, une longue série de changements de protocoles est probable, et ces changements forment un processus que, en tant que malades potentiels, nous avons autant de raisons de craindre que de raisons d'espérer !

© Pour la Science - n° 434 - Décembre 2013

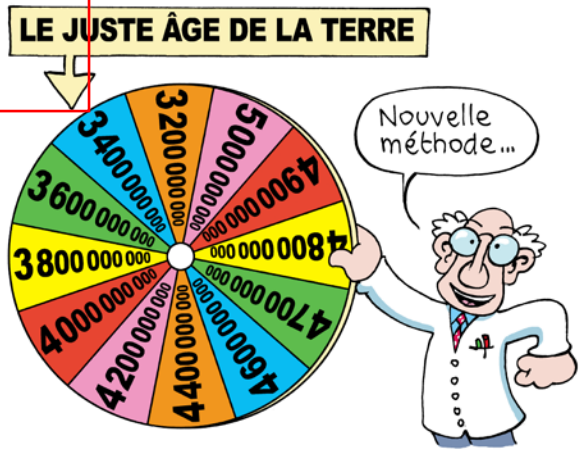
À se réclamer de la science, la médecine hérite d'un des traits de la science : les vérités y ont un statut précaire. Ce qui est vérité aujourd'hui risque de passer demain pour erreur. Allons bon ! Quitte à tomber malades, essayons d'attendre encore 10 ou 20 ans...

➜ ELLE NE FAIT PAS SON ÂGE !

Lorsque des méthodes indépendantes donnent à peu près le même résultat, on en conclut que l'ordre de grandeur du résultat est probablement exact. Ainsi en va-t-il de l'évaluation de l'âge de la Terre.

Seulement, s'il est possible de montrer que des phénomènes qui paraissaient indépendants sont en fait liés (exemple : l'électricité et le magnétisme), il est hasardeux, à l'inverse, d'affirmer que des phénomènes qui paraissent indépendants le sont vraiment. Alors, qui sait si l'avenir ne découvrira pas un phénomène commun sous-jacent, encore ignoré, entachant d'une même erreur les diverses méthodes qui convergent aujourd'hui pour évaluer l'âge de la Terre ?

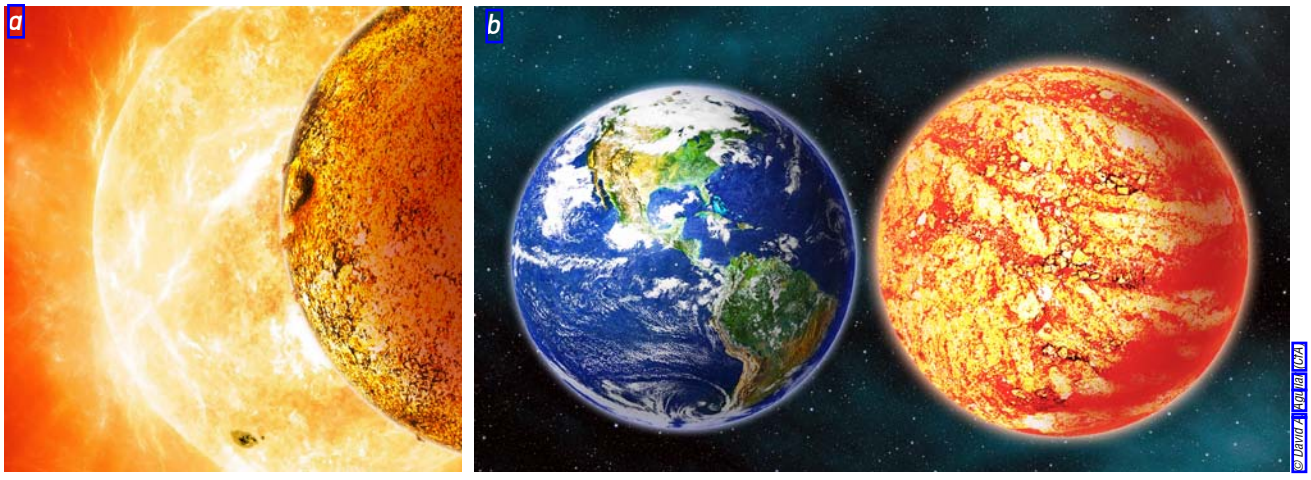
L'évaluation de l'âge de la Terre a souvent varié – y compris depuis que, cessant de ressortir de la vérité révélée, elle est devenue scientifique. Si elle se stabilisait définitivement, ce serait une nouveauté totale. Or en sciences comme ailleurs, la nouveauté totale est possible, certes, mais nettement moins probable que la poursuite d'un mouvement en cours. Ne soyons donc pas trop surpris si nous apprenons, un jour ou l'autre, que la Terre a encore changé d'âge. ■



Astrophysique

Une jumelle brûlante de la Terre

L'exoplanète Kepler 78b est semblable à la Terre par sa taille, sa densité et sa composition. Mais, étant très proche de son étoile, elle est beaucoup plus chaude.



L'exoplanète Kepler 78b est située à moins de 1,5 million de kilomètres de son étoile. Sa surface, dépourvue d'atmosphère, est recouverte de roche en fusion *(a)*. Cela lui donne un aspect très différent de la Terre. Les deux planètes, de taille proche *(b)*, auraient une composition similaire : elles sont constituées de roche et ont un noyau de fer.

Dans la recherche d'exoplanètes semblables à la Terre, un nouveau pas a été franchi. On avait découvert de nombreuses planètes ayant une taille proche de celle de la Terre. Il est cependant beaucoup plus difficile d'estimer leur masse et leur composition. Deux équipes d'astronomes ont étudié l'exoplanète Kepler 78b, dont ils ont montré que la densité est proche de celle de la Terre ; sa composition serait donc voisine, c'est-à-dire qu'elle serait essentiellement constituée de roche et de fer. Mais les similitudes s'arrêtent là : Kepler 78b est si proche de son étoile que ce monde doit être recouvert de lave.

Depuis sa mise en service en 2009, le télescope spatial *Kepler* a permis d'identifier près de 3 000 candidats au titre d'exoplanètes par la méthode du transit. Quand une exoplanète passe devant son étoile, la luminosité baisse. Il est possible d'en déduire sa taille. Cette méthode favorise surtout la détection des planètes de grande taille et très proches de leur étoile. C'est pour cette raison que la plupart des exoplanètes détectées sont des jupiters chauds, des planètes géantes gazeuses dont l'orbite est proche de l'étoile. Néanmoins, quelques planètes de la taille de la Terre (une à deux fois son rayon) ont aussi été détectées.

Pour déterminer la masse d'une planète, il faut utiliser la méthode des vitesses radiales – l'étoile subit un petit déplacement dû à l'attraction réciproque avec l'exoplanète. Encore une fois, cette technique est difficile à mettre en œuvre pour des planètes de la taille de la Terre. Mais deux équipes, celle de Francesco Pepe, de l'Observatoire astronomique de Genève, et celle d'Andrew Howard, de l'Université de Hawaii, ont pu l'utiliser pour étudier l'exoplanète Kepler 78b, située à 400 années-lumière de nous.

Grâce aux observations de *Kepler*, on a estimé que son rayon est de l'ordre de 1,2 fois celui de la Terre. Et en utilisant les observations des instruments au sol (HARPS-North à l'Observatoire de la Palma et HIRES de l'Observatoire Keck), les astronomes ont mesuré une masse comprise entre 1,7 et 1,9 fois celle de la Terre. Sa densité est donc très voisine de celle de la Terre et sa composition probablement identique : cette planète serait rocheuse avec un noyau de fer qui représenterait 40 pour cent de la masse totale. Ainsi, Kepler 78b serait la première exoplanète découverte ayant la même taille et la même composition que la Terre.

Mais l'aspect de cette exoplanète est sans doute très différent. En effet, Kepler 78b est 40 fois plus proche de son étoile que ne l'est Mercure du Soleil. Une année sur cette exoplanète dure 8,5 heures environ et la température à sa surface dépasse 2 400 °C : il s'agit d'un monde couvert de lave et dépourvu d'atmosphère. En outre, l'intensité de la pesanteur sur cette planète serait assez élevée pour qu'il n'y ait pas de pertes de matière liquide ou solide, contrairement à ce qui se semble se produire sur l'exoplanète KIC 12557548b.

→ Sean Bailly

A. Howard et al., F. Pepe et al., Nature, en ligne le 30 octobre 2013

© Pour la Science - n° 434 - Décembre 2013

Neurobiologie

Une souris insensible à la douleur

De nombreux animaux se protègent des prédateurs en leur injectant un venin douloureux. Ashlee Rowe, de l'Université du Texas, et ses collègues ont montré que la souris sauterelle *Onychomys torridus*, qui vit dans le désert de l'Arizona, a développé une résistance à la douleur causée par le venin du scorpion *Centruroides sculpturatus*, dont elle se nourrit. Mieux : la piqûre de ce dernier l'immunise contre d'autres types de douleur. Comment ?

La douleur survient quand des neurones dits nocicepteurs, qui innervent la peau ou les organes, sont activés par un signal chimique, thermique ou mécanique. Un influx se propage alors jusqu'à la moelle épinière, puis est transmis au cerveau. Les chercheurs ont montré que, chez la souris sauterelle, le venin inactive des canaux ioniques particuliers des neurones nocicepteurs, ce qui bloque la propagation de l'influx.

Une souris sauterelle dévore un scorpion.

Le blocage reste efficace un certain temps, même pour d'autres types de stimulus douloureux. Le mécanisme antidouleur découvert est une piste pour la production d'analgésiques, dans la mesure où l'homme, comme de nombreux mammifères, est doté de canaux ioniques similaires.

→ Guillaume Jacquemont

A. Rowe et al., Science, en ligne le 24 octobre 2013

Archéologie

Des pumas au fond du lac Titicaca

Le culte de divinités liées aux lacs, aux sources et aux cours d'eau se retrouve dans de nombreuses cultures. Une équipe d'archéologues belges et boliviens, dirigée par Christophe Delaere, de l'Université libre de Bruxelles, a récolté une impressionnante moisson de vestiges dans une zone du lac Titicaca, en Bolivie, où, depuis des milliers d'années, les habitants de la région jettent des offrandes.

Cette plaquette votive en or et en forme de puma a été jetée dans le lac Titicaca durant la période Tihuanaco, il y a plus de 1 000 ans.

Les archéologues ont méthodiquement fouillé deux carrés de sondage de deux mètres de côté près de l'île du Soleil. Cela a suffi pour produire 2 000 objets, dont les plus anciens remontent au VI^{e} siècle avant notre ère. Durant la période dite formative, qui va de 2700 à 200 avant notre ère, les paysans et les pêcheurs de la région ont commencé par se regrouper en villages. Ensuite, l'évolution des sociétés villageoises a conduit l'un des villages, Tihuanaco, à se transformer en une ville organisée autour d'un sanctuaire important. De l'époque Tihuanaco (VI^{e} au XI^{e} siècle de notre ère) datent nombre de plaquettes d'or incisées qui attestent à la fois d'une très bonne maîtrise de la métallurgie et de l'importance des offrandes faites au lac ou au Soleil. Des matériaux provenant de tout le continent sud-américain (lapis-lazuli, spondyles, jade, quartz, etc.) illustrent à quel point les échanges étaient riches durant la période précolombienne. Il est aussi fascinant de découvrir, parmi les offrandes, des pumas en or et en céramique. Typique du matériel iconographique tihuanaco, cette figure animale forte semble avoir symbolisé le caractère d'un dieu principal. Le Soleil ? Ou le lac ? Quoi qu'il en soit, on peut noter que l'île du Soleil s'appelait à l'origine Titicaca (elle a donné son nom au lac), ce qui, suivant certaines étymologies, signifierait « roc du puma ».

→ François Savatier

En bref

Recensement amazonien

La forêt amazonienne compte près de 390 milliards d'arbres – quatre fois plus qu'il n'y a d'étoiles dans la Galaxie ! –, selon un recensement réalisé par une équipe internationale. Les chercheurs ont compilé des données collectées sur un panel représentatif de 1 170 parcelles de un hectare et les ont extrapolées à l'ensemble de la forêt. Celle-ci abrite 16 000 espèces d'arbres, dont 227 dominent : elles représentent plus de la moitié des arbres, contre 0,12 pour cent pour les 11 000 espèces rares répertoriées.

La génétique d'Alzheimer

Les mutations de certains gènes augmentent le risque de développer la maladie d'Alzheimer. En comparant les génomes de plus de 74 000 individus, dont le tiers était atteint de la maladie, des biologistes du Consortium international I-GAP ont identifié 11 de ces gènes (10 étaient déjà connus). Leurs découvertes confirment certaines hypothèses sur les mécanismes en jeu (les mutations perturbent par exemple la régulation du peptide bêta amyloïde, qui s'agrège autour des neurones des malades) et en suggèrent de nouvelles.

La Cité interdite sur glace

La Cité interdite de Pékin a été bâtie au XV^{e} siècle. Certains blocs de pierre pèsent plus de 100 tonnes et proviennent de carrières distantes d'environ 70 kilomètres. Les véhicules équipés de roues n'auraient pas pu supporter une telle charge. Or certains livres mentionnent des luges posées sur des blocs de glace. Jiang Li, de l'Université des sciences et des technologies de Pékin, et ses collègues ont comparé diverses techniques et ont mis en évidence que celle-ci était la plus efficace, si l'on ajoute de l'eau liquide pour lubrifier.

En bref

Les empreintes révélées

Les empreintes digitales sont un élément majeur des enquêtes criminelles, mais elles sont souvent très ténues. Pour les rendre exploitables, on doit leur appliquer un traitement posant plusieurs problèmes : il est long, coûteux, nuisible aux fragments d'ADN… Des chercheurs français ont développé un révélateur plus efficace en combinant une colle avec un colorant fluorescent. Ce produit a été validé par la police et la gendarmerie, ainsi que par Scotland Yard et le FBI.

Un nouveau tendon du genou !

C'est tout simple : toutes les représentations du genou montrent le ligament colatéral fibulaire qui joint l'extrémité extérieure du fémur au péroné. En réalité, ce ligament n'est pas seul. Il est flanqué d'un tendon supplémentaire, le « tendon antérolatéral », qui vient d'être décrit et nommé ! À l'issue d'une dissection minutieuse, Steven Claes et Johan Bellemans, deux chirurgiens orthopédiques belges, l'ont mis en évidence, confirmant ainsi une hypothèse émise dès 1879 par un chirurgien français.

Biologie cellulaire

Comment les cellules freinent et tournent

Si les mécanismes du mouvement des cellules sont bien décrits, la façon dont elles régulent la direction de leur migration restait mal connue. Alexis Gautreau, du Laboratoire d'enzymologie et biochimie structurales (CNRS, UPR 3082), à Gif-sur-Yvette, et ses collègues ont mis en évidence chez l'homme et d'autres organismes un facteur essentiel de cette régulation : une protéine, Arpin, freine la cellule et lui permet de changer de direction.

Une cellule se déplace en projetant sa membrane vers l'avant en une structure nommée lamellipode, dont la formation est déclenchée par l'activation d'un complexe protéique nommé Arp2/3. Au microscope, cependant, le mouvement de la cellule paraît tâtonnant : un lamellipode naît, ondule, se rétracte, un autre apparaît à côté, se rétracte à son tour… Ces hésitations seraient-elles dues à un mécanisme inhibiteur qui, aux côtés de la voie d'activation, régulerait la formation du lamellipode ?

L'hypothèse s'est révélée correcte. Les biologistes ont identifié une protéine, Arpin, qui se lie au complexe Arp2/3 et l'inhibe lorsqu'il est activé. De plus, des cellules ne produisant pas Arpin se déplacent plus vite et plus linéairement que des cellules non modifiées. Ainsi, la protéine Arpin ralentit la formation du lamellipode (et donc la cellule), sans pour autant empêcher la formation d'un autre lamellipode ailleurs dans la membrane, ce qui modifie la trajectoire de la cellule. Chose étonnante, Arpin est activée… par la voie de signalisation qui active le complexe Arp2/3 : une même commande dose localement, en fonction de signaux extérieurs, l'activation et l'inhibition du complexe.

© Romain Gorelik (CNRS)

Dans ces cellules de souris, Arpin *(en vert)* est localisée à l'extrémité des lamellipodes.

Les biologistes s'intéressent à présent au rôle d'Arpin dans les cellules cancéreuses. Certaines se mettent à migrer, formant des métastases. Parce que la protéine Arpin n'y serait plus produite ? Oui, suggèrent les premières études sur le cancer du sein : Arpin n'est plus exprimée dans les cancers les plus invasifs…

→ Marie-Neige Cordonnier

I. Dang, R. Gorelik, C. Sousa-Brin et al., Nature, en ligne le 16 octobre 2013

Génétique des populations

Aux origines des juifs ashkénazes

Qui étaient les ancêtres des juifs « ashkénazes » – juifs dont les ascendants récents vivent ou vivaient en Europe centrale et de l'Est ? À cette question débattue depuis longtemps, une équipe internationale menée par Martin Richards, des Universités de Leeds et de Huddersfield, en Grande-Bretagne, apporte un éclairage intéressant.

Selon l'hypothèse dominante, les ancêtres des juifs ashkénazes sont arrivés en Europe en provenance du Proche-Orient vers le Ier siècle de notre ère, après la destruction de Jérusalem par les Romains. Des unions mixtes avec des Européens de souche auraient alors conduit à un brassage génétique. D'après une autre thèse, cette population proviendrait principalement d'individus européens qui se seraient convertis au judaïsme. Et, selon certains, les ashkénazes proviennent surtout de conversions massives chez les Khazars, un peuple caucasien dont la classe dirigeante a adopté le judaïsme vers le Xe siècle de notre ère.

Afin d'éclaircir la question, l'équipe de M. Richards a cherché à reconstruire la généalogie à partir de l'analyse de l'ADN mitochondrial, qui n'est transmis que par les mères. Sur la base d'un grand nombre de données génétiques, elle a trouvé que plus de 80 pour cent des ADN mitochondriaux des juifs ashkénazes modernes ont une origine européenne. En d'autres termes, la lignée maternelle des juifs ashkénazes remonte principalement à l'Europe occidentale préhistorique !

Quant à la lignée paternelle, d'autres études portant sur le chromosome Y avaient montré une origine très majoritairement proche-orientale. Des hommes plutôt originaires du Levant, des femmes plutôt originaires d'Europe : tel est le tableau que semble dessiner la génétique.

→ Maurice Mashaal

M. D. Costa et al., Nature Communications, vol. 4, 2543, 2013

© Bogdan Ionescu, Shutterstock

© Pour la Science - n° 434 - Décembre 2013

Biologie animale

Des rennes aux yeux d'hiver

Noël approche. Pendant que le Père Noël vérifie son traîneau, ses rennes se préparent à l'hiver et à la baisse de luminosité qui l'accompagne. Comment ? En modifiant le fond de leurs yeux. C'est ce qu'ont montré Glen Jeffrey, de l'*University College* de Londres, et ses collègues.

À l'instar de nombreux mammifères, tels les chats, le renne est doté au fond de ses yeux d'une surface réfléchissante, le *tapetum lucidum*, qui augmente la quantité de lumière captée par la rétine. L'été, cette couche est plutôt jaune et réfléchit la lumière reçue dans la direction incidente. En revanche, l'hiver, elle est bleue et diffuse la lumière : la rétine reçoit alors davantage de lumière. Ce changement résulte d'un réarrangement du collagène (des protéines fibrillaires) qui se resserre, probablement en raison de l'augmentation de la pression intraoculaire.

→ Loïc Mangin

K.-A. Stokkan et al., Proc. R. Soc. B, vol. 280, 20132451, 2013

© Vitaly Titov & Maximov/Shutterstock.com

Les rennes s'adaptent à la faible luminosité hivernale grâce à une modification du *tapetum lucidum*, la surface réfléchissante qui tapisse le fond de leurs yeux : il devient bleu *(a)* alors que l'été, il est plutôt jaune *(b)*. La barre représente un centimètre.

Physique des particules

Pas de matière noire pour LUX

Aux États-Unis, au fond d'une mine du Dakota du Sud, à plus de quatre kilomètres de profondeur, le détecteur LUX traque la matière noire. La nature de cette dernière n'est pas encore connue, mais s'il s'agit de particules exotiques, les physiciens espèrent observer leurs collisions avec des atomes de xénon dans la cuve de leur dispositif. Si ces interactions existent, elles sont rares, et les chercheurs ne savent pas exactement avec quelle probabilité elles se produisent. Après trois mois d'enregistrement de données, LUX n'a révélé aucun signal intéressant. Ce résultat négatif permet néanmoins aux physiciens d'exclure des particules candidates au titre de matière noire dont la probabilité d'interaction est relativement élevée. Ainsi, certains signaux mesurés par d'autres expériences, que l'on pouvait éventuellement attribuer à de la matière noire, sont disqualifiés.

→ S. B.

D.S. Akerib et al., prépublication (http://arxiv.org/abs/arXiv:1310.8214)

MUSÉUM
NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE
paléontologie

A worlwide review of fossil and extant glypheid and litogastrid lobsters (Crustacea, Decapoda, Glypheoidea)
Sylvain Charbonnier, Alessandro Garassino, Günter Schweigert & Martin Simpson

583 figures couleur • 20 tableaux • texte en anglais • 220 x 275 mm • relié • 304 p. • 69€ TTC
ISBN 978-2-85653-706-0 • collection mémoires

Ce volume est consacré à la première révision mondiale des glyphées fossiles et actuelles. Ces crustacés forment un groupe particulier de langoustes qui est très diversifié dans le registre fossile. Les glyphées sont apparues au Trias, ont prospéré au Jurassique et ont décliné entre le Crétacé et l'Éocène. Elles étaient considérées comme éteintes jusqu'à la découverte de deux espèces actuelles dans le Pacifique.
Depuis 1822, plus de 120 espèces de glyphées ont été décrites et de nombreux problèmes de nomenclature, de taxonomie et de classification se sont accumulés dans la littérature. L'objectif principal de l'ouvrage est, à travers une approche synoptique, de mettre à jour la littérature ancienne et de réviser tous les genres et toutes les espèces de glyphées à partir de leur matériel type. Les diagnoses et les descriptions sont ici présentées de façon standard en utilisant une terminologie commune. Pour la première fois, des traductions en anglais des diagnoses anciennes permettent de comprendre comment a évolué notre conception du groupe des glyphées.
La plupart des taxons présentés ici sont richement illustrés : plus de 990 spécimens et 583 figures.
La méthodologie ainsi développée par les auteurs est appelée à devenir le standard pour tous les paléocarcinologues.

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

MUSÉUM PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES
MNHN.FR

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

Biochimie

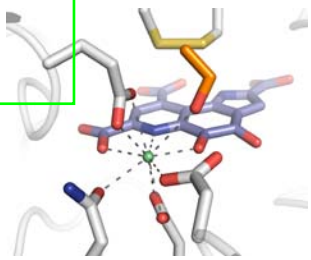
Des terres rares essentielles à certaines bactéries

Le cratère volcanique Solfatare, près de Naples, était considéré comme l'entrée des Enfers par les Romains. On y trouve aujourd'hui des mares de boue, chaudes et acides, où vivent des bactéries mal connues. Une équipe de l'Université Radboud de Nimègue, aux Pays-Bas, et une autre de l'Institut Max Planck de recherche médicale à Heidelberg, en Allemagne, ont étudié la bactérie *Methylacidiphilum fumariolicum*. Les biologistes ont montré que certaines enzymes synthétisées par la bactérie contiennent des atomes de « terres rares ». Ces éléments (cérium, lanthane, praséodyme, etc.) sont essentiels à son métabolisme. Cette observation est étonnante dans la mesure où les terres rares interviennent peu dans les processus biologiques.

M. fumariolicum se développe dans des conditions extrêmes, avec une température optimale de l'ordre de 50 à 60 °C et un *p*H acide, compris entre 2 et 5. Comme source d'énergie, elle utilise le méthane, abondant dans les mares. Pour en étudier le métabolisme, l'équipe de l'Université Radboud a cultivé en laboratoire ces micro-organismes. Elle a observé que la bactérie ne se développe qu'en présence d'eau des mares de la Solfatare, qui contient des terres rares à des concentrations 100 à 1 000 fois supérieures à celles trouvées généralement à la surface de la Terre. Thomas Barends et ses collègues ont déterminé la structure d'une des enzymes intervenant dans le métabolisme de la bactérie et ont remarqué un ion métallique non identifié au sein de cette protéine. Après analyse, les deux équipes ont conclu qu'il s'agissait d'un ion de cérium, un élément des terres rares.

→ S. B.

A. Pol et al., Environmental Microbiol., doi : 10.1111/1462-2920.12249, 2013



© T. Barends, et al.

Un ion de terre rare *(en vert)* est niché au cœur d'une enzyme de la bactérie *Methylacidiphilum fumariolicum*.

© Pour la Science - n° 434 - Décembre 2013

Éthologie

L'éléphant choisit ce qu'on lui montre du doigt

Pour attirer l'attention sur un objet, on le pointe souvent du doigt. Anna Smet et Richard Byrne, de l'Université de St Andrews, au Royaume-Uni, ont montré que les éléphants d'Afrique comprennent spontanément ce geste.

Les éléphants étaient confrontés à deux récipients, dont l'un contenait de la nourriture. Sans indice de l'expérimentateur, ils exploraient l'un ou l'autre de façon équiprobable. En revanche, quand l'expérimentateur pointait du doigt le récipient rempli, les animaux le choisissaient dans la plupart des cas, et ce sans y avoir été entraînés.

Les éléphants vivent en sociétés complexes et auraient développé au cours de l'évolution une grande capacité à interpréter les comportements. Pointent-ils aussi des objets de la trompe ? Cela reste à prouver.

→ G. J.

A. Smet et R . Byrne, Current Biology, en ligne le 10 oct. 2013

L'éléphant choisit le plus souvent le récipient pointé du doigt par l'expérimentateur.

© Anna F. Smet and Richard W. Byrne

Sciences sociales

L'originalité ne fait pas recette

En science, avoir de nouvelles idées est valorisé. Est-ce pour autant un gage de succès ? Des chercheurs américains ont montré que pour avoir un impact élevé – être abondamment cité –, un article scientifique doit introduire une petite part de nouveauté, mais surtout se référer à des travaux connus. Les chercheurs ont analysé près de 18 millions d'articles et ont défini un « score de classicisme » associé aux références classiques, très partagées, et un « score d'originalité » pour les références peu partagées révélant des influences originales.

L'analyse a mis en évidence qu'un ancrage classique est aussi important qu'une part d'originalité, et que la combinaison des deux double les chances d'avoir un impact élevé. Par ailleurs, les articles écrits en équipe sont en général plus originaux, mais aussi plus ancrés dans des travaux classiques.

→ Philippe Ribeau-Gésippe

B. Uzzi et al., Science, 25 octobre 2013

Géophysique

La rotation du noyau terrestre enfin comprise ?

La Terre tourne sur elle-même vers l'Est en quasiment 24 heures. Il n'en va pas de même de son noyau. Le noyau interne, en fer solide, tourne dans le même sens, mais plus vite. Le noyau externe, constitué de fer liquide, tourne pour sa part en sens inverse, vers l'Ouest ! Philip Livermore, de l'Université de Leeds, en Grande-Bretagne, et ses collègues ont montré que ces mouvements du noyau sont liés et contrôlés par le champ magnétique terrestre.

La circulation du fer dans le noyau liquide engendre, par effet dynamo, le champ magnétique terrestre (de l'ordre de 10^{-4} tesla à la surface de la planète). Les géophysiciens ont observé depuis longtemps que ce champ se décale vers l'Ouest, ce qui suggère que le noyau liquide est animé d'un mouvement similaire. En outre, l'analyse de l'aimantation rémanente des roches montre que sur les 3 000 dernières années, le champ magnétique s'est déplacé vers l'Ouest à une vitesse variable, mais aussi vers l'Est. Rappelons qu'en se refroidissant après avoir été chauffées, certaines roches enregistrent l'orientation du moment magnétique : c'est l'aimantation rémanente.

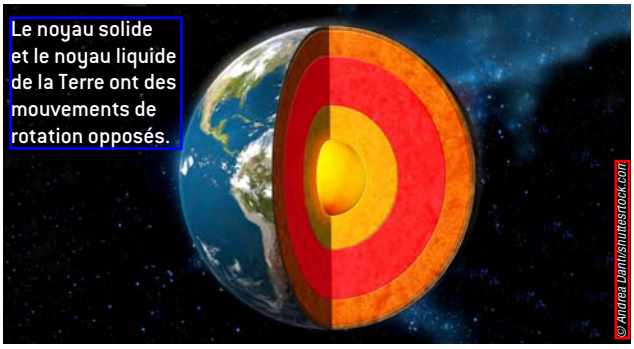
L'étude des ondes sismiques qui se propagent dans tout le globe terrestre a par ailleurs révélé que le noyau interne tourne vers l'Est et devance en moyenne le mouvement de la surface de la planète de quelques degrés par an.

P. Livermore et ses collègues se sont intéressés à l'interaction des composantes du noyau et du champ magnétique. Ils ont mis au point une simulation en trois dimensions du centre de la planète qui permet d'étudier des scénarios où la viscosité du fer liquide (qui n'est pas précisément connue) est 100 fois inférieure à celle des simulations précédentes. Cette viscosité joue un rôle crucial dans la dynamique du fluide ferreux et, par conséquent, sur l'effet dynamo et la structure du champ magnétique.

Avec leur simulation, les géologues ont ainsi mis en évidence que, dans des régimes de faible viscosité, certains couples de forces deviennent importants. Ces couples d'axe Nord-Sud agissent, les uns sur la partie la plus externe du noyau liquide, les autres dans le noyau solide. Ils ont la même intensité, mais des sens opposés. De quoi expliquer les mouvements opposés des noyaux interne et externe ?

→ S. B.

P. W. Livermore et al., PNAS, en ligne, 16 septembre 2013



Le noyau solide et le noyau liquide de la Terre ont des mouvements de rotation opposés.

© Andrea Danti/shutterstock.com

En bref

Climat et activité humaine

La vitesse du réchauffement climatique n'est pas constante. Selon une analyse statistique réalisée au Centre des sciences de l'atmosphère de Mexico, on constate des ralentissements quand les pratiques changent. Ce fut le cas à partir de 1989 avec la réduction des émissions de gaz à effet de serre due à une nouvelle législation, et lors de trois périodes de faible activité économique qui ont diminué les émissions de dioxyde de carbone : les deux guerres mondiales et la Grande Dépression. Encore une preuve de l'influence humaine ?

Entendre avec les yeux

Les implants cochléaires, des neuroprothèses qui stimulent le nerf auditif, permettent à des personnes devenues sourdes de suivre une conversation. Toutefois, le niveau de récupération est inégal. Kuzma Strelnikov, du CNRS, et ses collègues, ont montré qu'il est lié au degré d'activation de certaines aires cérébrales, tel le cortex visuel, lors de tests simples juste après la pose de l'implant. Ils l'expliquent notamment par l'importance de la lecture sur les lèvres dans la compréhension de la parole.

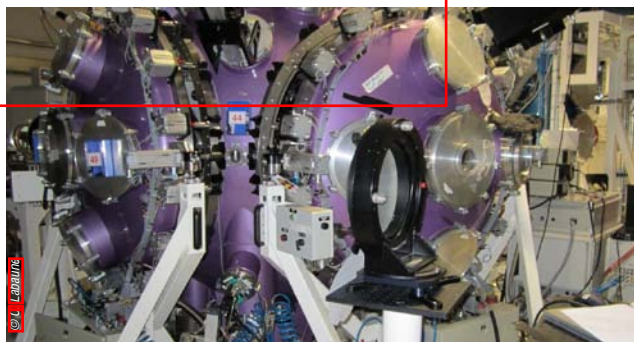
Physique

La fusion hydrogène-bore en progrès

La fusion hydrogène-bore est une alternative à la fusion deutérium-tritium, et une équipe franco-américaine vient de multiplier par 100 le taux de telles réactions de fusion obtenues.

C'est en 2005 qu'une équipe russe a réalisé pour la première fois la fusion entre un atome d'hydrogène et un atome de bore 11, produisant trois atomes d'hélium 4 et de la chaleur. La masse du bore est bien supérieure à celles du deutérium et du tritium, de sorte que la température du plasma doit être dix fois supérieure à celle que nécessite la fusion deutérium-tritium avec gain d'énergie. Néanmoins, les physiciens russes avaient obtenu un millier de réactions en tirant des impulsions laser picosecondes (10^{-12} seconde) sur du bore.

Autour de Christine Labaune, de l'École polytechnique, l'équipe franco-américaine a amélioré ce principe en dirigeant un torrent de protons arrachés à une feuille d'aluminium vers l'échantillon de bore au moment même où celui-ci passait à l'état de plasma à l'aide d'une impulsion laser nanoseconde (10^{-9} seconde). Les chercheurs ont ainsi déclenché 100 fois plus de fusions qu'en 2005.



La chambre expérimentale où a été réalisée l'expérience de fusion.

Même si le résultat obtenu est loin du seuil de production d'énergie, ce changement d'échelle est encourageant pour la voie hydrogène-bore, dont l'immense intérêt est de ne pas produire, contrairement à la fusion deutérium-tritium, de neutrons rapides qui détruisent tous les matériaux.

Peut-être une combinaison astucieuse de lasers, de particules accélérées et autres combustibles adaptés nous offrira-t-elle enfin une fusion exploitable industriellement ?

→ F. S.

Nature Comm., 8 octobre 2013

Paléontologie

310 millions d'années d'insectes modernes

Il y a 65 millions d'années, une grande crise balaie les dinosaures, épargnant quelques espèces de mammifères. S'ensuit une explosion de la biodiversité de ces derniers, qui sont aujourd'hui les nouveaux maîtres de la Terre. Maîtres ? Oui chez les vertébrés, mais pas chez les invertébrés, où ce sont les insectes présentant quatre stades de développement (les holométaboles) qui dominent. Or avec des collègues, André Nel, du Muséum national d'histoire naturelle de Paris, vient de prouver que cet ensemble à l'origine de la quasi-totalité des insectes actuels existait déjà il y a quelque 310 millions d'années.

Les chercheurs ont en effet retrouvé dans les blocs de charbon d'un terril à Avion, dans le Pas-de-Calais, cinq espèces d'insectes datant de l'étage du Carbonifère (358,9 à 298,9 millions d'années) nommé Moscovien (317,2 à 307 millions d'années). Les cinq espèces sont *Avioxyela gallica* (une espèce volante partageant des caractères avec les hyménoptères), *Stephanastus polinae* (apparentée aux coléoptères), *Metabolarva bella* (une larve difficile à rapprocher d'un ordre existant), *Aviorrhyncha magnifica* (un membre ancien de l'ordre des hémiptères) et *Westphalopsocus pumilio* (un psocoptère). Ces insectes mesuraient manifestement quelques dizaines de millimètres et non pas des dizaines de centimètres, comme la plupart des insectes du Carbonifère connus jusqu'à présent, telle la libellule géante *Meganeura monyi*, dont les ailes avaient une envergure de 70 centimètres. Selon A. Nel, cette différence d'échelle explique sans doute pourquoi les holométaboles du Carbonifère sont passés inaperçus. Toutefois, ils ont existé et vécu dans l'ombre des insectes géants, comme nos ancêtres mammifères ont vécu dans celle des dinosaures.

L'aile antérieure d'*Aviorrhyncha magnifica*, le plus ancien hémiptère jamais trouvé, qui date du Carbonifère supérieur (environ 310 millions d'années).

→ F. S.

Nature, en ligne le 16 octobre 2013

© Pour la Science - n° 434 - Décembre 2013

Neurobiologie

Hippocampe et tentations

Pourquoi certaines personnes résistent-elles aux plaisirs immédiats et pensent-elles aux bénéfices qu'elles en tireront à long terme, alors que d'autres cèdent rapidement ? L'équipe de Mathias Pessiglione, de l'Institut du cerveau et de la moelle épinière à Paris, a montré que l'hippocampe, siège cérébral de la mémoire épisodique, joue un rôle central dans la prise de décision, notamment parce qu'il permet aussi d'imaginer des événements futurs. Les neurobiologistes ont présenté à une vingtaine de volontaires, par exemple, des aliments soit sous forme de photographies (pour les récompenses accessibles immédiatement), soit sous forme de textes (pour les récompenses futures que les participants devaient imaginer). Les sujets faisaient leur choix pendant qu'on enregistrait leur activité cérébrale. Par rapport aux individus optant pour la récompense immédiate, ceux qui choisissaient les récompenses imaginées – à long terme – présentaient un hippocampe plus actif. Imaginer une récompense différée nécessite un effort mental, ce qui expliquerait pourquoi on cède souvent à la tentation…

→ Bénédicte Salthun-Lassalle

M. Lebreton et al., PLoS Biology, en ligne le 22 octobre 2013

Astrophysique

La lentille gravitationnelle la plus lointaine

Certains objets sont si éloignés dans l'Univers que même les plus puissants télescopes ne peuvent les observer. Mais il existe des sortes de télescopes naturels qui peuvent amplifier la lumière provenant d'objets lointains et les rendre visibles : les lentilles gravitationnelles. Ce phénomène, expliqué par la théorie de la relativité générale d'Einstein, permet aux astronomes d'observer des galaxies extrêmement éloignées. Il nécessite qu'un corps massif soit présent sur la ligne de visée d'une source lumineuse. Les rayons lumineux de la source sont déviés et focalisés, ce qui augmente l'intensité perçue.

Arjen van der Wel, de l'Institut Max-Planck d'astronomie à Heidelberg, et ses collègues ont ainsi observé une galaxie dont la lumière met 12,2 milliards d'années pour nous parvenir. Une autre galaxie joue le rôle de lentille gravitationnelle. Depuis la lentille, la lumière met 9,4 milliards d'années pour arriver sur Terre, ce qui en fait la lentille gravitationnelle la plus lointaine connue.

→ S. B.

A. van der Wel et al., à paraître dans The Astrophysical Journal Letters, 2013

Environnement

Qualité de l'air et développement *in utero*

Depuis quelques décennies, si les émissions de plusieurs polluants atmosphériques ont diminué en Europe, d'autres polluants, tels que les particules fines (inférieures à dix micromètres), l'ozone et le dioxyde d'azote, restent en concentrations importantes dans l'air, entraînant diverses pathologies respiratoires, cardio-vasculaires, immunitaires et neurologiques. Une vaste étude coordonnée en France par Rémy Slama, de l'Institut Albert Bonniot (U823 Inserm), à Grenoble, montre à présent que les particules fines et le dioxyde d'azote ont aussi un impact sur le développement des fœtus.

En réunissant les données de 14 cohortes conduites dans 12 pays européens, les épidémiologistes ont extrait et analysé les informations concernant 74 000 femmes ayant accouché entre 1994 et 2011, et ont évalué les concentrations en particules fines et en dioxyde d'azote à leur domicile durant leur grossesse. Ils ont ainsi observé que l'exposition de femmes enceintes aux particules fines inférieures à 2,5 micromètres, au dioxyde d'azote ou à un trafic routier dense augmente le risque de donner naissance, à terme, à des bébés de petit poids (inférieur à 2,5 kilogrammes), plus fragiles. Et ce, même si les concentrations sont inférieures à la limite légale imposée par l'Union européenne (25 microgrammes par mètre cube). En particulier, une exposition *in utero* est associée à une réduction de la circonférence crânienne moyenne à la naissance.

Si l'on parvenait à limiter les émissions de ces particules fines à dix microgrammes par mètre cube (une recommandation de l'Organisation mondiale de la santé), 22 pour cent des cas de bébés ayant un petit poids de naissance à terme pourraient être évités, concluent Rémy Slama et ses collègues. Aujourd'hui, selon le dernier rapport sur la qualité de l'air en Europe publié en octobre par l'Agence européenne pour l'environnement, 90 pour cent de la population urbaine européenne sont exposés à des concentrations supérieures…

→ M.-N. C.

M. Pedersen et al., The Lancet Respiratory Medicine, 2013

Biologie moléculaire

Des abeilles qui ont disparu avec les dinosaures

La chute sur Terre d'une météorite géante qui a vraisemblablement entraîné l'extinction des dinosaures a-t-elle épargné les insectes ? Oui, mais une étude réalisée par Sandra Rehan, de l'Université du New Hampshire, aux États-Unis, et ses collègues suggère qu'une famille d'abeilles a aussi connu une extinction massive.

Les biologistes ont utilisé une méthode phylogénétique consistant à reconstruire l'arbre évolutif des abeilles. Ils se sont concentrés sur une sous-famille ancienne et diversifiée, celle des xylocopes *(Xylocopinae)*. Leurs résultats montrent que l'origine de cette sous-famille remonte à environ 100 millions d'années, ce qui est cohérent avec de précédentes estimations.

Ils révèlent aussi une stagnation du nombre d'espèces commençant avant l'extinction des dinosaures et se terminant peu après. Pour les biologistes, qui se fondent également sur certaines données paléontologiques, cela traduit une diversification intense annulée par une extinction brusque et massive. Cependant, selon André Nel, du Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, ces résultats sont à prendre avec prudence, car on manque de fossiles d'insectes pour les confirmer.

→ G. J.

S. Rehan et al., PLoS One, 2013

Une abeille actuelle de la sous-famille des xylocopes.

DERNIÈRE minute...

PETITE OU GRANDE BOUCHE

La larve de ver *Pristionchus pacificus* peut, selon les conditions environnementales, développer une grande bouche de prédateur ou une petite bouche pour manger des bactéries. Ainsi, si la population de vers est grande ou si la nourriture est rare, le ver développera une grande bouche. L'équipe de Ralf Sommer, de l'Institut Max-Planck de biologie du développement à Tübingen, en Allemagne, a identifié le gène *eud-1*, qui sert à sélectionner l'une ou l'autre des deux formes. On nomme plasticité phénotypique la capacité d'un organisme à exprimer différents phénotypes selon l'environnement.

REGARD ET AUTISME

Les enfants autistes évitent le contact visuel. Cette caractéristique, qui aide à établir le diagnostic après deux ans, serait en fait décelable dès l'âge de deux mois, selon une étude de Warren Jones et Ami Klin, du Centre d'autisme Marcus à Atlanta (États-Unis). En suivant 110 enfants depuis la naissance, dont 13 sont devenus autistes, ils ont montré que le contact visuel des enfants autistes s'est réduit entre deux et six mois, alors qu'il était normal auparavant. Pourrait-on utiliser un tel dépistage pour prendre en charge plus tôt les enfants concernés ?

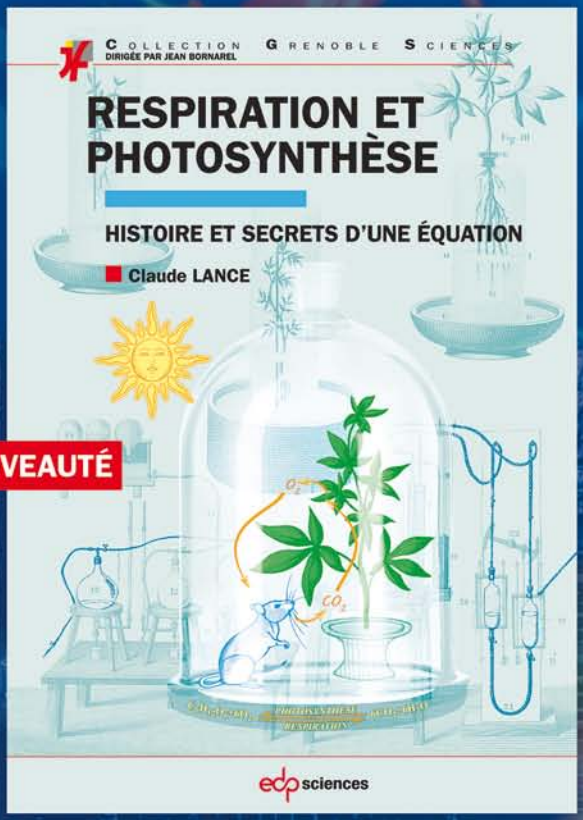
Retrouvez plus d'actualités et toutes les références sur www.pourlascience.fr

© Pour la Science - n° 434 - Décembre 2013

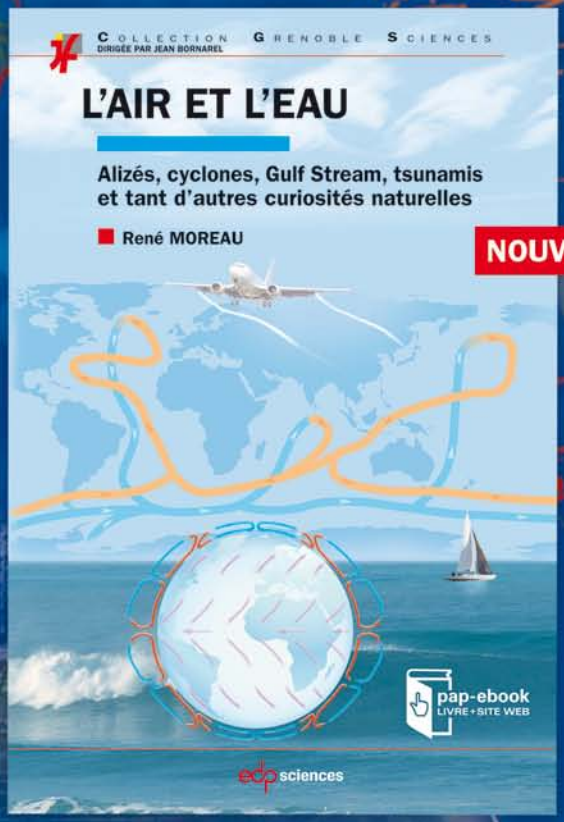
GRENOBLE SCIENCES

CONSEIL ■ EXPERTISE ■ LABELLISATION ■ ÉDITION

GRENOBLE SCIENCES est un centre de conseil et d'expertise.
Le label *Grenoble Sciences* n'est attribué qu'aux ouvrages ayant atteint la qualité scientifique et pédagogique optimale.



NOUVEAUTÉ



NOUVEAUTÉ

■ **Pour cette fin d'année 2013, Grenoble Sciences vous propose une sélection de livres à glisser sous le sapin de Noël ! ...**
(éditeur EDP Sciences)

... et d'autres ouvrages pour divers publics à découvrir sur le site de Grenoble Sciences.

POUR COMMANDER

Ces ouvrages sont en vente dans le rayon *Sciences* des librairies ou sur internet :
http://www.edition-sciences.com

■ GRENOBLE SCIENCES

Université Joseph Fourier GRENOBLE

http://www.grenoble-sciences.com

Grenoble Sciences, Université Joseph Fourier, Bât. B de Phitem,
230 rue de la Physique – BP 53, 38041 Grenoble cedex 9
Tél. (33)4 76 51 46 95 – Fax. (33)4 76 51 45 79
Email : Grenoble.Sciences@ujf-grenoble.fr

Région RhôneAlpes

POINT DE VUE

Cigarette électronique et santé publique

Même si sa non-toxicité à long terme reste à prouver, la cigarette électronique devrait jouer un rôle positif dans l'aide au sevrage tabagique.

Marion ADLER

La cigarette électronique, ou e-cigarette, jouit depuis deux ans d'un succès manifeste et d'un essor impressionnant. En France, le nombre de ses consommateurs a récemment dépassé le million. En même temps, la consommation de tabac sous forme classique a baissé de plus de sept pour cent, sur une population de 13,5 millions de fumeurs.

Reste que, face à ce succès fulgurant, plusieurs questions se posent. La cigarette électronique est-elle vraiment moins toxique que la cigarette classique ? Aide-t-elle à arrêter de fumer ? Son utilisation chez les jeunes n'ouvre-t-elle pas la voie à l'habitude de fumer et à une dépendance vis-à-vis de la nicotine ?

Avant de donner quelques éléments de réponse, expliquons en quoi consiste une cigarette électronique. Il en existe diverses variantes plus ou moins perfectionnées, permettant par exemple de calibrer à volonté les bouffées. Pour l'essentiel, une telle cigarette est constituée d'un tube contenant un liquide et d'une résistance chauffante alimentée par une batterie au lithium. Sous l'effet de la chaleur, le liquide s'évapore.

Ce liquide comporte surtout du propylène glycol ou du glycérol, substances inodores, et divers parfums. Il peut être dépourvu de nicotine ou en contenir des quantités plus ou moins importantes selon le souhait de l'utilisateur (la dose maximale de nicotine autorisée en France est de 20 milligrammes par millilitre). L'utilisateur appuie sur un bouton qui permet de chauffer la résistance et de faire sortir une « vapeur », d'aspect similaire à la fumée de cigarette. « Vapoter » consiste à aspirer cette vapeur.

Les vapoteurs inhalent-ils des substances toxiques ? Quelques études et rapports alarmants ont été publiés ces dernières années. Toutefois, la qualité des produits était alors loin d'être optimale. Depuis, des progrès semblent avoir été accomplis, grâce à une meilleure fabrication ou à un plus grand respect des normes sur les produits de consommation courante.

Les études les plus récentes sont plus rassurantes, même s'il subsiste des questions sur l'effet à long terme de certaines substances. À titre d'exemple, Maciej Goniewicz et ses collègues, à l'Institut du cancer de Roswell Park, ont étudié dernièrement la présence de substances cancérogènes ou toxiques dans la vapeur de cigarettes électroniques de 12 marques. Ils ont notamment identifié quatre composés carbonyles que l'on retrouve dans toutes les cigarettes électroniques (formaldéhyde, acétaldéhyde, o-méthylbenzaldéhyde et acroléine), ainsi que deux nitrosamines. Selon cette étude, la vapeur de cigarette électronique peut ainsi contenir des substances potentiellement toxiques, mais les concentrations relevées sont 9 à 450 fois inférieures à ce qu'elles sont dans la fumée de cigarette. La cigarette électronique semble donc *a priori* bien moins toxique que la cigarette classique – dont la fumée, rappelons-le, contient plus de 4 000 composés toxiques !

Il reste que ces conclusions devront être validées par des études cliniques, en particulier chez l'homme. Par ailleurs, les expositions au propylène glycol ou à la glycérine nécessitent plus de recherches. Ces produits n'ont pas entraîné jusqu'ici de problèmes de santé connus, mais les niveaux d'exposition atteints avec la cigarette électronique, en particulier par voie respiratoire, sont inédits.

Outre le fait que la cigarette électronique est *a priori* beaucoup moins toxique – au moins à court terme – que la cigarette ordinaire, elle constitue souvent une bonne aide au sevrage du tabac.

IL EST SANS DOUTE POSSIBLE D'ASSOCIER la cigarette électronique à tout traitement d'aide à l'arrêt du tabac, bien que des études d'efficacité restent à faire.

Il existe aujourd'hui des traitements d'aide à l'arrêt du tabac faisant appel à des médicaments ou bien à des substituts nicotiniques. Leur efficacité a été prouvée, à condition qu'ils soient prescrits avec des doses suffisantes de nicotine (ce n'est pas toujours le cas). On peut associer la cigarette électronique à ces traitements, son atout étant qu'elle induit un apport de nicotine à l'organisme assez semblable, en quantité et en rapidité, à celui d'une cigarette.

La cigarette électronique peut alors venir en complément à un patch, à la place (ou en plus) des formes orales de nicotine (gommes, pastilles, inhaleur ou spray buccal) qui soulagent plus lentement le manque. Son utilisation permet aussi au patient de diminuer peu à peu sa consommation de cigarettes jusqu'à l'annuler. Après avoir obtenu un sevrage

© Pour la Science - n° 434 - Décembre 2013

complet du tabac, on pourra, à ce stade, réduire très progressivement la dose de nicotine de la cigarette électronique.

Il est sans doute possible d'associer la cigarette électronique à tout traitement d'aide à l'arrêt du tabac, bien que des études d'efficacité, portant sur les modèles récents de cigarette électronique et comportant les protocoles d'utilisation de substituts nicotiniques les plus efficaces (association de patch avec des formes orales), restent à faire.

En mai dernier, le ministère de la Santé a annoncé l'interdiction de la vente de cigarettes électroniques aux mineurs, l'interdiction de la publicité et l'interdiction de vapoter dans les lieux publics. C'est une mesure importante et positive : d'une part, la similitude du vapotage avec l'acte de fumer du tabac peut stimuler l'envie des fumeurs et rendre leur sevrage plus difficile ; d'autre part, celles situées à proximité d'un vapoteur absorbent certaines substances, dont la nicotine, et les asthmatiques se plaignent parfois d'irritations des voies respiratoires. Reste à faire appliquer la réglementation...

Un autre inconvénient de la cigarette électronique est qu'elle pourrait faciliter chez les jeunes le passage à la cigarette classique et ainsi renforcer le tabagisme. Les liquides de vapotage contiennent de plus en plus de parfums sucrés, appréciés des jeunes consommateurs, cibles des fabricants. Ceux qui se mettent à la cigarette électronique sans jamais avoir fumé sont-ils davantage susceptibles de devenir dépendants de la nicotine et de passer aux cigarettes classiques ? La question reste ouverte en attendant des études sérieuses.

Ainsi, pour l'heure, le recul manque pour que l'on confirme la non-toxicité à long terme de la cigarette électronique, ainsi que pour être certain qu'elle ne renforcera pas le tabagisme chez les jeunes. Ne contenant ni goudrons, ni monoxyde de carbone, ni produits de combustion, elle semble beaucoup moins nocive que la cigarette qui, elle, tue un fumeur sur deux. Et elle aide déjà bon nombre de fumeurs à se sevrer du tabagisme. En dépit des incertitudes qui restent à lever, l'apport de la cigarette électronique à la santé publique semble positif. ■

Marion ADLER est médecin généraliste et tabacologue à l'Hôpital Antoine-Béclère, à Clamart.

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

DÉVELOPPEMENT DURABLE

Comment refroidir de façon durable ?

La production de froid, notamment pour la climatisation et la conservation des aliments, est devenue massive. Mais il est nécessaire de réduire la consommation d'énergie et la pollution qui lui sont associées.

Didier COULOMB

Selon une étude publiée en 2013 par l'Institut de technologie du Massachusetts (MIT), la mortalité durant les périodes de grande chaleur a chuté de 80 pour cent aux États-Unis entre la période 1900-1959 et la période 1960-2004, principalement grâce à la généralisation des climatiseurs. Ce chiffre illustre l'importance de la production de froid. Inventée il y a près de 150 ans, la méthode est aujourd'hui utilisée dans de multiples secteurs : santé (conservation de médicaments ou d'embryons, refroidissement des aimants des scanners), énergie (liquéfaction du gaz naturel), alimentation, habitation, environnement (capture et stockage du dioxyde de carbone atmosphérique), etc.

L'utilisation du froid s'accroîtra encore fortement au XXIe siècle, en particulier dans les pays en développement, où les besoins associés à la climatisation et à la chaîne de production alimentaire sont loin d'être comblés : quelque 23 pour cent des produits alimentaires y sont perdus par défaut de réfrigération (9 pour cent dans les pays développés). L'accroissement de la population ne fera qu'accentuer le phénomène. Comment limiter les nombreux impacts environnementaux de la production de froid ?

En général, le froid est produit en absorbant dans une enceinte de la chaleur grâce à un fluide, dit frigorigène, et en la relâchant hors de l'enceinte. Ce fluide circule et subit un cycle thermodynamique de compression et de détente (au cours de laquelle le froid est produit). Les impacts environnementaux sont dus à la consommation d'énergie (environ 15 pour cent de l'électricité mondiale servent à produire du froid) et à la pollution liée aux fluides frigorigènes. Ces derniers peuvent s'échapper en raison de fuites, d'erreurs de maintenance ou lors de la mise en décharge des équipements. Les frigorigènes

étant volatils, ils s'évaporent : selon les équipements, jusqu'à 20 pour cent du fluide se retrouvent dans l'atmosphère.

En 1974, on a découvert un trou dans la couche d'ozone stratosphérique, au-dessus du pôle Sud. Or cette couche nous protège des ultraviolets, responsables de certains cancers de la peau. Les produits chimiques contenant du chlore (cas de la plupart des frigorigènes utilisés depuis 1930) ayant été en partie tenus pour responsables de sa dégradation, un protocole international a été signé en 1987 à Montréal. Il a interdit l'utilisation des chlorofluorocarbures (CFC) et des hydrochlorofluorocarbures (HCFC), en laissant un certain délai d'adaptation aux constructeurs. Le plus souvent, ces produits ont été remplacés par des hydrofluorocarbures (HFC), qui n'ont aucun impact sur la couche d'ozone, laquelle est stabilisée et devrait se reconstituer d'ici une cinquantaine d'années.

CERTAINS FRIGORIGÈNES EXERCENT un effet de serre plusieurs milliers de fois plus puissant que le dioxyde de carbone.

Cependant, les frigorigènes fluorés, tels les hydrofluorocarbures, sont des gaz à effet de serre. Ils représentent près de deux pour cent des émissions annuelles de ces gaz en équivalent CO_2, car, bien que beaucoup moins abondants que le dioxyde de carbone, ils exercent parfois un effet de serre plusieurs milliers de fois plus puissant. Du fait de la croissance des besoins en froid, les hydrofluorocarbures pourraient représenter près de sept pour cent des émissions annuelles de gaz à effet de serre à l'horizon 2050. Et les frigorigènes ne représentent que 15 pour cent des émissions liées aux systèmes réfrigérants, le reste étant associé à la production de l'énergie nécessaire à leur fonctionnement.

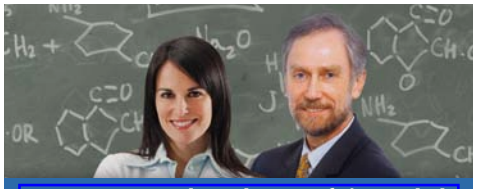
Pour diminuer la consommation énergétique, on cherche à améliorer l'isolation, ainsi qu'à concevoir des équipements plus économes et des systèmes intégrés (où aussi bien la chaleur que le froid produits sont utilisés pour différentes applications). En outre, le développement des énergies renouvelables permettra de diminuer les émissions de dioxyde de carbone associées à la production de l'électricité nécessaire.

Les frigorigènes fluorés sont visés par les mesures et les conventions internationales sur les gaz à effet de serre depuis plus de 20 ans. Il est aujourd'hui difficile de s'en passer totalement, car on ne dispose pas d'équipements alternatifs efficaces et compétitifs pour toutes les applications.

Cependant, toute une panoplie de mesures a été ou sera bientôt déployée, afin de permettre une adaptation progressive. On limite les fuites grâce à la formation du personnel qui manipule les fluides et à la certification des entreprises. On récupère de plus en plus les fluides usagés, qui sont soit recyclés, soit détruits dans des usines spécialisées. On réduit la quantité de fluide utilisé par équipement grâce à une conception améliorée. On confine le frigorigène dans un dispositif hermétique chargé d'abaisser la température d'un fluide anodin, telle l'eau, qui transporte ensuite le froid jusqu'au lieu à rafraîchir. On emploie des fluides à effet de serre faible ou nul, tels des hydrocarbures ou de l'ammoniac. On promeut des technologies sans fluide.

Toutes ces mesures sont encadrées par la loi et le seront de plus en plus. Des négociations sont en cours aux échelles européenne et mondiale pour élaborer de nouveaux règlements qui viseront à interdire progressivement l'usage de fluides à très fort effet de serre (en tenant compte de la durée de vie des équipements, en moyenne d'une vingtaine d'années). Ils devront intégrer une adaptation des réglementations de sécurité, les frigorigènes à faible effet de serre étant le plus souvent inflammables. En outre, il faudra informer toutes les entreprises. C'est à ce prix qu'une vague de froid – bénéfique – pourra continuer à se répandre ! ■

Didier COULOMB est directeur de l'Institut international du froid, basé à Paris.



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

© Pour la Science - n° 434 - Décembre 2013

En 2014 nous recrutons

300 chercheurs (h/f)

- Biologie
- Chimie
- Écologie & Environnement
- Homme & Société
- Ingénierie & Systèmes
- Mathématiques
- Nucléaire & Particules
- Physique
- Sciences de l'information
- Terre & Univers

© CNRS Photothèque/IPEV / Franck DELBART, © CNRS Photothèque / Hubert RAGUET

Le CNRS ➤ révélateur de talents

Les personnes en situation de handicap peuvent également être recrutées par voie contractuelle.

cnrs
dépasser les frontières

www.cnrs.fr

Inscriptions aux concours sur le site **www.cnrs.fr**
du 2 décembre 2013 au 6 janvier 2014

Suivez Emploi CNRS

Les fleurs et les rubans de glace

Quand les conditions météorologiques sont favorables, les tiges de certaines plantes donnent naissance à de magnifiques structures de glace. Un phénomène rare et partiellement élucidé.

James R. Carter

Pour observer des fleurs de glace, il faut vous extraire de votre lit bien chaud aux premières heures d'une matinée hivernale et aller faire une longue promenade en forêt. Mais les trésors qui vous attendent méritent bien cet effort ! Si les conditions météorologiques et la flore locale sont adéquates, vous apercevrez des formations glacées éphémères, bourgeonnant à partir de tiges de végétaux : un jardin de glace.

J'ai observé par hasard, pour la première fois, ces sculptures naturelles de glace en décembre 2003, lors d'une randonnée dans le Tennessee. Je n'ai pas pu expliquer ce que j'avais vu jusqu'à ce que je fasse une recherche sur Internet ; mais une année plus tard, j'ai découvert des formations glacées similaires dans une région différente et associées à un autre type de plante. En novembre 2005, je roulais dans le Nord du Kentucky, et j'en observais par hasard sur le bord de la route, où des plantes avaient été fauchées. Des volutes de glace rayonnaient dans toutes les directions à partir de tiges dont le sommet avait été coupé.

L'ESSENTIEL

- Les fleurs de glace se forment sur les tiges d'une quarantaine d'espèces végétales.
- Ces structures peuvent naître lorsque la température ambiante est basse et le sol humide, mais non gelé.
- L'eau du sol est aspirée par capillarité et remonte dans la tige par des canaux. Elle ressort sur les côtés et gèle. Le processus alimente en continu la formation d'un ou de plusieurs rubans de glace.
- Un processus physique similaire est observé avec des pierres poreuses.

Toutes les photographies sont de James Carter, sauf mention contraire.

J'ai continué à observer ces formations pendant quelques dizaines de kilomètres. Cette région était riche en espèces végétales capables de former des fleurs de glace, et les conditions de température et d'humidité étaient idéales ce jour-là. J'ai poursuivi mon exploration afin de mieux comprendre le phénomène et d'en apprendre plus sur les facteurs requis pour créer ces merveilles glacées *(voir les figures 2 et 3)*.

Un jardin de glace éphémère

Quelques jours plus tard, en Virginie centrale, par un matin glacial qui succédait à une journée pluvieuse, je suis sorti chercher de nouveaux exemplaires de ces fleurs de glace. Le long d'un chemin en terre battue, je les ai découvertes sous trois formes : des rubans de glace à la base de petites tiges, des aiguilles de glace soulevant une mince couche de terre et une baguette de glace s'élevant jusqu'à environ cinq centimètres du sol. L'année suivante, je suis revenu sur les lieux de ma première observation dans

© Pour la Science - n° 434 - Décembre 2013

1. LES FLEURS DE GLACE ne se forment pas par condensation de vapeur d'eau, mais à partir du liquide qui s'échappe de la tige et gèle. Le processus est continu, ce qui conduit à la formation de rubans de glace.

le Tennessee et j'ai recueilli des graines de l'un des végétaux produisant de la glace, une plante nommée *Verbisina virginica*, pour les rapporter dans mon jardin dans l'Illinois. L'hiver suivant, j'avais mes propres fleurs de glace, ce qui a beaucoup facilité l'observation de leur formation et le décryptage des conditions favorables à ce phénomène.

Les pionniers de la fleur de glace

Tandis que je tentais de percer les secrets de ces fleurs de glace, je me suis plongé dans certains articles historiques sur le sujet. Plusieurs des végétaux produisant des fleurs de glace sont connus sous des noms vernaculaires, en particulier *frostweed* et *frost-plant* en anglais, qui signifient littéralement « herbe de givre » et « plante de givre » ; cela indique que leurs étonnantes « fleurs » hivernales sont connues depuis bien longtemps. Les premiers comptes rendus publiés remontent au début des années 1800.

Un article remarquable a été écrit par John Herschel, le fils de l'astronome William Herschel qui a découvert la planète Uranus. En 1833, il publia un article illustré dans la revue *Philosophical Magazine*, où il écrivait que la glace « semblait émerger comme une sorte de ruban – ou une excroissance ondulée en forme de papillote – comme s'il s'agissait d'un procédé d'extrusion d'un état mou présent à l'intérieur de la tige poussé vers l'extérieur par des fissures longitudinales sur les côtés de la tige [...]. La structure de ces rubans était fibreuse, comme celle de la variété fibreuse du gypse, qui présente une surface soyeuse brillante. »

Les observations de Herschel semblent avoir déclenché toute une série d'études sur le même sujet. L'une d'elles, parue dans un numéro de 1850 de la même revue, est du médecin et naturaliste John LeConte, de l'Université de Géorgie, aux États-Unis. LeConte a fait de nombreuses observations pertinentes sur des tiges entières ou coupées qui produisaient toutes de la glace. Il nota que de nombreuses tiges étaient mortes et sèches à la période de l'année où il fit son étude, bien que les racines aient pu être vivantes, et que la formation de glace n'ait pas semblé liée aux fonctions physiologiques de la plante. Il observait : « À une certaine distance, elles présentent l'aspect de boucles de coton

© Pour la Science - n° 434 - Décembre 2013

2. L'ASPECT DES FLEURS DE GLACE est très varié : dense et structuré *(en haut)* ou plus fin comme de la gaze *(en bas)*. Néanmoins, on retrouve dans toutes ces fleurs une structure striée. L'eau s'échappe par des pores alignés le long de la tige, puis gèle et forme des rubans striés.

variant de 8 à 13 centimètres de diamètre, situées autour du pied des plantes ; et quand elles sont nombreuses, l'effet est saisissant et magnifique. »

En 1892, le naturaliste américain William Hamilton Gibson décrivait une glace « scintillant comme de petits éclats de quartz blanc au milieu des herbes proches de la base de la tige. C'est une fleur de cristal de glace du blanc le plus pur qui "jaillit" de la tige, faisant éclater l'écorce, et prenant la forme fantasque de toutes sortes de boucles, collerettes et crêtes plumeuses ». Gibson nota que la taille de cette formation de glace semblait être plus grande que la quantité de sève qu'une plante pouvait produire, ce qui indiquait que l'humidité provenant du sol devait être en jeu.

Beaucoup d'autres chercheurs ont étudié les aspects de la physiologie des végétaux susceptibles d'être liés à la production de fleurs de glace. L'une des recherches les plus minutieuses est celle de William Coblentz, physicien au Bureau américain des normes, à Washington (qui a été remplacé en 1988 par l'Institut américain des normes et de la technologie, le NIST). En 1914, Coblentz coupa des tiges de plantes et les inséra dans un sol humide dans son laboratoire, afin de prouver que les racines n'étaient pas nécessaires pour former ces volutes de glace, et que cette glace ne se formait pas par condensation de la vapeur d'eau contenue dans l'air ambiant (comme c'est le cas pour le gel).

Différents noms, différents phénomènes

Un siècle plus tard, les fleurs de glace restent en grande partie une énigme. Il n'existe même pas de consensus sur la façon de les nommer. Ainsi, on trouve les fleurs de glace sous diverses dénominations, qui parfois se rapportent également à d'autres phénomènes : franges de glace, filaments de glace ou fleurs de givre. Ce dernier terme n'est pas approprié, car les fleurs de glace ne se forment pas de la même façon que le givre. En outre, le terme fleur de glace désigne aussi des structures gelées qui se forment à la surface de mers salées, mais là encore il s'agit d'un phénomène différent.

Robert Harms, de l'Université du Texas, au Centre de ressources sur la flore à Austin, a proposé le terme *crystallofolia*

© Pour la Science - n° 434 - Décembre 2013

(le nom latin pour « feuilles de glace ») pour décrire ces formations.

Après avoir commencé à faire pousser mes propres fleurs de glace, j'ai souhaité apprendre tout ce que je pouvais sur ce phénomène. Il y a eu peu d'études scientifiques sur le sujet, mais en rassemblant tout ce que l'on sait, une image globale commence à émerger.

La première observation est que toutes les plantes ne produisent pas des fleurs de glace. J'ai compilé des comptes rendus qui répertorient à travers le monde une quarantaine d'espèces productrices de glace. Toutes sont des espèces herbacées, ce qui signifie qu'elles n'ont pas de tige ligneuse et que leurs feuilles et leurs pousses se fanent à la fin de la saison de croissance. La plupart des fleurs de glace sont associées à des tiges séchées ou mortes, mais certaines peuvent apparaître sur des tiges vertes vers la fin de la saison de croissance, lorsque les températures sont favorables. En outre, une autre formation de glace, nommée cheveux de glace, ou chevelure de glace, ne pousse qu'à partir de bois mort *(voir la figure 4)*, mais le processus pourrait être distinct et impliquer des champignons.

Une quarantaine d'espèces produisent des fleurs de glace

Pour mieux comprendre comment les fleurs de glace se forment, R. Harms a étudié l'anatomie des espèces qui en fabriquent dans la nature. Il a remarqué que ces plantes ont un important système de canaux de transport de la sève et de l'eau, c'est-à-dire un important xylème. L'eau est aspirée du sol vers la tige par la conjonction d'un phénomène de capillarité et de la transpiration de l'eau par les feuilles. L'eau contenue dans les vaisseaux du xylème sort par des pores situés tout le long des canaux et passe dans les cellules du tissu adjacent, le parenchyme. Ces cellules forment un réseau perpendiculaire aux vaisseaux du xylème et transportent le liquide de l'intérieur vers la périphérie de la tige.

Quand les températures deviennent négatives, en automne et en hiver, la sève peut être en surfusion, situation où le liquide est à une température inférieure à la température de solidification, mais

3. DIFFÉRENTES ESPÈCES de plantes peuvent former des fleurs de glace. L'auteur en a répertorié une quarantaine. Toutes sont des herbacées telles que les dictames *(Cunila origanoides, en haut)* ou *Verbesina virginica (en bas)*.

© Pour la Science - n° 434 - Décembre 2013

DES FLEURS DE GLACE SUR DES TIGES VERTES

La plupart des fleurs de glace émergent de tiges desséchées et mortes. Mais à l'automne, des tiges vertes peuvent former des fleurs de glace, grâce à des conditions météorologiques particulières. J'ai observé cette boucle de glace *(ci-dessus)* longue de quatre centimètres par un matin calme de la fin du mois d'octobre, sur *Verbesina virginica*, une plante connue pour produire des fleurs de glace. À cette époque, la température devient négative, mais uniquement sur les surfaces à ciel ouvert. Seules deux tiges coupées, comme celle représentée ici, ont produit de la glace. Les feuilles des plantes non coupées protégeaient du gel leurs tiges, qui ne formaient donc pas de fleurs. Les spécialistes des fleurs de glace débattent encore pour savoir si la source principale de la glace est la sève déjà présente dans les tiges vertes ou de l'eau supplémentaire aspirée vers le haut à partir du sol. Lorsque des tiges mortes forment des fleurs de glace, de l'eau monte du sol par capillarité, ce qui suggère que ces structures naissent d'un processus de nature plutôt physique que biologique. Cependant, personne n'a encore étudié la composition chimique de la glace formée au-dessus de ces tiges vertes, pour voir si elle diffère ou non de celle de la glace formée sur les tiges mortes.

Le phénomène physique responsable de la croissance des rubans de glace est la ségrégation de glace. Il est possible d'en voir une autre manifestation dans la nature sous la forme d'aiguilles de glace qui poussent dans le sol *(a)*.

Les premières publications scientifiques sur les aiguilles de glace remontent au milieu des années 1800. Le phénomène de ségrégation de glace est à l'œuvre ici : le milieu sous-jacent doit avoir suffisamment de pores pour laisser l'eau remonter afin d'approvisionner la croissance de la glace. Ces pores doivent être assez petits pour que les forces de capillarité repoussent l'eau vers la surface. En 1981, Vernon Meentemeyer, de l'Université de Géorgie, et Jeffrey Zippin, ingénieur de l'armée américaine, ont remarqué que le sol doit contenir une quantité suffisante d'argile et de limon pour que sa po-

Des aiguilles de glace dans le sol.

© Pour la Science - n° 434 - Décembre 2013

SÉGRÉGATION DE GLACE ET MILIEUX POREUX

rosité soit favorable à la formation d'aiguilles. Par exemple, des aiguilles de glace peuvent se développer sous une motte de gazon recouverte de mousse *(a)*. Les aiguilles de glace ont poussé en deux jours, avec une frontière visible due à l'interruption de la croissance entre les nuits.

La ségrégation de glace s'observe aussi avec des galets particuliers, qui forment des tiges de glace atteignant plusieurs centimètres de longueur *(c et d)*. Des amateurs passionnés par ce sujet m'ont envoyé des photographies montrant de la glace poussant à partir de petites pierres, et, par la suite, ils m'ont envoyé des galets qui ont la particularité d'être poreux. Lorsqu'on les pose sur une surface humide (qui produit aussi des aiguilles de glace), une couche de glace se forme à leur sommet ; cette couche fond partiellement dans la journée, puis, la nuit suivante, une nouvelle couche de glace se forme et pousse la précédente vers le haut. Ces observations suggèrent que les aiguilles et les tiges de glace relèvent du même principe physique.

Les galets en question proviennent de roches sédimentaires contenant essentiellement de la silice. Certains morceaux de briques et de poteries produisent aussi des tiges de glace. Les galets qui produisent des tiges de glace assez importantes ont une porosité et une perméabilité particulières. Leurs pores sont assez petits pour absorber l'eau liquide et mettre en œuvre la ségrégation de glace. Pour estimer ces propriétés, on peut mesurer la quantité d'eau absorbée par le galet lorsqu'il est posé sur une éponge humide. S'il prend du poids, il produira probablement de la glace. Très peu de cailloux sont assez poreux pour former des tiges de glace.

En me fondant sur ces expériences, j'ai essayé de créer de la « glace de galet » dans un environnement contrôlé. J'ai reconstitué les conditions propices à la formation de glace en maîtrisant la température de la terre humide (du sable) sur laquelle sont placés les galets, en utilisant une lampe électrique ajustable comme source de chaleur pour empêcher le gel. L'ensemble est placé dans une enceinte isolée et la surface, avec la terre et les galets, est exposée à un air glacial.

Si toutes les conditions sont réunies, de la glace pousse sur les côtés ou au sommet d'un galet aussi longtemps que de l'eau dans le sol est disponible (*ci-dessous :* des galets posés sur de la terre humide avant, *b*, et après formation de la glace, *c* et une tige de glace sur un galet, *d*). La glace peut pousser à partir des côtés des cailloux, formant même un collier ou un tube recourbé si le plan de congélation (le lieu où les températures sont optimales pour la croissance de la glace) se trouve au-dessous du sommet du caillou. Quand on remplace le sable par une terre plus lourde ayant une teneur élevée en argile, le même dispositif entraîne la croissance d'aiguilles de glace à partir de la terre, glace qui pousse les galets vers le haut.

Susan Wells Hall/USGS

Tiges de glace formées par des galets.

LA GLACE DES TUYAUX

Des observateurs curieux à travers le monde m'ont envoyé des photographies de spirales et de rubans de glace spectaculaires qui ont jailli naturellement de tuyaux métalliques en divers endroits *(a et b)*. Pour expliquer comment ces structures se forment, j'ai essayé de reproduire ce processus et de faire pousser mes propres spirales de glace. J'ai mis au point une procédure que d'autres peuvent suivre.

La glace occupe un volume supérieur d'environ neuf pour cent à celui de l'eau liquide ; la solidification de l'eau entraîne une expansion. Lors de ma première tentative, j'ai utilisé des tuyaux en plastique, mais ces derniers n'ont pas tardé à se briser. Cependant, des tuyaux en fer peuvent résister à cette surpression.

Mes tests ont montré que l'une des extrémités du tuyau doit être aplatie ou recouverte d'une « capsule » et percée d'une petite fente. La méthode la plus performante que j'ai trouvée consiste à boucher temporairement cette extrémité rétrécie du tuyau, à la tenir à l'envers, puis à remplir cette extrémité avec une petite quantité d'eau que je fais geler, ce qui forme un bouchon de glace. Je remplis ensuite le reste du tuyau avec de l'eau très froide et je bouche l'autre extrémité. Je retourne le tuyau, de sorte que la fente et le bouchon de glace soient au sommet, et je le place dehors par une nuit glaciale. Avec un peu de chance, quand l'eau glacée contenue dans le tuyau est en expansion, elle pousse le bouchon de glace, qui crée de longues boucles par extrusion *(c)*.

© Pour la Science - n° 434 - Décembre 2013

où il n'y a pas d'élément pour amorcer le changement de phase de l'état liquide à l'état solide. À l'intérieur de la tige, la pression peut augmenter par gonflement des cellules, ce qui peut entraîner des déchirures longitudinales de l'épiderme de la tige. Dans ce cas, les cellules du parenchyme sont en contact avec l'air glacé. Elles se comportent alors comme de petits robinets alignés verticalement le long de la tige. L'eau, qui sourd de la tige sous l'effet de la pression, gèle. Le processus dure jusqu'à ce que la pression s'équilibre entre l'intérieur de la tige et l'extérieur, ou que l'eau s'épuise.

Comme le soulignait Gibson à la fin du XIXe siècle, la quantité de glace est plus importante que la sève contenue dans la plante. En outre, la plupart des fleurs de glace se forment sur des tiges desséchées. Il est donc probable que l'eau soit aspirée par capillarité du sol et ressorte par les côtés de la tige, comme dans le scénario proposé par R. Harms. Dans le cas des fleurs de glace se formant sur des tiges vertes *(voir l'encadré page 24)*, il reste à élucider quelles sont les parts respectives de la sève et de l'eau dans la glace formée.

Quand l'eau suinte de la tige, elle gèle, mais l'eau liquide repousse la partie solide et gèle à son tour. On nomme ségrégation de glace ce phénomène, où l'eau se déplace à travers un milieu poreux et gèle au contact d'un milieu plus froid. On l'observe ailleurs dans la nature, par exemple sur le sol avec les aiguilles de glace *(voir l'encadré pages 24 et 25)*.

Des rubans de glace extrudés par des pores

En 1989, Hisashi Ozawa et Seiiti Kinosita, de l'Université d'Hokkaïdo, au Japon, ont étudié la ségrégation de glace en plaçant un cristal de glace d'eau au-dessus d'un filtre microporeux, qui lui-même recouvrait une nappe d'eau en surfusion. Les pores de ce filtre étaient si petits que, contrairement à l'eau liquide, la glace ne pouvait pas passer à travers. Quand l'eau montait à la surface, elle gelait à la base de la glace, s'y agglutinait et la repoussait vers le haut. La chaleur latente libérée au cours du changement de phase empêchait l'eau, située en dessous, de geler. Ainsi, le processus se poursuivait aussi longtemps qu'il restait de l'eau.

Dans le cas des fleurs de glace, des conditions similaires apparaissent le plus souvent pendant la nuit, quand la température atmosphérique devient négative, tandis que l'eau contenue dans le sol reste liquide. Mais j'ai vu de la glace commencer à pousser sur des tiges en plein après-midi, quand un vent froid soufflait dans la région. Les pores des cellules végétales assurent la ségrégation de la glace et empêchent le liquide contenu dans la tige de se solidifier. Une fois que le sol lui-même est gelé, ces processus cessent, mais ils peuvent reprendre quand le dégel s'amorce. Sous les latitudes moyennes, les conditions pour que se forment des fleurs de glace peuvent être réunies à tout moment entre octobre et mars.

Il existe d'autres situations où se forment des structures de glace reposant sur un principe similaire à celui des fleurs de glace sur les plantes. Il est ainsi possible de fabriquer des tiges de glace sur des pierres poreuses *(voir l'encadré pages 24 et 25)*. J'ai aussi montré qu'il était possible de fabriquer des rubans de glace, de façon artificielle, par extrusion dans des tuyaux métalliques *(voir l'encadré page 26)*. Je suis toujours fasciné par le fait que quelque chose d'aussi banal que la glace puisse revêtir des formes si magnifiques... mais si éphémères et si rares. ■

Credit: Wagner

4. LES CHEVEUX DE GLACE sont des filaments très fins de glace, longs de plusieurs centimètres, qui forment des boucles sur du bois mort dépourvu d'écorce. Il y a un siècle, le géophysicien Alfred Wegener s'y est intéressé. Récemment, le botaniste Gerhart Wagner et ses collègues, de l'Université de Berne, en Suisse, ont montré que les cheveux de glace sont liés à la présence d'un champignon. Les gaz produits quand ce champignon décompose le bois exercent une pression qui pousse l'eau contenue dans les canaux du bois vers la surface, où elle gèle.

L'AUTEUR

James R. CARTER est professeur émérite au Département de géographie et de géologie de l'Université d'État de l'Illinois, aux États-Unis.

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

LE WEB

L'auteur présente de **nombreuses photographies de fleurs de glace** sur son site Internet : http://my.ilstu.edu/~jrcarter/ice/

Thomas Peacock et George Haller

L'ordre caché des écoulements chaotiques

De nouvelles techniques d'analyse en mécanique des fluides permettent d'identifier des lignes de séparation. Elles promettent de meilleures prévisions du déplacement des polluants dans les océans ou dans l'atmosphère.

© Pour la Science - n° 434 - Décembre 2013

L'ESSENTIEL

- Les méthodes d'analyse classiques permettent difficilement de suivre le devenir de débris transportés par un écoulement irrégulier.
- L'approche des structures lagrangiennes cohérentes consiste à identifier des lignes attractives et répulsives au sein du fluide.
- Ces lignes invisibles constituent des « barrières de transport » qui permettent de mieux comprendre la dynamique de l'écoulement.
- Cette approche serait applicable au sauvetage en mer, à la cardiologie, au suivi des pollutions...

Andrew Santecki

Article reproduit avec l'autorisation de G. Haller, Physics Today, vol. 65(2), pp. 41-47, 2013. © 2013 AIP Publishing LLC.

En avril 2010, de fines particules de cendres émises par un volcan islandais en éruption ont perturbé le trafic aérien européen. Le même mois, l'explosion de la plate-forme pétrolière *Deepwater Horizon*, dans le golfe du Mexique, a provoqué la marée noire la plus importante de l'histoire des États-Unis. Un an plus tard, un tsunami a frappé la côte de la région de Tohoku, au Japon. En plus des nombreuses pertes humaines, il a provoqué le désastre de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi, accident qui a conduit au déversement de nombreux débris et éléments radioactifs dans l'océan Pacifique.

Ces trois événements d'importance partagent une même problématique : dans chaque cas, des matériaux sont libérés dans l'environnement à partir d'une source ponctuelle. Or, prévoir où les débris sont transportés par les courants atmosphériques ou marins est crucial pour rediriger le trafic aérien, les missions de nettoyage, etc.

Distinguer de l'ordre dans le chaos

Pour suivre des polluants ou des débris à la dérive et prévoir où ils vont s'accumuler, l'approche usuelle consiste à faire des simulations numériques des écoulements atmosphériques ou marins et à utiliser la carte des vitesses des courants. Cette approche permet en principe d'estimer le devenir des débris. La difficulté est que de telles prévisions sont très sensibles aux conditions initiales. En d'autres termes, deux simulations d'une même situation peuvent donner des résultats très différents si les positions ou les vitesses initiales diffèrent, même de façon infime. On peut remédier à ce problème de sensibilité aux conditions initiales en effectuant plusieurs simulations pour le même scénario. L'ensemble des résultats indique alors une tendance générale sur la trajectoire des débris, mais cela ne permet pas d'obtenir un résultat précis.

En outre, l'analyse classique consiste souvent à déterminer l'histoire complète d'une trajectoire. On obtient ainsi des figures complexes « en spaghettis » qu'il est difficile d'interpréter. Pour améliorer la compréhension et les prévisions du comportement d'un fluide, de nouveaux concepts et méthodes sont à développer.

Récemment, des idées se situant à l'interface de la dynamique non linéaire – domaine

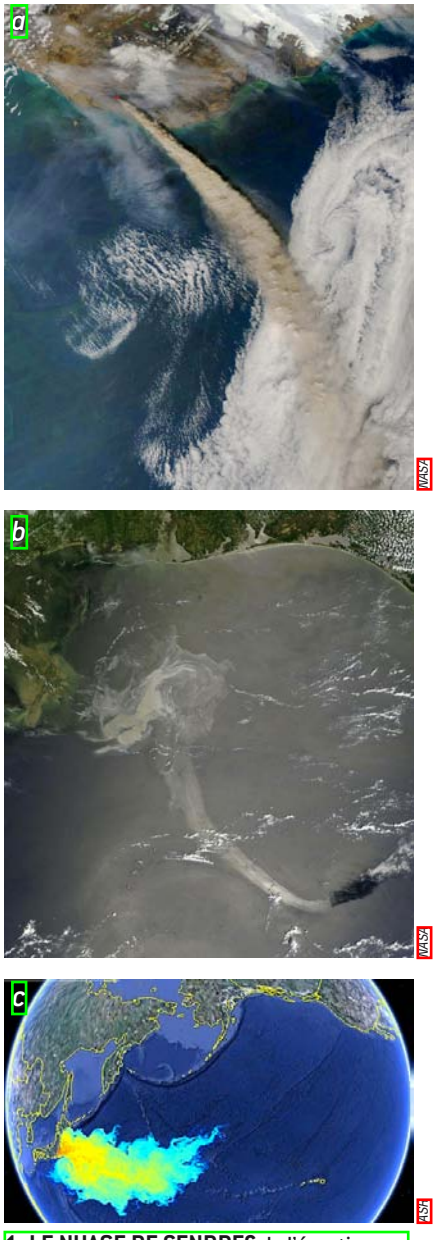
des mathématiques et de la physique qui sous-tend la théorie du chaos – et de la mécanique des fluides ont donné naissance au concept dit de structures lagrangiennes cohérentes. Il s'agit de lignes matérielles dans les fluides s'écoulant en deux dimensions et de surfaces dans les fluides à trois dimensions, qui forment une sorte d'ossature pour l'écoulement. Elles sont qualifiées de « barrières de transport », car elles déterminent le déplacement du fluide et délimitent des zones qui n'échangent pas de matière. Plus précisément, les structures lagrangiennes cohérentes sont des lignes matérielles vers lesquelles le fluide se trouvant à proximité est attiré ou d'où il est repoussé. Cette approche fournit un nouvel outil pour, entre autres, mieux comprendre le mouvement de débris charriés par un fluide.

Bien que la détection de structures lagrangiennes cohérentes dans des fluides en trois dimensions ait fait des progrès, cet article se concentre sur le cas des écoulements bidimensionnels. Les structures lagrangiennes cohérentes sont alors des courbes régulières et continues d'éléments fluides. Elles sont plus simples à manier que leur équivalent dans un fluide tridimensionnel, tout en gardant une importance pratique : les écoulements bidimensionnels décrivent de façon pertinente le transport de polluants qui restent à la surface de l'océan ou dans une couche de densité constante de l'atmosphère.

Des barrières qui canalisent les débris

Les barrières de transport reflètent une certaine organisation de l'écoulement du fluide. Dans les trois événements que nous avons mentionnés, elles permettent d'expliquer l'aspect allongé et étroit du nuage de cendres volcaniques, la structure étirée de la nappe de pétrole et l'aspect filamenteux de la répartition des contaminants radioactifs *(voir la figure 1)*. L'approche novatrice des structures lagrangiennes cohérentes a montré son efficacité sur le terrain, en particulier lors d'une expérience réalisée dans la baie de Monterey et consistant à suivre la dérive de bouées, ainsi que lors de l'analyse *a posteriori* de la marée noire de *Deepwater Horizon* dans le golfe du Mexique.

Pour en comprendre les principes essentiels, il est nécessaire de présenter quelques notions de dynamique des fluides et des



1. LE NUAGE DE CENDRES de l'éruption du volcan islandais Eyjafjöll en 2010 *(a)*, la nappe de pétrole très étirée lors de la marée noire de la station pétrolière *Deepwater Horizon* dans le golfe du Mexique en 2010 *(b)*, l'étirement vers l'Est de déchets radioactifs issus de la centrale de Fukushima en 2011 *(c)* : des structures invisibles guident les débris au sein des océans et de l'atmosphère.

méthodes utilisées pour les étudier, ainsi que leurs limites.

Il existe deux points de vue pour étudier le mouvement d'un fluide. Le point de vue dit eulérien considère les propriétés du fluide en chaque point fixé de l'espace et du temps. On peut par exemple quadriller la surface du fluide et, en chaque nœud du maillage, spécifier la vitesse du fluide, en grandeur et en direction. On cartographie ainsi le champ des vitesses à un instant donné, ce qui est un exemple typique de la description eulérienne. Dans ce point de vue, l'identité et la provenance de l'élément fluide présent au point considéré n'ont pas d'importance.

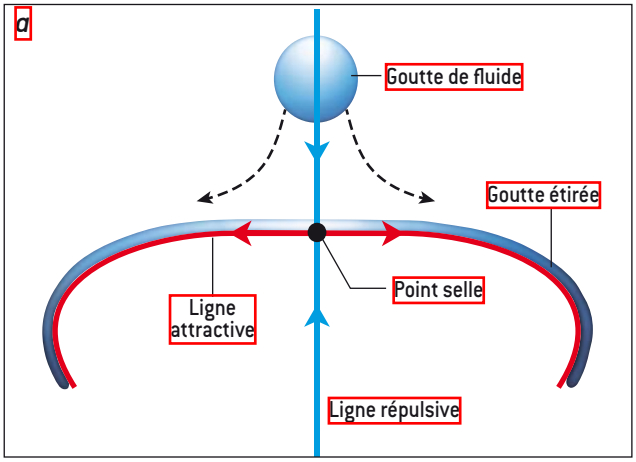
À l'inverse, le point de vue dit lagrangien s'intéresse aux éléments de fluide et définit de petits volumes de fluide dont on suit le parcours et les variations de vitesse au gré de l'écoulement. Cette approche est la plus naturelle pour étudier la dérive de débris dans un fluide.

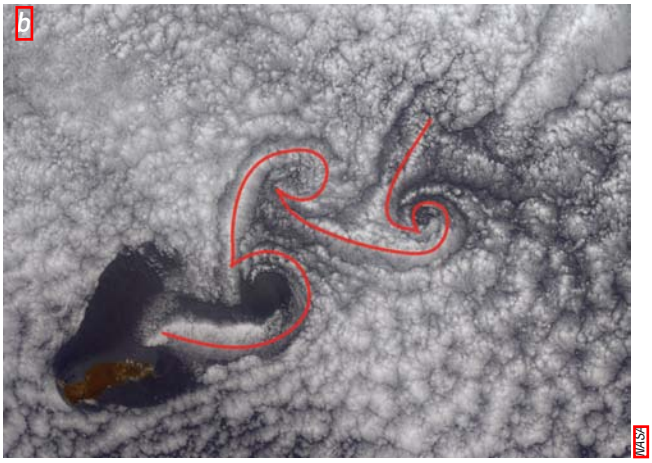
Pour élaborer une méthode efficace d'analyse d'un fluide, un point important est la notion d'objectivité, ou d'invariance par changement de référentiel. Cela signifie qu'une propriété attachée à un élément de fluide ne doit pas dépendre du référentiel dans lequel le système est étudié ; sinon, des structures ou des caractéristiques sans pertinence physique risquent d'apparaître. Ainsi, les champs eulériens tels que le champ des vitesses ne sont pas invariants lorsqu'on effectue une translation ou une rotation à vitesse non nulle du système de coordonnées utilisé pour décrire la situation.

Par exemple, pour visualiser un écoulement, on utilise souvent les lignes de courant, lignes qui suivent la direction locale du vecteur vitesse à un instant donné. Ce sont, par construction, des entités eulériennes. Or, si l'on translate à une certaine vitesse le système de coordonnées utilisé, les vecteurs vitesse du fluide sont modifiés et, par conséquent, les lignes de courant aussi. Par exemple, les tourbillons sont identifiés comme des régions du fluide dont les lignes de courant sont fermées. Mais un tourbillon observé d'un référentiel peut se présenter de façon très différente, et ne plus correspondre à un tourbillon.

Pour les écoulements instables, qui sont plus souvent la règle que l'exception dans la nature, il n'existe pas *a priori* de référentiel privilégié. C'est pourquoi les

© Pour la Science - n° 434 - Décembre 2013





2. LES ÉCOULEMENTS PERMANENTS OU QUASI PÉRIODIQUES sont assez bien compris. Dans cet exemple, près d'un point selle *(a)*, les particules de fluide arrivent selon la même direction mais dans des sens opposés et sont repoussées dans des directions perpendiculaires. Les lignes répulsive *(en bleu)* et attractive *(en rouge)* forment des barrières de transport. De telles structures sont parfois bien visibles dans la nature. Balayée par un vent régulier, l'île volcanique de Guadalupe *(b)*, au large du Mexique, dans l'océan Pacifique, produit une perturbation périodique dans les mouvements atmosphériques. Les motifs nuageux permettent d'identifier les lignes attractives *(en rouge)*.

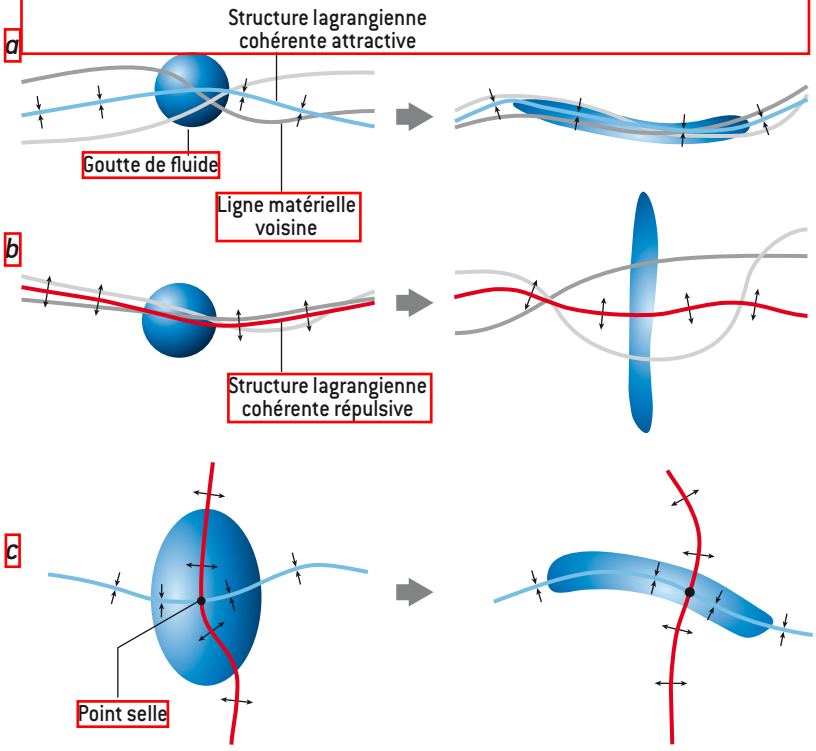
descriptions des structures dynamiques guidant le transport au sein du fluide doivent être indépendantes du référentiel choisi. Pour une marée noire, par exemple, l'interprétation du mouvement des nappes de pétrole ne doit pas dépendre du référentiel dans lequel les mesures sont effectuées : le radar d'une station côtière d'observation, un avion de reconnaissance ou un satellite en orbite. Les prévisions requièrent donc des méthodes lagrangiennes, indépendantes du référentiel utilisé.

Des lignes attractives et répulsives

L'analyse lagrangienne d'un écoulement est bien maîtrisée dans les situations les plus simples, mais elle devient difficile dans des systèmes chaotiques. Examinons d'abord ce qui se passe dans des écoulements permanents (qui ne changent pas avec le temps), périodiques ou quasi périodiques. Par exemple, on peut décrire simplement la dynamique du fluide autour d'un « point selle » d'un écoulement permanent *(voir la figure 2a)*. Les éléments de fluide s'approchent du point selle selon des sens opposés en suivant une ligne de courant. Ils sont ensuite repoussés suivant une ligne orthogonale à la première. La ligne par laquelle le fluide arrive peut être considérée comme un mur répulsif, tandis que la ligne d'échappement constitue un mur attractif : le fluide est repoussé par le premier et s'étire le long du second. Il

DES STRUCTURES ATTRACTIVES ET RÉPULSIVES

Les « structures lagrangiennes cohérentes » attirent ou repoussent le fluide environnant. Une structure lagrangienne cohérente attractive *(a, ligne bleue)* est une ligne matérielle vers laquelle le fluide est attiré plus fortement que vers toute autre ligne *(en gris)*. Un élément de fluide *(boule bleue)* est attiré par elle et se déforme en l'épousant plus ou moins. De façon analogue, une structure lagrangienne cohérente répulsive *(b, ligne rouge)* est une ligne matérielle qui repousse le fluide plus fortement que toute autre ligne ; la goutte de fluide s'étire perpendiculairement à elle. Ces structures ne peuvent être traversées par du fluide. Le croisement d'une structure répulsive et d'une structure attractive *(c)* forme un point selle généralisé, qui sépare le fluide en quatre régions qui ne se mélangent pas.



est possible de modéliser la dynamique du fluide dans cette région avec juste ces deux lignes.

De telles lignes existent aussi dans les écoulements périodiques et quasi périodiques. Elles constituent le squelette de motifs qu'il est facile d'observer. Un exemple est le sillage que laisse dans les nuages l'île mexicaine de Guadalupe *(voir la figure 2b)*. Un vent régulier souffle au-dessus de cette île, créant une turbulence régulière qui se traduit par un motif quasi périodique dans les nuages, une « allée de tourbillons de von Karman ». Mais l'identification de telles lignes dans des écoulements dont la structure temporelle et spatiale est complexe, apériodique ou chaotique est un défi.

La plupart des méthodes mathématiques disponibles pour identifier des lignes matérielles au sein d'un fluide font l'hypothèse d'un écoulement permanent, périodique ou quasi périodique, et supposent une bonne connaissance du champ d'écoulement à tous les instants. Mais les écoulements qui nous intéressent sont en général apériodiques, et le champ des vitesses est connu à partir d'observations ou de simulations numériques sur des intervalles de temps limités. Il en résulte que même les concepts les plus simples, de murs attractifs ou répulsifs et de points selles, sont mal définis dans les situations apériodiques.

Pour les écoulements apériodiques et chaotiques, les barrières de transport qui généralisent les lignes attractives et répulsives des écoulements permanents et périodiques sont précisément les structures lagrangiennes cohérentes. Leur identification nécessite des outils mathématiques appropriés et la connaissance du champ des vitesses sur la zone étudiée pendant l'intervalle de temps considéré.

Un exemple simple : la double gyre

Avant de décrire la méthode d'analyse, illustrons l'intérêt de l'approche des structures lagrangiennes cohérentes, par rapport à un traitement plus classique, avec le problème de la double gyre – une paire de tourbillons voisins et dont les sens de rotation sont opposés *(voir l'encadré ci-contre)*. Dans cet exemple, l'écoulement est périodique et pourrait donc être traité de façon classique, mais il est assez simple pour présenter les idées essentielles de l'approche par les structures lagrangiennes cohérentes.

Le dispositif est constitué d'un bassin rempli de liquide. On y crée deux tourbillons avec des sens de rotation opposés, leur position et leur intensité variant au cours du temps de façon périodique. Lorsqu'on dépose une goutte de colorant entre les deux tourbillons, elle s'étire et se déforme en suivant l'écoulement. Il est difficile de comprendre la forme prise par la goutte au bout d'un certain temps à partir de la seule connaissance du champ des vitesses : le colorant s'est séparé en deux et a formé des lignes dont la forme n'est pas directement reliée aux tourbillons.

En outre, si le référentiel choisi pour l'étude était en rotation, les vecteurs vitesse seraient très différents, mais cela n'aurait pas modifié le trajet pris par le colorant. Ainsi, pour interpréter le résultat, il faut identifier les structures responsables de

LES AUTEURS

Thomas PEACOCK est professeur d'ingénierie et de mécanique au MIT (Institut de technologie du Massachusetts), aux États-Unis.

George HALLER est professeur de dynamique non linéaire à l'Institut polytechnique (ETH) de Zurich, en Suisse.

L'exemple de la double gyre

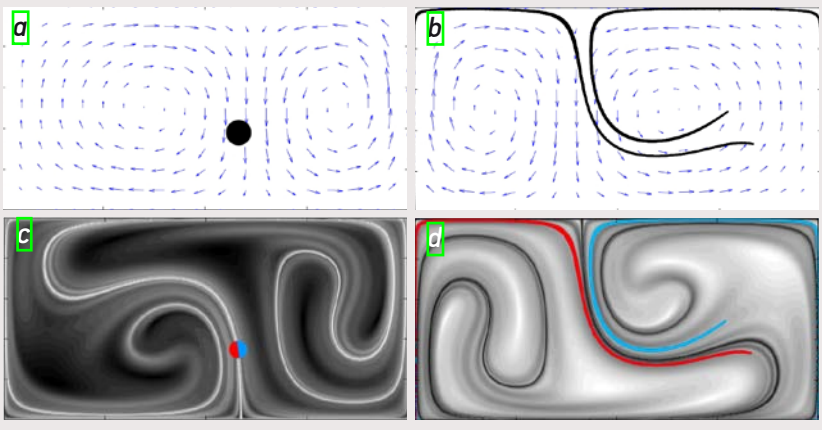
L'expérience de la double gyre illustre bien l'intérêt de l'approche par les structures lagrangiennes cohérentes.

Dans un bassin, on crée deux tourbillons ayant des sens de rotation opposés et dont l'intensité varie et les centres se déplacent de façon périodique. Le champ des vitesses *(a)* du fluide indique la situation au début de l'expérience, lorsqu'on dépose une goutte d'encre *(disque noir)*. La longueur et la direction des flèches indiquent le module et la direction de la vitesse de déplacement des éléments de fluide. Après un certain temps *(b)*, l'encre s'est déplacée dans le bassin. Elle a formé deux filaments qui s'étirent vers la droite et vers le haut avant de se séparer.

Il est très difficile de comprendre à partir des vecteurs vitesse comment l'encre a pu suivre de telles trajectoires. Intuitivement, d'après les conditions initiales, on pourrait s'attendre à voir l'encre s'approcher du bord inférieur et se diriger surtout à gauche et un peu vers la droite.

L'analyse du champ des vitesses permet d'identifier les structures lagrangiennes cohérentes et de voir plus clairement les contraintes qui ont déplacé l'encre dans le bassin. La recherche des structures lagrangiennes cohérentes au début de l'expérience *(c)* met en évidence une structure répulsive *(ligne blanche)* qui coupe la goutte d'encre *(représentée maintenant en rouge et bleu)* en deux parties. Cette structure divise la goutte et empêche qu'elle se remélange en formant une barrière infranchissable pour le fluide et l'encre.

L'analyse à la fin de l'expérience *(d)* met en évidence une structure lagrangienne cohérente attractive *(ligne noire)* qui va étirer l'encre sur toute sa longueur (en rouge et en bleu correspondant aux lignes de la *figure b*). L'interprétation de l'influence des différentes structures explique convenablement les observations.



© Pour la Science - n° 434 - Décembre 2013

IDENTIFIER LES BARRIÈRES DE TRANSPORT DANS UN FLUIDE

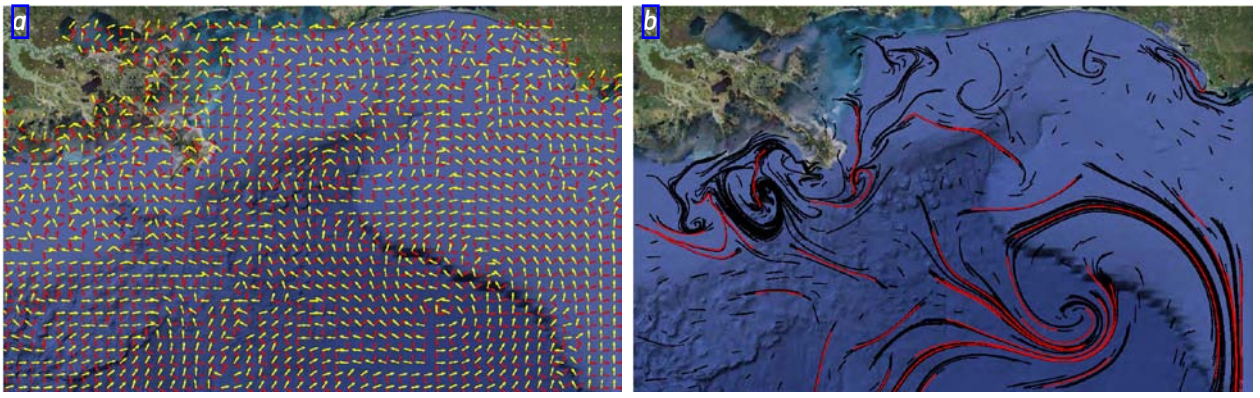
La marée noire de *Deepwater Horizon* a permis aux chercheurs de tester l'approche des structures lagrangiennes cohérentes. L'analyse a été faite *a posteriori*, mais elle montre que cette méthode fournit une explication physique aux observations.

Pour implémenter cette procédure, il est nécessaire d'établir une carte des vecteurs vitesse pour toute la période étudiée. Ainsi, pour l'analyse de la marée noire, les vitesses ont été mesurées entre le 14 et le 17 mai 2010.

Il faut ensuite calculer les déplacements des éléments de fluide à partir des vitesses mesurées entre le début et la fin de la durée, ce qui correspond aux déformations du fluide. Les chercheurs mettent ainsi en évidence les contraintes qui agissent au sein du fluide, qu'ils représentent par un tenseur de contraintes (dit de Cauchy-Green) en chaque point de la surface marine du golfe.

Dans le cas d'un fluide bidimensionnel, le tenseur de Cauchy-Green est une matrice 2×2 définie en chaque point et à laquelle sont associés deux nombres et deux vecteurs *(a, en rouge et jaune)* : les valeurs propres et les vecteurs propres de la matrice. Les vecteurs propres indiquent comment se déformerait un petit volume sphérique de fluide centré sur le point où est calculé le tenseur, entre le début et la fin de la période analysée. La boule de fluide devient un ellipsoïde dont la direction des axes est donnée par les vecteurs propres. Il est possible de définir des lignes de contraintes tangentes à ces vecteurs propres. Les structures lagrangiennes cohérentes correspondent aux lignes de contraintes qui sont localement les plus attractives ou répulsives (au moment initial). On peut suivre leur déplacement en faisant évoluer le champ des vecteurs vitesse.

Le résultat de cette analyse *(b)* montre des lignes attractives *(en noir)*, les plus fortes étant les structures lagrangiennes cohérentes *(en rouge)*.



la forme prise par le colorant et qui sont indépendantes du référentiel choisi.

L'analyse de la dynamique du fluide par l'approche des structures lagrangiennes cohérentes met en évidence des lignes répulsives qui ont coupé la goutte en deux et des lignes attractives qui ont étiré la goutte d'encre, laquelle en a épousé la forme.

Ces structures lagrangiennes cohérentes donnent une tout autre information que le champ des vecteurs vitesse. Leur interprétation permet de comprendre et d'expliquer la forme de la goutte d'encre. Mais si les structures lagrangiennes cohérentes sont l'outil adapté pour étudier le transport de matériaux dans un fluide, comment les identifie-t-on ?

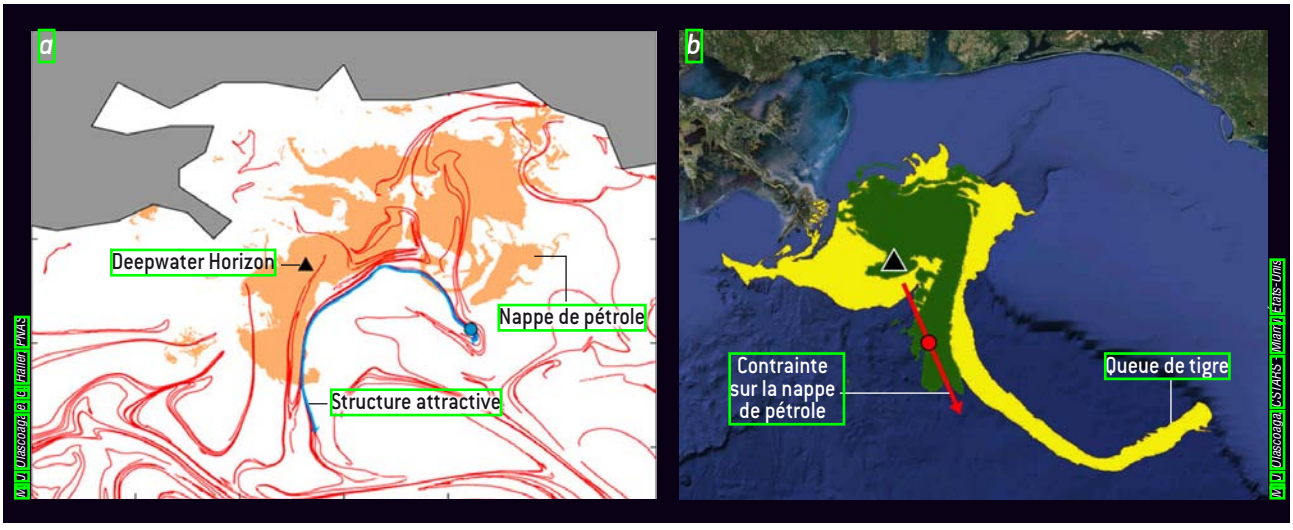
Il y a une vingtaine d'années, Raymond Pierrehumbert et Huijin Yang, à l'Université de Chicago, ont développé une approche innovante dans l'étude lagrangienne du champ des vecteurs vitesse. Ils ont considéré un critère de stabilité : l'« exposant de Lyapunov à temps fini ». Il s'agit d'un nombre qui caractérise la sensibilité du comportement, sur un intervalle de temps donné, d'un élément de fluide vis-à-vis de sa position initiale. Si l'on considère deux positions initiales légèrement différentes, l'écart entre les positions finales de l'élément de fluide sera d'autant plus grand que l'exposant de Lyapunov est élevé.

Un critère de stabilité

Cet exposant, que l'on peut définir en chaque point, prend une valeur très grande là où le fluide est instable. Pour l'estimer, on mesure de combien des éléments de fluide initialement adjacents se sont mutuellement éloignés au bout de l'intervalle de temps considéré. Les régions répulsives du fluide sont celles où l'exposant de Lyapunov a les valeurs les plus élevées. Pour déterminer les régions attractives, on applique la même procédure en renversant le sens du temps : on part de la fin et on remonte à l'instant initial. Les régions répulsives en situation de temps inversé sont alors des régions attractives quand le temps s'écoule dans le sens normal. Il est nécessaire d'utiliser cette procédure, car si l'on part de l'instant initial, il n'est pas possible à l'avance de savoir quels éléments du fluide vont se retrouver au point considéré.

En 2001, l'un de nous (G. Haller) a relié la distribution spatiale des exposants de Lyapunov à temps fini d'un écoulement fluide aux structures lagrangiennes cohérentes. Les maximums du champ des exposants de Lyapunov quand le temps s'écoule normalement correspondraient aux structures lagrangiennes cohérentes répulsives et les maximums quand on inverse le sens du temps correspondraient aux structures attractives. On considérait initialement que les lignes de maximums des exposants de Lyapunov étaient quasiment lagrangiennes, ce qui implique que le flux de matière qui les traverse est faible.

La méthode des exposants de Lyapunov a été concrètement appliquée dans deux premiers exemples : le suivi de pollutions côtières en Floride, d'une part, et en Californie, d'autre part. Dans les deux cas, le champ des vitesses a été déterminé par des stations radar à haute fréquence installées sur la côte. L'analyse a permis, par exemple, d'estimer les moments les plus appropriés pour évacuer des déchets des centrales électriques côtières, et éviter que ces déchets ne polluent les côtes. Depuis, la méthode des exposants de Lyapunov a été



3. LE SUIVI *A POSTERIORI* de la marée noire de *Deepwater Horizon* a permis d'expliquer de nombreuses tendances dans le déplacement de la nappe de pétrole *(a, en orange)*. La structure lagrangienne cohérente attractive *(a, en bleu)*, présente entre les 9 et 19 juin 2010, a poussé le pétrole vers l'Est, vers la Floride. Cette approche a aussi montré comment les conditions, au 15 mai, ont déformé la nappe de pétrole *(b, en vert)* pour donner, deux jours plus tard, ce qu'on a nommé la « queue de tigre » *(b, en jaune)*.

utilisée dans diverses situations : circulation sanguine et dépôt de plaques d'athérome dans les artères, contrôle aérien, écoulement de l'air autour des ailes d'avion, etc.

Relier les structures lagrangiennes cohérentes aux lignes extrémales des exposants de Lyapunov à temps fini offre une méthode numérique relativement simple. Mais cela soulève des difficultés mathématiques qui n'avaient pas été examinées en détail. En particulier, l'approche des exposants de Lyapunov peut créer des faux négatifs ou des faux positifs dans la détection de structures lagrangiennes cohérentes. Et souvent les lignes extrémales ne sont pas lagrangiennes, dans le sens où le flux de matière à travers elles peut être important.

Pour résoudre les difficultés de l'approche des exposants de Lyapunov, l'un de nous (G. Haller) et Mohammad Farazmand, de l'Université McGill à Montréal, ont montré en 2012 que les structures lagrangiennes cohérentes répulsives sont, en fait, des lignes matérielles dont les positions initiales sont, localement, les « lignes de contraintes » les plus répulsives dans l'intervalle de temps considéré. Ces lignes de contraintes sont obtenues mathématiquement à partir d'une caractérisation du champ des déformations dans le fluide *(voir l'encadré page 33)*. Solutions d'équations différentielles du premier ordre, ce sont des courbes régulières qui sont véritablement lagrangiennes : le fluide ne les traverse pas, elles délimitent des zones du fluide qui ne se mélangent pas.

BIBLIOGRAPHIE

M. J. Olascoaga et G. Haller, **Forecasting sudden changes in environmental pollution patterns,** *PNAS*, vol. 109, n° 13, pp. 4738-4743, 2012.

M. Farazmand et G. Haller, **Computing Lagrangian coherent structures from variational LCS theory,** *Chaos*, vol. 22, 013128, 2012.

T. Peacock et J. Dabiri, **Introduction to Focus Issue : Lagrangian coherent structures,** *Chaos*, vol. 20, 017501, 2010.

S. C. Shadden *et al.*, **The correlation between surface drifters and coherent structures base on high-frequency radar data in Monterey Bay,** *Deep-Sea Research, Part II*, vol. 56, n° 3-5, pp. 161-172, 2009.

Par comparaison, l'obtention des lignes extrémales des exposants de Lyapunov s'est révélée être un problème complexe de traitement d'images, ne reposant pas sur un édifice mathématique précis.

La marée noire de *Deepwater Horizon* a permis de tester l'approche des structures lagrangiennes cohérentes et la recherche des lignes de contraintes. L'image satellitaire enregistrée le 17 mai 2010 a révélé un long filament de pétrole qui s'est étiré au Sud-Est de la nappe principale. Ce filament a été surnommé « queue de tigre » *(voir la figure 3)*. Une simulation numérique du golfe du Mexique à cette période nous a permis d'identifier la structure lagrangienne cohérente attractive qui est à l'origine de la queue de tigre.

Un outil pour prendre des décisions

Les résultats de l'étude des structures lagrangiennes cohérentes dans le golfe du Mexique relèvent d'une démarche que l'on peut qualifier de « rétrovision » où, au contraire de la « prévision », on analyse et explique un phénomène qui s'est déjà produit. C'est un outil important pour expliquer pourquoi le phénomène a évolué de la façon observée et pas d'une autre. Mais les structures lagrangiennes cohérentes sont-elles un outil utilisable pour faire des prévisions et anticiper un comportement tel que la formation de la queue de tigre ?

© Pour la Science - n° 434 - Décembre 2013

Pour ce faire, il est nécessaire de mesurer avec une grande précision l'état du système. Cela implique de pouvoir intégrer presque en temps réel les données des satellites et des stations locales aux simulations numériques de grande échelle, afin de déterminer la position des barrières de transport.

L'analyse de la marée noire de *Deepwater Horizon* montre qu'une barrière de transport a poussé la nappe de pétrole vers la côte Ouest de la Floride pendant deux semaines en juin 2010. Si cette information avait été disponible à l'époque, la décision des autorités pour contenir ou disperser le pétrole aux endroits critiques aurait pu être prise avec plus d'assurance.

La théorie des structures lagrangiennes cohérentes est aujourd'hui mathématiquement bien établie. Le défi est d'optimiser les temps de calcul pour des applications concrètes. Parmi les pistes possibles, de nouveaux travaux montrent que un pour cent des structures lagrangiennes parmi les plus attractives sont à l'origine des phénomènes les plus marqués dans un écoulement. Le développement d'une méthode pour repérer ces éléments permettrait de gagner du temps. Des outils généraux d'extraction de structures attractives et répulsives, mais aussi d'autres configurations telles que des tourbillons ou des jets, sont en cours de développement.

Des applications diverses

Le suivi des débris dérivants et, à plus long terme, la surveillance des pollutions ne sont pas les seules applications possibles pour les structures lagrangiennes cohérentes. Cette approche pourrait être utile aux opérations de sauvetage en mer après un naufrage, en permettant de localiser plus rapidement dans quelle direction les victimes vont dériver. David Schmale et Shane Ross, de l'Institut polytechnique de Virginie, aux États-Unis, ont étudié le transport par le vent de spores du champignon *Fusarium*, un phytopathogène responsable de maladies dans les récoltes. Ils ont montré que des barrières de transport attractives et les régions encadrées de deux barrières répulsives piègent les spores et peuvent les transporter sur des centaines de kilomètres. Le mathématicien Shawn Shadden, de l'Institut de technologie de l'Illinois, a étudié la circulation sanguine dans les ventricules du cœur. Il a montré que chez certains patients dont le cœur est volumineux, le sang reste plus longtemps dans le ventricule, ce qui peut entraîner une thrombose avec formation de caillots.

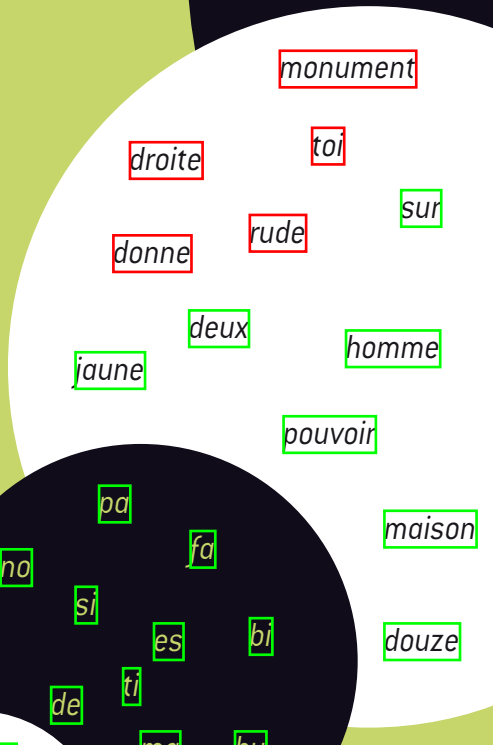
Ces exemples montrent que l'approche des structures lagrangiennes cohérentes peut être utile dans des contextes variés. Cette méthode a aussi révélé une vision plus pertinente du transport de débris dans des écoulements complexes. Les barrières de transport révélées par les structures lagrangiennes cohérentes constituent un squelette autour duquel s'organisent les flux et, à ce titre, sont un aspect fondamental de la compréhension des mouvements au sein d'un fluide. ■

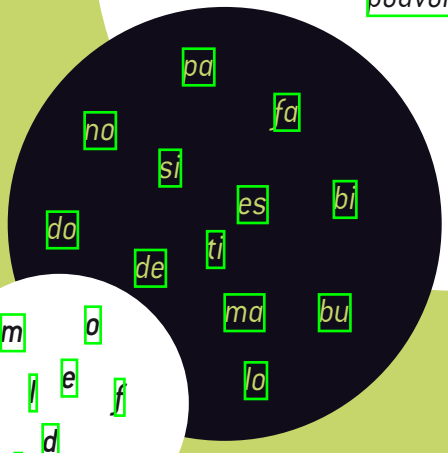
La structure en réseaux du langage

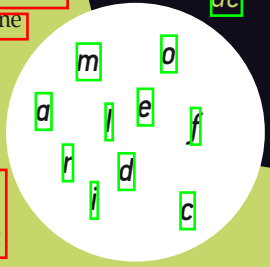
Ricard Solé, Bernat Corominas-Murtra et Jordi Fortuny

Des techniques d'analyse issues des mathématiques et de la physique révèlent les structures du langage et renseignent ainsi sur son origine et son évolution.

« Naturellement destiné à l'exploitation de la pension bourgeoise, le rez-de-chaussée se compose d'une première pièce éclairée par les deux croisées de la rue, et où l'on entre par une porte-fenêtre. »







Seule l'espèce humaine emploie un système de communication symbolique capable de transmettre une information complexe. Certains animaux semblent avoir maîtrisé quelques éléments rudimentaires d'un tel système, mais leur mode de commmunication est beaucoup moins développé que notre langage. De même, aucune machine ne parvient à l'imiter pour l'instant. Comment avons-nous développé ce système de communication ?

Comme l'a signalé le linguiste américain Derek Bickerton, le langage ne laisse pas de fossiles. On doit donc recourir à des données indirectes. On étudie, par exemple, les changements culturels liés à l'art ou à la fabrication d'outils, qui traduisent des améliorations cognitives et, suppose-t-on, des facultés de communication. Ces dernières années, la génétique a aussi apporté quelques éléments. On a ainsi découvert un gène noté *FoxP2*, dont la mutation provoque des troubles de la parole. Sa séquence est identique chez l'homme moderne et chez les Néandertaliens, qui maîtrisaient peut-être certains aspects d'une communication orale.

Ces indices corroborent une autre affirmation de D. Bickerton : « Rien ne survient dans le monde sans laisser une trace, aussi ténue ou indirecte soit-elle. » En linguistique, l'analyse de ces traces a donné lieu à de grands débats, souvent très théoriques, concernant leur nature et leur origine (génétique, culturelle ou les deux).

Certaines recherches en linguistique ont récemment fait appel à des outils associés d'habitude aux mathématiques et à la physique statistique, tels que l'analyse de systèmes complexes. Celle-ci porte sur des systèmes composés d'un grand nombre d'éléments et qui présentent des propriétés dites émergentes : les propriétés du système global sont plus riches que la simple sommation des propriétés de chaque composante.

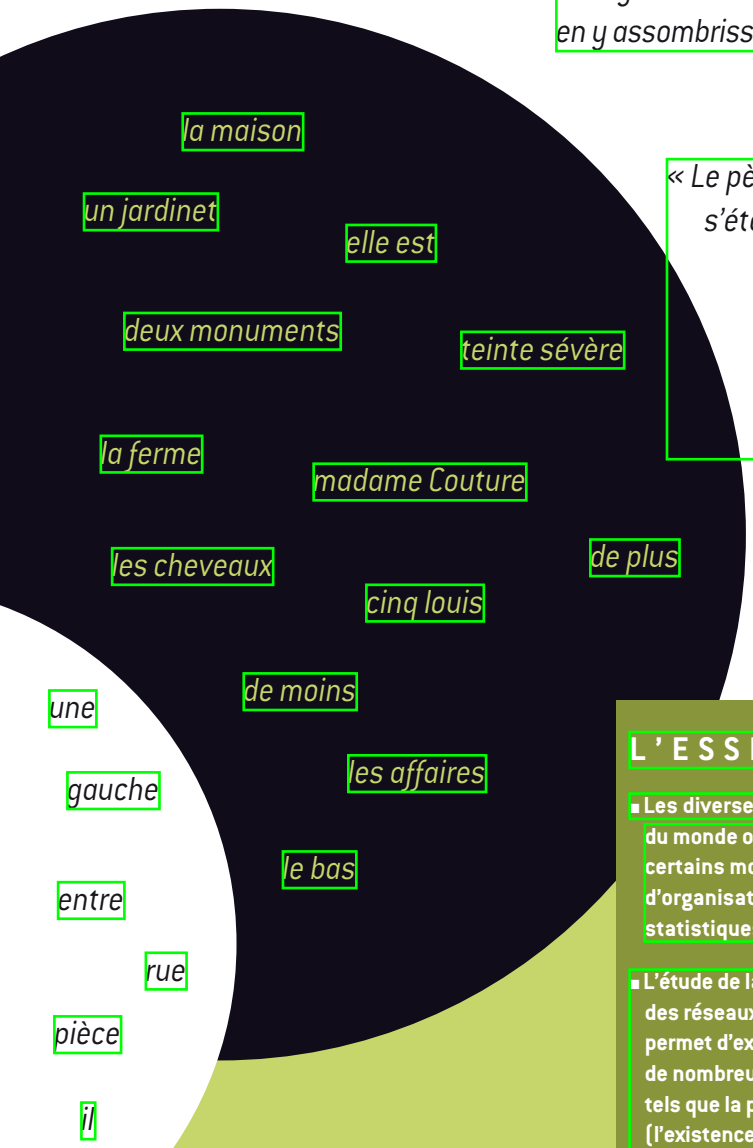
Le langage humain est un système de ce type. De même qu'une fourmilière est plus qu'un simple agrégat d'insectes, le langage ne se limite pas à la juxtaposition de mots.

Dans une série de travaux récents, nous avons abordé l'étude quantitative du langage du point

© Pour la Science - n° 434 - Décembre 2013

« *La façade de la pension donne sur un jardinet, en sorte que la maison tombe à angle droit sur la rue Neuve-Sainte-Geneviève, où vous la voyez coupée dans sa profondeur.* »

« *La maison où s'exploite la pension bourgeoise appartient à madame Vauquer. Elle est située dans le bas de la rue Neuve-Sainte-Geneviève, à l'endroit où le terrain s'abaisse vers la rue de l'Arbalète par une pente si brusque et si rude que les chevaux la montent ou la descendent rarement. Cette circonstance est favorable au silence qui règne dans ces rues serrées entre le dôme du Val-de-Grâce et le dôme du Panthéon, deux monuments qui changent les conditions de l'atmosphère en y jetant des tons jaunes, en y assombrissant tout par les teintes sévères que projettent leurs coupoles.* »



« *Le père Goriot, vieillard de soixante-neuf ans environ, s'était retiré chez madame Vauquer, en 1813, après avoir quitté les affaires. Il y avait d'abord pris l'appartement occupé par madame Couture, et donnait alors douze cents francs de pension, en homme pour qui cinq louis de plus ou de moins étaient une bagatelle.* »

Extrait du Père Goriot, *Honoré de Balzac, 1835*

L'ESSENTIEL

- **Les diverses langues du monde ont en commun certains modèles d'organisation et des lois statistiques.**
- **L'étude de la connectivité des réseaux linguistiques permet d'expliquer de nombreux aspects, tels que la polysémie (l'existence de mots ayant plusieurs sens) ou l'organisation en catégories sémantiques.**
- **La façon dont la syntaxe émerge chez l'enfant et le développement de formes de communication rudimentaires par des systèmes artificiels renseignent sur l'origine du langage.**

D'après Ricard Solé, Jordi Luque et Sebastian Santaga

de vue systémique.

Bien que les langues du monde arborent des différences lexicales et grammaticales notables, elles semblent avoir des structures et des lois statistiques communes. Leur analyse renseigne sur l'origine de la complexité du langage. En particulier, nous avons étudié les mécanismes qui régissent l'acquisition de la syntaxe par l'enfant et l'évolution du langage humain vers un système de communication efficace, souple et au pouvoir informatif illimité.

Pour analyser l'architecture du langage, une approche nouvelle et prometteuse s'appuie sur la théorie des réseaux, qui a connu un développement spectaculaire au cours des dix dernières années. L'idée principale consiste à traiter les mots comme des éléments de base (des nœuds du réseau), à déterminer certaines propriétés qui permettent de les relier et à étudier le maillage résultant.

À titre d'exemple, prenons l'ensemble des noms d'animaux et, en un temps limité à quelques secondes, prononçons tous ceux qui nous viennent à l'esprit. Nous obtiendrons

1. **LE LANGAGE HUMAIN EST STRUCTURÉ** à de multiples niveaux. À partir de quelques règles de composition simples, les phonèmes se combinent en syllabes qui, à leur tour, s'associent en mots. Grâce à la syntaxe, les mots forment des phrases. Le nombre d'éléments possibles croît de façon exponentielle.

© Pour la Science - n° 434 - Décembre 2013

une liste du type : chien, chat, cheval, dauphin, baleine, cachalot... Des termes contigus ont presque toujours un lien. Ils peuvent tous deux désigner des animaux de compagnie, des représentants de la faune marine, des animaux rares dans la vie quotidienne (tels des reptiles ou des insectes)... Pour élaborer une liste, le cerveau recourt à des associations d'idées liées sémantiquement : le choix de l'animal suivant est déterminé par sa similarité avec le précédent selon des propriétés diverses (telles que la taille, l'habitat ou la familiarité).

Des catégories et des « animaux ponts »

Cette expérience a été menée en 2010 par une équipe de l'Université de Navarre, en Espagne, dirigée par Joaquín Goñi et Pablo Villoslada, avec la collaboration de l'un d'entre nous (B. Corominas-Murtra). En la répétant maintes fois avec de nombreux participants, nous avons établi une liste de mots de plus en plus longue et tracé un réseau qui prenait en compte leurs liens sémantiques *(voir l'encadré page ci-contre)*. Ce réseau était organisé en groupes d'éléments ayant davantage de connexions entre eux qu'avec le reste du réseau. Ces groupes sont, par exemple, les insectes, les reptiles, les animaux rencontrés dans les zoos...

Cette structure reflète une organisation fondée sur des catégories. Elle révèle aussi l'existence, d'un point de vue sémantique, d'« animaux ponts », qui permettent de passer d'un groupe à un autre. Ainsi, le crocodile est perçu à la fois comme un reptile et comme un animal de zoo. Le maillage résultant est très interconnecté et facile à parcourir.

De tels réseaux renseignent aussi sur l'origine de certains types d'ambiguïtés sémantiques, apparemment universels. Ainsi, dans toutes les langues, il existe de nombreux termes ayant la même signification et, à l'inverse, des mots qui ont plusieurs sens. Les premiers sont les synonymes et les seconds sont qualifiés de polysémiques.

Le phénomène de la polysémie est surprenant. Le langage tend à favoriser une communication efficace et donc, en principe, à éviter l'ambiguïté. Pourquoi alors la polysémie est-elle omniprésente ? Si les mots polysémiques ne faisaient qu'entraver la communication, la constante évolution des langues (bien plus rapide que l'évolution génétique) les aurait éliminés.

En 2002, les physiciens argentins Mariano Sigman et Guillermo Cecchi ont analysé l'un des réseaux d'association sémantique les plus complets au monde : *WordNet*. Son édification a démarré en 1985 à l'Université de Princeton, aux États-Unis, sous l'impulsion du linguiste George Miller. M. Sigman et G. Cecchi ont utilisé les outils de la théorie des réseaux complexes pour analyser l'organisation globale de *WordNet*.

Confrontés aux mots *lion* et *rayures*, nous pensons souvent au mot *tigre*, qui apparaît comme une façon d'associer ces deux termes *a priori* sans rapport. Ainsi, en choisissant deux mots au hasard, nous pouvons les relier par une chaîne de vocables intermédiaires. Des chemins de mots, de longueur mesurable, apparaissent alors. De même, les liens triangulaires, où deux éléments liés à un troisième sont aussi associés l'un à l'autre, fournissent une idée du degré d'association locale entre concepts : par exemple, les mots *lumière* et *nuit* sont reliés à *lampe*, et aussi entre eux. Les connexions entre les divers nœuds sont de nature distincte, mais on peut les considérer simultanément pour se représenter le réseau comme un tout organisé en différents niveaux.

Le langage humain, un petit monde

M. Sigman et G. Cecchi ont montré que *WordNet* est un réseau de type petit monde, c'est-à-dire où, d'une part, deux nœuds quelconques peuvent être reliés par un chemin assez court et, d'autre part, certaines zones comprennent un grand nombre de connexions par rapport au nombre de nœuds. Le phénomène du petit monde a été analysé en détail en 1998 par Duncan Watts et Steven Strogatz, de l'Université Cornell, aux États-Unis. Sa découverte remonte à quelques dizaines d'années plus tôt, lorsque des sociologues, tel l'Américain Stanley Milgram, ont étudié la proximité sociale entre individus. Imaginons que chacune des personnes qui constituent une société corresponde à un nœud d'un réseau. Si deux d'entre elles se connaissent, elles sont considérées comme connectées. Le degré de séparation sociale entre deux individus quelconques est défini comme le nombre minimum de « sauts » à effectuer entre les nœuds pour les relier.

À partir d'une série d'expériences fondées sur l'échange de cartes postales, Milgram a déduit que la distance sociale moyenne entre les habitants des États-Unis s'élève à environ six degrés. Ainsi, même dans un pays comptant plusieurs dizaines de millions d'habitants, nous sommes bien plus proches les uns des autres que nous l'imaginons. Le phénomène du petit monde se manifeste dans de nombreux autres réseaux : gènes, circuits électroniques, etc. Il favorise le transport d'information ou d'énergie dans l'ensemble du réseau.

Bien que le lexique *WordNet* analysé par M. Sigman et G. Cecchi soit composé de 66 000 mots, la distance moyenne entre deux d'entre eux ne dépasse pas sept degrés. On peut donc naviguer aisément dans le réseau. En outre, ce dernier présente de nombreux liens triangulaires (une autre caractéristique des réseaux de type petit monde), ce qui facilite la libre association de concepts.

WordNet est également un réseau dit sans échelle. Ce type de réseau se caractérise par l'association d'un grand nombre d'éléments ayant peu de liens entre eux et de quelques nœuds fortement connectés. En 1999, Albert-László Barabási et Réka Albert, alors à l'Université Notre-Dame, aux États-Unis, ont montré que c'est la présence de tels superconnecteurs qui donne lieu au phénomène de petit monde. Bien que la plupart des nœuds de ces réseaux ne permettent pas de se déplacer avec rapidité, les chemins possibles se multiplient dès qu'un superconnecteur est atteint. Et il est facile, grâce à certains d'entre eux, de parvenir rapidement à destination. En outre, la perte de quelques superconnecteurs provoque une baisse de connectivité importante du réseau.

Dans le réseau sémantique, les superconnecteurs sont les mots polysémiques. M. Sigman et G. Cecchi ont analysé les conséquences de leur élimination : le degré de séparation moyen entre les mots est monté jusqu'à 11 et le nombre de liens triangulaires a été divisé par 300.

Une navigation facilitée

La polysémie confère donc une grande cohésion au réseau sémantique, car elle facilite aussi bien la navigation que l'association locale entre concepts (corrélée au nombre de liens triangulaires). L'ambiguïté favorise les liens sémantiques : c'est peut-être pourquoi toutes les langues du monde présentent de la polysémie. L'exécution de

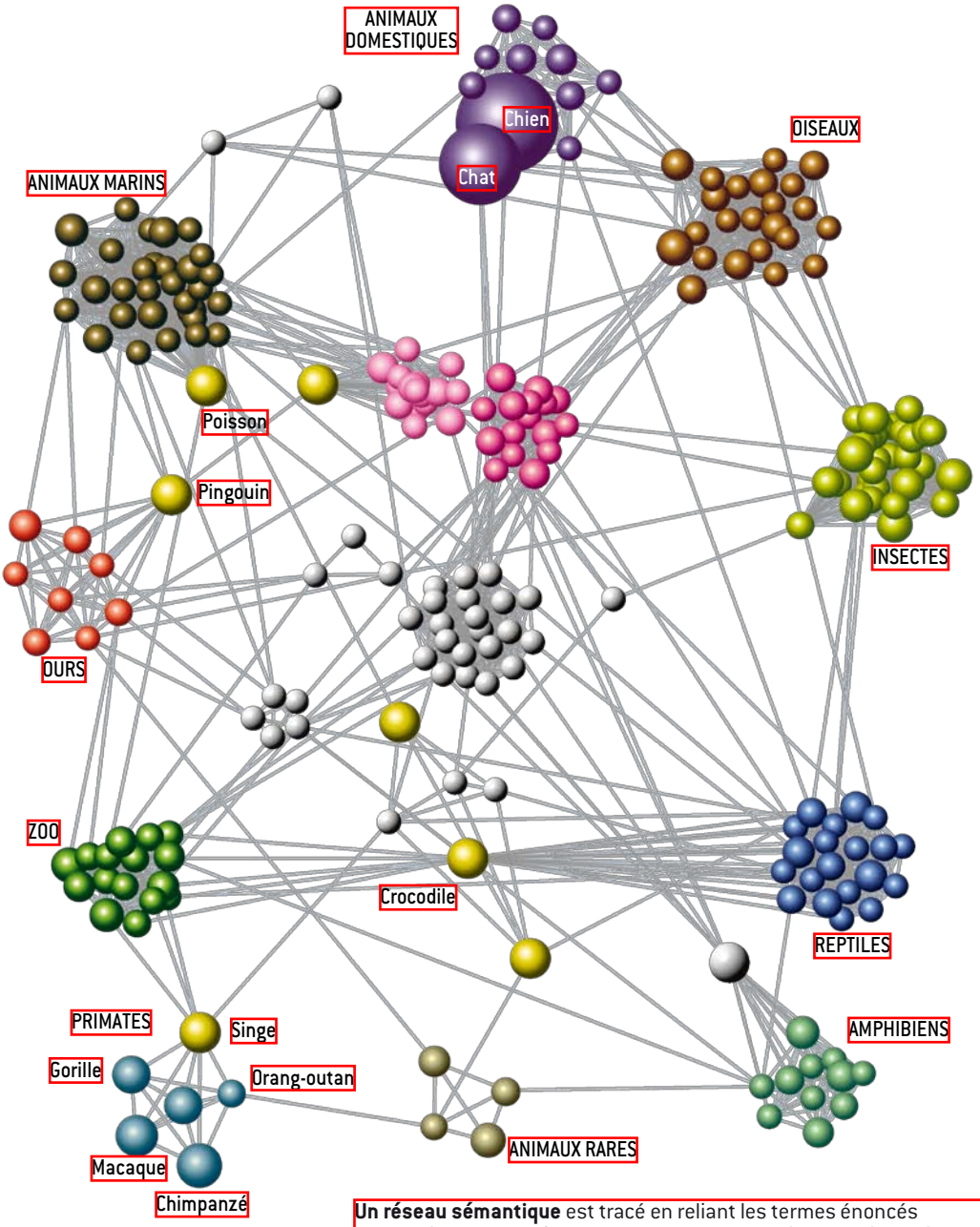
© Pour la Science - n° 434 - Décembre 2013

QUAND LES RÉSEAUX SÉMANTIQUES EXPLIQUENT LA POLYSÉMIE

L'étude quantitative des propriétés émergentes du langage se fonde sur la théorie des réseaux complexes. On relie des mots au sein d'un réseau, dont on analyse les propriétés statistiques.

Le schéma ci-dessous illustre une expérience menée en 2010. Les sujets devaient énoncer en un temps court les noms de tous les animaux qui leur venaient à l'esprit. Deux mots consécutifs avaient presque toujours un lien sémantique. On a alors tracé un réseau de relations sémantiques entre ces termes. On y distingue des groupes de mots *(figurés en couleur)* ayant plus de relations entre eux qu'avec le reste du réseau, et des mots ponts *(nœuds jaunes)*, qui mettent en relation divers groupes. Par exemple, le mot *singe* fait penser à la fois aux animaux de zoo et aux primates. Ces caractéristiques facilitent notablement la navigation au sein du réseau, ce qui constitue un avantage pour de multiples tâches cognitives.

Plusieurs études ont montré que les réseaux linguistiques sont sans échelle. Ils se caractérisent par un petit nombre de nœuds très connectés, ce qui permet d'aller rapidement d'un point à un autre. Dans les réseaux sémantiques, ces « superconnecteurs » seraient les mots polysémiques, ce qui expliquerait leur existence dans toutes les langues (en apparence contre-productive, puisqu'ils introduisent de l'ambiguïté).



Un réseau sémantique est tracé en reliant les termes énoncés successivement, de façon spontanée, par les sujets. La dimension relative des nœuds symbolise la fréquence à laquelle apparaissent les différents mots dans les listes fournies.

Avec l'aimable autorisation des auteurs (source : The Semantic Organization of the Art ma categori evidence from semantic verba fluency and network theory J. Cogn. Sci. 8, 31 Cognitive Processing Vol. 12 n° 2 pp. 183-196 mai 2011

tâches cognitives demande de naviguer à travers un vaste univers de mots et de significations, d'où l'utilité du phénomène de petit monde. Des études ultérieures sur d'autres réseaux linguistiques, tels ceux obtenus à partir des dictionnaires de synonymes et d'antonymes, ont confirmé ces propriétés.

Outre ses propriétés sémantiques, l'un des attributs essentiels du langage humain réside dans son pouvoir combinatoire. À partir d'éléments simples et de quelques règles de base permettant de les associer, nous créons d'autres éléments, plus complexes : nous unissons des phonèmes pour construire des syllabes, que nous combinons pour former des mots, avec lesquels nous constituons des phrases. Le nombre de possibilités croît alors de façon exponentielle.

Pour étudier ce potentiel combinatoire, le processus d'acquisition de la langue maternelle offre un champ d'investigation unique. Un bébé n'apprend pas les règles d'une langue comme le ferait un adulte, mais il les construit à partir de données dispersées, fournies par d'autres membres de sa communauté.

L'enfant subit une immersion linguistique nécessairement incomplète, car les mots et les phrases auxquels il est confronté ne peuvent couvrir toutes les éventualités du langage. Il ne reçoit ni une liste d'exemples exhaustive ni des instructions explicites quant à l'usage des règles linguistiques. Le locuteur se forge une connaissance tacite de la langue. Il emploie diverses règles, notamment grammaticales, mais n'est pas conscient de la structure sous-jacente à ses propres productions linguistiques.

Des premiers mots aux premières phrases

Au cours des deux premières années de sa vie, l'enfant entend souvent certains mots et quelques séquences courantes composées de deux vocables, ainsi qu'un faible nombre de phrases (comparé à l'univers des combinaisons possibles). Il passe alors par une phase durant laquelle il n'utilise que des mots isolés, puis par l'étape dite des deux mots, où il associe deux termes de façon assez primitive. Vers l'âge de deux ans, une transition se produit : l'enfant commence à construire des phrases complexes, en faisant peu d'erreurs, voire aucune. Ainsi, l'étape des trois mots n'existe pas. Une fois dépassée celle des deux mots, la syntaxe infantile contient déjà une grande partie de la complexité de la syntaxe adulte. Comment l'enfant peut-il développer une connaissance aussi systématique et élaborée à partir d'une stimulation aussi partielle (comprenant très peu d'exemples) et souvent truffée d'ambiguïtés ?

Le processus d'acquisition de la langue a donné lieu à de vifs débats. Dépend-il d'un système cognitif prédisposé à cette acquisition ? En d'autres termes, existe-t-il un « organe du langage » qui facilite le passage d'une communication fragmentée à un discours général, comme le soutient Noam Chomsky ? Pour ce linguiste américain et d'autres, l'enfant dispose d'une grammaire universelle innée. Celle-ci le guiderait au cours de l'acquisition de la langue, en restreignant l'ensemble des combinaisons possibles et en lui procurant les éléments fondamentaux d'analyse. Pour apporter quelques éléments au débat, nous avons exploré la façon dont

LES AUTEURS

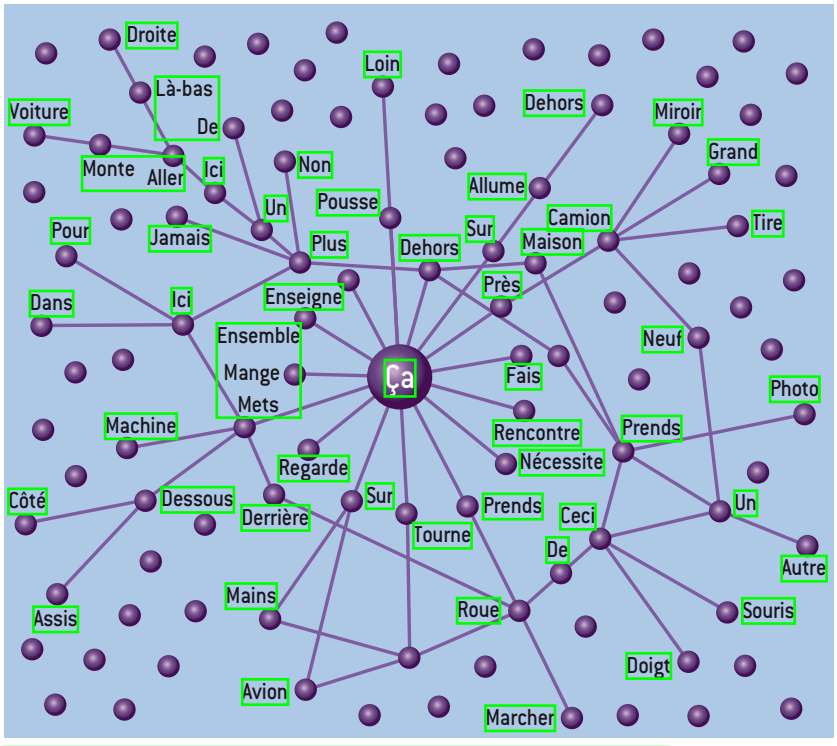
Ricard SOLÉ est chercheur à l'Université Pompeu Fabra de Barcelone, en Espagne, et membre de l'Institut de Santa Fe, aux États-Unis.

Bernat COROMINAS MURTRA est chercheur au Département de science des systèmes complexes de l'Université médicale de Vienne, en Autriche.

Jordi FORTUNY est chercheur à l'Université de Barcelone.

L'ÉMERGENCE DE LA SYNTAXE

Vers l'âge de deux ans, les enfants passent directement de la phase dite des deux mots (au cours de laquelle ils n'associent que deux vocables de façon assez primitive) à une étape où ils construisent des phrases complètes. Il n'existe pas d'étape à trois mots. Comment cette transition se produit-elle ?



Au départ, le réseau d'associations syntaxiques a une structure essentiellement arborescente. La plupart des mots sont déconnectés ou ne sont reliés que par paires.

© Pour la Science - n° 434 - Décembre 2013

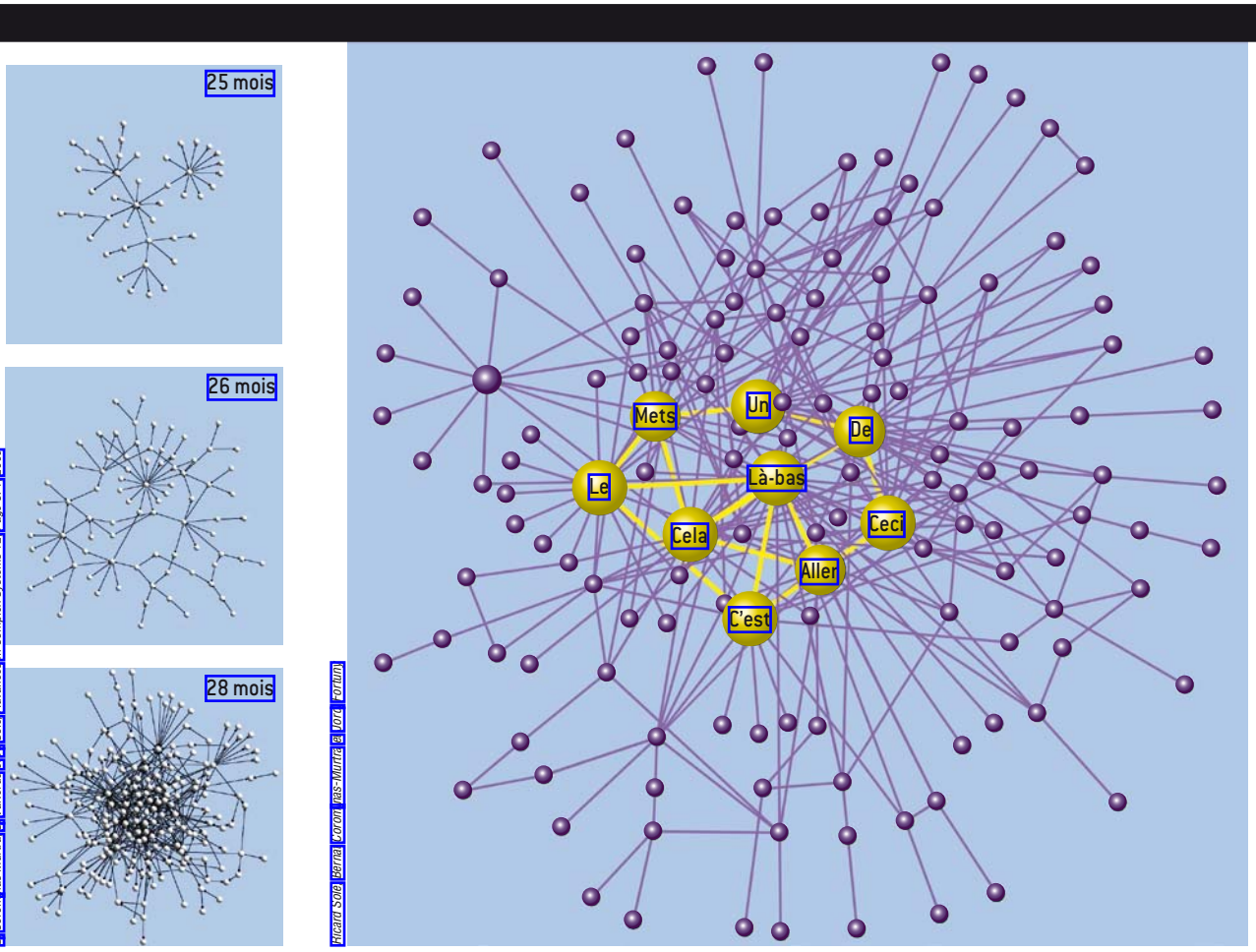
l'enfant relie les mots les uns aux autres à mesure de son apprentissage.

En 2009, nous avons mené une étude fondée sur la base de données CHILDES, qui contient des dialogues entre des parents et leurs enfants, régulièrement enregistrés pendant plusieurs mois. À partir de ces conversations – caractérisées par beaucoup d'imitation et de redondance, surtout au début –, on peut extraire les structures syntaxiques qui apparaissent peu à peu. On forme un réseau en liant les mots connectés dans les « phrases » de l'enfant. Il peut être nécessaire d'extraire d'abord les constituants fondamentaux de ces « phrases » *via* une analyse complexe, incluant l'examen détaillé du contexte de la conversation (les productions enfantines sont souvent peu claires, avec notamment des mots déformés).

Comment ce réseau évolue-t-il à mesure que l'enfant acquiert la syntaxe ? Au début, il est peu étendu et constitué de sous-réseaux non connectés entre eux : chacun comprend un faible nombre de mots, présente peu de boucles et ressemble à un arbre *(voir l'encadré ci-dessous)*. Un tel réseau indique que les relations syntaxiques entre les termes sont encore rares et illustre le fait que les productions enfantines se composent d'à peine plus de deux mots.

Vers l'âge de deux ans survient une transition entre un réseau peu connecté et un réseau caractérisé par un grand nombre de liens. L'organisation des relations syntaxiques se modifie de façon brutale. Comme dans les réseaux sémantiques, des réseaux sans échelle apparaissent : tous les mots sont désormais connectés et, si la plupart d'entre eux ne le sont qu'avec un ou deux autres, certains ont de très nombreux liens. Là encore, les réseaux sont de type petit monde, les mots pouvant être rapidement reliés par une relation syntaxique grâce aux nœuds très connectés, tels *un* ou *ça*.

Au cours de la transition, un changement qualitatif se produit dans la façon de créer des phrases. Avant cette transition, l'enfant ne prononce que des termes isolés ou des combinaisons de deux vocables complémentaires d'un point de vue sémantique, tels qu'un nom et un adjectif s'y rapportant ou un verbe et un nom. Les particules fonctionnelles (principalement les articles et les prépositions) sont quasi absentes. Plus tard, avec l'incorporation de ces dernières, de nouvelles constructions syntaxiques apparaissent. Elles se fondent sur l'emboîtement successif de sous-structures, qui permet de créer des structures de dimension illimitée. Par exemple, la phrase « L'enfant joue à la balle » peut être utilisée comme subordonnée dans la phrase « J'ai vu que l'enfant joue à la balle. » Ce mécanisme, qualifié de récursivité, est considéré par l'école chomskienne comme la propriété essentielle du langage humain.



Quand l'enfant atteint l'âge de deux ans, le réseau syntaxique se métamorphose : il passe d'un réseau arborescent à un réseau sans échelle. Les liens se multiplient et plusieurs superconnecteurs apparaissent *(nœuds jaunes sur l'image de droite)*, permettant à l'enfant de produire des phrases complètes et bien organisées.

Il n'est efficace pour la communication que grâce à notre capacité d'interpréter les structures produites. Cette interprétation est compositionnelle, c'est-à-dire qu'elle prend en compte les éléments lexicaux d'un énoncé, mais aussi leurs relations dans le contexte de la phrase : ce n'est pas une simple « addition » de significations. La capacité d'interpréter de façon compositionnelle les structures récursives est la clé du potentiel expressif du langage. Pour de nombreux experts, son acquisition au cours de l'évolution est l'une des principales énigmes posées par l'étude des origines du langage.

Le moindre effort

De telles observations restant assez qualitatives, nous avons tenté d'analyser de façon plus quantitative les propriétés des structures syntaxiques. Nous nous sommes intéressés à la fréquence d'usage des mots dans une langue à partir de l'analyse de textes écrits. Elle suit une loi dite de Zipf, en référence au linguiste américain George Zipf qui l'a décrite pour la première fois dans les années 1930. Cette loi stipule que la fréquence d'occurrence $f(r)$ d'un mot est inversement proportionnelle à son rang r (qui désigne sa place dans une liste où les mots sont classés par fréquence d'utilisation décroissante). Autrement dit, si le mot le plus employé (de rang $r = 1$) apparaît un certain nombre de fois dans un texte, le deuxième plus utilisé ($r = 2$) apparaît deux fois moins souvent, le troisième trois fois moins souvent, etc. Il en découle que peu de mots sont très fréquents.

En 2011, nous avons examiné une hypothèse formulée par Zipf au milieu du siècle dernier. Selon cette hypothèse, le langage humain suivrait le principe du moindre effort, qui concernerait aussi bien l'émetteur que le récepteur d'un message. Moins un locuteur emploie de mots, plus il économise son effort, mais plus il augmente celui que son interlocuteur doit faire pour déchiffrer le message. D'après Zipf, le nécessaire compromis qui en résulte pourrait régir l'évolution des langues. Cela expliquerait en particulier qu'aucun lexique n'est composé d'un seul mot (moindre effort pour l'émetteur, qui ne doit apprendre qu'un mot), ni d'innombrables vocables ayant chacun un sens unique (moindre effort pour le récepteur, puisqu'aucun mot n'est ambigu).

Pour vérifier la pertinence de cette hypothèse, nous avons utilisé des résultats

Luc Steels, Laboratoire Sony, Paris

2. LES AUTOMATES de Luc Steels, de la Société *Sony CSL*, à Paris, apprennent à partir de leur environnement et inventent des mots pour se référer aux objets. En faisant de multiples essais et en communiquant, plusieurs robots peuvent développer un lexique commun et une grammaire simple.

BIBLIOGRAPHIE

B. Corominas-Murtra *et al.*, **Emergence of Zipf's law in the evolution of communication,** *Physical Review E*, vol. 83, art. 036115, 2011.

R. V. Solé *et al.*, **Diversity, competition, extinction : The ecophysics of language change,** *Journal of the Royal Society Interface*, vol. 7, pp. 1647-1664, 2010.

A.-L. Barabási et E. Bonabeau, **Les réseaux invariants d'échelle,** *Dossier Pour la Science*, n°66, 2010.

B. Corominas-Murtra *et al.*, **The ontogeny of scale-free syntax networks : phase transitions in early language acquisition,** *Advances in Complex Systems*, vol. 12, pp. 371-392, 2009.

R. V. Solé *et al.*, **Language networks: their structure, function and evolution,** *Complexity*, vol. 15, pp. 20-26, 2009.

D. Bassano, **Premiers pas dans le langage,** *Cerveau&Psycho*, n°3, 2003.

antérieurs qui quantifiaient les efforts du locuteur et du récepteur grâce à la théorie de l'information. En outre, nous avons supposé que le langage se complexifie en incorporant des éléments nouveaux et qu'il est doté d'une capacité informative illimitée. Nous avons alors montré que le système de communication le moins coûteux en termes d'efforts se conforme à la loi de Zipf. On retrouve donc bien une caractéristique des langues naturelles à partir de l'hypothèse du moindre effort.

Enfin, nous avons établi qu'il est possible de construire un système formel d'emboîtement de contenus où le passage de l'étape à deux éléments à celle à trois éléments implique une transition vers un potentiel de création illimité. Ce système fait intervenir la loi de Zipf, qui associe la précision (de multiples mots peu courants et spécifiques) et l'ambiguïté (peu de termes très fréquents, mais dont l'usage est générique). Si ce cadre théorique est encore abstrait, il suggère que la transition observée dans le processus d'acquisition de la langue obéit en partie à un principe organisationnel fondamental acquis par le cerveau au cours de l'évolution.

Pour étudier les origines de la complexité du langage, on doit aussi prendre en compte le rôle joué par l'évolution culturelle. Les langues subissent des changements notables en un temps bien plus court que celui de l'évolution génétique. Un texte écrit dans notre langue maternelle il y a à peine quelques centaines d'années contient de nombreux archaïsmes et peut être ardu à comprendre. L'entrelacement des évolutions linguistiques et culturelles est difficile à tester expérimentalement, mais la simulation informatique a permis de l'explorer.

Des langages artificiels

Dans le sillage du linguiste britannique Jim Hurford, divers chercheurs, tels Simon Kirby, de l'Université d'Édimbourg, ou Morten Christiansen, de l'Université Cornell, ont mené des expériences virtuelles au cours desquelles une population d'« agents », capables d'échanger et de décoder des mots, ont développé un certain nombre de propriétés caractéristiques du langage. Dans plusieurs d'entre elles, certaines règles d'ordonnancement des mots sont apparues de façon spontanée. Selon plusieurs scientifiques, tels S. Kirby et Terrence Deacon, de l'Université de Californie, le langage

© Pour la Science - n° 434 - Décembre 2013

aurait évolué pour survivre dans un environnement défini par la nature du cerveau humain. Dans leurs modèles, le langage est considéré comme un virus qui infecte l'esprit de chaque individu et qui agit comme une entité symbiotique : les êtres humains en auraient besoin pour prospérer, voire pour survivre, tandis que le langage dépendrait d'eux pour se reproduire. Bien que cette hypothèse paraisse séduisante, elle renseigne peu sur les processus régissant l'évolution du langage.

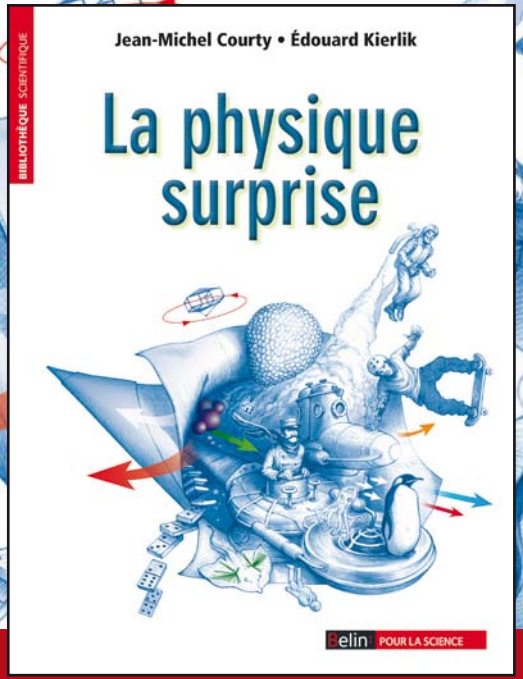
Découvrirons-nous un jour l'origine de ce dernier ? Le langage ne laissant pas de traces fossiles, nous ne retrouverons jamais la voie précise qu'il a empruntée. Néanmoins, nous pourrons peut-être reconstituer son développement, au moins à grands traits, en nous fondant sur l'existence de règles universelles qui semblent guider l'évolution vers la complexité. Bien que les langues du monde arborent des différences lexicales et grammaticales notables, la présence de modèles organisationnels généraux (tels que la loi de Zipf ou les réseaux de types petit monde et sans échelle) suggère que le langage humain constitue la seule solution pour une communication à la fois sûre et flexible.

Une autre approche novatrice consiste à faire évoluer des formes de langage au sein de systèmes robotiques. Au lieu de construire des modèles de langage humain, on emploie des robots équipés de capteurs et d'un cerveau simplifié (une sorte de réseau neuronal). C'est l'approche adoptée par Luc Steels, du laboratoire de l'entreprise Sony (Sony CSL, pour *Computer Science Laboratory*), à Paris, et de l'Institut de biologie évolutive de Barcelone. Il a employé deux systèmes robotiques simples, dotés de vision et capables d'observer un ensemble d'objets et de les nommer. Ces systèmes pouvaient communiquer entre eux et échanger des informations sur les objets environnants.

L. Steels a ainsi tenté de recréer les premiers pas du langage. Ses robots devaient segmenter l'information relative à chaque objet, telles sa couleur ou sa localisation, et choisir un mot pour la nommer. Les termes employés étaient inventés, tels *bozopite* ou *malewina*. Durant la phase de communication, chaque robot tentait de déduire à quel objet ou attribut son compagnon faisait référence. De temps à autre, un accord surgissait et les deux machines commençaient à employer le même terme. À la fin, les robots utilisaient un grand nombre de mots pour indiquer l'orientation spatiale (en haut, en bas, etc.) et d'autres attributs tels que la couleur et la taille. D'autres études avec des robots plus évolués ont aussi montré l'émergence d'une grammaire rudimentaire.

De tels travaux renseignent sur l'importance de l'interaction physique du robot avec le milieu et de la perception qu'il a de lui-même et des autres dans l'espace. Ils permettent aussi d'étudier si la structure du langage humain constitue l'unique solution au problème de la communication complexe, ou seulement une parmi d'autres. Quels types de langages apparaîtront le jour où l'on utilisera des robots plus complexes ? Verra-t-on surgir un langage semblable au nôtre – ce qui confirmerait l'existence de lois universelles –, ou découvrira-t-on une forme de communication totalement nouvelle ? ■

La physique surprise



Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

Que nous réserve cette Physique surprise ? Trente-neuf pièces à déguster sans modération, mitonnées par les auteurs. Le style et les croquis, l'actualité et la variété des thèmes vous séduiront, vous amuseront, vous surprendront. Oui, on peut franchir le mur du son en chute libre.
Non, les veines ne sont pas bleues. Oui, on peut séparer le chaud et le froid dans un courant d'air.
Alors... Bon appétit !

Éditions Belin/Pour la Science 2013
184 pages – 24 euros – ISBN 978-2-8425-5121-9

Disponible en librairie et sur www.pourlascience.fr

Sonder les volcans avec des rayons cosmiques

N. Lesparre, D. Gibert et J. Marteau

© Pour la Science - n° 434 - Décembre 2013

Prévoir les éruptions volcaniques reste un défi pour les scientifiques. La solution viendra-t-elle des muons, issus du rayonnement cosmique, qui permettent de radiographier l'intérieur des volcans ?

© Hélène Giraud/Sygma/Corbis

L'ESSENTIEL

- Prévoir le jour où aura lieu une éruption volcanique et la puissance de l'événement reste un enjeu essentiel.
- Une nouvelle méthode est à l'étude : la radiographie par les muons.
- Les muons sont issus des particules cosmiques et sont partiellement absorbés par la matière.
- L'analyse du flux des muons qui traversent un volcan permet de l'« ausculter ».
- En suivant l'évolution des entrailles du volcan, les volcanologues devraient être capables de prévoir la survenue d'une éruption.

La Soufrière, massif volcanique situé en Guadeloupe, s'est formée récemment (entre 100 000 et 200 000 ans). Il est toujours actif et dangereux. Il a connu une activité magmatique intense, en témoignent ses multiples dômes, diverses éruptions explosives et des effondrements partiels. Jean-Christophe Komorowski et Georges Boudon, à l'Institut de physique du Globe de Paris, ont montré que de tels événements se sont produits au moins huit fois au cours des 7 800 dernières années. Depuis la formation du dôme actuel, en 1530, la Soufrière a subi six éruptions phréatiques (avec libération d'un énorme panache de vapeur d'eau). Le dernier événement date de 1976-1977 : il s'agissait d'une éruption magmatique avortée, le magma étant remonté à quelques kilomètres sous le volcan. Face à la menace d'une violente éruption, 73 000 personnes avaient été évacuées et étaient restées éloignées de chez elles durant six mois. Depuis, le magma a relâché de façon sporadique des gaz acides dans le système hydrothermal du volcan. L'activité du volcan a progressivement diminué jusqu'en 1992, où elle a augmenté à nouveau, vraisemblablement à cause d'une réorganisation de la circulation des fluides.

Comment prévoir les éruptions ?

Parmi les différents scénarios d'éruptions envisageables, on peut craindre un effondrement du dôme, une éruption phréatique ou une remontée de magma. Risque-t-on une explosion du type de celle de 1980 au Mont Saint-Helens, comme cela s'est déjà produit il y a quelque 3 000 ans ? Prévoir ces événements de façon fiable et suffisamment à l'avance pour évacuer les populations concernées : tel est bien le Graal des volcanologues. Ils disposent de diverses méthodes pour ausculter le volcan et essayer de prévoir quand surviendra un tel événement et quelle en sera la violence. De surcroît, ils en conçoivent de nouvelles : parmi elles, la radiographie par les muons cosmiques.

1. LA SOUFRIÈRE DE GUADELOUPE est un volcan actif, qui est déjà entré en éruption à diverses reprises. En radiographiant ses entrailles à l'aide de muons, pourrait-on mieux prévoir les risques potentiels ?

© Pour la Science - n° 434 - Décembre 2013

En quoi consiste la méthode ? Elle n'est pas sans rappeler la radiographie aux rayons X. Ces derniers traversent l'organisme, sont plus ou moins absorbés par les tissus et les os qu'ils rencontrent sur leur passage, et nous donnent des images de l'intérieur du corps humain, liées à cette absorption variable. De même, les rayons cosmiques traversent la matière. Serait-il possible d'observer les entrailles des volcans au moyen de ces rayons cosmiques, plus ou moins absorbés par la matière qu'ils traversent ? L'idée fut proposée au milieu des années 1960 par l'équipe de Luis Alvarez (1911-1988), lauréat du prix Nobel de physique en 1968 : il suggéra d'utiliser les rayons cosmiques pour ausculter la grande pyramide de Khéphren et y rechercher la chambre de la Reine.

Découverts en 1912 par le physicien américain d'origine autrichienne Victor Hess, les rayons cosmiques arrivant sur Terre sont constitués d'une « pluie » de particules produites par les rayons cosmiques primaires qui bombardent l'atmosphère terrestre. Les particules produites dans ces « cascades » sont de natures variées : électrons et photons, entre autres, mais aussi muons. Le muon est une particule élémentaire qui a les mêmes propriétés que l'électron, si ce n'est qu'il est instable (sa durée de vie est égale à 2,2 microsecondes) et que sa masse est environ 200 fois supérieure (206,8 fois précisément). Les muons sont parfois surnommés électrons lourds. Ce sont ces muons, sur lesquels nous reviendrons, qu'utilisa l'équipe d'Alvarez pour « voir » à travers les épaisses parois de la pyramide.

C'est au milieu des années 1990 que l'équipe japonaise de Kanetada Nagamine eut l'idée d'utiliser les muons cosmiques pour ausculter les volcans. Depuis, les détecteurs de particules ont été notablement améliorés, ce qui a conduit plusieurs équipes à s'intéresser à la radiographie des volcans à l'aide des muons. Avoir accès à de telles images permettrait de suivre l'évolution des entrailles des volcans et, par exemple, de détecter une remontée de magma ou l'apparition de poches de vapeur avant toute manifestation visible.

LES AUTEURS

Nolwenn LESPARRE est géophysicienne à l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire, à Fontenay aux Roses.
Elle a été lauréate du Prix *Le Monde* de la recherche universitaire 2012.

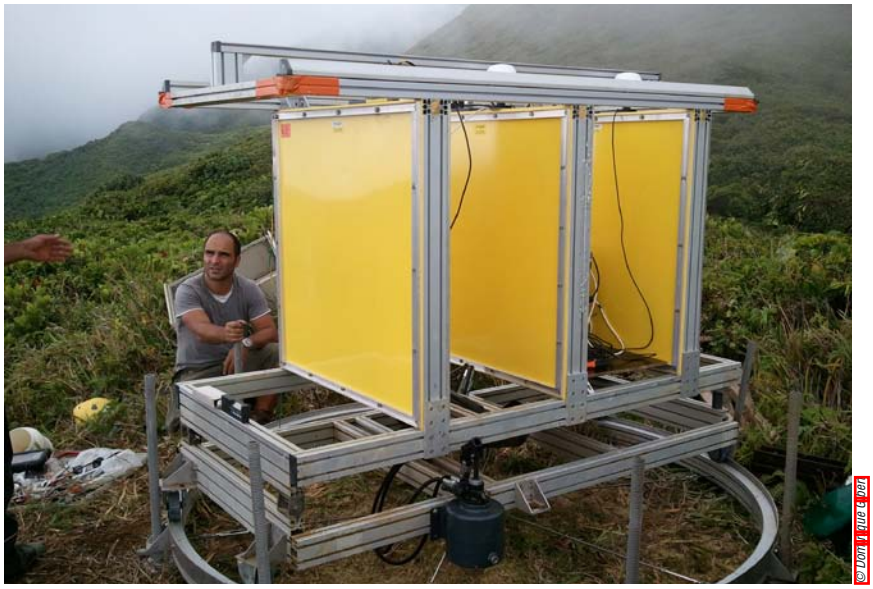
Dominique GIBERT est géophysicien à l'Institut de physique du Globe de Paris et professeur à l'Université de Rennes 1.
Il coordonne le projet DIAPHANE.

Jacques MARTEAU est physicien des particules à l'Institut de Physique nucléaire de Lyon.
Il a travaillé sur les expériences neutrinos OPÉRA et T2K.

Un volcan sous surveillance

Parmi ces équipes, le groupe DIAPHANE réunit des géophysiciens et des physiciens des particules de l'Institut de physique du Globe de Paris, de l'Institut de physique nucléaire de Lyon et du laboratoire Géosciences Rennes. Cette équipe mène des expériences sur plusieurs volcans aux Philippines, sur l'Etna et aux Antilles, où elle s'intéresse surtout à la Soufrière, surveillée en permanence par l'équipe de l'Observatoire volcanologique de Guadeloupe *(voir l'encadré page ci-contre)*. Comme nous l'avons évoqué, ce volcan subit des éruptions phréatiques, c'est-à-dire l'expulsion violente de grands volumes d'eau sous forme de panaches de vapeur.

L'énergie thermique du volcan est emmagasinée dans les réservoirs hydrothermaux – des poches d'eau chaude. L'apport de chaleur en provenance de la chambre magmatique et l'accumulation d'énergie résultant de l'obstruction progressive des exutoires – fumerolles et sources – servant habituellement à son évacuation peuvent entraîner une surpression telle qu'elle déclenche une éruption. La quantité d'énergie stockée et la rapidité avec laquelle elle est évacuée déterminent la violence de l'éruption. Ces deux paramètres dépendent du volume des réservoirs d'énergie et de la structure du dôme volcanique. L'altération du dôme est accentuée par la circulation de fluides



2. LES DÉTECTEURS DU TÉLESCOPE de la Soufrière mis au point par les auteurs sont constitués de barreaux scintillants arrangés en séries perpendiculaires, constituant une matrice *(les carrés jaunes)*. Ces barreaux captent les muons et un photomultiplicateur transforme le signal initial en un signal électrique. Un télescope comporte au moins trois matrices, chacune contenant 256 pixels de 25 centimètres carrés. L'espacement des trois matrices définit la résolution des mesures. Le détecteur résiste aux conditions météorologiques difficiles qui règnent à la Soufrière : pluies, ouragans, etc. De surcroît, il est transportable par hélicoptère dans des endroits difficiles d'accès.

© Pour la Science - n° 434 - Décembre 2013

La surveillance des volcans

Lors de la remontée de magma vers la surface, un volcan est secoué de petits séismes, nommés trémors volcaniques. La mesure de la sismicité est donc une méthode privilégiée pour surveiller les volcans et anticiper une éruption. Elle permet notamment de localiser la région où le fluide qui remonte fracture la roche pour se frayer un chemin. Il est alors important de disposer d'une imagerie sismique de la région, permettant d'évaluer la répartition des vitesses de propagation des ondes sismiques à l'intérieur du volcan. La résolution de l'imagerie sismique est liée à la précision avec laquelle on localise les événements détectés.

Les mouvements de fluide à l'intérieur de l'édifice peuvent également entraîner une déformation du sol qui peut être mesurée par GPS ou même par interférométrie radar à l'aide de satellites. Cependant, les satellites survolent un même endroit environ tous les 20 jours. On obtient ainsi une information globale sur les déformations du volcan, mais il est difficile de détecter des variations rapides.

Le suivi de la composition et du flux de gaz apporte aussi des renseignements sur l'arrivée de magma frais en profondeur et sur les interactions de fluides liées à la présence d'un système hydrothermal. Pour assurer cette surveillance, il faut effectuer des prélèvements dans les sources hydrothermales ou les fumerolles, ce qui n'est pas sans danger. Mais, grâce à la mise en place récente de spectromètres de terrain automatiques, les mesures peuvent aujourd'hui être faites à distance et plus régulièrement.

Tout comme l'imagerie sismique, les imageries magnétiques, électriques et gravimétriques permettent d'identifier les structures internes d'un volcan et de révéler notamment les régions de passage préférentiel des fluides (magma et eau). Elles peuvent aussi indiquer les zones altérées par l'érosion hydrothermale et susceptibles d'être emportées lors d'une déstabilisation de l'édifice.

Toutefois, ces techniques exigent une présence humaine sur le volcan, ce qui peut être risqué. Il arrive en effet que des éruptions se produisent sans qu'aucun signal précurseur n'ait été détecté, comme ce fut le cas pour le volcan Mayon aux Philippines en mai 2013, qui est pourtant bien surveillé.

Les fumerolles reflètent l'activité d'un volcan, mais leur surveillance nécessite de s'en approcher, ce qui n'est pas dénué de risques.

© Nouvent / Espame

hydrothermaux très acides qui attaquent la roche et réduisent sa tenue mécanique.

Qui plus est, le sommet (1 467 mètres) est entouré d'une forêt tropicale dense jusqu'à 1 100 mètres d'altitude et le relief le rend difficile d'accès. Les pluies abondantes sont accompagnées de fortes rafales, toutes conditions qui rendent la surveillance difficile. Dès lors, la tomographie par rayons cosmiques présente l'intérêt théorique de suivre les entrailles du volcan sans avoir à l'escalader. Restait à démontrer la faisabilité de la méthode et sa fiabilité.

Les muons, que nous avons déjà mentionnés, sont produits à une quinzaine de kilomètres d'altitude lors des collisions entre les rayons cosmiques primaires et les atomes de l'atmosphère. Les particules primaires résultent de phénomènes astrophysiques violents, telles les explosions d'étoiles en supernovae, au cours desquelles elles sont accélérées. Les plus énergétiques détectées à ce jour ont une énergie d'environ $3{,}2 \times 10^{20}$ électronvolts, c'est-à-dire plus que les plombs d'une carabine à air comprimé !

Lorsqu'elles pénètrent dans l'atmosphère, ces particules heurtent les molécules d'air. Sous le choc, de nouvelles particules sont libérées et se désintègrent à leur tour. Une cascade de désintégrations conduit à une averse de particules, nommée gerbe atmosphérique. Certains observatoires – HESS2, en Namibie, ou l'Observatoire Pierre Auger, en Argentine – sont consacrés à l'étude de ces phénomènes.

Les muons représentent cinq pour cent des milliards de particules qui constituent une gerbe atmosphérique. Leur énergie est comprise entre quelques dizaines et quelques milliers de gigaélectronvolts. Ils se déplacent à une vitesse proche de celle de la lumière dans le vide, ce qui allonge considérablement leur durée de vie apparente grâce à des effets relativistes. Cela leur permet de traverser l'atmosphère et d'atteindre le sol. Aux énergies considérées, les muons interagissent essentiellement par ionisation des atomes de la matière qu'ils traversent.

Les muons que... presque rien n'arrête

La perte d'énergie est approximativement constante et d'environ deux mégaélectronvolts par centimètre d'eau traversée. L'atmosphère ayant une épaisseur équivalant à dix mètres d'eau, les muons perdent deux gigaélectronvolts pour parvenir jusqu'au sol.

Les muons ne s'arrêtent pas en touchant le sol. Ils traversent la matière, où ils perdent de l'énergie plus rapidement que dans l'air. Si leur énergie est suffisamment grande et l'obstacle pas trop dense, ils peuvent le traverser de part en part. Si la densité de l'obstacle est trop élevée, ils sont arrêtés. On retrouve ici le principe de la radiographie aux rayons X, et on peut l'appliquer à la radiographie (ou tomographie) de l'intérieur d'un volcan. On mesure l'atténuation du flux de muons cosmiques produite par le volcan. L'atténuation augmente avec la quantité de matière traversée ou plus précisément l'opacité, c'est-à-dire le produit de la densité moyenne par la longueur du trajet dans le volcan.

Le principe décrit, comment procède-t-on en pratique ? On dispose d'un détecteur de particules – également nommé télescope, car on observe des rayons cosmiques – placé au pied du volcan et qui enregistre un flux de muons *(voir l'encadré pages 48 et 49)*. Le télescope utilisé à la Soufrière est robuste, résistant aux variations de température, insensible aux pluies tropicales et aux ouragans. Il est également léger et maniable, transportable par hélicoptère et déposé sur des pentes escarpées. Deux ou trois personnes peuvent l'installer. Un

vérin hydraulique et une base rotative permettent de modifier l'orientation du télescope et de l'ajuster avec précision. Il est alimenté par des panneaux solaires, une éolienne ou une pile à combustion.

Le télescope est équipé de barreaux scintillants arrangés en deux séries perpendiculaires, de façon à former un damier constituant une matrice. Un télescope comporte au minimum trois matrices de 256 pixels de 25 centimètres carrés permettant de détecter les muons provenant de 961 directions différentes. La résolution angulaire est adaptée en ajustant la distance entre les matrices.

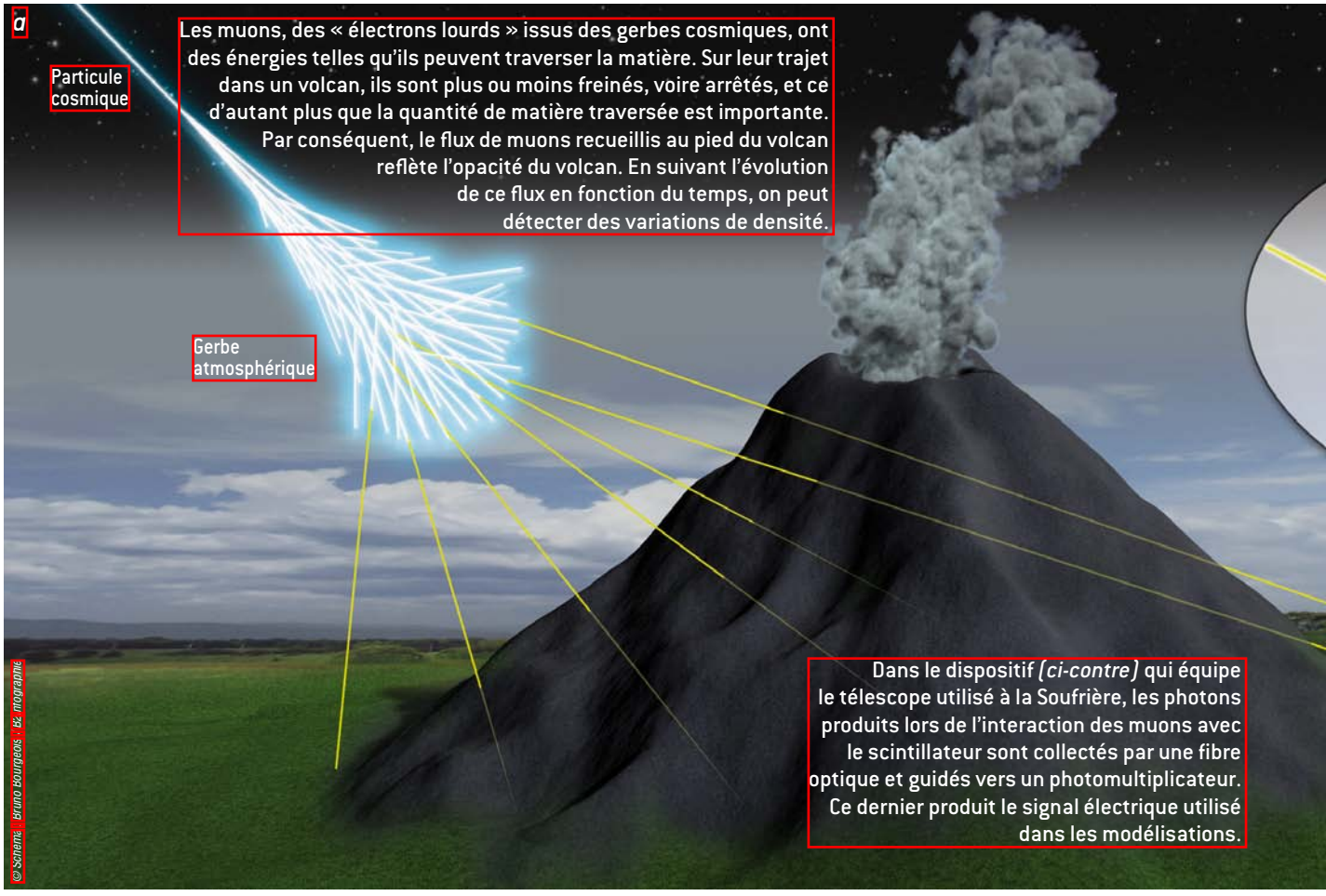
Lorsqu'une particule chargée traverse un barreau, la matière est ionisée et émet des photons avant de revenir à son état initial. L'énergie perdue par l'ionisation d'un muon produit entre 15000 et 20000 photons ultraviolets. Une fibre optique, collée au cœur du scintillateur, capture une partie de ces photons et les guide vers un photomultiplicateur qui produit une impulsion électrique. Ainsi, les muons produisent des photons que le photomultiplicateur convertit en électrons, signal électrique amplifié et mis en forme par un système électronique adapté de l'expérience OPERA (dédiée à l'étude des particules élémentaires nommées neutrinos). Les horloges utilisées pour repérer le passage de chaque muon ont une précision de quelques dizaines de picosecondes. Un ordinateur central collecte les informations provenant des différentes matrices et, dans le cas de la Soufrière, les transmet à l'observatoire volcanologique situé à une dizaine de kilomètres du volcan. Cela permet de mesurer un flux de muons en temps réel et de détecter d'éventuelles variations dues à des changements de conditions à l'intérieur du massif.

Le flux de muons décroît quand l'opacité augmente, et la mesure de son atténuation reflète les variations de densité à l'intérieur de l'objet sondé. Pour modéliser les variations de densité dans le volcan, nous résolvons ce que l'on nomme un problème inverse, méthode qui nous permet de déduire l'opacité du volcan du flux de muons l'ayant traversé. La tomographie par analyse du flux de muons nous donne des images de densité avec une résolution d'une vingtaine de mètres.

Comment calibrer le détecteur

Toutefois, restent encore plusieurs difficultés à résoudre : comment calibrer le détecteur pour obtenir une image de résolution optimale ? Comment évaluer la durée minimale d'enregistrement des données ? Et comment déduire du flux de muons enregistré les variations d'opacité du volcan ? D'abord, il est important d'estimer le flux de muons observables, afin d'ajuster la configuration du détecteur.

LE PRINCIPE DE LA RADIOGRAPHIE DES MONTAGNES PAR LES MUONS



© Pour la Science - n° 434 - Décembre 2013

Mais le calcul du flux de muons traversant une montagne nécessite de connaître approximativement la répartition des densités dans cet objet. Pour ce faire, on utilise les connaissances accumulées au fil du temps par les géologues. Bien sûr, on ignore les détails de l'anatomie du volcan, mais l'activité de la Soufrière est suivie depuis longtemps, ses failles et sa cheminée ont été explorées par divers moyens, de sorte que l'on a une idée de la répartition des masses en son sein.

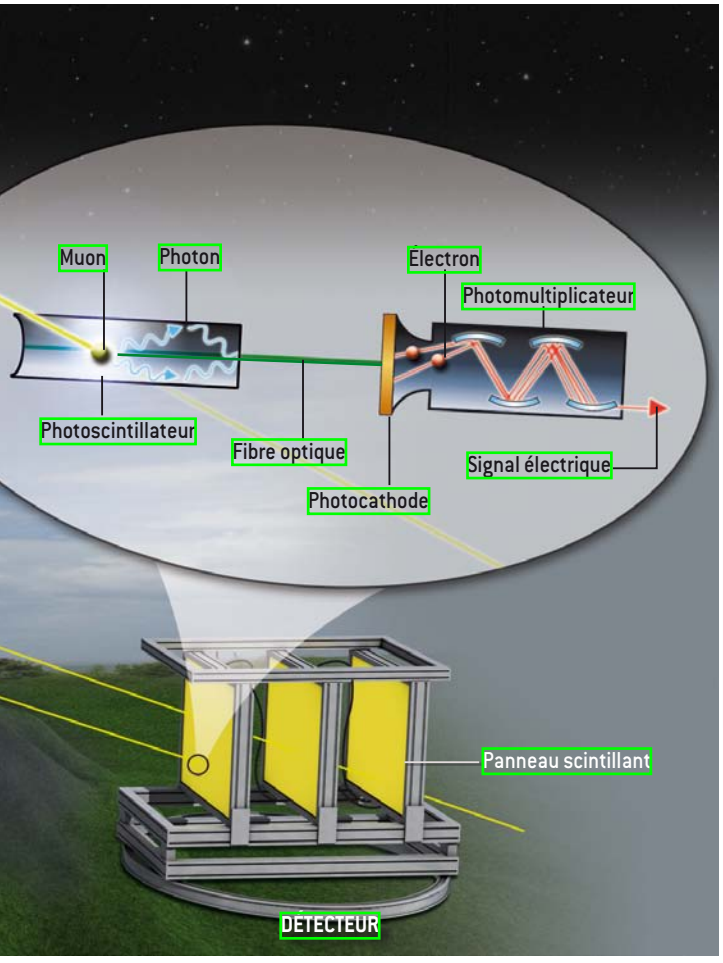
Partant de ces données obtenues par d'autres méthodes, on estime le flux en fonction de la position du télescope par rapport à l'objet, de son orientation et de sa configuration. On peut alors évaluer les épaisseurs de roche traversées par les muons pour chacun des angles de vue du télescope. Ces épaisseurs sont ensuite converties en opacité, caractéristique qui détermine le seuil d'énergie minimale nécessaire aux muons pour traverser l'objet sans être absorbés. Le flux de muons détectables correspond alors au flux de muons arrivant à la surface du volcan et dont l'énergie est suffisante pour qu'ils puissent en ressortir.

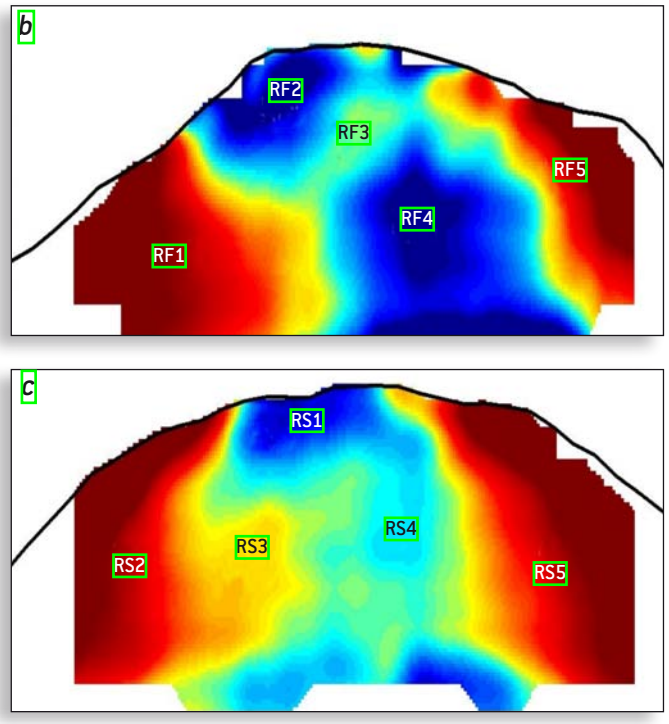
Les radiographies de la Soufrière

Qu'avons-nous observé ? De nombreux signes témoignent de l'activité actuelle du volcan : des fractures, des fumerolles, le lac d'acide du gouffre Tarissan et des zones altérées par le système hydrothermal. Nous avons installé notre télescope successivement en trois endroits à l'Est, au Sud et à l'Ouest du volcan. Le fait d'avoir plusieurs points de vue permet de valider l'analyse des données.

Les radiographies montrent des zones de très faible densité dans la partie supérieure du volcan ; elles sont associées à la zone active du cratère Sud (nommées RF2 et RS4) et indiquent la présence d'un réseau de cavités *(voir l'encadré ci-dessous)*. Elles révèlent aussi une région peu dense (RF4) à la base du dôme, pouvant correspondre à la présence de roches altérées par les fluides hydrothermaux. Les régions de densité plus élevées (par exemple RF1 et RF5) révèlent l'existence de roches non altérées, en particulier de l'andésite mise en place lors de la formation du dôme. Des régions de densités intermédiaires (RF3) correspondraient à des barrières rocheuses localisées entre les réservoirs hydrothermaux.

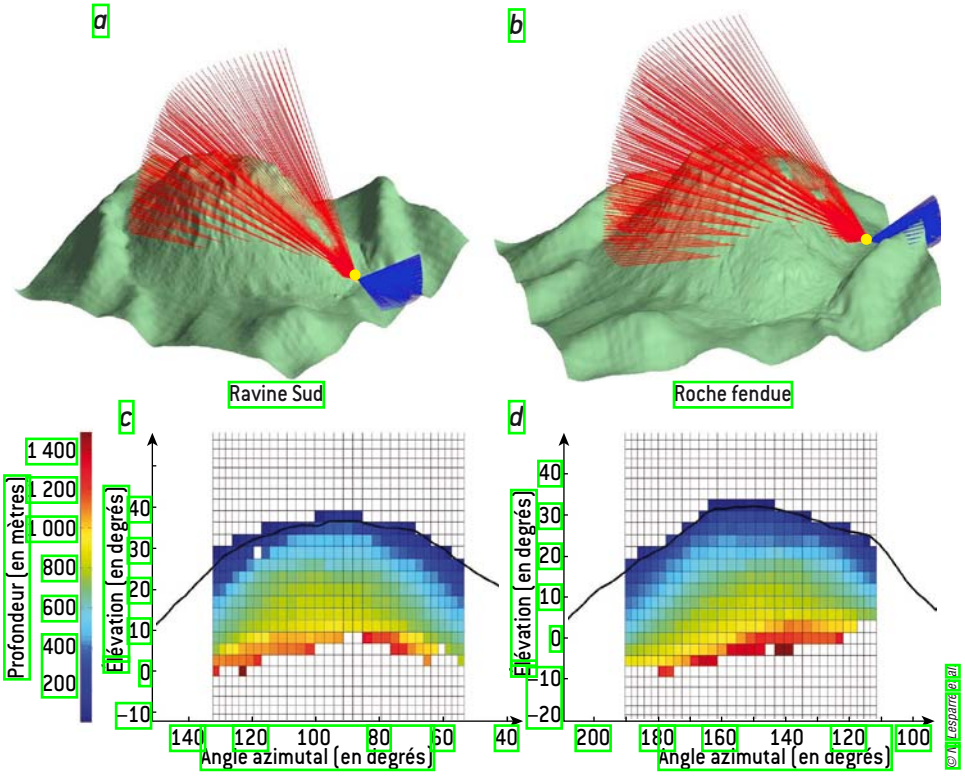
Nos radiographies présentent une bonne résolution spatiale. Elles ont été comparées à des images obtenues à l'aide d'autres méthodes géophysiques : les différentes images révèlent des structures similaires à l'intérieur du volcan. Par exemple, une tomographie électrique avait été effectuée à travers le dôme, apportant des informations sur les structures superficielles. Ce type d'images est sensible à la présence de





Le détecteur de la Soufrière de Guadeloupe a été placé à deux endroits : à l'Est sur le site de Roche Fendue, et au Sud sur le site de Ravine Sud. Dans chaque cas, les géophysiciens ont obtenu des coupes Est-Ouest *(b)* et Nord-Sud *(c)* de la densité moyenne de la Soufrière. Cette densité moyenne est élevée dans certaines zones *(en rouge)*, plus faible dans d'autres *(en bleu)*. Pour réaliser une modélisation tridimensionnelle de la Soufrière, plusieurs relevés pratiqués tout autour du volcan sont nécessaires.

© Modélisations | Lesparre et al.



3. LE TÉLESCOPE *(position repérée par le point jaune)* a été placé à deux endroits différents du volcan pour acquérir des données. Le premier site est celui de Ravine Sud *(a)*, le second celui de Roche fendue *(b)*. Tous les faisceaux de muons *(en rouge)* que le télescope est capable de détecter ont été calculés. Les auteurs ont également déterminé l'épaisseur de roche que les muons traversent à Ravine Sud *(c)* et à Roche fendue *(d)*. On constate que les muons permettent de radiographier des épaisseurs de roche supérieures à 1 000 mètres.

La résolution d'un problème inverse

Les problèmes inverses se posent quand il s'agit de retrouver les propriétés physiques d'un système à partir des résultats des mesures : connaissant les effets, on cherche à déterminer les causes qui les ont produites. Prenons l'exemple de la Soufrière de Guadeloupe.

Si l'on connaissait la configuration des densités à l'intérieur du volcan, on pourrait résoudre un problème direct (relativement simple), c'est-à-dire évaluer l'atténuation des muons pour cette configuration donnée. Dans le cas de la radiographie par les muons, on cherche à retrouver la distribution des densités à l'intérieur du volcan à partir des données dont on dispose : les mesures de l'atténuation du flux de muons. Pour résoudre ce problème dit inverse, on détermine les distributions des densités qui expliquent le mieux possible les données mesurées.

Mais de nombreux cas de figure sont envisageables. On réduit les possibilités en utilisant l'ensemble des connaissances géologiques acquises sur le volcan. On trouve ainsi une solution plus réaliste. Plusieurs techniques peuvent alors être choisies pour obtenir le meilleur compromis entre la solution la plus réaliste, celle qui explique le mieux les données et celle qui optimise le temps de calcul.

Les problèmes inverses interviennent dans d'autres disciplines, par exemple la médecine lors de la réalisation d'échographies ou de scanners : en recombinant toutes les images obtenues, et connaissant la densité moyenne normale des tissus traversés, on reconstruit le cerveau étudié en trois dimensions et on localise de façon précise la présence éventuelle d'une anomalie (tumeur, présence d'un caillot sanguin, etc.).

En médecine, la résolution en imagerie cérébrale, par exemple, est excellente, parce que l'on peut disposer tout autour du crâne du sujet une couronne de détecteurs captant les signaux.

Dans le cas de la Soufrière, nous ne disposons que d'un détecteur que nous avons déplacé dans deux positions orthogonales. La combinaison de ces données ne fournit pas une modélisation tridimensionnelle de l'intérieur du volcan, mais la répartition des masses dans la direction Est-Ouest *(Ravine Sud, b, dans l'encadré page 49)* et dans la direction Nord-Sud *(Roche fendue, c, dans l'encadré page 49)*.

fluides conducteurs et révèle les passages où les fluides du système hydrothermal circulent. Cependant, la résolution spatiale de la méthode n'atteint pas celle de la tomographie par analyse du flux de muons.

Après la réalisation de ces deux radiographies, le télescope est resté installé pendant plusieurs mois sur le même site. Durant ce suivi, nous avons enregistré une augmentation du flux de muons à travers certaines zones du volcan, où l'écran rocheux est tel que seuls les muons de haute énergie le traversent. Or, quand on fait la moyenne du flux de ces muons sur quelques jours, on constate qu'il est constant. Si l'on observe une augmentation du flux, c'est nécessairement que la densité du milieu a diminué.

En effet, la région concernée correspond à un site où des fumerolles présentent un regain d'activité. Par conséquent, il est possible qu'à la suite d'une réorganisation de la circulation des fluides à l'intérieur de l'édifice, les roches de la région étudiée se soient appauvries en eau. Cette observation, qui doit être confirmée par des mesures indépendantes, montre l'intérêt de la tomographie par muons pour la surveillance des volcans en continu.

Une surveillance en continu

Ainsi, l'installation d'un télescope sur les flancs de la Soufrière de Guadeloupe a permis de montrer qu'un détecteur adapté au milieu tropical fournit des radiographies intéressantes des entrailles du volcan. La méthode permet de distinguer les hétérogénéités à l'intérieur de l'édifice. Les nouvelles données accumulées devraient permettre de concevoir des modèles plus précis de l'évolution du volcan. Un suivi régulier de cette évolution devrait révéler les changements internes d'opacité. Géophysiciens et volcanologues pourront-ils alors prévoir d'éventuelles éruptions ? C'est bien sûr ce que nous espérons.

Cette expérience a été réalisée sur un volcan de type explosif, mais elle est aussi applicable à des volcans de type effusif, tel l'Etna. Quel que soit le type éruptif d'un volcan, il présente des structures internes plus ou moins denses liées à la présence de cavités, d'une colonne éruptive, de roches massives ou de cendres et de ponces... Nous l'avons souligné, le télescope utilisé à la Soufrière offre de nombreux avantages (résistant, manipulable, précis, etc.), et la méthode

© Pour la Science - n° 434 - Décembre 2013

permet de tomographier à distance des volcans dangereux, par exemple la Soufrière Hills de Montserrat. Toutefois, la tomographie par muons présente un inconvénient : elle n'est pas applicable partout.

Elle est bien adaptée au dôme de la Soufrière, qui a un diamètre de l'ordre du kilomètre et dont les pentes sont abruptes. Le flux de muons est suffisant pour obtenir en un mois une série de données exploitables. En revanche, un volcan de type bouclier comme le Piton de la Fournaise, à la Réunion, est moins adapté, car sa base est large de plusieurs kilomètres et ses pentes sont plus douces.

Dès lors, le flux de muons est fortement atténué par l'épaisseur de la roche, et il faudrait recueillir les données durant plusieurs mois, voire quelques années, pour commencer à distinguer les structures internes. Lors de l'expérience que nous avons réalisée sur l'Etna, volcan culminant à 3 300 mètres d'altitude, nous avons dû limiter notre étude à l'un des cratères sommitaux, le cratère Sud-Est, dont les dimensions sont comparables à celles de la Soufrière de Guadeloupe.

La tomographie par muons serait-elle applicable à d'autres objets que les volcans ? Oui, à condition de pouvoir aligner le flux de muons cosmiques, l'objet et le détecteur. D'autres applications sont envisageables, et un télescope a récemment été installé dans le laboratoire souterrain de l'Institut de radioprotection et sûreté nucléaire, IRSN, à Tournemire, pour caractériser les roches présentes au-dessus des galeries.

De la Soufrière au suivi des nappes phréatiques

La méthode pourrait servir à caractériser le milieu recouvrant des sites de stockage géologique ou à évaluer des ressources minières. Les mesures effectuées en continu sur la Soufrière ont également montré la possibilité d'observer des variations de densité. La méthode permettrait aussi d'évaluer les dimensions de nappes phréatiques et de suivre leurs fluctuations, ou encore de surveiller les sites de stockage de dioxyde de carbone. Cette toute jeune méthode devrait trouver de nombreuses applications ! ■

BIBLIOGRAPHIE

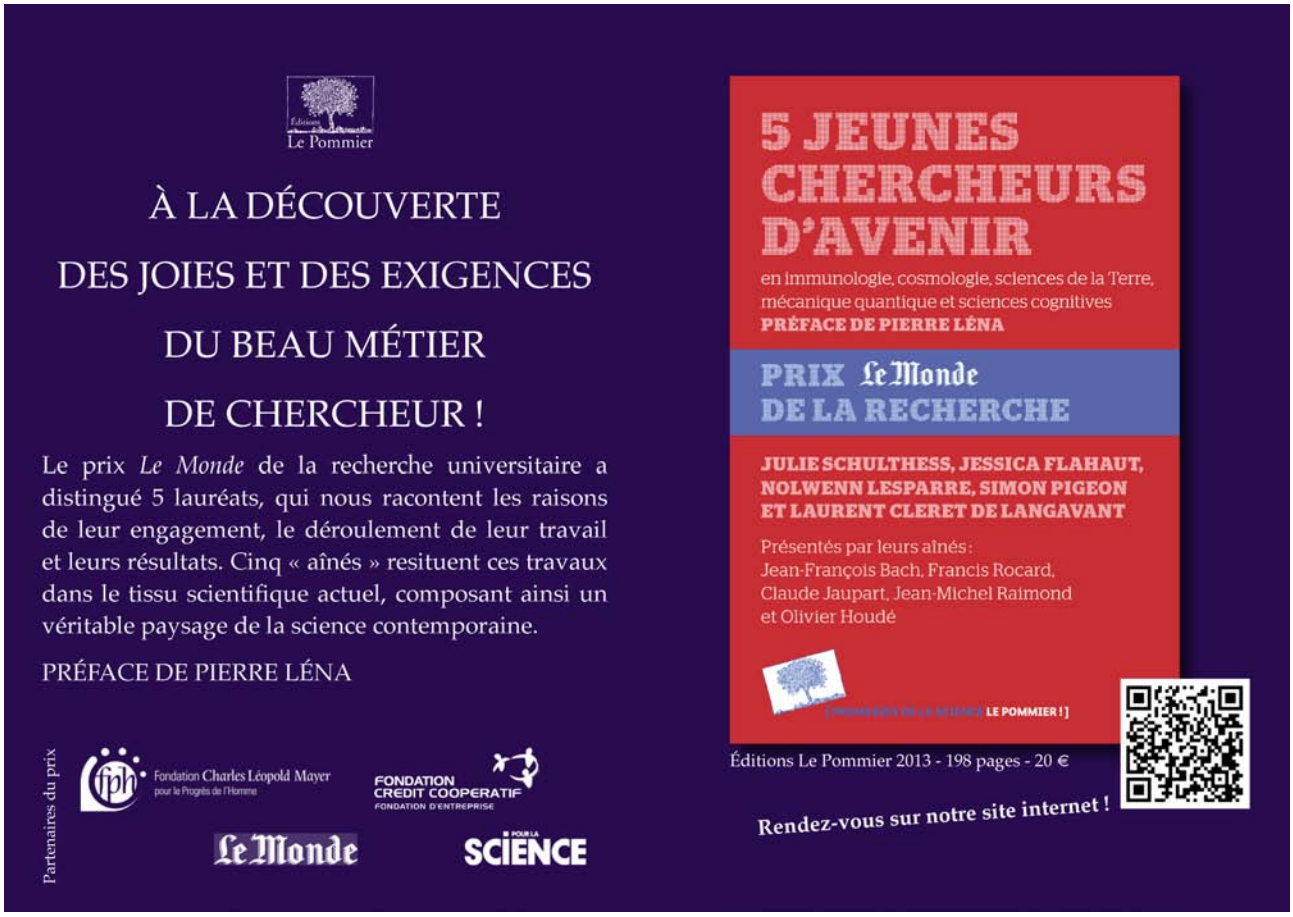
N. Lesparre *et al.*, **Density muon radiography of La Soufrière of Guadeloupe : First results and comparison with other tomography methods**, *Geophys. J. Int.*, vol. 190, pp. 1008-1019, 2012.

J. Marteau *et al.*, **Muons tomography applied to geosciences and volcanology**, *Nucl. Instrum. Methods A*, vol. 695, pp. 23-28, 2011.

N. Lesparre *et al.*, **Geophysical muon imaging : feasibility and limits**, *Geophys. J. Int.*, vol. 183, pp. 1348-1361, 2010.

J. Paul et J.-L. Robert-Esil, **Le roman des rayons cosmiques**, Ellipses, 2009.

P. De Wever et al., **Le volcanisme cause de mort et source de vie**, Vuibert, 2003.



De nombreux oiseaux migrateurs parcourent plusieurs milliers de kilomètres en voyageant la nuit. Comment surmontent-ils une telle épreuve ?

La migration nocturne
une épreuve extrême

Paul Bartell et Ashli Moore

Imaginez-vous sur un long vol de nuit. Les turbulences et le manque de confort vous empêchent de dormir. Lorsque vous arrivez à l'aéroport au petit matin, vous êtes déshydraté et de mauvaise humeur, mais une journée de réunions importantes vous attend. Le soir, vous ne souhaitez rien d'autre qu'une douche chaude et un long sommeil. Malheureusement, vous devez retourner à l'aéroport pour un autre vol de nuit.

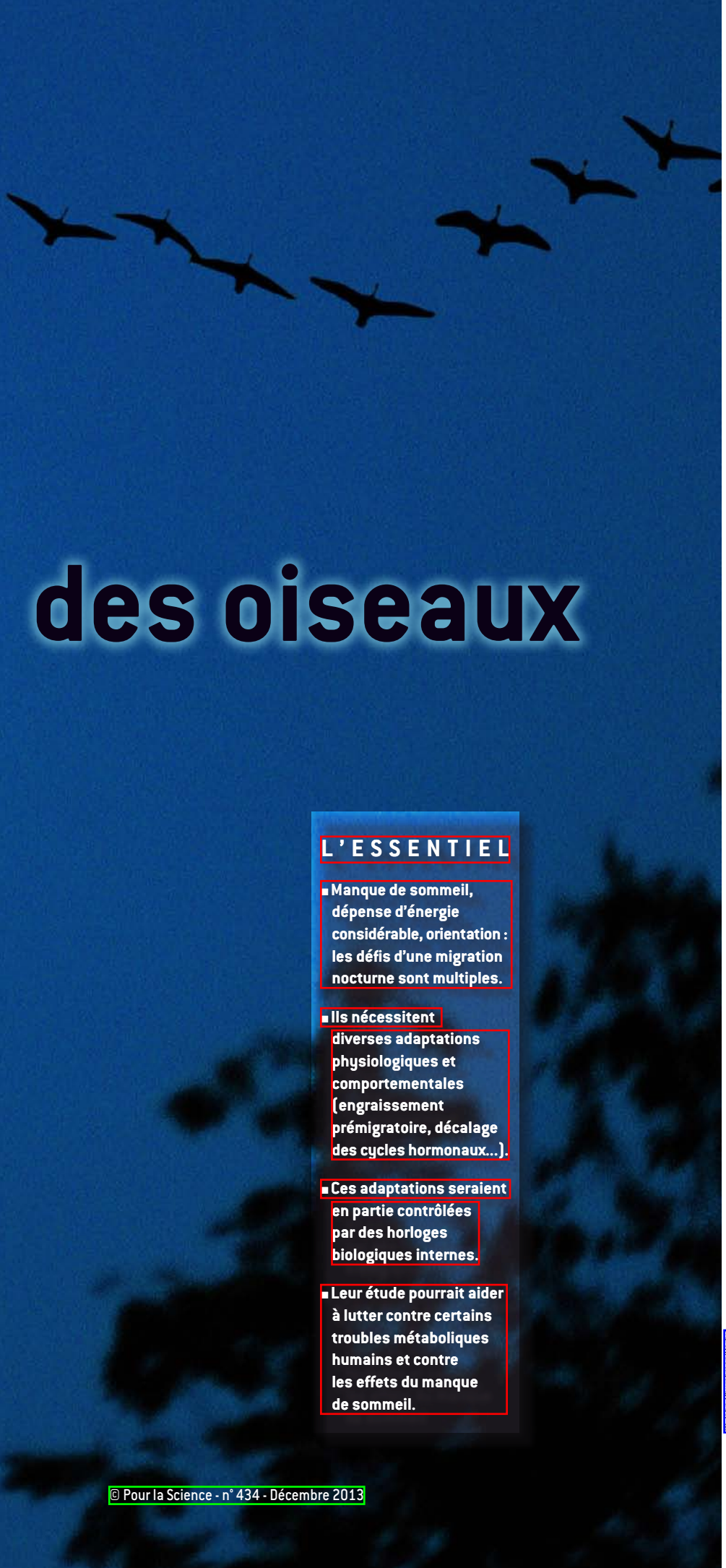
Vous supporteriez un tel programme de temps en temps, mais imaginez que ce soit votre rythme quotidien : travail de jour et vol de nuit, pendant plusieurs semaines d'affilée. Imaginez aussi qu'il n'y ait ni boissons ni nourriture à bord de l'avion. Et dernier détail : c'est vous qui fournissez l'énergie nécessaire au vol en pédalant sur un vélo fixe.

C'est bien sûr impossible. Pourtant, des milliards d'oiseaux accomplissent une performance similaire deux fois par an, lorsqu'ils migrent entre leurs sites de reproduction d'été et leurs zones d'hivernage. Parmi les 700 espèces d'oiseaux au moins qui nichent en Amérique du Nord, plus de 400 migrent (contre environ 200 en France). Dans le monde entier, les oiseaux migrateurs déclinent plus vite que les autres. Comprendre les défis auxquels ils sont confrontés est capital pour leur protection.

La migration requiert de spectaculaires changements saisonniers de comportement et de physiologie. À la fin de l'été, après l'envol des oisillons, les oiseaux muent et remplacent leurs plumes, anciennes et abîmées, par de nouvelles. En outre, ils se nourrissent abondamment – on parle d'hyperphagie. Cette quête de nourriture se traduit par une activité frénétique à cette époque de l'année. L'hyperphagie des oiseaux s'accompagne d'importants changements de la masse et de la composition de leur corps, qui devient très gras.

Les oiseaux partent ensuite pour un voyage de plusieurs semaines. Ils passent l'hiver dans des régions plus chaudes, qui leur offrent des ressources suffisantes. Puis ils muent à nouveau, avant une autre période d'hyperphagie de plusieurs semaines. Quand la durée des jours et la température ont assez augmenté, ils repartent en migration vers des sites de reproduction. À leur arrivée, les mâles délimitent des territoires. Des couples se forment, construisent des nids et pondent des œufs. Bientôt, ceux-ci éclosent, et les parents consacrent presque toute leur énergie à nourrir les poussins. Si le temps le permet, ils peuvent s'accoupler de nouveau et avoir une seconde couvée. Puis le cycle recommence *(voir la figure 1)*.

© Pour la Science - n° 434 - Décembre 2013



des oiseaux

L'ESSENTIEL

- Manque de sommeil, dépense d'énergie considérable, orientation : les défis d'une migration nocturne sont multiples.
- Ils nécessitent diverses adaptations physiologiques et comportementales (engraissement prémigratoire, décalage des cycles hormonaux...).
- Ces adaptations seraient en partie contrôlées par des horloges biologiques internes.
- Leur étude pourrait aider à lutter contre certains troubles métaboliques humains et contre les effets du manque de sommeil.

À l'évocation du mot migration, on pense souvent à une formation d'oies en V. Cependant, dans de nombreux cas, les migrations d'oiseaux sont difficiles à observer. Ainsi, la plupart des passereaux (des oiseaux chanteurs et d'autres espèces apparentées) migrent de nuit. Quels sont les avantages de telles migrations nocturnes ? Comment les oiseaux en supportent-ils les contraintes physiologiques et de quelle façon s'orientent-ils ? Quand dorment-ils ? Des études récentes ont apporté quelques réponses, mettant notamment en évidence le rôle des horloges biologiques internes.

Les humains prennent des vols de nuit pour les divers avantages qu'ils offrent, tels des billets moins chers ou la possibilité de passer la journée sur le lieu de destination. Dans une étude publiée en 2011, Guy Beauchamp, de l'Université de Montréal, a analysé les migrations diurnes ou nocturnes de multiples oiseaux d'Amérique du Nord. Ses résultats suggèrent qu'un voyage de jour est bénéfique pour les espèces sociales, qui migrent en grands ensembles et restent groupées parce que les oiseaux voient leurs congénères. Les migrations nocturnes, quant à elles, permettraient d'éviter les prédateurs, de minimiser le stress thermique et les pertes d'eau par évaporation, et de réduire les dépenses énergétiques (en raison d'une plus faible turbulence de l'air). Ce serait particulièrement avantageux pour les petits oiseaux ; et, de fait, la plupart d'entre eux migrent de nuit. En outre, voler la nuit libère une partie de la journée pour la quête de nourriture.

Des ombres devant la Lune

Comment sait-on que des oiseaux migrent la nuit ? On a d'abord remarqué que des groupes d'oiseaux changent d'endroit entre le soir et le lendemain matin. Depuis les années 1880, des ornithologues étudient les vols nocturnes en observant la Lune et en attendant que des oiseaux passent devant elle. On répertorie aussi les cris d'oiseaux en vol entendus la nuit : une liste a été publiée en 1899, mais cette technique n'a pris son essor que dans les années 1950, grâce à des avancées en matière d'enregistrement des sons. Lors du développement des radars, dans les années 1940, des « signaux fantômes » se sont révélés être des oiseaux migrants ; depuis, le radar est très utilisé pour l'étude des migrations. Nombre de

© John Cumming/Corbis

© Pour la Science - n° 434 - Décembre 2013

LES AUTEURS

Paul BARTELL est maître de conférences en biologie aviaire à l'Université de Pennsylvanie, aux États-Unis.

Ashli MOORE est chercheuse à l'Université de Pennsylvanie.

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

ces méthodes sont encore en service ; elles ont juste été un peu perfectionnées.

L'activité migratoire nocturne est aussi étudiée en laboratoire, où diverses manifestations physiologiques et comportementales persistent. En période de migration, les oiseaux qui la pratiquent ont des comportements stéréotypés pendant la nuit, nommés *Zugunruhe* (littéralement, inquiétude migratoire). Ils battent par exemple rapidement des ailes, comme s'ils s'apprêtaient à s'envoler d'un perchoir. Le terme *Zugunruhe* a été inventé par des aviculteurs allemands ; ceux-ci avaient capturé des oiseaux sauvages et observé ce comportement, qui endommageait les plumes des oiseaux, à certaines époques de l'année. Le jour, les oiseaux captifs ont un comportement bien distinct consistant à sautiller ou à se nourrir.

En dehors des périodes migratoires, la plupart des passereaux migrant de nuit ne sont actifs que pendant la journée. Comme chez tous les animaux, une horloge interne, synchronisée sur le cycle quotidien d'alternance de la lumière et de l'obscurité, contrôle les comportements d'activité et de repos. Elle est dite circadienne, mot construit à partir des termes latins *circa* et *diem* (« environ un jour »). Cette horloge est contrôlée par un ensemble de gènes *(voir l'encadré page 58)*, dont l'expression peut être régulée par des stimulus externes tels que la lumière.

Durant la migration, les oiseaux deviennent actifs à la fois le jour et la nuit. Ce changement, qui survient avec les changements de saisons, entraîne une réorganisation physiologique et comportementale notable. L'horloge circadienne envoie-t-elle alors des signaux différents à l'organisme ? Ou le cerveau et le corps réagissent-ils différemment à ses signaux pendant la période migratoire ?

Un comportement réglé comme une horloge

Les ressorts neurobiologiques du comportement migratoire nocturne sont mal connus, mais avec l'ornithologue allemand Eberhard Gwinner (1938-2004), de l'Institut Max Planck, en Allemagne, l'un de nous (P. Bartell) a montré qu'une horloge circadienne contrôle le comportement de *Zugunruhe*. Lorsque le cycle lumière-obscurité est remplacé par une faible lumière constante au cours du temps, les activités d'un oiseau se déroulent selon un cycle d'environ 24 heures. Cela indique que ces activités sont contrôlées par une horloge interne.

En dehors des périodes migratoires, il n'y a qu'un seul pic d'activité par cycle, contre deux pics pendant ces périodes. L'horloge circadienne qui contrôle l'activité migratoire nocturne est distincte de celle qui contrôle l'activité diurne, du moins chez les espèces étudiées. Leurs interactions, qui dépendent de la saison, déterminent si l'oiseau manifeste ou non un comportement de *Zugunruhe* et une activité migratoire.

Gwinner et Leonida Fusani, de l'Université de Ferrare, en Italie, ont montré que durant la période migratoire, l'activité nocturne dépend aussi des réserves d'énergie et de la nourriture disponible. Les oiseaux doivent parfois se reposer et se ravitailler sur des sites de halte migratoire. Lorsque des oiseaux maigres trouvent un endroit où la nourriture abonde, ils suspendent parfois leurs vols nocturnes pendant plusieurs jours et restent sur place jusqu'à ce qu'ils aient recouvré un poids suffisant. Ce n'est pas le cas quand la nourriture est rare sur le site de halte : les oiseaux se remettent alors rapidement en chemin. Ainsi, des stimulus externes influent sur les comportements contrôlés par les horloges biologiques.

1. LE CYCLE ANNUEL D'UN OISEAU MIGRATEUR (ici le bruant à gorge blanche, *Zonotrichia albicollis*) comprend deux périodes de migration, au printemps et à l'automne. À la fin de l'été, après la reproduction, les oiseaux changent de plumage et grossissent en se nourrissant d'aliments gras, afin de stocker l'énergie nécessaire à leur vol vers des climats plus chauds. À la fin de l'hiver, les oiseaux muent et engraissent de nouveau, avant de retourner sur leurs sites de reproduction.

© Pour la Science - n° 434 - Décembre 2013

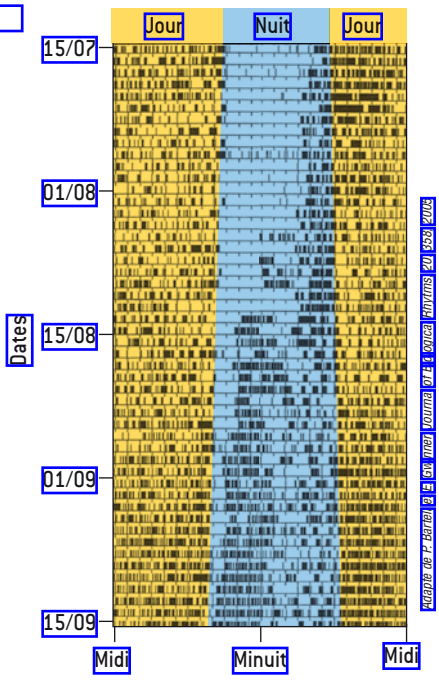
Le comportement migratoire nocturne est saisonnier : il se manifeste à l'automne, puis au printemps. Les variations de la durée du jour, ou photopériode, constituent un signe environnemental fiable et précis du moment de l'année. Elles sont d'autant plus prononcées que l'on est loin de l'équateur. Nombre d'organismes de la zone tempérée y sont sensibles, y compris des plantes, des insectes et des vertébrés.

Au printemps, l'allongement des jours incite les oiseaux à passer des activités d'hivernage à la mue prémigratoire, l'engraissement et la migration ; il entraîne aussi un développement des gonades, qui favorisera la reproduction. On a bien plus étudié le contrôle photopériodique de la reproduction que celui de la migration, mais certains principes sont les mêmes. La mesure de la photopériode s'effectue *via* l'horloge circadienne. Dans la nature, seuls les jours d'une longueur suffisante déclenchent des réactions telles que la migration ou la reproduction. En laboratoire, on peut provoquer ces réactions en éclairant un oiseau à différents moments de sa « nuit interne » – contrôlée par son horloge biologique –, afin de simuler la variation de son « matin ».

Les oiseaux perçoivent la photopériode grâce à des photorécepteurs situés dans le cerveau, où la lumière parvient à travers les plumes, la peau et le crâne. Même des oiseaux aveugles en sont capables. À la fin de l'hiver, quand les jours s'allongent, les photorécepteurs activent une cascade de modifications hormonales et physiologiques. Les mécanismes qui déclenchent la migration d'automne sont moins bien connus, mais on sait que le raccourcissement des jours est en cause.

Outre la photopériode, certains oiseaux utilisent un « calendrier interne » (une horloge circannuelle). Quand on les soumet à des jours artificiels de durée constante, ils présentent spontanément une activité de *Zugunruhe* deux fois par an. Gwinner a montré que des rythmes circannuels peuvent persister en captivité pendant 12 ans, soit la durée de vie maximale des passereaux captifs. Selon les espèces, ils sont plus ou moins réguliers et influent plus ou moins sur la régulation saisonnière de l'activité. En particulier, ils sont plus importants pour les oiseaux qui passent l'hiver près de l'équateur, où la longueur du jour ne varie pas assez pour déclencher la migration de printemps, ainsi que pour les migrateurs transéquatoriaux, confrontés à une inversion des changements de la photopériode : par exemple, des oiseaux migrant de l'hémisphère Nord vers l'hémisphère Sud à l'automne perçoivent d'abord un raccourcissement des jours, puis un allongement.

2. LE *ZUGUNRUHE*, caractérisé notamment par des battements d'ailes doublés d'une grande agitation, est visible en infrarouge sur cette image prise dans une complète obscurité. Les oiseaux migrant la nuit adoptent ce comportement, quand ils sont captifs, aux périodes correspondant à leur migration.



3. L'ACTIVITÉ D'UNE FAUVETTE DES JARDINS *(Sylvia borin)* en captivité, indiquée par des barres noires, augmente quand on diminue artificiellement la durée du jour d'une façon caractéristique de la période précédant la migration d'automne. Cette augmentation concerne la période nocturne, tandis que l'activité diurne reste inchangée.

Dans la nature, le comportement migratoire résulte donc de facteurs multiples, tels que le rythme circannuel interne, les paramètres génétiques, les signes sociaux, l'état physique et les stimulus environnementaux (photopériode, température, disponibilité de nourriture).

Récemment, Heiko Schmaljohann, de l'Institut de recherche aviaire Vogelwarte Helgoland, en Allemagne, a montré que le traquet motteux *(Oenanthe oenanthe)*, un petit migrateur nocturne, parcourt près de 15 000 kilomètres lors de ses migrations : il part d'Alaska et rejoint sa zone d'hivernage, en Afrique de l'Est, en passant par la Sibérie, l'Asie centrale et le désert d'Arabie. Comment les oiseaux se repèrent-ils sur une telle distance ? La mise au point de systèmes de localisation très légers permet de suivre leur périple, dont ils révèlent l'itinéraire. Ils indiquent aussi la distance parcourue, la vitesse et le nombre de haltes pour se reposer. Cette technique, encore récente, devrait être d'une grande aide pour étudier la navigation chez les oiseaux migrateurs : mécanismes sensoriels, mémoire spatio-temporelle, adaptations…

S'orienter dans un entonnoir

Avant la mise au point de ces dispositifs, les recherches dans ce domaine se déroulaient en laboratoire, à l'aide d'enceintes nommées entonnoirs d'Emlen, du nom des deux chercheurs qui les ont développées en 1966. Un oiseau est placé dans un dispositif en forme d'entonnoir, dont le fond est constitué d'un tampon encreur et où un tamis fixé sur la partie supérieure empêche le volatile de s'échapper. Les empreintes laissées sur les parois de l'entonnoir indiquent dans quelle direction il tente de s'envoler. Les versions modernes du dispositif utilisent plutôt du papier recouvert d'une mince pellicule blanche (que les oiseaux enlèvent quand ils marchent dessus) ou des techniques électroniques d'enregistrement et d'analyse des données.

On constate ainsi qu'en période de migration, l'oiseau s'oriente dans la direction

Kira Delmore, Université d'Amboise

4. DES SYSTÈMES DE GÉOLOCALISATION très légers ont été développés pour étudier les itinéraires, les durées et les sites de halte des migrations. L'un d'eux est ici porté par une grive à dos olive *(Catharus ustulatus)*.

P. Bartel

5. QUAND ILS S'APPRÊTENT À MIGRER, les oiseaux accumulent d'importantes quantités de graisse sous-cutanée *(en haut et en bas, les états respectifs précédant et suivant l'engraissement)*.

appropriée : vers le Sud à l'automne et vers le Nord au printemps pour des oiseaux de l'hémisphère Nord. En faisant varier les paramètres de l'expérience (par exemple, en projetant la sphère céleste au plafond ou en créant des champs magnétiques), on détermine quels stimuli servent à l'orientation *(voir la figure 6)*.

On a ainsi montré que les oiseaux de l'hémisphère Nord adoptent la direction à suivre (Nord ou Sud) en se fondant sur les variations saisonnières de la photopériode. Ils s'orientent ensuite grâce à la position des astres, à l'inclinaison du champ magnétique terrestre et à la polarisation de la lumière, qui diffère selon qu'on regarde vers le Soleil ou ailleurs. Cette polarisation leur permettrait de repérer la direction de l'astre quand il vient de disparaître, à la tombée du jour.

L'horloge circadienne pourrait aussi aider à la navigation, mais ce point est controversé. Certains biologistes et physiciens pensent que le cryptochrome, une protéine de l'horloge circadienne, joue un rôle dans la sensibilité des oiseaux au champ magnétique. D'autres chercheurs ont supposé que l'horloge circadienne leur permet de percevoir le décalage horaire, un indicateur de leur position, mais ils n'ont pu le prouver. Des expériences supplémentaires sont nécessaires pour confirmer le rôle de l'horloge circadienne.

Bien plus dur qu'un ultramarathon

La migration des oiseaux ressemble à un sport d'endurance extrême, mais elle dépasse de loin les performances des meilleurs athlètes humains. L'ultramarathon de Badwater, l'une des courses les plus difficiles au monde, part de la Vallée de la Mort, en Californie, et s'étend sur une distance de 217 kilomètres ; c'est bien peu au regard de la migration de la barge rousse *(Limosa lapponica)*, qui effectue un voyage de presque 11 000 kilomètres en huit jours ! Notons tout de même que le vol nécessite moins d'énergie par unité de masse que la course. En revanche, il mobilise 70 à 90 pour cent de la capacité aérobie maximale des oiseaux (le volume maximal d'oxygène qu'ils peuvent consommer par unité de temps).

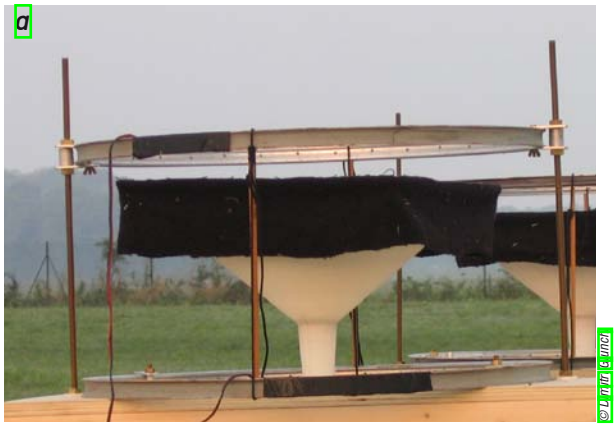
Contrairement aux athlètes humains, les oiseaux n'ont pas accès à des sources externes d'eau ou de nourriture pendant un exercice intense et prolongé. L'homme en a besoin, car les mammifères puisent d'abord leur énergie dans des hydrates de carbone – les sucres –, dont les réserves s'épuisent vite. Quand elles sont terminées, l'organisme consomme les lipides – les graisses. Or nos mécanismes de combustion des lipides sont peu efficaces, ce qui limite notre endurance, même si nous avons des graisses en excès. À l'inverse, les oiseaux migrateurs utilisent de préférence les graisses comme source d'énergie, et chaque individu en stocke avant son départ.

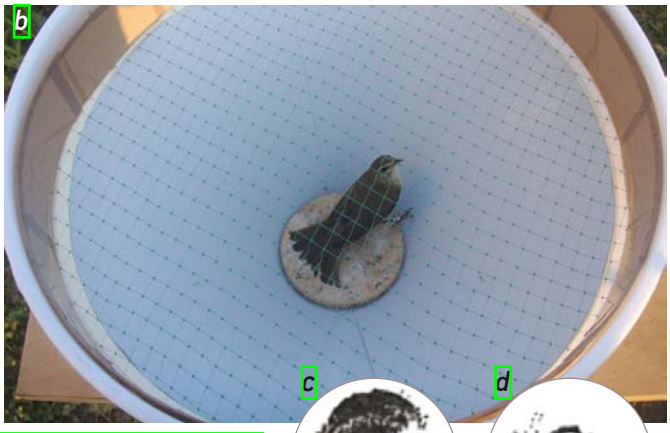
L'endurance est dans la graisse

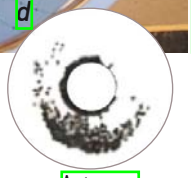
Ainsi, les oiseaux chanteurs doublent leur masse corporelle pour se préparer à la migration, essentiellement en augmentant les réserves de graisses sous-cutanées. L'engraissement prémigratoire est contrôlé par une horloge interne circannuelle chez de nombreuses espèces. La variation de la photopériode et la disponibilité en nourriture participent aussi à son déclenchement. Chez certaines espèces, des modifications métaboliques entraînent l'accumulation de graisses même sans augmentation de la quantité de nourriture absorbée. Cependant, dans la plupart des cas, les oiseaux mangent bien plus au cours de cette période. Ce comportement est associé à un accroissement saisonnier de la concentration en neurotransmetteurs (des molécules responsables de la communication entre neurones) dans l'hypothalamus, une aire cérébrale profonde qui contrôle l'appétit et la satiété.

Chez les mammifères, la satiété est en grande partie déclenchée par une hormone nommée leptine : synthétisée par les cellules adipeuses constituant la graisse corporelle, elle est d'autant plus abondante que ces cellules sont nombreuses et indique donc l'importance des réserves de graisses. On a voulu savoir si cette hormone intervient dans les modifications saisonnières de la prise de nourriture, du stockage des graisses et de leur utilisation chez les oiseaux migrateurs. Christopher Guglielmo, de l'Université de l'Ontario de l'Ouest, a montré que les oiseaux y sont aussi sensibles : ils ont un récepteur fonctionnel pour cette hormone, et des injections de leptine ont des effets notables sur leur métabolisme. Pourtant, le gène qui code la leptine est absent de leur génome.

© Pour la Science - n° 434 - Décembre 2013







Printemps

Automne

6. LES ENTONNOIRS D'EMLEN servent à déterminer la direction d'envol des oiseaux migrateurs, retenus captifs par un filet. Les empreintes des oiseaux, qui s'impriment sur le papier recouvrant la paroi de l'entonnoir *(b)*, montrent que cette direction diffère entre la migration de printemps *(c)* et celle d'automne *(d)*. Divers dispositifs permettent d'étudier les indices utilisés par les oiseaux pour s'orienter *(a, un bobinage électrique qui crée un champ magnétique artificiel)*.

Ils utilisent donc probablement un autre signal pour indiquer le niveau des réserves de graisse. L'un des candidats est l'adiponectine, une hormone également produite par les cellules adipeuses. Cette hormone favorise la mobilisation et la transformation du glucose et des acides gras.

Comme beaucoup d'autres facteurs métaboliques, l'adiponectine est produite selon un rythme circadien *(voir la figure 7)*. Des chercheurs de notre laboratoire ont montré que pendant la migration des bruants à gorge blanche *(Zonotrichia albicollis)*, le maximum de concentration en adiponectine survient pendant la nuit, tandis qu'il a lieu le jour aux autres périodes. En outre, le nombre de récepteurs de l'adiponectine augmente notablement durant la nuit dans le foie des oiseaux en migration. Ces deux changements favorisent la production d'énergie pour les vols nocturnes.

Le début de la période d'engraissement et sa durée sont liés à la distance de migration : plus cette dernière est longue, plus les oiseaux accumulent de graisses. Comment peuvent-ils alors décoller ? La taille de leurs organes digestifs diminue, compensant en partie le gain de poids associé aux graisses, et la masse musculaire augmente. Néanmoins, avant la migration, l'état physique d'un oiseau diffère de celui d'un athlète humain se préparant à une activité physique intense, pour laquelle un excès de poids n'est pas souhaitable. Chez un humain, l'augmentation de la masse corporelle, de la proportion de graisse et des concentrations de glucose et de lipides dans le sang seraient même des marques d'obésité et de syndrome métabolique – expression désignant un ensemble de dysfonctionnements métaboliques associés à un risque élevé de diabète et de maladies cardiovasculaires. En d'autres termes, selon les critères humains, les oiseaux en période prémigratoire sont obèses, diabétiques et susceptibles d'être terrassés par une crise cardiaque à tout moment !

La carte et la boussole

Dans les années 1950, l'ornithologue néerlandais Albert Perdeck (1923-2009) a déplacé de plusieurs kilomètres des étourneaux lancés dans leur migration automnale. Ceux qui avaient déjà accompli la migration auparavant ont corrigé leur trajectoire et leur temps de vol, et sont arrivés à leurs quartiers d'hiver habituels. Ceux qui migraient pour la première fois ont continué leur route vers le Sud comme si de rien n'était.

Cette expérience montre, d'une part, que les oiseaux migrateurs ont une capacité déterminée génétiquement à maintenir une direction fixe et, d'autre part, qu'ils établissent une carte mentale de leur environnement au fil des voyages. En d'autres termes, ils utilisent une boussole pour suivre une direction, mais aussi une carte pour déterminer quelle direction suivre afin d'arriver à destination.

Si les mécanismes de boussole sont assez bien connus, ceux qui sous-tendent la carte mentale des oiseaux migrateurs restent à déterminer. Ils ne sont établis que chez le pigeon voyageur (une espèce non migratrice), qui se fonderait sur les odeurs lui parvenant pour construire une carte chimique. Ainsi, un pigeon qui n'est jamais sorti de son pigeonnier le retrouve même si on l'en éloigne de plusieurs dizaines de kilomètres. Pour les oiseaux migrateurs, certains chercheurs pensent qu'ils utilisent les étoiles pour déterminer non seulement la direction, mais aussi leur position ; les astres seraient à la fois la carte et la boussole. Toutefois, ils n'ont pas réussi à le prouver.

Francesco Bonadonna
Responsable de l'équipe Écologie comportementale, CEFE/CNRS (UMR 5175)

Un rendement dix fois supérieur à celui des mammifères

Toutefois, les oiseaux brûlent bien mieux les graisses que les mammifères et sont beaucoup plus résistants aux troubles métaboliques. Les graisses fournissent le plus d'énergie par unité de masse, ce qui en fait un carburant idéal. Cependant, comme elles sont insolubles, elles sont difficiles à transporter des sites de stockage jusqu'aux muscles. Les oiseaux y sont bien adaptés, ce qui leur permet d'utiliser la graisse avec un rendement dix fois supérieur à celui des mammifères, voire plus pendant la migration. Ainsi, la concentration en protéines assurant le transport des lipides augmente durant la migration.

Chez les oiseaux, des horloges circadiennes contrôlent la prise de nourriture et l'utilisation des réserves énergétiques. Ces horloges, qui se réorganisent pendant les migrations nocturnes, interagissent de façon complexe avec les voies métaboliques. Les liens entre le métabolisme des lipides et les

mécanismes moléculaires des horloges font l'objet de nombreuses recherches, en raison de leurs implications dans certains troubles métaboliques humains. Chez l'homme, l'une de ces horloges, située dans le foie, influe sur la transformation des nutriments et sur des paramètres physiologiques tels que la glycémie. Des résultats récents suggèrent que chez les oiseaux, elle joue aussi un rôle important dans la régulation du métabolisme pendant la migration.

L'un de nous (P. Bartell) a ainsi montré que l'horloge circadienne hépatique change notablement chez des fauvettes à tête noire *(Sylvia atricapilla)* manifestant une activité de *Zugunruhe*. En particulier, la concentration de certaines molécules ne varie plus aux mêmes moments et la quantité de nombreuses protéines d'horloge fluctue entre des maximums plus élevés et des minimums plus faibles. Lors de cette étude, les oiseaux étaient soumis à des durées constantes du jour, ce qui montre que les modifications de l'horloge hépatique sont déclenchées par des signaux circannuels internes. En outre, ils ne mangeaient pas la nuit ; les changements physiologiques ne résultent donc pas de décalages entre les repas, ni de différences entre les nutriments absorbés.

Au cours de la migration, les oiseaux se nourrissent toujours le jour, mais le vol, très consommateur d'énergie, se décale vers la nuit. Il semble que pendant la journée, l'horloge hépatique prépare le corps de l'oiseau au vol nocturne en entraînant la synthèse de protéines nommées PPARγ, qui favorisent la production et le stockage des graisses *(voir l'encadré ci-dessous)*. Inversement, la nuit, l'horloge hépatique accélère le métabolisme des lipides et donc la production d'énergie pour le vol.

Ces expériences soulignent les relations complexes entre les horloges biologiques internes, le métabolisme des graisses et la

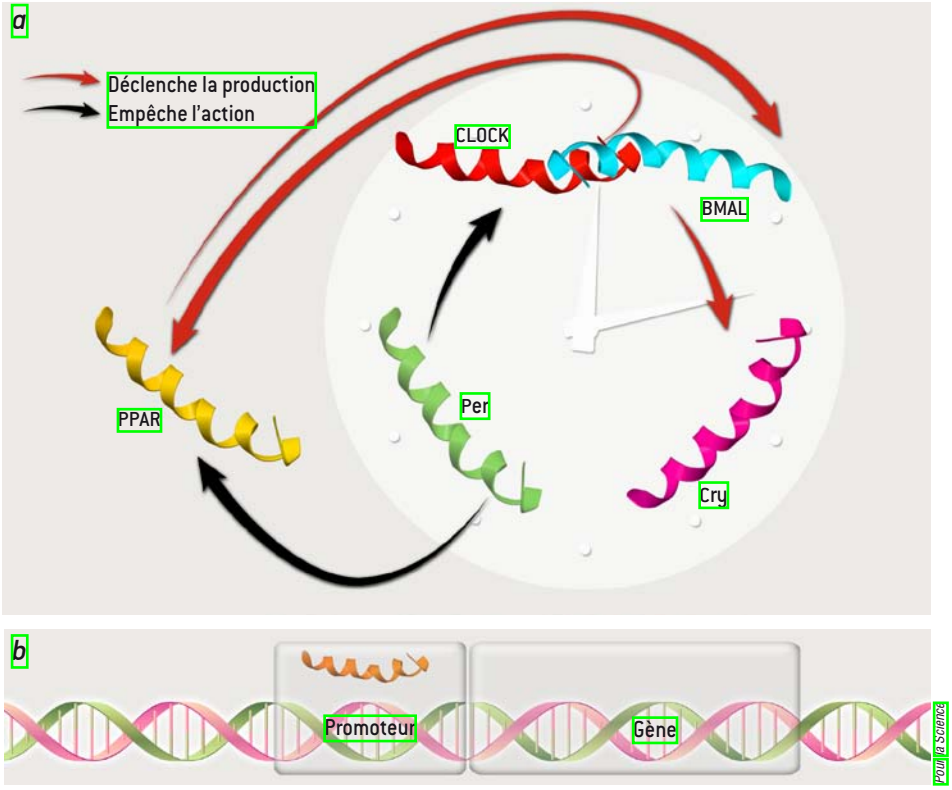
HORLOGES INTERNES ET MÉTABOLISME DES GRAISSES : DE MULTIPLES INTERACTIONS

Dans l'horloge circadienne des vertébrés interviennent quatre protéines principales, nommées CLOCK, BMAL, Period (Per) et cryptochrome (Cry). La concentration de ces protéines fluctue selon un cycle de 24 heures. Les protéines CLOCK et BMAL s'associent pour activer la transcription des gènes *Per* et *Cry*. Des protéines Per et Cry sont alors produites et se lient au complexe CLOCK/BMAL, qu'elles finissent par empêcher de réguler l'expression du génome – et donc de déclencher leur propre production. Il en résulte une diminution des quantités de protéines Per et Cry, régulièrement dégradées dans la cellule et non renouvelées. Quand elles sont devenues assez rares, le complexe CLOCK/BMAL active de nouveau la transcription des gènes *Per* et *Cry* et le cycle recommence.

Cette boucle de régulation moléculaire existe à divers endroits de l'organisme, où des groupes de cellules se coordonnent parfois pour remplir des fonctions d'horloge. Dans le cerveau, par exemple, une « horloge maîtresse » coordonne les horloges dites périphériques, telle celle localisée dans le foie, qui contrôle le métabolisme des nutriments et l'homéostasie énergétique (l'équilibre entre les apports et les dépenses d'énergie).

Outre *Per* et *Cry*, le complexe CLOCK/BMAL active la transcription périodique de nombreux autres gènes. L'un d'eux est celui de la protéine PPAR, qui régule à son tour la transcription d'autres gènes. Différentes formes de PPAR assurent des fonctions distinctes. Le PPARα, surtout présent dans le foie, favorise la dégradation des lipides. Le PPARγ, à l'inverse, entraîne la production et le stockage de graisses. Les comportements alimentaires suivant un rythme d'environ 24 heures chez nombre d'animaux, c'est peut-être aussi le cas de la concentration de ces composés.

Ce n'est pas la seule interaction des protéines PPAR et de l'horloge hépatique. La protéine Per limite la production de graisses en inhibant la régulation de la transcription effectuée par PPAR ; la production de Per étant périodique, il en serait de même de l'activité de PPAR. Enfin, les protéines PPAR activent l'expression du gène codant la protéine d'horloge BMAL. Ainsi, elles contrôlent l'horloge moléculaire, et sont contrôlées par elle en retour.



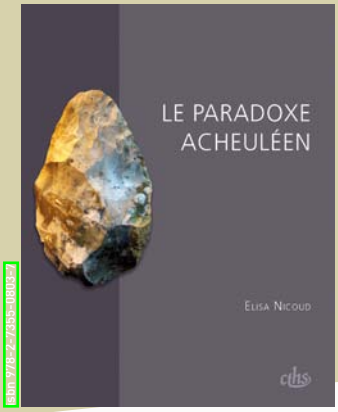
LES HORLOGES CIRCADIENNES DES VERTÉBRÉS sont notamment fondées sur les fluctuations périodiques des concentrations de quatre protéines (CLOCK, BMAL, Per et Cry), qui s'influencent mutuellement *(a)*. Elles interagissent avec le métabolisme des graisses, en contrôlant la production de protéines PPAR – qui rétroagissent sur la production de protéines d'horloge – ou en inhibant leur action sur l'expression du génome. Pour déclencher l'expression d'un gène (et la production des protéines qu'il code), les protéines se fixent sur ses promoteurs, des segments d'ADN qui le précèdent *(b)*.

© Pour la Science - n° 434 - Décembre 2013

Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques

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

Collection documents préhistoriques



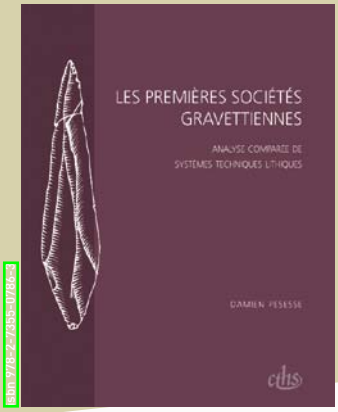
Le Paradoxe acheuléen

Élisa Nicoud

Les vestiges acheuléens se caractérisent par la présence d'un objet d'une même famille typologique : morphologie générale en amande, extrémité mince aux bords convergents et l'autre épaisse, deux faces taillées selon deux plans de symétrie (bifaciale et bilatérale) approximatifs. Le biface est un objet intrigant élevé au rang de « fossile directeur » d'une culture de la préhistoire, derrière lequel plusieurs éléments variés se regroupent pourtant. Nous verrons alors que ce terme générique recouvre des industries distinctes et révèle l'existence de nouvelles dynamiques de peuplement européen au Pléistocène moyen.

Coéditeur : École française de Rome

309 p., ill., 21 x 27 cm, 45 €



Les Premières sociétés gravettiennes
Analyse comparée de systèmes techniques lithiques

Damien Pesesse

L'étude des premières sociétés gravettiennes fournit un éclairage original sur les processus culturels affectant ces populations entre 31 000 et 27 000 BP. La comparaison des séries lithiques de La Gravette, Puy Jarrige et La Vigne Brun met en évidence une tradition technique cohérente qui définit la première composante gravettienne en France et dans certains pays limitrophes.
Le développement de ces pratiques et les modifications du système technique lithique à la fin de l'Aurignacien sont mis en évidence dans le gisement de l'abri Pataud.

288 p., ill., 21 x 27 cm, 45 €

Le lapis lazuli dans l'Orient ancien
Production et circulation du Néolithique au IIe millénaire av. J.-C.

Michèle Casanova

Le lapis-lazuli occupe une place de tout premier plan dans les sociétés du Proche-Orient ancien. Son histoire, entamée au Néolithique avec les parures découvertes au VIIe millénaire à Mehrgarh, se prolonge jusqu'au IIe millénaire avant J.C. et même au-delà. Par l'examen détaillé de sa présence, par la typologie des objets, la caractérisation des outillages et des savoir-faire, par les questions de dimension anthropologique qui se cristallisent sur les emplois et les fonctions des objets en lapis-lazuli, ces questions peuvent éclairer la connaissance du mouvement historique d'ensemble de l'humanité.

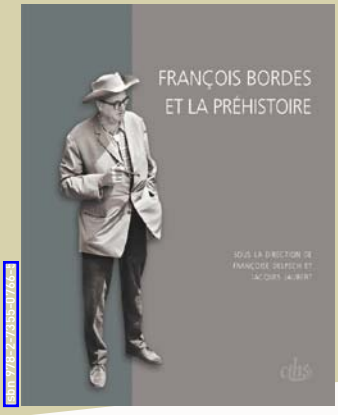
284 p., ill., 21 x 27 cm, 45 €

Peuplements et préhistoire en Amériques

Denis Vialou (dir.)

Cet ouvrage réunit les contributions de soixante préhistoriens de neuf pays, impliqués dans des recherches sur le terrain, de l'extrême nord du continent jusqu'à sa pointe australe. Plusieurs grandes problématiques y sont analysées : les peuplements, les cultures paléoindiennes en Amérique du Nord, les chasseurs-cueilleurs, les horticulteurs ou encore les peuples pêcheurs en Amérique du Sud, la technologie d'industries lithiques...
Profondément diverse et originale, la préhistoire en Amériques révèle des comportements sociaux et économiques en union remarquable avec les milieux naturels variés de l'immense continent. Elle témoigne de la créativité novatrice et résolument moderne des Sapiens préhistoriques.

492 p., ill., 21 x 27 cm, 52 €

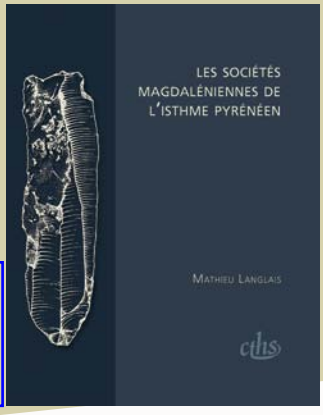


François Bordes et la préhistoire

Françoise Delpech et Jacques Jaubert (dir.)

Excepté quelques publications individuelles ou les journées hommages de la Société préhistorique française (1982) demeurées inédites, c'est le premier ouvrage exclusivement consacré à l'oeuvre du préhistorien François Bordes (1919-1981). Incontestablement, avec André Leroi-Gourhan, il est l'un des deux grands noms de la discipline pour la seconde moitié du XXe siècle en France : géologue, préhistorien, auteur de nombreuses fouilles sur des sites prestigieux du Sud-Ouest, initiateur de la taille expérimentale et à l'origine de travaux précurseurs et fondamentaux, notamment du point de vue méthodologique.

328 p., ill., 21 x 27 cm, 45 €

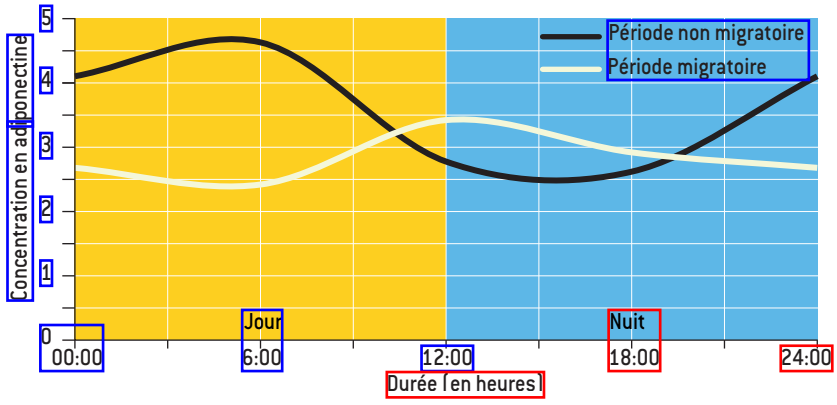


Les sociétés magdaléniennes de l'isthme pyrénéen

Mathieu Langlais

Les sociétés de chasseurs-cueilleurs du magdalénien, qui ont perduré pendant sept millénaires entre Méditerranée et Atlantique, sont appréhendées ici à travers leurs équipements lithiques. Cet angle d'approche nous révèle que la confrontation de l'armement et de l'outillage en silex s'avère un levier dialectique efficace pour enquêter sur les moteurs évolutifs et sur les interactions entre les transformations socio-économiques et les changements environnementaux au cours de la fin du Dernier Maximum Glaciaire et du Tardiglaciaire.

340 p., ill., 21 x 27 cm, 45 €



7. LA CONCENTRATION DE L'HORMONE ADIPONECTINE, qui favorise l'utilisation du glucose et des acides gras, fluctue de façon périodique. Lors de la migration, les fluctuations se modifient, le maximum se produisant pendant la nuit.

migration. Des études complémentaires sont nécessaires pour mieux les comprendre.

Si les oiseaux migrent la nuit et se nourrissent le jour, ils dorment probablement très rarement. Pourtant, la migration est exigeante sur les plans physique et cognitif : les oiseaux naviguent dans l'obscurité sur des milliers de kilomètres et rencontrent chaque jour de nouveaux territoires, sur lesquels ils doivent trouver de la nourriture et éviter les prédateurs. Notre homme d'affaires imaginaire, pédalant la nuit pour faire voler son avion et sollicitant son cerveau le jour pour le travail de bureau, souffrirait d'un grave handicap cognitif après deux jours de ce régime. Les oiseaux semblent bien plus résistants...

Les connaissances sur la durée, le moment et les modalités du sommeil des oiseaux migrateurs sont encore imprécises, mais elles progressent. De nombreux oiseaux peuvent ne dormir que d'un hémisphère cérébral : une moitié du cerveau est endormie, tandis que l'autre reste éveillée, de sorte que l'animal peut maintenir une activité physique partielle. Les oiseaux migrateurs utilisent peut-être cette tactique en vol ; sans doute trouvent-ils plutôt le temps de faire des sommes pendant la journée ; ou peut-être ont-ils une capacité unique à supporter le manque de sommeil.

Deux tiers de sommeil en moins

Cette dernière hypothèse semble proche de la réalité chez les bruants à couronne blanche *(Zonotrichia leucophrys)*. En 2004, Niels Rattenborg, de l'Université du Wisconsin, et ses collègues ont mesuré le sommeil d'oiseaux en captivité et constaté qu'ils passaient 63 pour cent moins de temps à dormir en période de migration. Les oiseaux ne compensaient pas le manque de sommeil par une augmentation de son intensité et ne dormaient pas pendant la journée. Pourtant, leurs performances à un test cognitif évaluant leur capacité d'apprentissage n'ont pas diminué. Des humains soumis à une privation de sommeil équivalente obtiennent des résultats médiocres à ce genre de tests, de même que les bruants non migrateurs.

Ainsi, selon qu'ils sont ou non en période de migration, les oiseaux résistent bien ou mal au manque de sommeil. On ignore les mécanismes sous-jacents, mais leur étude aiderait peut-être à améliorer les fonctions cognitives des personnes subissant des veilles prolongées, tels les soldats et les pilotes.

Dans cette étude, les éthologues n'ont pas constaté de sommeil diurne ni unihémisphérique. Cependant, l'équipe de Verner Bingman, à l'Université d'État de Bowling Green, a observé ces deux comportements en laboratoire chez un autre oiseau migrateur, la grive à dos olive *(Catharus ustulatus)*. Ce passereau effectue des microsommes d'une durée de 12 secondes environ. De courtes périodes de sommeil diurne permettraient une certaine récupération sans empiéter sur la recherche de nourriture, ni trop s'exposer aux prédateurs.

Les oiseaux migrateurs semblent défier les règles de la physiologie. Ils deviennent obèses, mais sont des athlètes d'élite ; ils dorment à peine et pourtant leur cerveau et leur corps sont au meilleur de leur forme. Leurs traits comportementaux et physiologiques ressemblent à ceux d'une des phases du trouble bipolaire, nommée manie, qui apparaît souvent de façon saisonnière : hyperactivité, fixation sur un but, peu de sommeil, intensification du métabolisme, augmentation des concentrations en hormones du stress…

Quoi qu'il en soit, la migration s'accompagne d'adaptations physiologiques et comportementales complexes et déconcertantes. Même si nous sommes loin de les comprendre parfaitement, nous avons au moins découvert un facteur commun : des horloges biologiques interviennent presque partout. Peut-être pourrions-nous en tirer une leçon et, plutôt que de résister à nos rythmes naturels quotidiens et saisonniers, vivre à la cadence de nos horloges biologiques. ■

BIBLIOGRAPHIE

F. Bairlein *et al.*, **Cross-hemisphere migration of a 25 g songbird,** *Biology Letters*, vol. 8, pp. 505-507, 2012.

G. Beauchamp, **Why migrate during the day,** *Journal of Evolutionary Biology*, vol. 24, pp. 1969-1974, 2011.

C. Guglielmo, **Move that fatty acid: Fuel selection and transport in migratory birds and bats,** *Integrative and Comparative Biology*, vol. 50, pp. 336-345, 2010.

T. Fuchs *et al.*, **Daytime micro-naps in a nocturnal migrant: An EEG analysis,** *Biology Letters*, vol. 5, pp. 77-80, 2009.

J. Weber, **The physiology of long-distance migration : Extending the limits of endurance metabolism,** *Journal of Experimental Biology*, vol. 212, pp. 593-597, 2009.

P. A. Bartell et E. Gwinner, **A separate circadian oscillator controls nocturnal migratory restlessness in the songbird *Sylvia borin*,** *Journal of Biological Rhythms*, vol. 20, pp. 538-549, 2005.

© Pour la Science - n° 434 - Décembre 2013

SciLogs

La nouvelle communauté de blogueurs scientifiques francophones

Grâce à ***Scilogs.fr***, dialoguez avec des chercheurs et acteurs du monde des sciences aux points de vue riches et variés. De blog en blog, explorez la science avec ceux qui la font, la décryptent, l'analysent : résultats de recherche, applications pratiques, perspectives insolites, débats éthiques et politiques… Pour vivre la science au quotidien !

Best of Bestioles
Loïc Mangin
Rédacteur en chef adjoint
Pour la Science

Ecoblog
Vincent Devictor
Chercheur au CNRS en écologie et biologie de la conservation

Retrouvez aussi les autres communautés «SciLogs»: déjà plus 140 blogueurs scientifiques à l'international !

Signal sur bruit
Richard Taillet
Astrophysicien, professeur chercheur au LAPTh

Complexités
Jean-Paul Delahaye
Mathématicien, informaticien, et auteur de la rubrique *Logique et calcul* dans *Pour la Science*

Psycho info
Jérôme Palazzolo
Médecin psychiatre, à Nice et à l'Université Internationale Senghor, à Alexandrie, en Égypte

L'actu sur le divan
Sébastien Bohler
Rédacteur à *Cerveau & Psycho*

Alterscience
Alexandre Moatti
Polytechnicien, chercheur en histoire des sciences au laboratoire SPHERE

Connectez-vous maintenant pour découvrir www.Scilogs.fr !

Suivez les dernières actualités des blogueurs également sur les réseaux sociaux

Proposé par POUR LA SCIENCE

La Grande Muraille verte

René Bally et Robin Duponnois

Le projet de la Grande Muraille verte vise à implanter ou à stabiliser une bande végétale en bordure du Sahara à travers tout le continent africain, afin d'endiguer la progression du désert vers le Sud.

La désertification se caractérise par un appauvrissement drastique des sols, souvent enclenché par leur surexploitation agricole. Elle conduit à l'abandon des terres cultivées, que le vent, la pluie et d'autres phénomènes naturels achèvent de rendre stériles, en supprimant la couche superficielle fertile.

Selon le Comité scientifique français de la désertification, dix millions d'hectares de terres arables sont remplacés par le désert chaque année dans le monde. Le phénomène menace une partie de l'Afrique, de l'Amérique du Sud et de l'Asie. Dans les pays riches, telle l'Australie, les agriculteurs ont les moyens d'endiguer la progression du désert, notamment *via* une irrigation contrôlée. Quelque 70 pour cent des terres arides ou semi-arides (qui représentent 41 pour cent de la superficie des continents) sont concernés et 480 millions de personnes risquent de devoir quitter leurs terres ou changer de mode de vie.

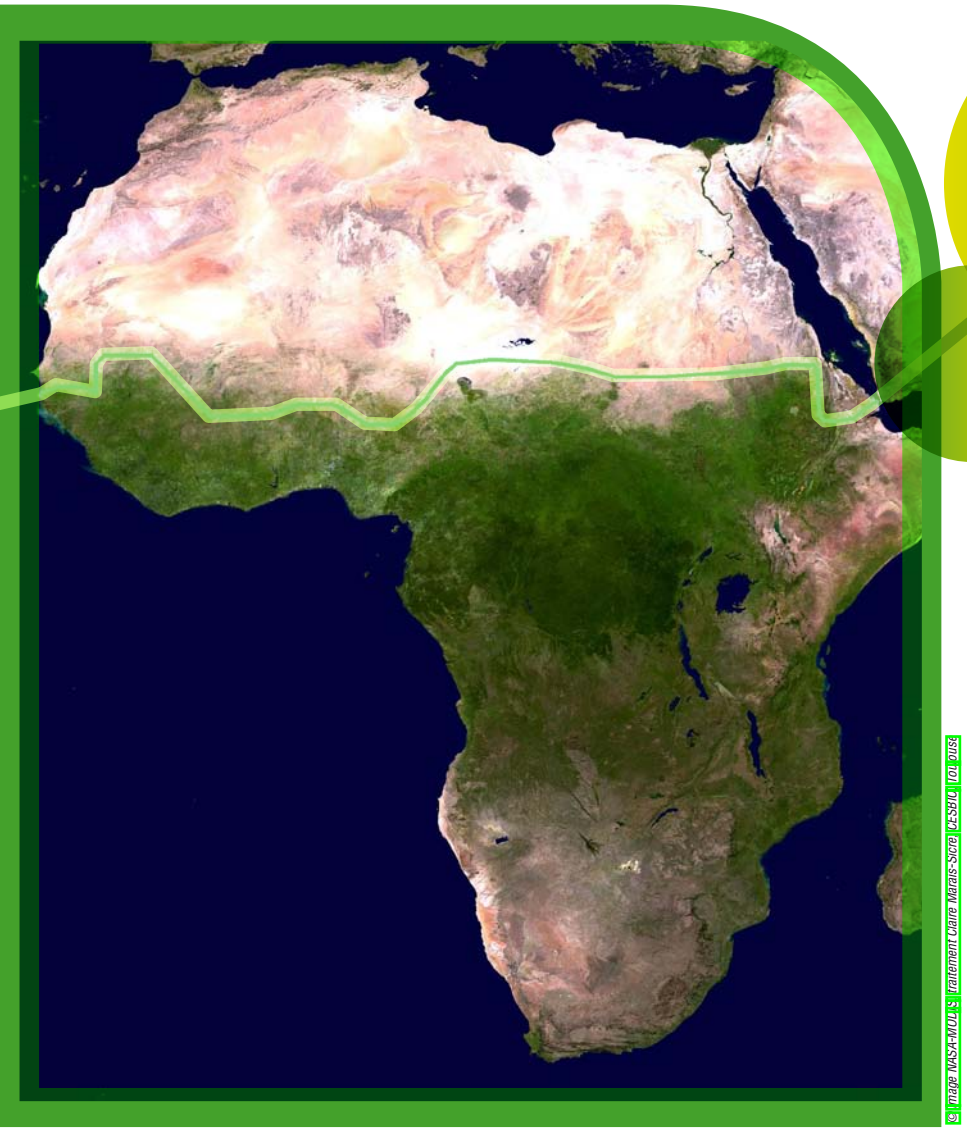
L'Afrique est particulièrement touchée. Selon certains experts, elle a perdu environ 650 000 kilomètres carrés de terres productives depuis 50 ans, soit l'équivalent d'un territoire grand comme la France. Depuis les années 1900, le désert du Sahara aurait progressé par endroits de 250 kilomètres vers le Sud. Dès lors, la lutte contre la désertification constitue une priorité pour l'Union africaine, qui la traite dans le programme NEPAD (Nouveau partenariat pour le développement de l'Afrique), et pour la Communauté des États sahélo-sahariens.

Malheureusement, ces organisations n'ont pas réussi à enrayer le phénomène, d'où la nécessité d'une nouvelle stratégie globale. C'est dans ce contexte qu'a été proposée en 2005 l'Initiative africaine de la Grande Muraille verte (IAGMV) : il s'agit d'édifier un rempart végétal, large de 15 kilomètres, qui traverserait le continent et stopperait l'avancée du Sahara vers le Sud. Ce rempart transcontinental relierait le Sénégal à l'Éthiopie, passerait par 11 pays et couvrirait une distance de 7 000 kilomètres *(voir la figure 1)*. Il comprendrait des forêts (des plantations massives d'arbres sont prévues), mais aussi des cultures. Une grande partie du projet consiste à préserver de l'abandon les cultures déjà en place et qui sont menacées par la désertification, en amé-

L'ESSENTIEL

- La désertification menace 480 millions d'hommes dont les terres agricoles s'appauvrissent.
- La Grande Muraille verte doit être constituée d'une bande de forêts et de cultures en bordure du Sahara.
- Au sein de cette bande, on cherche à augmenter la productivité des systèmes agricoles et à prévenir l'abandon des terres.
- Seul le Sénégal a commencé la mise en œuvre de la Grande Muraille verte, mais des projets sont prévus au Mali et au Burkina Faso dès 2014.

© Pour la Science - n° 434 - Décembre 2013



© Image NASA-MODIS, traitement Claire Marais-Sicre (CESBIO) (01) pubs

1. LA GRANDE MURAILLE VERTE devrait traverser l'Afrique d'Est en Ouest, en passant par 11 pays *(en vert, le tracé prévu)*. Sa longueur serait de 7 000 kilomètres, pour une largeur de 15 kilomètres.

liorant leur productivité. Dans ce cadre, on cherche à développer et à diffuser de nouvelles techniques compatibles avec les pratiques et les savoir-faire traditionnels. Après une brève présentation des actions qui ont précédé cette initiative, nous décrirons plus en détail le projet de Grande Muraille verte.

Plusieurs décennies d'efforts infructueux

Depuis quelques décennies, la plupart des pays du Sahel ont consenti des efforts techniques, financiers et institutionnels importants. L'objectif était d'assurer la sécurité alimentaire de leurs populations (ainsi que la sécurité énergétique, *via* la production de bois de chauffage) et d'améliorer les conditions de vie des agriculteurs, tout en préservant la biodiversité. Cela s'est traduit par une diversification agricole, par la mise en place de bassins de rétention des eaux pluviales et par des actions contre la désertification et contre la dégradation des sols arables. Par exemple, on a mis en place des murets en terre en forme de demi-lunes sur les pentes érodées par des

© Axel Ducoudray/Initiative Prime Tessékéré

2. UNE PÉPINIÈRE D'ACACIAS, dans la région de Tessékéré, au Nord du Sénégal *(à gauche)*. Les arbres y sont cultivés en pots pendant quatre mois, avant d'être replantés dans le milieu naturel *(à droite)*.

pluies violentes : ces structures retiennent la terre et constituent des réservoirs d'eau. On y concentre parfois les fertilisants, tels les excréments d'animaux, afin de ne pas disperser les ressources.

Certaines pratiques agricoles traditionnelles ont aussi été encouragées, telles que le mulch (couverture du sol par des ressources organiques, par exemple des résidus de culture) ou le zaï. Ce dernier consiste à creuser des microbassins d'environ un mètre de diamètre dans le champ et à y planter les graines *(voir la figure 4)*. L'eau de pluie s'y concentre et des fertilisants organiques y sont répandus. En stimulant l'activité biologique dans les « points chauds » des bassins, le zaï permet de reconstituer les propriétés hydrophysiques des sols dégradés (stabilité, porosité, etc.) et d'optimiser la productivité de l'agrosystème. Il nécessite cependant un important travail du sol et n'est donc intéressant que lorsque les précipitations sont faibles, inférieures à 300 millimètres par an.

Malgré leur promotion, ces pratiques restent peu répandues, principalement en raison du manque de ressources organiques. En effet, dans les régions arides, les résidus de culture servent surtout au fourrage destiné à l'élevage.

Globalement, les diverses initiatives n'ont pas donné les résultats escomptés. De nombreuses contraintes, essentiellement financières, limitent le développement de la plupart des pays sahéliens. Ce constat a conduit à l'adoption de nouveaux projets, tel celui de la Grande Muraille verte. Proposé lors du septième Sommet des chefs d'État et de gouvernement de la Communauté des États saharo-sahéliens, qui s'est tenu les 1er et 2 juin 2005 à Ouagadougou, au Burkina Faso, ce projet a été approuvé deux ans plus tard par l'Union africaine. Il a d'abord été présenté comme une simple bande forestière, large de 15 kilomètres, qui traverserait le continent. Un certain scepticisme en a résulté, car cette conception de la lutte contre la désertification allait à l'encontre des acquis scientifiques et techniques.

La Grande Muraille verte en chiffres :

Le Sénégal avance rapidement dans la mise en place de la Grande Muraille verte. De 2008 à 2010 :

13 pépinières créées

7 750 000 plants d'arbres produits

16 225 hectares de plantations forestières réalisées

4 540 kilomètres de pare-feu creusés

La leçon des remparts verts d'Algérie et de Chine

En effet, des expériences sur des plantations arboricoles continues avaient déjà été tentées, mais elles avaient rencontré des problèmes. Ainsi, le projet du Barrage vert algérien, lancé dans les années 1970, visait à mettre en place une barrière végétale pour stopper l'avancée du désert vers le Nord. Elle devait être large de 20 à 30 kilomètres et s'étendre sur trois millions d'hectares, de la frontière Est du pays jusqu'à sa frontière Ouest. Or les premières plantations, qui comprenaient uniquement des pins d'Alep, ont été détruites en grande partie

© Pour la Science - n° 434 - Décembre 2013

par des chenilles processionnaires. De façon générale, les monocultures sont plus vulnérables aux infections et aux insectes. À cela s'ajoutaient d'autres facteurs, telle la pression du pastoralisme : les troupeaux qui traversaient les plantations détruisaient les jeunes pousses. En conséquence, seuls 160 000 hectares ont été reboisés pour l'instant, soit cinq pour cent de l'objectif initial. L'édification du Barrage vert algérien se poursuit, mais elle se fonde désormais sur plusieurs espèces d'arbres.

Un projet similaire se déroule en Asie, avec la Grande Muraille verte de Chine. L'objectif est d'entourer le désert de Gobi d'une ceinture végétale, afin d'endiguer sa progression et de protéger les villes adjacentes des vents de sable. Comme en Algérie, une seule espèce a été utilisée initialement (un arbre exotique d'Australie), avant que les plantations ne se diversifient. Démarré en 1978, ce projet ne s'achèvera que dans plusieurs dizaines d'années, le coût prévu étant d'environ un milliard d'euros. Quelque 18 pour cent de la ceinture sont aujourd'hui réalisés, et représentent déjà la plus grande forêt artificielle du monde.

Un plan de développement complet

Fort de ces expériences, le projet de la Grande Muraille verte n'a pas consisté en une monoculture continue, mais en un plan de développement complet d'une bande de territoire. Ce plan comprend la plantation d'espèces végétales présentant un intérêt économique et adaptées à la sécheresse, ainsi que la mise en place de systèmes agroforestiers (des associations d'arbres et de cultures). Il inclut aussi la réalisation de bassins de rétention, le développement d'autres activités économiques (artisanat, sculpture du bois, etc.) et l'amélioration de la gouvernance locale et des services socio-économiques.

La diffusion des bonnes pratiques s'appuie sur un réseau de Pôles ruraux de développement (PRD), composés de représentants du projet (fonctionnaires, ingénieurs, etc.) qui organisent des formations et des ateliers. De la sorte, on espère endiguer la fuite des populations qui conduit à l'abandon des terres et à la désertification. Selon un rapport de l'Observatoire du Sahara et du Sahel (une organisation internationale visant notamment à lutter contre la désertification) daté de 2008 : « La Grande Muraille verte n'est pas conçue comme un mur d'arbres courant de part et d'autre du désert, mais plutôt comme un ensemble d'actions et d'interventions multisectorielles de conservation et de protection des ressources naturelles à des fins de lutte contre la pauvreté. »

Les plantations d'arbres sont tout de même un élément essentiel de ce plan. En effet, l'arbre est un acteur majeur dans le bon fonctionnement des sols. Il est essentiel aux mouvements hydriques (de l'eau dans le sol) et aux principaux cycles géochimiques (la circulation des nutriments, tels que le carbone, le phosphore et l'azote), qui régissent durablement la fertilité des sols. Un acacia haut de deux mètres, par exemple, plonge ses racines jusqu'à quatre mètres de profondeur, ce qui fait remonter de l'eau. Celle-ci passe dans l'atmosphère par un phénomène dit d'évapotranspiration. Les racines captent également les nutriments, utilisés pour produire des feuilles qui fertilisent les sols quand elles tombent. Le guano répandu par les oiseaux qui se perchent sur les arbres est un autre fertilisant. En outre, les arbres favorisent le développement de nombreux micro-organismes utiles aux cultures.

Trois principales espèces d'arbres locaux ont été choisies pour la Grande Muraille verte : l'acacia gommier *(Acacia senegal)*, le dattier du désert *(Balanites aegyptiaca)* et le jujubier *(Ziziphus mauritiana)*. La gomme de l'acacia est utilisée notamment pour l'alimentation, comme matériau de construction et comme additif dans les textiles.

LES AUTEURS

René BALLY est directeur de recherche au Laboratoire d'écologie microbienne (UMR 5557, Université de Lyon, CNRS).

Robin DUPONNOIS est directeur de recherche au Laboratoire des symbioses tropicales et méditerranéennes (IRD, UMR 113).

BIBLIOGRAPHIE

G. Boëtsch (dir.), **La Grande Muraille Verte, des arbres contre le désert**, Éditions Privat, 2013.

A. Dia et R. Duponnois, **La Grande Muraille Verte : Capitalisation des recherches et valorisation des savoirs locaux**, Éditions IRD, 2012.

A. Dia et R. Duponnois, **Le projet majeur africain de la Grande Muraille Verte : concepts et mise en œuvre**, Éditions IRD, 2010.

Collectif, **Les bénéfices de la gestion durable des terres**, WOCAT-UNCCD, 2009.

Collectif, **Initiative Grande Muraille Verte du Sahara et du Sahel. Note introductive n° 3**, Observatoire du Sahara et du Sahel, 2008.

© Axel Ducourneau, Ingénieur, PNUD, Dahl, Tessekere, Senegal

3. LES TROUPEAUX D'ANIMAUX DOMESTIQUES font courir des risques aux plantations, car ils consomment les jeunes pousses. La prise en compte des rivalités entre éleveurs et cultivateurs est essentielle à la réussite de la Grande Muraille verte.

© Edmond Hien, Université de Ouagadougou

4. LE ZAÏ EST UNE PRATIQUE TRADITIONNELLE consistant à creuser de petits bassins, où se concentrent l'eau et les fertilisants. Il pourrait être combiné avec les techniques promues dans le cadre de la Grande Muraille verte.

LE BRÉSIL ESPÈRE S'INSPIRER de certains projets pour lutter contre la désertification qui menace les régions arides du Nord-Est du pays.

Le dattier du désert a aussi de multiples usages : pharmacologiques pour les feuilles et l'écorce (qui traite la diarrhée), alimentaires (les fruits sont comestibles et donnent du jus et de la crème). Quant au jujubier, il produit des fruits comestibles.

Pour l'instant, le Sénégal est le seul pays qui a commencé la mise en place de la Grande Muraille verte. Il a créé des pépinières forestières, où les arbres sont cultivés en pots pendant quatre mois avant d'être plantés dans la nature. Entre 2008 et 2010, près de huit millions de plants ont été produits, plus de 16 000 hectares de forêt plantés et plus de 4 500 kilomètres de pare-feu creusés (les chiffres postérieurs à 2010 ne sont pas disponibles, mais le projet s'est poursuivi à un rythme comparable). En outre, des jardins ont été installés autour des villages, afin d'améliorer les revenus des populations locales. Des produits à haute valeur ajoutée, notamment maraîchers, y sont cultivés par des femmes. Le projet a été long à mettre en place, en particulier au niveau institutionnel, et les événements récents, tels que la guerre au Mali, l'ont ralenti, mais il devrait s'accélérer dans les prochaines années.

Une autre difficulté est que les arbres n'atteignent leur maturité qu'au bout de 20 à 30 ans et ne commencent à avoir un effet sur les écosystèmes que dix ans après leur plantation (rappelons que les premiers arbres de la Grande Muraille verte ont été plantés en 2008). Il faut donc que les populations locales les protègent et les entretiennent pendant leur développement.

De multiples recherches visent à accélérer ce développement – nous y reviendrons.

En 2009, l'Institut Écologie et environnement du CNRS a créé un Observatoire hommes-milieux (OHMi) à Téssékéré, au Nord-Est du Sénégal, en collaboration avec plusieurs organismes. Il regroupe des laboratoires du CNRS et de l'IRD, ainsi que des universités du Sénégal et du Burkina Faso. Il mène des recherches dans plusieurs domaines, aussi bien biologiques qu'écologiques, culturels, sociaux, sanitaires et climatiques, afin d'analyser et d'optimiser la mise en place de la Grande Muraille verte.

En foresterie, par exemple, on cherche à améliorer la production de plants dans les pépinières, au travers de l'étude de graines de provenances diverses (certaines poussent plus vite et donnent des arbres plus grands, qui produisent plus de graines), de différents substrats (mélanges divers de sable et de matière organique) et de récipients variés (influence de la forme et du volume du pot sur la croissance de l'arbre). Nous avons par exemple breveté une technique consistant à réduire en poudre des termitières mortes et à les mélanger à la terre ; cette source de matière organique favorise la croissance des arbres.

Gérer les rivalités entre éleveurs et cultivateurs

Un autre domaine de recherche clef est la modélisation des systèmes socio-écologiques, afin d'aboutir à une meilleure gouvernance. Les rivalités entre éleveurs et cultivateurs sont l'un des paramètres critiques pour la réussite de la Grande Muraille verte, comme l'a montré le cas algérien. Diverses solutions sont appliquées pour que ces rivalités ne soient pas rédhibitoires : des couloirs sont aménagés pour le passage des troupeaux, les périodes des passages sont adaptées afin de ne pas nuire aux cultures, etc.

Dans le domaine sanitaire, on vérifie par exemple que la mise en place de gros réservoirs d'eau ne favorise pas une pullulation d'insectes vecteurs de maladies dans les villages environnants. En termes de biodiversité, un programme vise à recenser les espèces d'oiseaux présentes et à suivre leur évolution à mesure que la Grande Muraille verte progresse et que les paysages se transforment. On cherche aussi à évaluer l'éventuel impact de la muraille sur le climat.

À ÉCOUTER

Jeudi 19 décembre, Robin Duponnois reviendra sur la lutte contre la désertification dans l'émission **La marche des sciences**, sur *France Culture* de 14h à 15h.
www.franceculture.fr

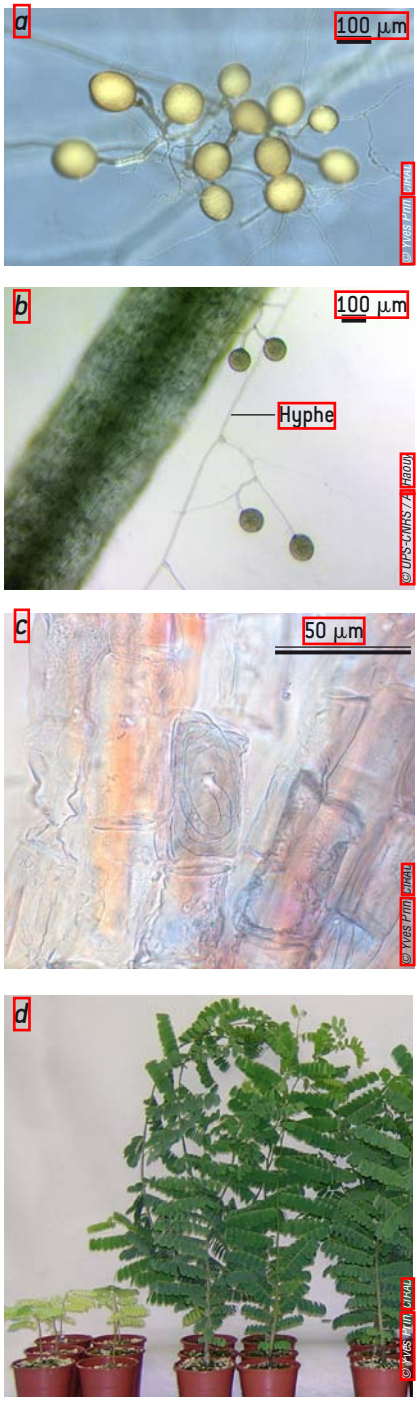
© Pour la Science - n° 434 - Décembre 2013

De nombreuses études concernent les micro-organismes naturellement présents dans les sols, qui pourraient se révéler des auxiliaires précieux pour la mise en place de la Grande Muraille verte. Certains favorisent l'absorption de minéraux par les plantes et d'autres neutralisent les pathogènes ou les parasites. Dans ce domaine, des résultats potentiellement utiles dorment dans les laboratoires, parfois depuis plusieurs dizaines d'années, et n'ont jamais été exploités à grande échelle. L'un des objectifs de la structure constituée des Pôles ruraux de développement et de l'Observatoire hommes-milieu est de transférer les acquis de la recherche aux agriculteurs. À titre d'illustration, examinons le cas des champignons mycorhiziens, qui favorisent la nutrition des plantes cultivées, et celui des biopesticides utilisables contre les plantes phytoparasites du genre *Striga*.

Des champignons pour réhabiliter les sols

Les champignons mycorhiziens sont des organismes microscopiques du sol très vulnérables à la désertification. Ils vivent en symbiose avec les racines de certaines plantes. Ce sont des éléments clefs du fonctionnement du sol, en particulier dans les milieux arides et semi-arides. Ils sont impliqués dans les principaux cycles biogéochimiques assurant la fertilité des sols, tels ceux du phosphore, de l'azote et du carbone. La symbiose mycorhizienne accélère notablement la croissance de la plante, à laquelle les champignons fournissent des ressources minérales *(voir la figure 5)*. En outre, ils fabriquent des substances toxiques pour les pathogènes.

On a longtemps considéré que l'impact du champignon sur le développement de la plante résultait uniquement des interactions des deux composantes de la symbiose (la plante et le champignon). On sait aujourd'hui que la symbiose modifie l'exsudat racinaire (un liquide excrété par les racines), influant ainsi sur l'abondance et la diversité de la microflore du sol qui s'en nourrit. À proximité des racines, voire à l'intérieur des cellules végétales, se développe une population microbienne spécifique, nommée mycorhizosphère. Celle-ci inclut des bactéries fixatrices d'azote, notamment du genre *Azospirillum* : ces bactéries établissent des endosymbioses (des symbioses où l'un des deux organismes est contenu dans l'autre) racinaires avec la plante, dont elles favorisent la croissance. Les plantes concernées sont par exemple les légumineuses (trèfles, fèves, lentilles, etc.) ou certains arbres, tels les aulnes.



5. LES CHAMPIGNONS MYCORHIZIENS *(a)* sont des micro-organismes du sol qui établissent des symbioses avec les plantes. Ils favorisent leur croissance *(d, à gauche : plants de quatre mois sans champignons ; à droite : plants de quatre mois avec champignons)*, notamment en leur fournissant de l'eau et des minéraux, qu'ils collectent *via* de longs filaments, les hyphes *(b, des spores connectées par des hyphes)*. Certains de ces filaments *(c, en bleu)* pénètrent dans les cellules des racines, avec lesquelles ils assurent divers échanges. En retour, la plante alimente le champignon en matière organique.

Des pratiques culturales favorisant les symbioses mycorhiziennes seraient un atout pour la gestion durable des terres, car elles optimiseraient la croissance des plantes sans appauvrir les sols. Elles permettraient de résoudre un paradoxe apparent : les plantes manquent de phosphore, ce qui est l'un des principaux facteurs limitant leur croissance, et pourtant cet élément abonde dans le sol de ces régions. Le problème est qu'il est surtout présent sous forme de complexes chimiques insolubles, tel du phosphate d'aluminium ou de fer, que les plantes ne parviennent pas à exploiter. Les champignons mycorhiziens, eux, en sont capables, grâce à divers mécanismes : ils peuvent par exemple acidifier le sol en libérant des protons (H^+) ou des acides organiques, ce qui leur permet de dissoudre les complexes chimiques et d'en extraire le phosphore. Ils le transmettent ensuite à la plante, *via* leurs longs filaments qui pénètrent dans les cellules végétales.

Plusieurs techniques culturales assez simples, mais hélas peu répandues, sont possibles. On peut par exemple semer des plantes dites hypermycotrophes, telles des légumineuses, qui établissent facilement la symbiose et favorisent la multiplication du champignon dans le sol. Le sol s'enrichit ainsi durablement en propagules fongiques (les spores, à partir desquelles croissent de nouveaux champignons) qui bénéficieront aux cultures. En milieu naturel, les plantes hypermycotrophes sont les premières à s'implanter lors de la reconstitution d'un couvert forestier.

Autre possibilité : la diffusion massive de champignons sur le sol en une fois. On peut aussi adopter une stratégie combinée avec les pratiques culturales traditionnelles, tel le zaï. On concentrerait alors les micro-organismes dans les cuvettes où sont plantés les arbres ou les plantes cultivées, ce qui diminuerait les quantités nécessaires.

Dans le cadre des pépinières, on mélange des racines colonisées par des champignons à la terre du pot. Cette technique a été utilisée pour la première fois dans la Grande Muraille verte en juin 2012 sur des jujubiers. Après les quatre mois de culture en pots, ils étaient bien plus grands que des arbres cultivés sans champignons *(voir la figure 5)*. Au bout d'un an, leur taille restait très supérieure et

Les causes de la désertification

La désertification se manifeste par un appauvrissement du sol de certaines régions, où le désert finit par s'installer. Elle touche surtout les zones arides et semi-arides, qui représentent 41 pour cent de la superficie des continents. Elle a de multiples causes, naturelles ou anthropiques.

Les facteurs naturels sont soit habituels en zone aride (déficit pluviométrique, températures élevées, insolation forte), soit exceptionnels : c'est le cas, par exemple, des crues côtières, qui salinisent les sols. Le principal facteur anthropique est la surexploitation des terres. Les monocultures consomment toujours les mêmes types de nutriments, et les besoins en bois de chauffage, en champs et en pâturages conduisent à une déforestation notable. En outre, des pathogènes et des parasites limitent la productivité des systèmes agricoles. Les plantes cultivées et les arbres sont d'autant moins tolérants à ces agressions que les sols manquent de nutriments. *Striga hermonthica*, une plante parasite des céréales, entraîne par exemple des pertes allant de 10 à 90 pour cent des récoltes. Les terres ne peuvent alors plus nourrir les agriculteurs, qui les abandonnent. Appauvries, dénuées de plantes pour stabiliser la couche de terre fertile et superficielle, elles sont balayées par les vents, lessivées par les pluies et deviennent désertiques.

Les régions arides sont les plus vulnérables, car la régénération naturelle du couvert végétal et des sols y est cinq à dix fois plus lente que dans les zones où les précipitations sont plus importantes et régulières. En outre, le PIB y est inférieur de 50 pour cent par rapport aux zones non arides, d'où un faible accès des agriculteurs aux méthodes modernes. Et la population y a augmenté de 18,5 pour cent dans les années 1990, accroissant la pression sur les ressources.

La plante parasite *Striga hermonthica*, qui s'accroche aux racines des céréales et pompe leur sève, entraîne des pertes importantes.

© Georges Saïd, Université Paris 1

leur mortalité était moindre. L'impact sur la production de fruits, qui commence vers l'âge de trois ans, pourra être déterminé dans un an ou deux.

D'autres plantations associant arbres mycorhizés et non mycorhizés sont prévues pour 2014 au Sénégal, au Mali et au Burkina Faso. L'objectif est d'en faire des vitrines pour les populations locales, afin de montrer les effets bénéfiques des symbioses mycorhiziennes. On espère ainsi encourager les pratiques qui les favorisent et aboutir à leur exploitation à grande échelle.

Une plante parasite qui fait perdre 40 pour cent des récoltes

Un autre domaine où les micro-organismes du sol pourraient se révéler utiles est la lutte contre les phytoparasites. En Afrique subsaharienne, les céréales constituent la base de l'alimentation et certaines plantes parasites limitent fortement leur production. La pire est l'espèce *Striga hermonthica*, qui s'accroche à la racine de la céréale et pompe sa sève, au point qu'elle finit par dégénérer et mourir *(voir l'encadré ci-dessus)*. Cette plante est abondante dans les sols dégradés des régions semi-arides, où elle entraîne des pertes de rendement considérables dans les principales cultures vivrières de ces régions, à savoir le sorgho, le mil, le maïs, le riz et le fonio. Ces pertes varient entre 10 et 90 pour cent des récoltes, pour une moyenne estimée à 40 pour cent en Afrique subsaharienne (soit environ 8 300 000 tonnes de cultures vivrières). Ainsi, *Striga hermonthica* menace de famine plus de 300 millions d'habitants de l'Afrique subsaharienne.

Diverses méthodes ont été développées pour lutter contre cette plante parasite, telles que l'arrachage des plants, la sélection de variétés de plantes cultivées résistantes et l'application d'herbicides. Toutefois, les résultats ont été décevants. *Striga hermonthica* est difficile à éliminer, car même si l'on supprime les plants, les graines survivent pendant des dizaines d'années dans le sol.

Depuis plusieurs décennies, divers programmes de recherche tentent de trouver une parade, soit en inhibant la germination des graines ou le développement des plantules, soit en stimulant une germination « suicidaire » (les graines germent en l'absence de la plante hôte et n'ont aucune chance de survivre). On détruirait ainsi les graines existantes et on empêcherait la production de nouvelles graines. Certains micro-organismes fongiques ou bactériens indigènes, qui vivent dans le sol, fabriquent des substances ayant de tels effets. Il y a plus de dix ans, l'équipe de l'un de nous (R. Bally) a par exemple découvert que des bactéries du genre *Azospirillum* sont des pathogènes redoutables pour *Striga hermonthica*. Elles synthétisent une molécule qui bloque sa germination à un stade précoce et entraîne la mort de la graine.

L'utilisation de tels micro-organismes constitue une option privilégiée, car ils sont déjà adaptés aux conditions du milieu. Ils commencent seulement à être incorporés dans de nouveaux biopesticides. Ainsi, une plate-forme technique est en cours de création à Ouagadougou pour exploiter les bactéries du genre *Azospirillum*. Elle effectue aujourd'hui des démonstrations dans de petites exploitations pour montrer l'efficacité de son produit. L'utilisation de ces biopesticides est réalisable à court terme et facile à intégrer aux pratiques culturales traditionnelles de ces régions. Avec les champignons mycorhiziens, elle permettrait d'augmenter notablement la productivité des agrosystèmes, même en l'absence des engrais et des pesticides utilisés par les agriculteurs des pays développés.

L'ampleur de la désertification en Afrique a entraîné la mobilisation conjointe des décideurs politiques et des scientifiques. La Grande Muraille verte représente à la fois une vitrine et un terrain d'expérimentation pour les méthodes de lutte. Elle doit servir à concrétiser les résultats scientifiques, afin de réhabiliter les milieux dégradés et d'améliorer la qualité de vie des populations. Déjà, d'autres pays s'y intéressent : le Brésil participera ainsi au financement de la Grande Muraille verte, espérant s'inspirer de certains projets pour lutter contre la désertification qui menace les régions arides du Nord-Est du pays. ■

© Pour la Science - n° 434 - Décembre 2013

L'information scientifique de référence **maintenant sur tablette et smartphone !**

Téléchargez gratuitement
l'application sur App Store et Google Play.
Le 1er numéro de *Pour la Science* est offert !

Disponible sur App Store

DISPONIBLE SUR Google play

Flashez ce QR code avec votre mobile ou votre tablette pour télécharger immédiatement l'application.

Avec l'application « Pour la Science », retrouvez dès leur sortie le mensuel *Pour la Science* à 5,49 € et son hors-série trimestriel *Dossier Pour la Science* à 5,99 € en version numérique optimisée pour tablette : lecture intuitive, sommaire interactif, contenus enrichis, feuilletage hors connexion, etc.

& Découvrez aussi l'application « Cerveau & Psycho » pour retrouver le magazine *Cerveau & Psycho* et son hors-série *L'Essentiel Cerveau & Psycho*

HISTOIRE DES SCIENCES

Les dessous de la gamme cosmétique *Tho-Radia*

Fin 1932, profitant du succès médiatique du radium découvert par les époux Curie, deux professionnels de santé opportunistes créent une gamme de produits de beauté à base de radium et de thorium, et… font fortune !

Thierry LEFEBVRE et Cécile RAYNAL

À l'heure où des lanceurs d'alerte dénoncent la présence de perturbateurs endocriniens dans de nombreux produits d'hygiène et de beauté, il nous a semblé intéressant de revisiter un cas historique saisissant et presque invraisemblable : l'adjonction de produits radioactifs dans un certain nombre de spécialités cosmétiques de l'entre-deux-guerres. Nous nous intéresserons ici au cas fascinant de la gamme *Tho-Radia*, en nous attachant à mettre en évidence les failles qui lui ont permis de prospérer.

Tho-Radia est née vers la fin 1932 dans un contexte très favorable. À l'époque et comme aujourd'hui, il n'existait pas d'autorisation préalable de mise sur le marché pour les produits de beauté, ce qui laissait le champ libre aux initiatives les plus déconcertantes. Découvert en 1898 par Pierre et Marie Curie, le radium s'était imposé dès les années 1910 dans les rayonnages des parfumeries : de la crème *Activa* à la crème *Radior*, en passant par des marques telles que *Ramey* et *Radium Elys*, les spécialités cosmétiques dites radifères s'étaient multipliées, sans susciter la moindre réaction des autorités.

On prêtait alors au radium des vertus quasi miraculeuses, certains le comparant même à la pierre philosophale. Vers 1925, le Laboratoire de radiumthérapie affirmait ainsi, dans une brochure intitulée *La Santé par le radium* : « Il a été trouvé peu à peu des remèdes radifères [c'est-à-dire qui contiennent du radium] contre presque toutes les maladies chroniques qui désolent l'humanité [...]. Cette découverte permet à la radioactivité et à toutes ses qualités merveilleuses de quitter le cabinet du médecin spécialiste pour se mettre à la disposition de tout le monde. » À côté de ces pratiques abusives, des services spécialisés en cancérologie utilisaient des sources radioactives pour traiter notamment des tumeurs cutanées ou de l'utérus – une technique nommée curiethérapie et encore utilisée efficacement de nos jours.

La cosmétologie était tout particulièrement concernée par les promesses excessives de l'entre-deux-guerres. Aux États-Unis, une publicité pour la crème *Radior* vantait ainsi les qualités du radium : « Un secret de beauté révolutionnaire fut révélé quand les scientifiques découvrirent le radium. Régénérateur et vitalisant, il a démontré son inestimable valeur pour la peau et pour le teint. » Bien entendu, on ne l'utilisait qu'à des doses infimes, de l'ordre de la fraction de microgramme. Le principe de cette « microradiumthérapie » – ou « microcuriethérapie – avait été posé par le pharmacien Alexandre Jaboin au tout début des années 1910 : les petites doses de radium étaient censées « stimuler les fonctions élémentaires des cellules vivantes » et « ranimer l'énergie vitale ». Ces hypothèses quelque peu hasardeuses inspirèrent le pharmacien Alexis Moussalli, quand lui vint, vers 1932, l'idée de créer *Tho-Radia*.

La formule du Dr Alfred Curie

Né au Caire le 29 avril 1894, Moussalli, fils de pharmacien d'officine, était arrivé en France en novembre 1915 pour y achever ses études de pharmacie. Il s'était empressé d'offrir ses services bénévoles à l'Institut Pasteur, où il avait ainsi étudié, sous la direction d'Albert Frouin, les propriétés biologiques des sulfates de lanthane, de thorium, d'erbium et d'yttrium. Recruté fin 1920 par les laboratoires Millot, le jeune homme était alors passé sans état d'âme de la recherche fondamentale aux applications commerciales : dès 1922, il avait imaginé des ovules gynécologiques « à base de terres rares », auxquels il avait donné le nom de *Néothorium (voir la figure 2)*. Selon la notice éditée à l'époque, cette spécialité était dotée de « propriétés décongestionnantes, antiseptiques et analgésiques ».

Quelques années plus tard, devenu directeur des laboratoires Millot, Moussalli fait la connaissance d'un médecin marginal dénommé Alfred Curie. Les deux hommes unissent leurs intérêts : l'homonymie du praticien désargenté avec le couple mythique de physiciens est une aubaine à ne pas rater ! Le pharmacien conçoit un mélange

© Pour la Science - n° 434 - Décembre 2013

– pour le moins original – de chlorure de thorium (0,50 gramme) et de bromure de radium (0,25 microgramme), le tout dans 100 grammes d'excipients (baume du Pérou, oxyde de titane et stéarine saponifiée neutralisée). Le 29 novembre 1932, le médecin se contente de déposer le nom de la marque *Tho-Radia* au greffe du tribunal de commerce de la Seine. Ainsi se trouve d'emblée confortée, à moindres frais, la future assertion publicitaire selon laquelle la crème a été composée « selon la formule du Docteur Alfred Curie ».

L'alliance entre Moussalli et Alfred Curie était un exemple parmi beaucoup d'autres de « compérage » médico-pharmaceutique. Le Code de la santé publique définit cette entente comme « l'intelligence entre deux ou plusieurs personnes en vue d'avantages obtenus au détriment du malade ou des tiers ». Cette pratique, aujourd'hui interdite, était assez courante dans les années 1930. L'évocation d'un patronyme célèbre afin d'abuser de la crédulité de la clientèle était un procédé certes inélégant, mais légal et répandu. Il fallut attendre le 17 novembre 1942 pour qu'une circulaire y mette un terme : il était dorénavant spécifié que « le nom d'un médecin, d'un ecclésiastique, d'une communauté religieuse ou de toute personnalité marquante ne [pouvait] être mentionné dans la dénomination et la représentation d'une spécialité que s'il [était] prouvé que ce médecin, cet ecclésiastique, cette communauté religieuse [était] bien à l'origine du produit ».

En pharmacie seulement

Ni Alexis Moussalli ni Alfred Curie ne possèdent les fonds indispensables à la promotion de *Tho-Radia* auprès du grand public. Ils font donc appel à une société de marques, la *Société d'exportation, commission et représentation*, ou *Secor*. Fondée en janvier 1932 dans une tout autre perspective, renflouée début 1933 par des capitaux suisses, cette entreprise à l'histoire tumultueuse se charge de la publicité et de l'exploitation de la gamme de cosmétiques, tout en se rémunérant sur les ventes.

La stratégie commerciale adoptée se révèle habile. Il est tout d'abord décidé de ne vendre *Tho-Radia* qu'en pharmacie, et non en parfumerie comme la plupart des crèmes concurrentes. Une insertion publicitaire, parue le 1er novembre 1933 dans *Le Petit Parisien*, justifie cette tactique commerciale : « Pourquoi le pharmacien est-il qualifié pour préparer et vendre une crème de beauté ? Parce qu'une crème de beauté, pour être embellissante, doit non seulement être inoffensive, mais

Collection Kharbine-Tapabor

1. PUBLICITÉ DES ANNÉES 1950 pour le rouge à lèvres *Tho-Radia*. L'image s'inspire du modèle imaginé en 1933 par le photographe-illustrateur Tony Burnand à la demande de la société *Secor*, en charge de la publicité et de l'exploitation de la gamme *Tho-Radia*.

encore posséder des vertus réellement curatives. [...] Or la signature du pharmacien sur un produit de beauté constitue une garantie indiscutable quant au respect de la formule et à la valeur thérapeutique des substances employées. D'autre part le pharmacien seul a le droit de vendre une crème de beauté dont les propriétés médicales font une véritable spécialité pharmaceutique. »

Pour conforter cette stratégie, les laboratoires Millot déposent la formule intégrale de la crème *Tho-Radia* auprès du Laboratoire national de contrôle des médicaments, créé quelques années plus tôt à la Faculté de pharmacie de Paris. Cette démarche facultative n'est pas dénuée d'arrière-pensées commerciales. Courant 1934, par exemple, une annonce publicitaire entêtante affirme que « *Tho-Radia* contient strictement les principes actifs qui sont énumérés dans sa formule, enregistrée au Laboratoire national de contrôle des médicaments sous le numéro 319-8 ».

Il faut dire que la *Secor* cherche alors à dissiper les suspicions de fraude dont elle fait régulièrement l'objet. « J'ai vu récemment une crème de beauté qui s'annonçait comme radioactive par son contenu en bromure de radium. Il va sans dire que ce produit ne contient pas la moindre parcelle de bromure de radium. S'il en contenait, il serait d'un usage extrêmement dangereux », dénonce encore le 11 octobre 1937 le médecin Édouard Rist, devant la Société de médecine légale de France.

L'inscription de la formule galénique au Laboratoire national de contrôle des médicaments n'était pas une preuve en soi (les contrôles effectifs étaient fort rares). En procédant de la sorte, Moussalli voulait avant tout faire taire ses détracteurs en leur signifiant qu'il ne redoutait pas une inspection inopinée.

Pour renforcer encore sa crédibilité, le pharmacien sollicite auprès d'un mystérieux « Laboratoire de recherches scientifiques (Atomistique) », situé à Colombes, un certificat de radioactivité. Daté du 18 juillet 1933, le document atteste de la présence effective de 0,253 microgramme de bromure de radium dans l'échantillon analysé. Les laboratoires commercialisant des produits radifères n'étaient nullement astreints à les faire expertiser *a posteriori*. Un certificat de radioactivité était donc un luxe, mais cette précaution pouvait se révéler payante. C'est ainsi qu'un fac-similé du document est reproduit en 1935 dans la première édition du *Dictionnaire médical et pratique des soins de beauté*, édité par la *Secor* en complément de la vente des produits *Tho-Radia*.

Finalement, il n'est pas du tout sûr que la crème de beauté ait contenu du radium. Des liens avec un fournisseur potentiel – l'Union minière du Haut Katanga – semblant attestés, l'hypothèse la plus vraisemblable est celle de fraudes ponctuelles, en fonction des difficultés d'approvisionnement ou de motivations vénales. Une chose est sûre : aux doses infimes concernées, l'adjonction du radioélément ne coûtait pas bien cher, de l'ordre d'une vingtaine de centimes par pot de 155 grammes vendu en moyenne 15 francs !

Collection particulière

2. PUBLICITÉ POUR LE NÉOTHORIUM MILLOT, parue en 1933 dans le *Guide médical des spécialités pharmaceutiques et des établissements médicaux*. Ces ovules, crayons, comprimés et tampons à base de terres rares (thorium, néodyme) étaient présentés comme des agents thérapeutiques de premier ordre dans le traitement des métrites, vaginites et ulcérations du col.

Une réglementation tardive du radium

Le plus surprenant est l'indifférence des pouvoirs publics et d'une partie du corps médical et pharmaceutique face à ces mésusages, pourtant portés à leur connaissance par la publicité. À l'évidence, les effets délétères du radium étaient sous-évalués.

En témoigne l'anecdote suivante : peu avant la Première Guerre mondiale, des personnes vivant à proximité de l'usine de fabrication de sels de radium d'Armet de Lisle, à Nogent-sur-Marne, se plaignaient de nuisances récurrentes. Alerté, le Conseil d'hygiène publique et de salubrité de la Seine missionna Maurice Hanriot, membre de l'Académie de médecine, pour inspecter les locaux : « Pendant ma visite, j'avais fixé à mon chapeau un papier de tournesol mouillé [qui change de couleur en fonction de l'acidité du milieu] dont l'extrémité seule avait légèrement viré au bout d'une heure. J'estime donc que les plaintes sont très exagérées. [...] Il n'y a pas lieu, pour le moment, de provoquer le classement de cette usine. » Abandonnés après la mort d'Armet de Lisle en 1928, le bâtiment et le terrain furent rachetés par la ville en 1965 pour y construire un groupe scolaire. Des mesures de radon, effectuées au début des années 1990, ont conduit à la fermeture précipitée de l'école en 1996. Elle fut détruite et les terrains décontaminés en 2011.

La vigilance n'était guère de mise dans les années 1910-1920, en dépit de quelques initiatives sans lendemain. Un tiers de siècle après la découverte des époux Curie, la loi du 1er janvier 1931 classait comme maladies professionnelles les « intoxications causées

© Pour la Science - n° 434 - Décembre 2013

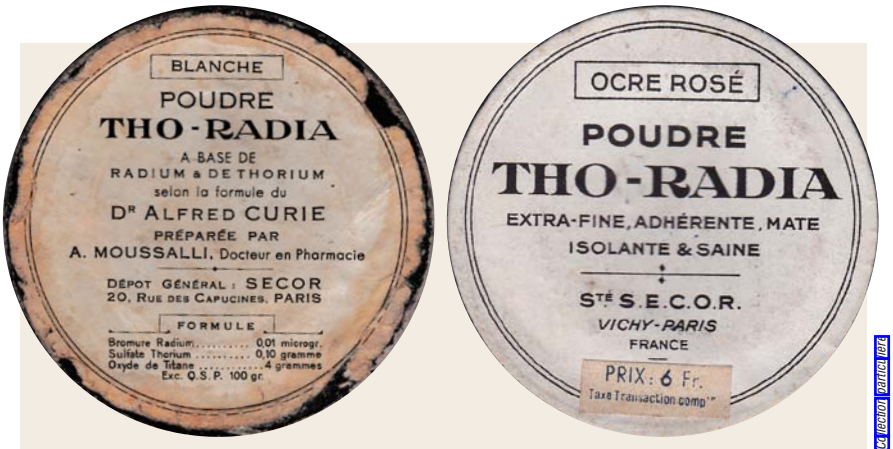
par l'action des rayons X ou des substances radioactives ci-après : uranium et ses sels, uranium X, ionium, radium et ses sels, radon, polonium, thorium, mésothorium, radiothorium ». Parmi les travaux et manipulations susceptibles de provoquer des pathologies, telles que radiodermites, cancers, anémies, etc., le législateur signalait la « fabrication de produits chimiques et pharmaceutiques radioactifs ». Le décret du 5 décembre 1934 rendait même obligatoire la distribution aux employés et ouvriers des entreprises concernées d'un document de prévention intitulé *Avis concernant les dangers que présentent les corps radioactifs, ainsi que les précautions à prendre pour les éviter*. Mais aucune contrainte n'était imposée aux fabricants.

Les consommateurs étaient les grands oubliés. Il fallut attendre plusieurs scandales sanitaires médiatisés outre-Atlantique (affaire des « radium girls » à la fin des années 1920, ouvrières contaminées par de la peinture au radium aux États-Unis, affaire du *Radithor*, une panacée à base de radium à l'origine du décès du millionnaire Eben Byers, en 1932) pour que les autorités françaises s'en préoccupent enfin. Déclenché en octobre 1936 à l'initiative du physicien Jean Perrin, alors sous-secrétaire d'État à la Recherche scientifique du gouvernement Blum, le processus aboutit, le 9 novembre 1937, à la publication au *Journal officiel* d'un décret « portant réglementation d'administration publique pour l'application de la loi du 12 juillet 1916 concernant le commerce des substances vénéneuses ». Étaient classés comme toxiques – inscrits au « tableau A » – « les radioéléments de la série de l'uranium et du radium, de la série de l'actinium, de la série du thorium et leurs sels, à l'exclusion des eaux naturelles radioactives et des boues naturelles radioactives ».

L'inscription de *Tho-Radia* au tableau A impliquait l'apposition, sur chaque conditionnement, d'une étiquette de couleur rouge orangé portant les mentions « Poison » et « Usage externe ». De plus, la délivrance ne pouvait dorénavant se faire que sur prescription médicale, qui plus est avec inscription à l'ordonnancier. Ces mesures coercitives étant incompatibles avec la stratégie grand public déployée depuis cinq ans par Moussalli et la *Secor*, décision fut prise… de retirer de la formule de *Tho-Radia* les produits incriminés, tout en conservant le nom désormais adopté par le grand public. *Exit* le radium et le thorium, ainsi que le Dr Alfred Curie, lequel continua malgré tout à empocher des redevances au moins jusqu'en 1943. Une intense campagne publicitaire relança l'intérêt pour cette version désormais inoffensive de *Tho-Radia*. Nulle mention n'était faite, cependant, du retrait du radioélément, si bien que la clientèle n'y a probablement vu que du feu *(voir la figure 3)*.

Le plus curieux dans cette incroyable aventure est que la crème et ses nombreuses déclinaisons ont perduré encore une trentaine d'années, au prix de moult rebondissements. La gamme cosmétique fut même l'enjeu d'une lutte sans merci entre les autorités françaises et suisses durant la Seconde Guerre mondiale pour le contrôle de l'entreprise, dans le contexte pesant de l'« aryanisation » des entreprises à capitaux juifs. Mais cela est une autre histoire…

Aujourd'hui, les produits reconnus nocifs sont répertoriés et leur emploi est prohibé en cosmétique. Malgré l'absence d'autorisation de mise sur le marché des produits de beauté et d'hygiène, l'Organisation mondiale de la santé reste vigilante face à l'emploi de nouveautés telles que les nanomatériaux, les OGM, etc. Comptons aussi sur les consommateurs méfiants, désormais dotés de moyens d'alerte autrement plus influents qu'à l'époque de *Tho-Radia*… ■



3. DEUX VERSIONS DE L'ÉTIQUETTE DE LA POUDRE *THO-RADIA*, l'une avant la réglementation du radium en novembre 1937, l'autre après.

LES AUTEURS

Thierry LEFEBVRE est maître de conférences à l'Université Paris Diderot et directeur de la *Revue d'histoire de la pharmacie*.

Cécile RAYNAL est pharmacienne et membre de la Société d'histoire de la pharmacie.

À ÉCOUTER

L'émission **La marche des sciences** du 24 octobre 2013, sur *France Culture*, a été consacrée à *Tho-Radia*. À écouter sur le site : **www.franceculture.com**

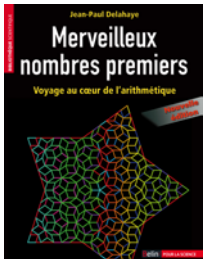
BIBLIOGRAPHIE

T. Lefebvre et C. Raynal, **Les métamorphoses de Tho-Radia : Paris-Vichy**, Glyphe, 2013.

P. Radvanyi, **Les Curie**, Belin, 2005.

La sélection de livres POUR LA SCIENCE

Pour Noël, faites plaisir à vos proches en leur offrant un beau livre scientifique et partagez des expériences ludiques et faciles avec des livres de sciences amusantes.



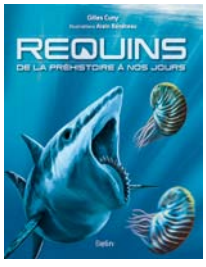
Merveilleux nombres premiers

Voyage au cœur de l'arithmétique

Jean-Paul Delahaye — **Réf. 075117**

Les nombres premiers fascinent. Connus dès les débuts de l'arithmétique, ils ont suscité la curiosité des 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.

Éditions Belin / Pour la Science 2013 – 296 pages – 28 euros – ISBN 978-2-8424-5117-2



Requins

De la préhistoire à nos jours

Gilles Cuny, illustr. de Alain Beneteau — **Réf. 005423**

Les requins ? Ils sont presque à égalité avec les dinosaures dans l'imaginaire collectif. Une histoire qui conduit à découvrir des monstres du passé, à la morphologie invraisemblable, illustrée de près de 200 reconstitutions et photographies. Un livre facile à lire, écrit par LE spécialiste français des requins.

Éditions Belin 2013 – 224 pages – 27,90 euros – ISBN 978-2-7011-5423-7

Faire léviter de l'eau

et autres expériences ébouriffantes

Florian Briant — **Réf. 007535**

Comment provoquer une tempête dans une bouteille ? Sauriez-vous allumer une ampoule sans la brancher, souffler une bulle géante ou bien extraire votre propre ADN ? Découvrez le plaisir de faire de la science, à travers 20 expériences ludiques et réalisables avec du matériel simple. À vous l'excitation du « labo » !

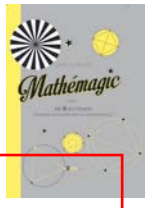
Éditions Belin 2013 – 176 pages – 21 euros – ISBN 978-2-7011-7535-5

La physique surprise

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik — **Réf. 075121**

Passionnés de physique et curieux de tout, Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik vous invitent à une nouvelle promenade sur des chemins de traverse dans un langage accessible, simple et imagé, sans jargon ni formules. Avec eux, laissez-vous surprendre par les phénomènes physiques que vous avez déjà côtoyés sans même les remarquer !

Éditions Belin / Pour la Science – 184 pages
26 euros – ISBN 978-2-8424-5121-9



Mathémagic !

David Acheson — **Réf. 007686**

De pi au pendule chaotique, de Pythagore à Andrew Wiles, embarquez pour une fascinante balade au pays des mathématiques ! De savoureuses illustrations achèveront de convaincre le profane comme l'initié qu'il s'agit là d'un des livres les plus réjouissants jamais écrit sur le sujet.

Éditions Belin 2013 – 176 pages
15 euros – ISBN 978-2-7011-7686-4

50 expériences pour épater vos amis à table

Jacques Guichard, Kamil Fadel et Guy Simonin — **Réf. 090544***

Retournez votre verre de vin sans en perdre une goutte, transformez l'eau en vin, créez un nuage dans une bouteille, mettez une olive en lévitation ! Des expériences très faciles à réaliser et enrichies d'une explication simple et compréhensible des phénomènes scientifiques en jeu.

Éditions Le Pommier 2013 – 168 pages
18,90 euros – ISBN 978-2-7465-0544-5

En partenariat avec les éditeurs

Belin ÉDITEUR INDÉPENDANT DEPUIS 1777 — Éditions Le Pommier

Pour commander ces ouvrages www.pourlascience.fr/librairie *
ou en renvoyant le bon de commande (page ci-contre).

* Pour commander les titres édités par *Le Pommier* : www.editions-belin.fr

Découvrez la nouvelle collection !

Destination Systèmes dynamiques avec Poincaré

Aurélien Alvarez (Dir.)

Réf. 090707*

Prévoir l'avenir, calculer le futur…Vraiment ?! Prédire le devenir d'un système en évolution au cours du temps n'est pas chose facile ! Henri Poincaré s'est très tôt passionné pour les systèmes dynamiques. Aujourd'hui, les mathématiciens étudient beaucoup de systèmes dynamiques de nature bien différente les uns des autres…

Éditions Le Pommier 2013 – 160 pages – 19 euros – ISBN 978-2-7465-0707-4

Destination Géométrie et topologie avec Thurston

Aurélien Alvarez (Dir.)

Réf. 090708*

Topologie, géométrie, en petites dimensions ? Mais késako ?! S'appuyant sur des intuitions très géométriques, le mathématicien William Thurston a bouleversé notre façon d'appréhender les espaces de dimension 3. Son programme de recherche fut mené à son terme dans les années 2000 par le mathématicien Grigori Perelman d'une manière tout aussi grandiose !

Éditions Le Pommier 2013 – 160 pages – 19 euros – ISBN 978-2-7465-0708-1

Nouveauté

Secrets d'épaves

Anne et Jean-Pierre Joncheray

Réf. 007534

Les deux auteurs, archéologues, ont consacré leur vie aux épaves, à leur recherche et leur fouille. Ce livre détaille 25 épaves emblématiques s'échelonnant des temps préhistoriques à la Seconde Guerre mondiale, de la grotte Cosquer au mythique Lightning de Saint Exupéry. Plongez dans des siècles d'histoire sous-marine !

Éditions Belin – 240 pages en coul.
39,50 euros – ISBN 978-2-7011-7534-8

Qu'est-ce qu'un pulsar, une naine brune, une supernova ? Ce livre propose un vaste panorama de l'astrophysique des étoiles en une trentaine de sujets de 4 pages chacun, abondamment illustrés de photographies époustouflantes.

Éditions Belin – 160 pages en coul.
25 euros – ISBN 978-2-7011-6285-0

Nouveauté

Ce que disent les étoiles

Dannielle Briot et Noël Robichon

Réf. 006285

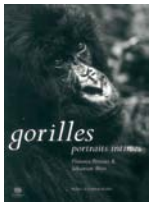
Qu'est-ce qu'une étoile et par quel mécanisme brille-t-elle ? Comment nait une étoile ?

Gorilles

Portraits intimes

Florence Perroux, Sébastien Meys

Réf. 090646*



« Croiser le regard d'un grand singe est une expérience singulière qui laisse rarement indifférent. » Côtoyant et photographiant les singes anthropoïdes depuis plusieurs années, les auteurs ont eu envie de nous faire découvrir le plus impressionnant mais aussi le plus sensible de nos cousins simiesques : le gorille.

Éditions Le Pommier 2012 – 144 pages
29 euros – ISBN 978-2-7465-0646-6

Tous ces livres sont également disponibles en librairie.

À LIRE AUSSI…

Merveilleux crabes

101 histoires pour un éloge de la biodiversité

Catherine Vadon

Réf. 005414

Éditions Belin 2013 – 176 pages
29,50 euros – ISBN 978-2-7011-5414-5

Arachna

Les voyages d'une femme araignée

Vincent Tardieu, Christine Rollard

Réf. 005556

Éditions Belin 2011 – 192 pages
30,45 euros – ISBN 978-2-7011-5556-2

Cendrillon et la mort des étoiles

Robert Gilmore

Réf. 090706*

Éditions le Pommier 2013 – 358 pages
19 euros – ISBN 978-2-7465-0706-7

Le dernier fado de l'androïde

Et autres histoires de sciences exotiques

Hugues Bersini

Réf. 090705*

Éditions le Pommier 2013 – 256 pages
17 euros – ISBN 978-2-7465-0705-0

BON DE COMMANDE

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

POUR LA SCIENCE

❑ 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 — Éditions 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 ❑.**

DPL434 Offre valable jusqu'au 31/12/2013 dans la limite des stocks disponibles

LOGIQUE & CALCUL

Bitcoin, la cryptomonnaie

La cryptographie et la puissance des réseaux ont rendu possible l'existence de monnaies purement numériques et dépourvues d'une autorité centrale de contrôle.

Jean-Paul DELAHAYE

Une nouvelle monnaie purement électronique intéresse de plus en plus. Ne s'appuyant sur rien de tangible, le total des devises sorties d'un protocole cryptographique vaut aujourd'hui l'équivalent de un milliard d'euros.

Le *bitcoin* a été proposé en 2008 et mis en œuvre le 3 janvier 2009 par un chercheur, ou peut-être plusieurs, caché sous le pseudonyme de Satoshi Nakamoto. La logique de cette monnaie numérique et la confiance qu'elle inspire seront le but de notre analyse. Le sujet est passionnant du fait de l'originalité, du mystère et du succès de cette construction informatique ; il est important, car on a affaire à un nouveau type de monnaie susceptible de jouer un rôle central en économie ; et il est délicat, car personne ne sait ce que ce montage numérique va devenir.

D'une certaine façon, toutes les monnaies sont électroniques : depuis longtemps, presque toutes les opérations bancaires se réduisent à des jeux d'écritures opérés dans les mémoires des ordinateurs. Cela signifie que l'on sait faire des systèmes informatiques robustes manipulant l'argent, même quand il s'agit de dizaines de milliards d'euros. Certes, les pannes, les « bugs », les virus, les pirates informatiques existent, mais on réussit assez bien à s'en protéger : l'informatisation du stockage et du transfert massif d'argent n'a pas entraîné de catastrophes. Les crises financières comme celle de 2009 n'ont pas pour origine le dysfonctionnement ou la fraude informatique, mais des erreurs d'analyse économique et financière commises par des humains, qui sont par ailleurs parfois trop voraces, voire malhonnêtes.

Pas d'autorité centrale

Aujourd'hui, toute monnaie repose sur une autorité centrale : une banque, adossée à un État ou à une association d'États. C'est aussi le cas de tous les systèmes de pseudo-monnaies électroniques privées, les monnaies « complémentaires » ou « alternatives ». Elles permettent des paiements par Internet *(Paypal)*, le commerce au sein d'un jeu sur le réseau (le dollar *Linden* de *Second Life*) ou la fidélisation des clients (les *miles* des compagnies aériennes, les points que votre superette inscrit sur votre compte à chaque passage aux caisses).

Les *bitcoins* sont conçus pour s'autoréguler. Le bon fonctionnement des échanges est garanti par une organisation générale que tout le monde peut examiner, car tout y est public : les protocoles de base, les algorithmes cryptographiques utilisés, les programmes les rendant opérationnels et les données des comptes.

À tout instant, chacun peut savoir combien il y a de *bitcoins* sur chaque compte existant et participer à la vérification des nouvelles transactions. Cette transparence totale n'empêche pas l'anonymat, les propriétaires des comptes n'étant pas tenus de se déclarer. C'est presque un paradoxe : tout mouvement de *bitcoins* est public et, pourtant, l'anonymat des détenteurs est protégé.

La possession des *bitcoins* est matérialisée par une suite de chiffres et de lettres qui constituent un porte-monnaie virtuel (ou compte). Une personne peut détenir plusieurs porte-monnaie. Le porte-monnaie comporte le montant en *bitcoins* de l'argent qu'il contient, une clef publique qu'on peut laisser circuler et une clef privée qui doit rester secrète, car son détenteur peut dépenser l'argent du porte-monnaie.

Tout support convient pour conserver la suite de symboles constituant votre porte-monnaie : papier, clef USB, la mémoire, etc. Grâce à des logiciels adéquats, vous pouvez gérer votre porte-monnaie sur votre ordinateur ou votre téléphone. Nombre de ces logiciels sont développés dans le cadre d'un projet *open source* : les programmes ne sont pas secrets et ceux qui le veulent peuvent contrôler ce qu'ils font et même contribuer à leur amélioration *(voir https://multibit.org/)*.

Pour avoir des *bitcoins* sur un compte, il faut soit qu'un détenteur de *bitcoins* vous en ait donné, par exemple en échange d'un bien, soit passer par une plate-forme informatique qui convertit des devises classiques en *bitcoins*, soit les avoir gagnés en participant aux opérations de contrôle

© Pour la Science - n° 434 - Décembre 2013

1. La signature et l'identification d'un document

Un protocole de signature à double clef est la donnée de deux fonctions f et g permettant de signer les messages et d'interpréter les signatures. Ces fonctions sont connues de tous. Nous ne nous préoccupons pas ici de la teneur du message, mais seulement de son identification.

À Alice sont associées deux clefs, A_{pri} (clef privée) et A_{pub} (clef publique). Ce sont des suites de chiffres. A_{pub} est accessible à tous, mais la clef A_{pri} n'est connue que d'Alice. Il est impossible en pratique de déduire A_{pri} de la connaissance de A_{pub}.

Les deux fonctions f et g servent à signer un message et à lire la signature.

Soit M un message à signer. Alice applique f aux données A_{pri} et M : $f(A_{pri}, M) = M'$. Ce sera le message signé par Alice. Toute personne ayant en main M' et connaissant la clef publique d'Alice vérifiera que c'est bien Alice qui a signé le message : pour cela, elle appliquera la fonction de lecture g aux données A_{pub} et M', ce qui donne M, car $g(A_{pub}, M') = M$. Le fait qu'il soit nécessaire d'appliquer la clef publique d'Alice à M' pour prendre connaissance du message empêche toute falsification du message M signé.

Il est parfois commode pour Alice de transmettre à la fois M et M', M' servant seulement à contrôler pour ceux qui le veulent qu'Alice a bien signé M avec sa clef privée.

Il existe de nombreuses façons de construire les fonctions f et g, mais la monnaie *bitcoin* est fondée sur la cryptographie à courbes elliptiques. La courbe employée est celle notée secp256k1. On aurait pu utiliser l'algorithme RSA, plus connu, mais il nécessite des clefs plus longues. La sécurité du système *Bitcoin* repose sur l'inviolabilité de la signature.

Les signatures de Napoléon Bonaparte.

collectif de la monnaie (nous verrons plus loin comment).

La gestion d'un porte-monnaie doit être très soigneuse. Si vous le perdez en l'effaçant par mégarde ou si vous oubliez le code secret qui permet d'y accéder, alors son contenu est perdu, comme quand vous lancez par-dessus bord un porte-monnaie réel au milieu de l'océan. De nombreux *bitcoins* ont ainsi été perdus par des utilisateurs imprudents ou négligents. Il n'est pas impossible non plus qu'on vous vole votre porte-monnaie virtuel, par exemple à l'occasion d'une intrusion dans votre ordinateur par un hacker. Pour éviter cela, certains porte-monnaie contenant d'importantes sommes en *bitcoins* sont gardés sur des ordinateurs non connectés au réseau ou éteints.

La cohérence des comptes, et donc la solidité de la monnaie *bitcoin*, se fonde sur un principe général de la théorie *Money is memory* de l'économiste américain Narayana Kocherlakota. Ce principe s'exprime ici sous la forme suivante :

– toutes les transactions faites depuis le début des *bitcoins*, le 3 janvier 2009, sont publiques et, à chaque instant, la somme totale des *bitcoins* émis est connue de tous, ainsi que le contenu de chaque porte-monnaie (mais pas le détenteur de ce porte-monnaie) ;

– seul celui qui connaît la clef secrète d'un porte-monnaie peut dépenser son contenu en envoyant tout ou partie de ce dernier à un autre porte-monnaie, cela à la vue de tous, ce qui permet à tous de connaître à chaque instant le contenu de chaque porte-monnaie ;

– tous ceux qui le souhaitent peuvent participer au calcul général de la répartition des *bitcoins* entre les porte-monnaie, cela à l'aide de logiciels (libres et gratuits) dont la correction est contrôlable par tous.

On n'utilise pas ici la cryptographie à clef publique pour cacher de l'information, mais pour signer les transactions. Toute transaction est irréversible, sauf accord explicite des deux contractants pour réaliser une transaction inverse. Quand vous avez dépensé l'argent d'un porte-monnaie, personne n'a autorité pour demander à celui qui a reçu l'argent de le rendre. C'est là une grande différence avec les monnaies numériques à autorité de contrôle centralisée où, assez fréquemment, des transactions sont annulées, parfois plusieurs jours après leur réalisation, ce qui donne lieu à toutes sortes d'escroqueries. L'absence d'autorité centrale et l'anonymat des comptes font qu'il sera très difficile d'agir sur celui qui détient le porte-monnaie ayant reçu vos *bitcoins*... même s'il ne vous livre pas l'achat que vous pensiez régler.

Ce système simplifié des *bitcoins* a une faille qui a contraint son inventeur à ajouter une série de dispositifs cryptographiques au mécanisme de base. La faille est que le propriétaire d'un porte-monnaie pourrait tenter de dépenser deux fois l'argent qu'il contient. Ces doubles dépenses seraient impossibles si les échanges étaient instantanés sur le réseau et si tout propriétaire d'un porte-monnaie participait au calcul continu du contenu de tous les porte-monnaie : sous cette hypothèse de connectivité totale et parfaite, celui qui recevrait l'argent d'un porte-monnaie déjà vidé (ou insuffisamment pourvu) refuserait la transaction, qui serait simultanément considérée invalide par tous.

Des améliorations

Malheureusement, les échanges électroniques ne sont pas instantanés, et certaines parties d'un réseau sont parfois temporairement déconnectées du reste. De plus, tous les utilisateurs de *bitcoins* ne souhaitent pas participer à la vérification continue de toutes les transactions et au recalcul permanent du solde de la totalité des comptes, car cela demande une grande puissance informatique et beaucoup de mémoire. Il faut donc améliorer le modèle.

Les améliorations se fondent sur une série de protocoles qui rendent la monnaie *bitcoin* résistante aux pannes du réseau ou de certaines machines et aux tentatives de manipulation de la monnaie ou de tricheries (dont les doubles dépenses). Ces perfectionnements rendent aussi facultative la participation au contrôle global des porte-monnaie ; pour éviter que trop peu de nœuds du réseau participent

© Pour la Science - n° 434 - Décembre 2013

au contrôle, un système de rémunération est prévu. Ce délicat agencement a étonné les spécialistes et prouve que l'inventeur des *bitcoins* est un cryptologue averti ou un groupe incluant d'excellents cryptologues.

Cette monnaie ne tient que par la cohérence et l'accord unanime de ceux qui y participent et s'entendent sur le contenu de chaque compte, que rien ne matérialise et qu'aucune autorité ne garantit. La construction logicielle et cryptographique doit donc assurer par elle-même que personne ne puisse augmenter le total des *bitcoins* détenus, ni modifier des comptes, sans que tout le monde s'en aperçoive rapidement. Il n'y a pas de police ; la conception même de la monnaie doit donc empêcher la fraude et les dysfonctionnements. Celle de Satoshi Nakamoto y parvient.

Le scepticisme sur la robustesse de la nouvelle monnaie s'atténue. La meilleure preuve est que la monnaie a tenu quatre ans, malgré toutes les attaques qu'elle a subies. C'est pourquoi la valeur actuelle d'un *bitcoin* dépasse 100 euros (mais le *bitcoin* fluctue beaucoup… il vaudra peut-être moins quand vous lirez l'article !).

Une page toutes les dix minutes

L'amélioration du modèle simplifié consiste à créer un cahier de comptes (dont le nom technique est *Blockchain*) qui est complété progressivement par ajout de nouvelles pages de transaction (nommées *blocs*) toutes les dix minutes environ, chaque ajout d'une page étant validé par ceux qui participent à la gestion et à la surveillance décentralisée des comptes. Pour récompenser cette vérification, un tirage au sort désigne toutes les dix minutes environ celui des participants qui ajoute la nouvelle page au cahier de comptes, et qui est rémunéré pour cela par 25 *bitcoins* créés *ex nihilo*. Lorsque la nouvelle page est ajoutée au cahier de comptes, les transactions qui y apparaissent sont validées. Cette création de *bitcoins* est la seule possible, et tous les *bitcoins* existants sont apparus de cette façon.

Lors d'une transaction en ma faveur, mon ordinateur connecté au réseau consulte le cahier de comptes et vérifie que le porte-monnaie qui m'envoie des *bitcoins* ne les a pas déjà dépensés. Cependant, à cause de la possibilité d'une double dépense simultanée, une transaction n'est considérée comme valide que si elle apparaît dans le cahier de comptes. Par conséquent, pour être assuré de l'irréversibilité (par exemple avant d'envoyer le livre qu'on vient de vous acheter en vous faisant parvenir

2. Le protocole d'une transaction

Lorsqu'Alice veut faire un paiement en *bitcoins* à Bernard (par exemple en échange d'un livre), leurs ordinateurs vont opérer une série d'échanges. Ces échanges sont gérés automatiquement par les logiciels installés sur leurs ordinateurs. Les communications sur le réseau *Bitcoin* se font directement entre les deux correspondants, qui y ont des rôles équivalents. On parle de réseaux pair-à-pair (ou P2P, *peer-to-peer*). L'existence de tels réseaux est essentielle pour la monnaie *bitcoins*, qui n'est gérée par aucun nœud central de réseau qui contrôlerait l'ensemble des communications. La transaction qui résulte des échanges entre Alice et Bernard sera publique (tous les ordinateurs présents sur le réseau y auront accès) et permettra la mise à jour par tous du cahier de comptes, qui indique combien de *bitcoins* sont déposés dans chaque porte-monnaie existant.

• Alice souhaite envoyer N *bitcoins* à Bernard.

• Bernard communique sa clef publique B_{pub} à Alice.

• Alice forge un message M de transaction contenant la clef publique B_{pub} de Bernard et la somme N à transférer : $M = B_{pub}\, N$.

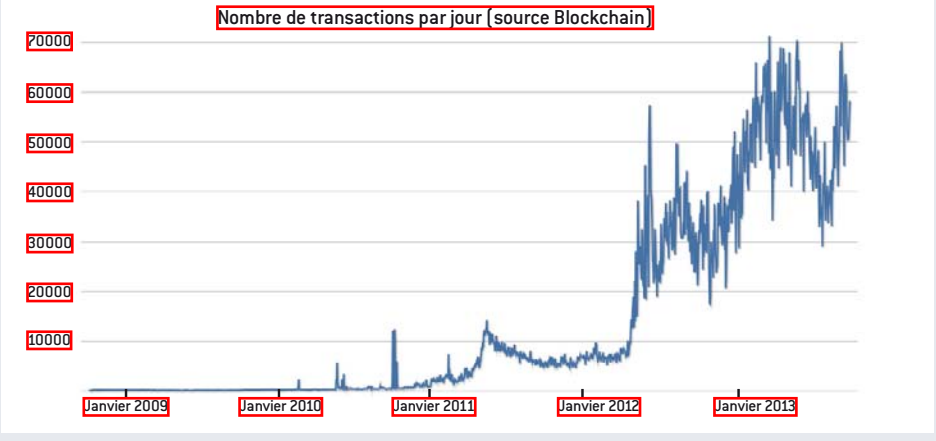
• Alice signe la transaction M avec sa clef privée A_{pri}, c'est-à-dire calcule une suite de symboles $M' = f(A_{pri}, M)$ qui, avec sa clef publique A_{pub}, redonne M : $g(A_{pub}, M') = M$ (tout le monde peut donc contrôler que c'est Alice qui a signé, mais personne ne peut signer à sa place).

• Alice diffuse la transaction signée sur le réseau afin qu'elle soit vue par tout le monde. Le protocole réel est légèrement plus compliqué (il contrôle qu'Alice dispose bien de la somme N dans son porte-monnaie).

En regardant cette transaction depuis l'extérieur, tout le monde voit que l'individu qui contrôle le compte d'Alice (individu que personne ne connaît) a donné son accord pour transférer N *bitcoins* sur le compte contrôlé par l'individu Bernard (que nul ne connaît).

Ne disposant pas de la clef privée d'Alice, personne d'autre qu'elle ne peut envoyer une telle transaction sur le réseau. Son envoi est donc la preuve qu'Alice était d'accord pour le transfert. Tout le monde considérera alors le transfert comme valide.

Le protocole de signature à doubles clefs utilisé est considéré comme robuste. Bien sûr, s'il venait à être cassé (c'est-à-dire si, par exemple, on réussissait à trouver une méthode rapide pour calculer la clef privée à partir de la clef publique), tout le système de la monnaie *bitcoin* s'effondrerait.

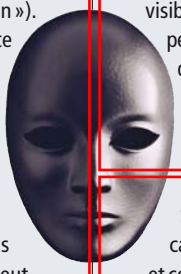


© Pour la Science - n° 434 - Décembre 2013

3. La naissance du *bitcoin*, Satoshi Nakamoto et l'anonymat

Le *bitcoin* a été défini en 2008 par un personnage actuellement anonyme au nom d'emprunt de Satoshi Nakamoto, qui dit avoir travaillé deux ans à la conception de sa monnaie. Une grande traque se déroule sur Internet pour identifier le personnage. On analyse la façon dont il s'est exprimé en anglais, on fait des listes de personnes pouvant avoir les compétences requises… et on spécule.

L'anonymat des utilisateurs des *bitcoins* est assuré par le fait que seuls les numéros et les contenus des comptes sont nécessaires au maintien de la cohérence du livre des comptes (la « Blockchain »). La clef privée d'un compte assure son propriétaire que lui seul pourra dépenser l'argent qui s'y trouve. En théorie, donc, l'anonymat des détenteurs de comptes est assuré. Cependant, l'anonymat n'est pas absolu. D'une part, on peut suivre le déplacement des *bitcoins* d'un compte à l'autre et ainsi en déduire des informations sur le propriétaire unique d'une série de comptes visiblement gérés par une seule personne. De plus, au moment de transformer des *bitcoins* en euros ou en une devise classique, l'anonymat n'est plus possible.



Des chercheurs, dont Sergio Lerner, ont étudié le cahier de comptes du *bitcoin* et conclu que S. Nakamoto détient probablement l'équivalent de dix pour cent des *bitcoins* émis à ce jour.

Il est en effet à peu près certain qu'au lancement de la monnaie, il fut le seul à « miner » les *bitcoins* pour se constituer un pécule personnel et qu'il a regroupé ce pécule sur quelques comptes en nombre assez limité.

L'invention des *bitcoins* aurait permis à Nakamoto de se constituer une fortune de l'ordre de 100 millions de dollars (au cours d'aujourd'hui). Il lui sera difficile de les remettre sur le marché sans dévoiler son identité, à moins qu'il mette en action des techniques de brouillage faisant perdre sa trace !

un paiement en *bitcoins*), il faut attendre dix minutes et voir sa transaction sur la nouvelle page du cahier.

La non-transmission instantanée des messages a pour conséquence que, parfois, deux ajouts de pages au cahier se feront presque simultanément dans deux parties éloignées du réseau, créant temporairement un dédoublement du cahier de comptes. Les deux versions peuvent alors contenir une dernière page sensiblement différente, ce qui rend alors possible une double dépense. L'événement est rare, mais comme il est possible et inévitable à cause de l'imperfection des communications, un procédé de remise en ordre du système est prévu. Les deux cahiers continueront chacun de leur côté à se voir ajouter des pages toutes les dix minutes environ. Le temps nécessaire à l'ajout est lié au processus de tirage au sort qui désigne le gagnant des 25 *bitcoins*. Les ajouts de pages des deux cahiers malencontreusement créés ne se feront donc pas à la même vitesse exactement. Le cahier le plus long (celui qui a été complété de plusieurs nouvelles pages le plus rapidement) est considéré comme le bon. Cette règle, traduite dans les programmes de vérification des comptes, conduit à l'élimination de l'autre cahier et à la reconstitution d'un état cohérent du système, où ne persiste qu'un seul cahier et où les doubles dépenses sont impossibles.

Ces ennuis temporaires, rares mais inévitables, dans la gestion du cahier de comptes ont pour conséquence que pour être certain qu'une transaction soit définitivement valide (c'est important dans le cas de grosses sommes), il faut attendre non pas dix minutes, mais plusieurs fois ce délai. On considère qu'une heure produit une garantie parfaite.

Ruée vers l'or numérique

La désignation des gagnants des 25 *bitcoins*, toutes les dix minutes, se fait par un processus cryptographique qui en assure la parfaite honnêteté et surtout une totale imprévisibilité et « infalsifiabilité » (il est impossible de manipuler le choix du gagnant). Le tirage au sort vous donne d'autant plus de chances de gagner que vous disposez de plus de puissance de calcul. Plus vous acceptez de consacrer des ressources de calcul à tenter de gagner, plus vous augmentez vos chances de gagner. Le travail fait par vos machines pour tenter de gagner porte le nom de *minage*, par analogie au travail dans une mine qui conduit ceux qui ont de la chance à trouver de l'or.

Aujourd'hui, participer à ces tirages au sort (et donc participer au contrôle général des comptes) est très tentant : 25 *bitcoins* s'échangent contre environ 3 200 euros (au 26 octobre 2013). Du coup, les « mineurs de *bitcoins* », comme ils se nomment, se sont multipliés, ce qui renforce le système de contrôle général des comptes. Les mineurs de *bitcoins* ont progressivement perfectionné leurs outils avec l'espoir d'augmenter leurs chances de gagner. Dans un premier temps, les mineurs ont programmé des cartes graphiques pour effectuer, le plus rapidement possible, les calculs demandés par le minage. En effet, les cartes graphiques disposent d'une puissance importante et on peut la détourner à d'autres choses que le simple traitement des images numériques. Aujourd'hui, les cartes graphiques ne suffisent pas pour avoir de bonnes chances de gagner, car, à mesure que plus de mineurs se sont mis à jouer, il est devenu plus difficile de gagner.

Précisons que le système de S. Nakamoto est conçu pour qu'il y ait un gagnant toutes les dix minutes environ et qu'il s'ajuste automatiquement pour que ce temps moyen ne diminue pas. Des entreprises se sont donc mises à fabriquer des cartes et des machines spécialisées dont le seul objectif est de miner les *bitcoins*. La consommation électrique consacrée au minage s'est considérablement accrue depuis un an. Le phénomène ressemble un peu à une ruée vers l'or, sauf qu'ici tout se déroule dans le monde des réseaux et des ordinateurs en faisant circuler des bits d'information et fonctionner des microprocesseurs dédiés.

En raison de la puissance de calcul nécessaire, il devient impossible, même pour un acteur très puissant, et on sait qu'il en existe, de s'emparer de tous les gains. L'analyse générale du protocole des *bitcoins*, effectuée dès 2008 par S. Nakamoto, montre que si un acteur pouvait disposer de la moitié de la puissance consacrée au « minage », il serait en mesure

4. Forces et faiblesses des *bitcoins*

Nouveauté, forces et qualités des bitcoins

– La monnaie *bitcoin* est fondée sur un réseau pair-à-pair et des logiciels libres et gratuits. Indépendante de toute banque, elle n'est pas soumise à une autorité centralisée et est complétement transparente.

– Les transactions de *bitcoins* sont rapides et irréversibles (après un délai d'une heure ou moins). Personne ne peut agir sur les *bitcoins* de vos comptes sans votre consentement.

– Il n'y a pas de frais de transaction ou de gestion, ou ceux-ci sont minimes (électricité, réseau, commissions volontaires et déterminées par l'utilisateur).

– Le nombre de *bitcoins* ne dépassera jamais 21 millions. Avec les *bitcoins*, vous échappez au risque qu'un acteur dominant (une banque centrale) décide de faire fonctionner la planche à billets et vous prenne de l'argent par l'inflation créée.

– Anonymat : le réseau fonctionne à partir de comptes. Détenir un compte, c'est connaître la clef privée qui lui est associée. L'identité des utilisateurs n'est utile à aucun moment.

– Un *bitcoin* peut être divisé en fractions de *bitcoin* jusqu'au 1/100 000 000e.

– Le *bitcoin* (à cause du nombre maximal de *bitcoins* en circulation) est déflationniste (il prend peu à peu de la valeur) : vos économies ne sont pas rongées par l'inflation, mais s'apprécient !

– Le *bitcoin* est conçu pour que l'intérêt de ceux qui s'en occupent est qu'il fonctionne bien, et plus il prend de la valeur, plus les contrôles auxquels il est soumis sont nombreux.

– Les protocoles et programmes permettant de gérer les transactions peuvent évoluer, mais cela ne peut se faire que par vote, donc dans l'intérêt de tous.

Doutes, fragilités, risques des bitcoins

– L'anonymat de l'inventeur S. Nakamoto et les *bitcoins* qu'il a gagnés facilement aux débuts de la monnaie créent un sentiment désagréable et font craindre une machination.

– Aujourd'hui, les *bitcoins* sont tout petits à côté des autres monnaies : il y a environ un milliard de dollars en *bitcoins*, alors que circulent 1 200 milliards de dollars.

– La monnaie *bitcoin* repose sur des protocoles cryptographiques dont la robustesse n'est pas prouvée mathématiquement.

– Le système de gestion des *bitcoins* repose sur un ensemble de protocoles rendus opérationnels par des programmes. Des erreurs peuvent s'y trouver.

– Le *bitcoin* reste assez compliqué à comprendre et suscite donc la méfiance du plus grand nombre (qui ne saisit pas mieux la façon dont fonctionnent vraiment les monnaies classiques).

– Peu de sites et peu de commerçants acceptent les *bitcoins* aujourd'hui.

– Le *bitcoin* favorise le blanchiment d'argent sale, facilite les trafics en tous genres, et permet la fraude fiscale.

– Le *bitcoin* est déflationniste, ce que certains considèrent comme négatif, car cela constitue un frein à la circulation de l'argent ; surtout, son cours est très volatil du fait des incertitudes qui l'entourent.

– Le *bitcoin* pourrait faire l'objet d'interdictions ou de contrôles stricts imposés par des États voulant protéger leur propre monnaie. Le *bitcoin* pourrait être victime d'attaques menées par des agences, telle la NSA, qui tenteraient de briser toute confiance en lui, pour maintenir les monopoles monétaires actuels.

– L'anonymat y est imparfait.

– Le succès des *bitcoins* a inspiré toutes sortes d'autres Nakamoto et des dizaines de nouvelles cryptomonnaies copiées sur lui ont vu le jour tout récemment. Certaines, un peu différentes et encore mieux conçues, pourraient capter l'intérêt et faire se déplacer l'argent misé aujourd'hui sur les *bitcoins*.

– L'évolution possible des protocoles et programmes, prévue mais au fonctionnement délicat, conduit à la mise en place d'une forme d'administration centralisée constituée par l'ensemble des nœuds les plus puissants du réseau de contrôle. Cela ferait à terme ressembler le *bitcoin* aux monnaies usuelles dont S. <Nakamoto voulait se démarquer *(voir l'article de Joshua Kroll et al. en bibliographie)*.

de perturber gravement le fonctionnement du système *Bitcoin*. Avec l'accroissement des efforts investis dans l'extraction de *bitcoins*, il est de plus en plus difficile de réunir ces 50 pour cent, ce qui renforce indirectement la monnaie *bitcoin*. Le système conçu par S. Nakamoto se consolide au fur et à mesure que des gens s'y intéressent : plus le cours du *bitcoin* monte, plus il devient intéressant de chercher à extraire des *bitcoins* ; or plus ceux qui le font sont nombreux, plus le *bitcoin* devient robuste et donc plus son cours a des chances de monter.

La puissance globale consacrée aujourd'hui (le 26 octobre 2013) au minage de *bitcoins* est de 36 080 pétaflops *(voir http://bitcoinwatch.com/)* (1 pétaflops = 10^{15} opérations en virgule flottante par seconde). C'est plus de 1 000 fois la puissance du plus puissant ordinateur du monde (le *Tianhe-2* détenu par la Chine), qui ne fait que 33 pétaflops, et c'est largement plus que la puissance cumulée des 500 ordinateurs les plus puissants.

C'est considérable ! Ce qu'on peut voir comme un énorme gâchis de temps de calcul empirera si le *bitcoin* s'impose et que son cours (qui, bien sûr, détermine l'argent que les mineurs sont prêts à investir) progresse.

Aujourd'hui, en utilisant seulement son ordinateur pour « miner », on n'a aucune chance de gagner des *bitcoins*. Cette situation a conduit à la création de « guildes de mineurs ». Les mineurs associés décident de partager les gains qu'ils feront, en proportion de la puissance de calcul qu'ils consacrent. Ces regroupements assurent à chacun de gagner un peu, car la guilde (si elle est puissante) remportera assez fréquemment les 25 *bitcoins* qu'elle redistribuera à ses membres. Toutefois, ne vous faites pas d'illusion : en rejoignant une guilde, si vous n'offrez que la puissance de votre ordinateur personnel, la part qui vous reviendra sera minuscule.

Pas plus de 21 millions de *bitcoins*

Les protocoles de S. Nakamoto (qui sont traduits dans les programmes utilisés pour la gestion décentralisée de la monnaie *bitcoin*) prévoient que tous les quatre ans, la somme distribuée aux gagnants du minage est divisée par deux. Au début, elle était de 50 *bitcoins* ; le 22 novembre 2012, elle est passée à 25 *bitcoins*, et elle passera à 12,5 *bitcoins* dans trois ans. Du fait qu'un *bitcoin* ne peut être divisé en unités plus petites que le cent millionième de *bitcoin*, le gain attribué toutes les dix minutes finira par s'annuler. Un petit

© Pour la Science - n° 434 - Décembre 2013

COLLECTION POUR LA SCIENCE LES PETITS THEMATIQUES

Spécial T.I.P.E. 2013-2014

Retrouvez tous les articles de référence parus dans Pour la Science sur le thème Transfert-Échanges

Déclinés en biologie, physique, informatique, archéologie et environnement, ces cinq feuilletables numériques vous aideront pour préparer votre T.I.P.E. !

3,99 €
35 p.
environ

Des dizaines d'autres sujets à découvrir sur
www.pourlascience.fr/petitsthematiques

L'AUTEUR

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

BIBLIOGRAPHIE

P. Noizat, **Bitcoin : derrière la bulle, de vrais débats,** *Les Échos*, 23 août 2013 http://blogs.lesechos.fr/paristech-review/bitcoin-derriere-la-bulle-de-vrais-debats-a13320.html

S. Barber *et al.*, **Bitter to better, How to make Bitcoin a better currency**, *Proceedings of Financial Cryptography*, 2013.

D. Ron et A. Shamir, **Quantitative analysis of the full Bitcoin transaction graph**, *Proceedings of Financial Cryptography*, 2013.

J. Kroll *et al.*, **The Economics of bitcoin mining, or bitcoins in the presence of adversaries,** 12th Workshop on the economics of information security, 2013 : www.weis2013.econinfosec.org/papers/KrollDaveyFeltenWEIS2013.pdf

FBI Directorate of Intelligence, **Bitcoin virtual currency : Unique features present distinct challenges for deterring illicit activity**, 2012 : www.wired.com/images_blogs/threatlevel/2012/05/Bitcoin-FBI.pdf

Satoshi Nakamoto, **Bitcoin : A peer-to-peer electronic cash system**, 2009 : http://bitcoin.org/bitcoin.pdf

Bitcoin Foundation : https://bitcoinfoundation.org

calcul montre que le processus d'émission de ces nouveaux *bitcoins* de récompense aura cessé en 2140 et qu'il y aura alors un total de 21 millions de *bitcoins*. À partir de cette date, aucun nouveau *bitcoin* ne sera plus jamais créé.

Afin d'éviter que tous les mineurs, essentiels au bon fonctionnement du protocole, désertent et que la construction et la validation continue du cahier de comptes cessent, S. Nakamoto a prévu qu'à chaque transaction, on donne une commission à celui qui ajoutera la page contenant la transaction au cahier. L'intérêt de miner sera donc préservé, même au-delà de 2140. Donner une telle commission n'est pas obligatoire et, aujourd'hui, même si vous ne laissez rien, vos transactions sont quand même validées et passent dans le cahier de comptes. Après 2140, il deviendra sans doute souhaitable de laisser un petit quelque chose à chaque transaction… On a le temps d'y penser.

L'impossible devenu réalité… et valeur

Le système mis en fonctionnement il y a quatre ans tient bien. Au début, le cours du *bitcoin* était dérisoire. Depuis un peu plus d'un an, il a monté pour atteindre 200 euros le 9 avril 2013. Il a ensuite chuté, puis est remonté à 100 euros. Certains ont réalisé d'excellentes affaires soit en achetant des *bitcoins* quand ils ne valaient rien, soit en les « minant » quand c'était facile. L'instabilité du cours fait qu'acheter des *bitcoins* est un pari. Cependant, à mesure que son usage se répandra et que des commerçants accepteront d'être payés en *bitcoins*, on peut espérer que le cours se calmera. Les avis sont partagés sur son devenir, mais l'intérêt qu'il suscite a de quoi rendre optimiste. Quelque chose d'important s'est produit avec la naissance de cette monnaie qu'une valorisation du total des *bitcoins* supérieure à un milliard d'euros a installé pour longtemps dans le monde réel. Une question se pose : pourquoi le *bitcoin* n'est-il pas apparu plus tôt ?

La réponse est simple : avant 2009, il était impossible d'envisager une telle monnaie qui doit son existence aux progrès récents dans plusieurs domaines.

a) Il fallait un réseau mondial fiable ; le *bitcoin* cesserait d'exister immédiatement en cas d'arrêt du réseau (il reprendrait à sa remise en marche).

b) Rien de possible non plus sans d'importantes puissances de calcul et de mémorisation informatique. C'est seulement récemment qu'elles sont devenues suffisantes pour que la tenue et la vérification des comptes, même en considérant toutes les transactions depuis la création de la monnaie, soient possibles quasi simultanément par des milliers d'acteurs indépendants. Ce modèle crée sans doute une confiance bien meilleure dans les comptes immatériels de cette monnaie que celle que l'on a dans ceux d'une banque qui s'occupe de gérer sa monnaie seule en faisant marcher la planche à billets de façon imprévisible et sans demander leur avis aux détenteurs de devises qui s'en trouvent pourtant lésés.

c) Le génie d'un informaticien (ou plusieurs ?) qui, en s'appuyant sur une cryptographie qui a formidablement progressé depuis 30 ans, a produit un protocole subtil et robuste que personne ne pensait possible, et qui a réussi à le faire fonctionner et décoller.

d) Essentielle aussi est la communauté des passionnés, un peu anarchistes, qui s'occupent des programmes et des réseaux pair-à-pair. Ils rendent l'utilisation pratique des *bitcoins* possible gratuitement par tous et évitent qu'un groupe, une banque ou un État ne s'empare de ce qui est au fond une monnaie commune, universelle et démocratique.

Ceux qui, à propos du *bitcoin*, parlent de pyramide de Ponzi ou de construction sur du vide pouvant s'écrouler du jour au lendemain n'ont rien compris à cette nouveauté remarquable, due aux mathématiques, aux avancées techniques et à l'ingéniosité de S. Nakamoto. Ils n'ont rien compris non plus aux monnaies qui reposent toutes sur la confiance (depuis l'abandon général de la convertibilité en or) et qui créent donc, comme le *bitcoin*, de la valeur à partir de rien. Le temps est peut-être venu aujourd'hui d'accorder sa confiance à des protocoles bien conçus, contrôlés par tous, plutôt qu'à des banques qui se moquent du reste du monde et qui, sans régulation collective, manipulent les monnaies aux dépens de (presque) tous. ■

© Pour la Science - n° 434 - Décembre 2013

Offre de parrainage

Pour Noël, offrez une année de découvertes avec POUR LA SCIENCE

Prix unitaire : 11.95 € – www.hugoetcie.fr

Et recevez votre CADEAU

Les amateurs de jeux de chiffres prendront plaisir à résoudre un jeu de chiffres par jour : sudokus, carrés magiques, opérations secrètes, dédalos, hanjes, koudumos, jeux de logique, géométrie…

À partir de janvier 2014, votre filleul recevra au choix pendant un an :

- 12 numéros du magazine *Pour la Science*

ou

- 12 numéros du magazine *Pour la Science* + 4 numéros du *Dossier Pour la Science.*

Une personne de votre entourage s'intéresse aux neurosciences et à la psychologie ? Faites-lui plaisir ! Offrez-lui un abonnement d'un an à Cerveau & Psycho et recevez votre cadeau !

À partir de janvier 2014, votre filleul recevra au choix pendant un an :

- 6 numéros du magazine *Cerveau et Psycho*

ou

- 6 numéros du magazine *Cerveau et Psycho* + 4 numéros de l'*Essentiel Cerveau & Psycho.*

Votre CADEAU

Avec trois niveaux de difficulté, les jeux proposés dans ce livre vous feront exercer votre sens de l'observation et votre logique, et s'ils paraissent simples, ils se révèlent parfois plus complexes qu'il n'y paraît.

Prix unitaire : 10.50 € – www.hugoetcie.fr

BULLETIN DE PARRAINAGE POUR LA SCIENCE

À découper ou à photocopier et à retourner accompagné de votre règlement dans une enveloppe non affranchie à : Groupe Pour la Science • Service Abonnements • 8 rue Férou • 75278 Paris cedex 06

POUR MON/MA FILLEUL(E)

Oui, j'offre 1 an d'abonnement au magazine *Pour la Science* :

❑ **formule simple** • **12 numéros** • **56 €** au lieu de ~~74,90 €~~
Tarif valable uniquement en France métropolitaine et d'outre-mer.
Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter : Europe 12 € – autres pays 25 €.

❑ **formule couplée** • **12 numéros + 4 Dossiers** • **76 €** au lieu de ~~102,70 €~~
Tarif valable uniquement en France métropolitaine et d'outre-mer.
Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter : Europe 16 € – autres pays 35 €.

Oui, j'offre 1 an d'abonnement au magazine *Cerveau & Psycho* :

Format choisi : ❑ **classique** (21 x 28 cm) **ou** ❑ **pocket** (16 x 23 cm)

❑ **formule simple** • **6 numéros** • **32 €** au lieu de ~~41,70 €~~
Tarif valable uniquement en France métropolitaine et d'outre-mer.
Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter : Europe 7,50 € – autres pays 15 €.

❑ **formule couplée** • **10 numéros + 4 Essentiels** • **48 €** au lieu de ~~69,50 €~~
Tarif valable uniquement en France métropolitaine et d'outre-mer.
Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter : Europe 11,50 € – autres pays 23 €.

J'indique ci-dessous les coordonnées de la personne qui en bénéficiera :

Nom : Prénom :
Adresse :
CP: Ville :
Pays : Tél. : (Pour le suivi client (facultatif))
Email :

POUR MOI*

Je reçois en cadeau aux coordonnées suivantes :

❑ **un Jeu de Chiffres par jour – 2014** (983871)
❑ **Jeux de Logique** (983870)

Nom : Prénom :
Adresse :
CP: Ville :
Pays : Tél. : (Pour le suivi client (facultatif))
Email :

Je choisis mon mode de règlement :

❑ Par chèque à l'ordre de *Pour la Science*
❑ Par carte bancaire
Numéro de carte
Date d'expiration
Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB)

Signature obligatoire

* Vous pouvez profiter de cette offre pour vous réabonner. Dans ce cas, remplissez la partie « Filleul » en indiquant vos coordonnées. Vous recevrez également vos cadeaux.
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 ou votre filleul(e) pouvez être amenés à recevoir des propositions d'organismes partenaires. En cas de refus de votre part, merci de cocher la case ci-contre** ❑.

PPN434 • Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 31/12/2013

SCIENCE & FICTION

Matière à fiction

Certains matériaux naturels ont des propriétés que les matériaux artificiels n'atteignent pas. Mais ceux de la science-fiction sont encore plus performants !

Roland LEHOUCQ et Jean-Sébastien STEYER

De la pierre taillée aux nanotubes de carbone, du travail du bois à la métallurgie, l'amélioration des techniques est toujours allée de pair avec la recherche de nouveaux matériaux. Dès l'Antiquité, Platon évoque l'orichalque dans *L'Atlantide* : ce métal, le plus précieux après l'or, aurait été couramment utilisé par les Atlantes. La pierre philosophale, autre matériau de légende, a été recherchée en vain par les alchimistes qui la pensaient capable de transmuter les métaux, notamment le plomb en or. Mais le mythe de la transmutation est devenu réalité avec l'invention des accélérateurs de particules : les collisions de haute énergie qui s'y déroulent transforment les noyaux cibles en d'autres noyaux n'existant pas toujours à l'état naturel. Ainsi la transmutation d'un métal en or fut réussie pour la première fois en 1941, en bombardant du mercure avec des neutrons. Hélas, l'or obtenu est radioactif et son coût de production prohibitif, ce qui rend le procédé totalement inutilisable en pratique !

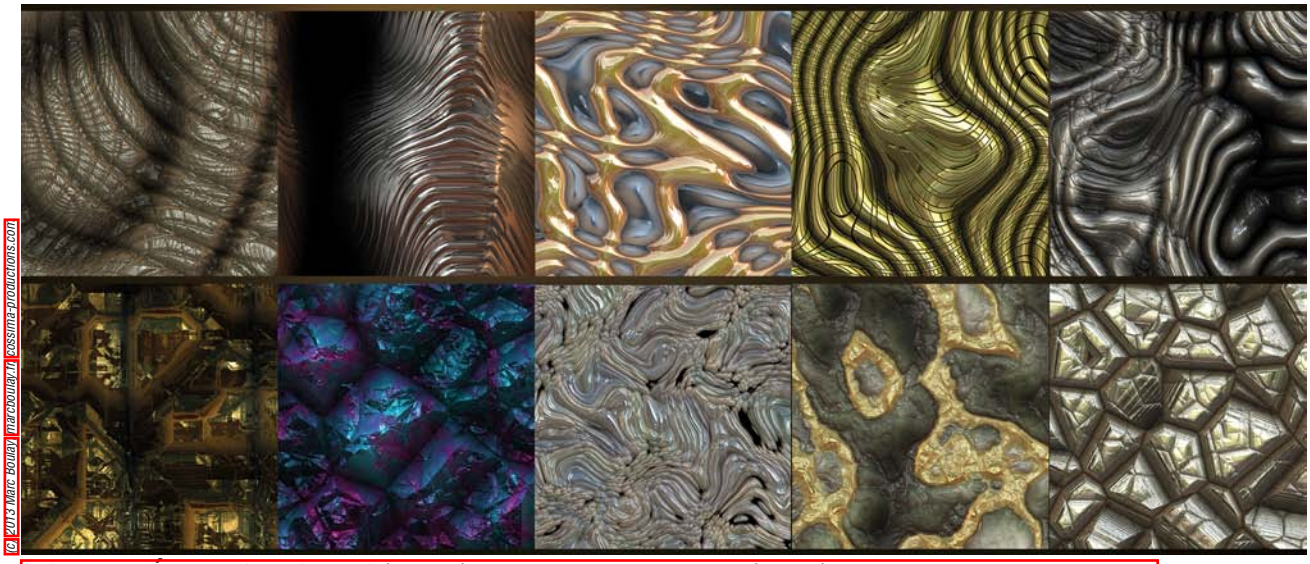
Les auteurs de science-fiction n'ont bien sûr pas manqué d'inventer quantité de matériaux fabuleux. L'un des premiers exemples est la cavorite, imaginée par H. G. Wells dans son roman *Les Premiers Hommes dans la Lune*, paru en 1901. Cette substance a la propriété singulière de se comporter comme un écran gravitationnel, tout comme une cage de Faraday fait écran aux champs électromagnétiques. La cavorite permet donc de construire un appareil se déplaçant par antigravité ! La physique interdit l'existence d'un matériau opaque à la gravitation, car il permettrait de fabriquer une machine à mouvement perpétuel : en placer un morceau sous une roue suffirait à la mettre en rotation du seul fait de l'annulation de son poids à l'endroit où le matériau est placé. La cavorite est nommée d'après le héros du roman, le docteur Cavor, qui la réalise en « fondant ensemble quelques métaux et diverses autres choses ».

1. DANS LE FILM *AVATAR*, l'unobtainium a les propriétés d'un supraconducteur à température ambiante, Graal des physiciens des matériaux.

Un cas plus intéressant encore est celui de Cleve Cartmill. En 1944, il publie dans la revue *Astounding Science Fiction* une nouvelle intitulée *Deadline* où est décrite une bombe utilisant des isotopes radioactifs déjà connus des physiciens nucléaires de l'époque. Les détails qu'il en donna attirèrent l'attention du FBI qui y vit un engin similaire à celui qui était alors en construction dans le cadre du très secret projet *Manhattan*, dont l'objectif était la réalisation d'une bombe nucléaire.

Les auteurs de science-fiction n'anticipent pas toujours l'avenir de façon aussi pertinente. S'ils s'inspirent de matériaux existant réellement, ils en déforment ou en amplifient les propriétés. Ainsi, dans *Les fontaines du paradis*, Arthur Clarke décrit la construction d'un ascenseur spatial, très long câble fixé à la surface de la Terre et permettant d'accéder à l'espace. Il doit être de faible densité et d'une résistance à la traction dépassant largement celle des matériaux ordinairement utilisés dans la construction. Dans son roman, Clarke nomme « monofilament » le matériau utilisé et extrapole probablement les propriétés des fibres de carbone ou des fibres polymères à haute résistance, le kevlar par exemple.

© Pour la Science - n° 434 - Décembre 2013



© JEUX Marc boulay / marcboulay.fr / cassima-productions.com

2. SUPERMATÉRIAUX POLYMORPHES *(en haut)* **fabriqués à partir de minéraux** *(en bas)* **rapportés de la Galaxie et observés – sur cette vue d'artiste – au microscope optique.**

Depuis, la science des matériaux a progressé, et les physiciens ont découvert le nanotube de carbone en 1991. Il s'agit d'un cylindre de quelques milliardièmes de mètre de diamètre constitué d'atomes de carbone agencés selon un motif hexagonal. Il semble que ces nanotubes aient les bonnes propriétés mécaniques pour construire un ascenseur spatial : sa résistance estimée est 100 fois supérieure à celle de l'acier, pour une densité quatre fois moindre. Seule difficulté : les brins que l'on sait fabriquer ne dépassent pas quelques centimètres de longueur…

L'alchimie de la science-fiction

S'ils s'inspirent parfois de la réalité, les auteurs de science-fiction aiment inventer de toutes pièces le matériau dont ils ont besoin. Ils ne font d'ailleurs que suivre la voie ouverte par les ingénieurs anglo-saxons qui, dans leur jargon, invoquent ironiquement l'« unobtainium » (de « unobtain » qui signifie ne pas obtenir) à chaque fois qu'ils parlent d'un matériau fictif ayant des propriétés peu communes. L'unobtainium a migré vers la science-fiction cinématographique, dans *Fusion the Core* (J. Amiel, 2003) et *Avatar* (J. Cameron, 2009), où il représente tour à tour le métal ultrarésistant de la coque du *Virgil*, le vaisseau d'exploration qui atteint le centre de la Terre, ou le supraconducteur à température ambiante convoité par les humains sur la planète Pandora. Parmi les matériaux fictionnels, les supermétaux sont les plus courants pour réaliser armes (les griffes en adamantium de Wolverine), armures (le mithril forgé par les Nains du *Seigneur des Anneaux*) ou coques de vaisseaux interstellaires.

Ces supermétaux résistent évidemment à des contraintes extrêmes ou à des températures infernales. Mais la physique joue encore les rabat-joie : la matière solide ne peut pas être infiniment résistante. Ainsi, sa résistance thermique est limitée par l'énergie de liaison des atomes qui le constituent. Quand la chaleur apportée est suffisante, l'agitation thermique est telle que le matériau perd sa cohésion et fond. La gamme de températures de fusion rencontrées dans la nature est relativement large : le sodium fond à 98 °C et le tungstène à 3 422 °C. Mais le jugement est sans appel : aucune matière terrestre ne résiste à une température supérieure à quelques milliers de degrés.

Le « neutronium » est un autre matériau qui a inspiré la science-fiction depuis le milieu du XX^{e} siècle. Le terme fait souvent référence à une forme extraordinairement dense et résistante de matière, inspirée de celle que l'on trouve dans le cœur d'une étoile à neutrons. Dans *L'alchimiste du neutronium*, de Peter Hamilton (1997), l'astrophysicienne Alkad Mzu veut venger la destruction de son monde natal et conçoit une arme capable de provoquer l'implosion du cœur d'une étoile. L'énorme énergie gravitationnelle ainsi dégagée fait exploser l'étoile et la transforme en supernova dont le résidu postexplosif est une étoile à neutrons. C'est précisément par ce mécanisme que les étoiles les plus massives finissent – naturellement – leur vie. Le scrith, dont le romancier Larry Niven fait la matière première de l'*Anneau-Monde* dans son œuvre éponyme de 1970, a aussi des propriétés proches de celle de la matière nucléaire : sa résistance n'a d'égal que l'intensité de la force nucléaire forte qui, dans le noyau des atomes, lie protons et neutrons. Il faut bien ça pour résister aux énormes contraintes engendrées par la rotation de l'Anneau-Monde, dont le rayon est de 150 millions de kilomètres.

Verrons-nous un jour les matériaux fabuleux de la science-fiction ? D'une certaine façon, ils sont déjà là, mais pas où nous les attendions : plantes et animaux produisent des matériaux organiques impressionnants. À quand, par exemple, une sporopollénine de synthèse, ce polymère ultrarésistant qui compose les parois des spores, des pollens et de certaines algues, capable de résister à des chocs et des températures extrêmes ? À quand une soie d'araignée artificielle, dont la configuration moléculaire pourra s'adapter aux changements de température et d'humidité ? Les applications du biomimétisme sont plus que prometteuses : polymères autoréparants, os synthétique, conducteurs organiques, surfaces autonettoyantes, nanomatériaux, etc. Les inventions d'aujourd'hui transformeront-elles la science-fiction d'hier en réalité de demain ? ■

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

Le retour de la Grande Comète de 1680 ?

Une comète qui restera visible jusqu'au début de l'année 2014 ressemble beaucoup à celle peinte au XVII^e siècle par l'artiste hollandais Lieve Verschuier. Ont-elles un lien de parenté ?

Loïc MANGIN

Durant les derniers jours de décembre, lorsque vous préparerez les festivités de fin d'année, prenez quelques minutes pour scruter le ciel à la nuit tombée. Avec un peu de chance, vous apercevrez C/2012 S1. Une étoile ? Un satellite ?

Non, une comète – qui est visible à l'aide de télescopes amateurs depuis août 2013 *(voir le cliché page ci-contre, en bas)* et qui le restera jusqu'en janvier 2014. Au plus près du Soleil (on parle de périhélie), le 26 décembre 2013, et à 60 millions de kilomètres de la Terre, elle sera alors peut-être visible à l'œil nu. Cette comète est aussi nommée ISON, du nom du télescope *(International Scientific Optical Network)* installé près de Kislovodsk, en Russie, grâce auquel Vitali Nevski et Artyom Novichonok l'ont découverte le 21 septembre 2012.

Rappelons qu'une comète est un petit corps constitué d'un noyau de glace et de poussières. À l'approche du Soleil, ce noyau fond en partie et entraîne l'apparition, autour de lui, d'une couche gazeuse et brillante souvent prolongée par une traînée lumineuse, la queue de la comète. Cette queue peut s'étendre jusqu'à 80 millions de kilomètres. Plus précisément, ISON est une comète dite rasante, c'est-à-dire que son périhélie est très proche du Soleil.

Les caractéristiques de l'orbite d'ISON (son demi-grand axe, son excentricité, son inclinaison…) intriguent les astronomes, car elles sont similaires à celles de C/1680 V1, une autre comète plus connue sous le nom de Grande Comète de 1680, mais aussi comète de Kirch. Elle a été représentée dans le ciel de Rotterdam *(voir page ci-contre, en haut)* par le peintre hollandais Lieve Verschuier (1627-1686). L'artiste est célèbre par ailleurs pour ses marines, riches d'enseignement sur la construction navale au XVII^e siècle.

La comète C/1680 V1 a été découverte le 14 novembre 1680 par l'astronome allemand Gottfried Kirch (1639-1710), qui sera le premier directeur de l'Observatoire de Berlin.

La comète de Kirch aurait été la première comète découverte grâce à un télescope : elle était pourtant visible à l'œil nu !

La comète de Kirch aurait été la première à avoir été découverte grâce à un télescope. On dit pourtant qu'elle fut visible en plein jour. De fait, elle avait une queue très longue, ce qu'illustre le tableau de Verschuier.

Dans ce tableau, que tiennent dans les mains certains spectateurs ? Il s'agit de bâtons de Jacob, ou arbalestrilles. Avant l'invention du sextant à la fin du XVIII^e siècle, ces instruments aidaient les astronomes à mesurer les angles. Ils étaient aussi utiles aux navigateurs et aux arpenteurs. Leur usage est attesté dès le XIV^e siècle.

La comète C/1680 V1 est aussi nommée comète de Newton, car le savant britannique, en rien concerné par sa découverte, aurait néanmoins utilisé les caractéristiques de son orbite pour, d'une part, vérifier les lois de Kepler et, d'autre part, élaborer la loi universelle de la gravitation. Étonnamment, en 1684, l'un des premiers informés de son succès fut son ami… l'astronome Edmond Halley, qui avait calculé la périodicité de la comète de 1682 portant désormais son nom. D'ailleurs, Halley aurait observé la comète de Kirch lorsqu'il traversait la Manche vers la France.

La comète de Kirch est passée à quelque 60 millions de kilomètres de la Terre le 30 novembre 1680 (on retrouve la distance qui séparera ISON de la Terre le 26 décembre prochain). Elle s'est approchée à moins de un million de kilomètres du Soleil le 18 décembre 1680, atteignant son pic de luminosité le 29 décembre. Elle a été observée la dernière fois le 19 mars 1681. On a calculé qu'en septembre 2012, elle était à quelque 253 unités astronomiques du Soleil, soit environ 40 milliards de kilomètres.

Comment interpréter les similarités entre les orbites des comètes C/1680 V1 et C/2012 S1 ? Elles ne peuvent être les mêmes, car la comète de Kirch a une période de l'ordre de 10 000 ans. En 2012, l'astronome John Bortle, de l'Observatoire Brooks, aux États-Unis, a proposé que ces deux comètes pourraient être les fragments d'un même corps initial. Cependant, les observations qui se sont accumulées depuis semblent infirmer cette hypothèse. Quoi qu'il en soit, une splendide comète dans le ciel reste un beau cadeau de Noël ! ■

Un site de la NASA est dédié à l'observation de la comète ISON. Il contient de nombreuses références : *http://www.isoncampaign.org*

© Pour la Science - n° 434 - Décembre 2013

© Pour la Science - n° 434 - Décembre 2013

IDÉES DE PHYSIQUE

Tomber plus vite qu'en chute libre

Lorsqu'un objet déformable tombe, son contact avec le sol peut accélérer la chute au lieu de la ralentir.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

L'accélération des objets due à la gravité ne dépend pas de leur masse, si bien qu'ils tombent en chute libre à la même vitesse (si l'on néglige le frottement aérodynamique). Cette loi de la physique est tellement ancrée dans nos esprits que l'on est très surpris par certaines situations où une partie d'un objet tombe plus lentement ou plus vite que son centre de gravité !

Les ressorts de la chute d'un ressort mou…

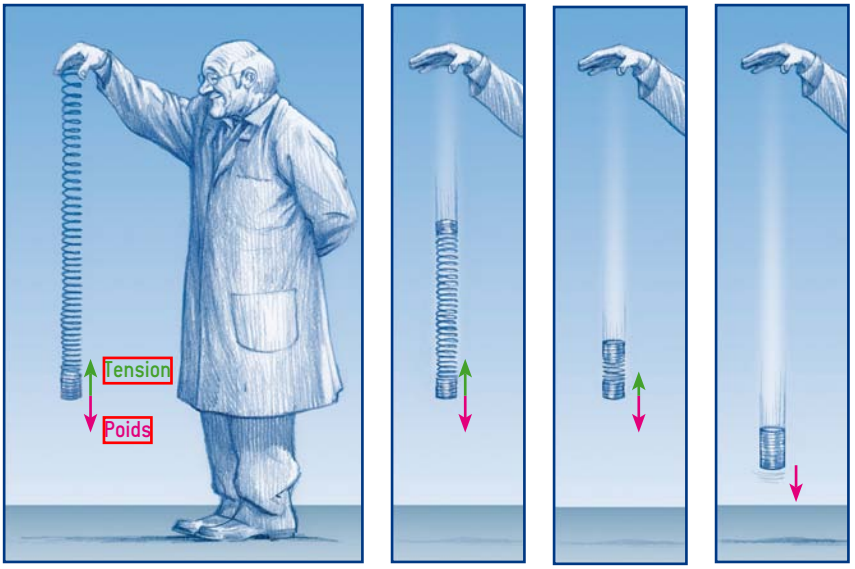
Un tel cas peut se produire lorsque l'objet qui tombe est soumis à des tensions internes. Le « slinky » en fournit un exemple *(voir la figure 1)*. Tenons par une extrémité ce jouet en forme de ressort souple, que l'on s'amuse habituellement à faire dévaler les escaliers, et laissons-le pendre en l'air. Il s'allonge, l'écartement de deux spires successives augmentant de bas en haut. Rien d'étonnant à cela : à l'équilibre, un segment donné du ressort soutient le poids de tout ce qui se trouve au-dessous de lui ; cette force augmente de bas en haut, d'où l'allongement proportionné.

Lâchons maintenant le slinky et observons sa chute. Même si tout va très vite, on s'aperçoit à l'œil nu que l'extrémité inférieure ne tombe pas : elle reste immobile tant qu'elle n'est pas rattrapée par la partie supérieure ! Le visionnage au ralenti d'images vidéo (il y en a pléthore sur le Web) montre plus de détails. Le ressort en chute libre présente deux parties : une zone inférieure immobile, qui conserve l'état de déformation qu'elle avait lorsqu'on tenait le ressort ; une zone supérieure qui tombe, où les spires sont jointives et le ressort totalement replié. Pourquoi cela ?

Au moment où on lâche le slinky, le segment supérieur subit, outre son propre poids, une force dirigée vers le bas et due à la tension du ressort. Il s'ensuit que l'accélération de ce segment sera supérieure à l'accélération g de la pesanteur, la force totale subie dépassant le poids. Autrement dit, ce segment tombe plus vite qu'en chute libre !

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



1. QUAND ON LÂCHE UN LONG RESSORT SOUPLE, la partie supérieure chute avec une accélération supérieure à g. Le bas du ressort reste immobile, jusqu'à ce que l'onde de compression du ressort l'atteigne et fasse diminuer la tension, initialement opposée au poids de cette partie.

© Pour la Science - n° 434 - Décembre 2013

Dès le lâcher, l'écartement des spires du haut commence à se réduire, le ressort se raccourcit et sa tension interne diminue au niveau de son segment supérieur. Pour le segment suivant du slinky, la tension subie par son extrémité du bas reste la même, les spires n'ayant pas encore bougé, tandis que la tension exercée sur son extrémité supérieure a diminué. Ce deuxième segment amorce alors sa chute. Et ainsi de suite pour les segments successifs du ressort.

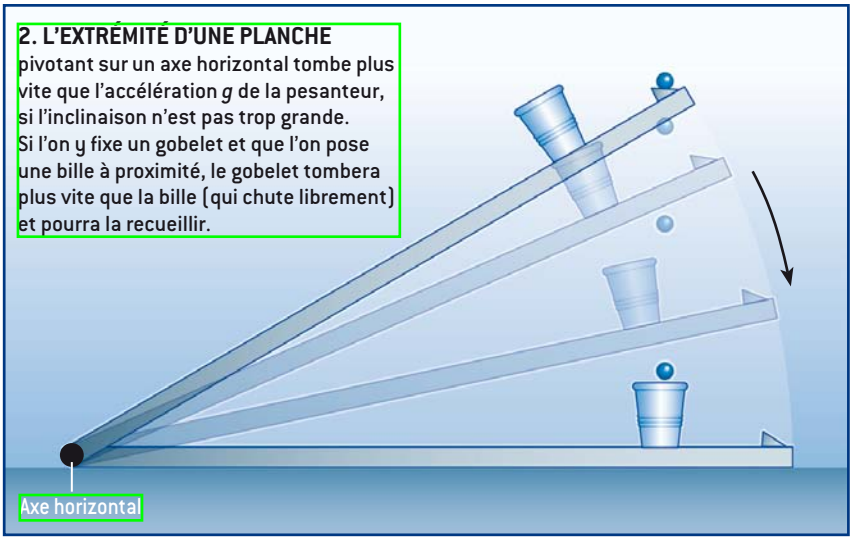
Le fait d'avoir lâché le slinky est donc ressenti en un point du ressort uniquement lorsque ce point est atteint par l'onde de compression des spires, qui se propage de proche en proche selon le mécanisme que l'on vient de décrire. Or le slinky est tellement mou que la vitesse de l'onde de compression est inférieure à la vitesse de chute acquise en une fraction de seconde par les spires. Il s'ensuit que la chute s'amorce par les spires du haut : elles se resserrent et forment une partie supérieure compacte qui tombe en bloc et entraîne dans sa chute les spires de la partie inférieure restées immobiles.

Considéré comme un tout, le ressort est soumis uniquement à son poids. L'accélération de son centre de gravité doit donc être égale à l'accélération g de la pesanteur. Sa partie inférieure étant immobile, cela confirme que la partie supérieure accélère plus vite que g...

Le mécanisme décrit ci-dessus est *a priori* présent dans tous les objets en chute libre. Mais comme les objets sont en général bien moins mous que le slinky, ils sont très peu déformés sous l'effet de leur propre poids, et les tensions internes se relâchent très rapidement par rapport à la vitesse de chute : bas et haut semblent tomber de conserve lorsqu'on les lâche.

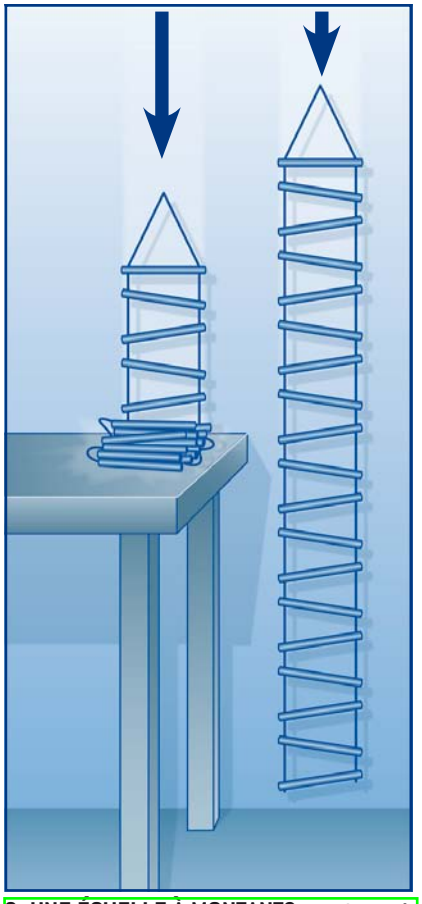
Un objet dans son ensemble ne peut pas chuter avec une accélération supérieure à g s'il reste en l'air. Toutefois, son contact avec le sol peut engendrer des tensions internes qui accélèrent sa chute. En témoigne un système simple et pourtant plein de surprises : une longue planche rigide fixée au sol à un axe horizontal *(voir la figure 2)*. Soulevons la planche et lâchons-la. Elle retombe au sol en pivotant autour de son axe. Son accélération angulaire, qu'on peut calculer, est égale à $3/2\ g/L \cos\theta$, où L est la longueur de la planche et θ l'inclinaison par rapport au sol.

On en déduit que pour les petits angles ($\cos\theta$ à peu près égal à 1), le centre de gravité de la planche, situé à une distance $L/2$ de l'axe, a une accélération verticale égale à $3g/4$, c'est-à-dire inférieure à g. Ce n'est pas étonnant, puisque la planche subit une réaction de l'axe qui la pousse vers le haut.



2. L'EXTRÉMITÉ D'UNE PLANCHE pivotant sur un axe horizontal tombe plus vite que l'accélération g de la pesanteur, si l'inclinaison n'est pas trop grande. Si l'on y fixe un gobelet et que l'on pose une bille à proximité, le gobelet tombera plus vite que la bille (qui chute librement) et pourra la recueillir.

Dessins de Bruno Vacaro



3. UNE ÉCHELLE À MONTANTS souples et à barreaux inclinés alternativement tombe plus vite *(échelle de gauche)* qu'en chute libre *(échelle de droite)* lorsque sa partie inférieure est en contact avec la surface de réception.

La chute accélérée par le contact avec le sol

En revanche, par un effet de levier, l'extrémité haute de la planche a une accélération verticale double, soit $3g/2$, qui vient en quelque sorte compenser l'absence d'accélération de l'extrémité fixée au sol. Si l'on incline davantage la planche, l'accélération verticale de l'extrémité sera moins importante, mais restera supérieure à g tant que l'angle est inférieur à environ 35 degrés.

On peut visualiser cela en fixant un gobelet à l'extrémité de la planche et en posant une bille près de ce gobelet. Si on lâche l'ensemble préalablement incliné (mais pas trop), le gobelet tombe plus vite que la bille et peut se positionner sous cette dernière : la bille tombe à l'intérieur, alors qu'initialement elle était à côté !

BIBLIOGRAPHIE

M. Vollmer et K.-P. Möllmann, **Faster than *g*, revisited with high-speed imaging**, *European Journal of Physics*, vol. 33(5), pp. 1277-1288, 2012.

A. Grewal *et al.*, **A chain that speeds up, rather than slows, due to collisions : How compression can cause tension**, *American Journal of Physics*, vol. 79(7), pp. 723-729, 2011.

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

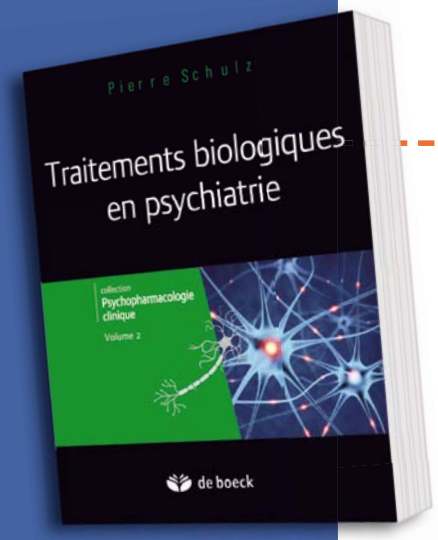
La discussion qui précède nous permet de concevoir un objet qui tombe plus vite qu'en chute libre. Attachons à l'extrémité de la planche, avec une ficelle, une masse placée plus haut. Cette extrémité tombant plus vite qu'en chute libre, elle va tirer sur la masse par l'intermédiaire de la ficelle et la fera donc tomber avec une accélération supérieure à *g*. L'idée est alors de démultiplier cet effet en réalisant une échelle dont les montants sont constitués de cordes, et les barreaux de planches inclinées successivement dans un sens puis dans l'autre *(voir la figure 3)*.

Contrairement à ce qu'il advient dans une échelle aux barreaux horizontaux et parallèles, chaque fois qu'une extrémité d'un barreau de cette échelle atypique touche le support, ce barreau pivote autour de cette extrémité et accélère la seconde extrémité, ce qui tire l'échelle vers le bas. À chaque impact de barreau, l'effet s'additionne. Il en résulte que le sommet d'une telle échelle descend plus vite lorsque sa partie inférieure a touché le sol que lorsqu'elle tombait en chute libre ! En revanche, le centre de gravité de l'échelle tombe moins vite qu'en chute libre (comme il se doit, puisque la partie de l'échelle ayant atteint le sol est immobile).

L'aspect énergétique de cette situation est également intéressant. Pour une échelle à barreaux horizontaux, l'énergie cinétique de chaque barreau est intégralement dissipée sous forme de chaleur lorsque ce barreau percute le sol. Mais lorsque le barreau est incliné, une partie de cette énergie cinétique est transférée à la partie supérieure de l'échelle et l'accélère. ■

© Pour la Science - n° 434 - Décembre 2013

L'EXCELLENCE EN SCIENCES



TRAITEMENTS BIOLOGIQUES EN PSYCHIATRIE
Pierre Schulz
Novembre 2013 • 800 pages • 62 €

■ Cet ouvrage propose une synthèse des connaissances contemporaines sur les traitements biologiques en psychiatrie, avec une sélection d'informations en neurosciences cliniques et des recommandations pour la pratique médicale.

CHIMIE ORGANIQUE
Jonathan Clayden, Nick Greeves, Stuart Warren
Traduction André Pousse
Août 2013 • 1280 pages • 120€

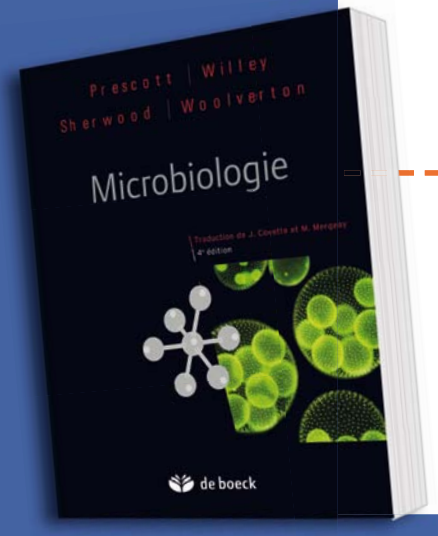
■ Un manuel de chimie organique rigoureux et captivant, qui permet à l'étudiant de comprendre comment on passe des principes fondamentaux aux synthèses les plus innovantes.

BIOSTATISTIQUE
Harvey J. Motulsky
Traduction : Michèle Dramaix-Wilmet
Septembre 2013 • 512 pages • 49 €

■ Un texte clair, accessible à tous, qui explique de manière facilement compréhensible les méthodes statistiques et détaille l'interprétation des résultats issus des analyses.

QUANTIQUE, FONDEMENTS ET APPLICATIONS
Avec 250 exercices et problèmes résolus
José-Philippe Perez, Robert Carles, Olivier Pujol
Septembre 2013 • 1120 pages • 54 €

■ Cet ouvrage met l'accent sur les fondements scientifiques et sur les applications concrètes et quantitatives de la physique quantique, en 20 leçons structurées, illustrées par de nombreux exemples et prolongées par 250 exercices et problèmes résolus.



MICROBIOLOGIE
Joanne M. Willey, Linda M. Sherwood, Christopher J. Woolverton
Traduction Jacques Coyette, Max Mergeay
Octobre 2013 • 1200 pages • 120 €

■ *Microbiologie* est la traduction de la 8e édition du *Prescott's Microbiology*, l'ouvrage américain de référence sur la microbiologie, décrite dans ses aspects fondamentaux, médicaux, écologiques, alimentaires et industriels.

En librairie et sur **www.deboeck.fr**

de boeck

Offre spéciale Noël

Abonnez-vous à

POUR LA SCIENCE

1 an ▪ 12 numéros

56 € au lieu de ~~74,90 €~~

+ En cadeau le jeu de cartes Astrofamily !

BULLETIN D'ABONNEMENT

POUR LA SCIENCE

À découper ou à photocopier et à retourner accompagné de votre règlement dans une enveloppe non affranchie à : Groupe Pour la Science • Service Abonnements • Libre réponse 90 382 • 75 281 Paris cedex 06

Oui, je m'abonne au magazine *Pour la Science* :

❑ **1 an • 12 numéros • 56 €** au lieu de ~~74,90 €~~

Tarif valable uniquement en France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter : Europe 12 € – autres pays 25 €.

❑ **2 ans • 24 numéros • 106 €** au lieu de ~~149,80 €~~

Tarif valable uniquement en France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter : Europe 25 € – autres pays 51 €.

+ En cadeau le jeu de cartes Astrofamily

Pour 20 € de plus, découvrez *Dossier Pour la Science* tous les trimestres !

Je préfère m'abonner à *Pour la Science* (12 nos/an) + *Dossier Pour la Science* (4 nos/an)

❑ **1 an • 16 numéros • 76 €** au lieu de ~~102,70 €~~

Tarif valable uniquement en France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter : Europe 16 € – autres pays 35 €.

❑ **2 ans • 32 numéros • 143 €** au lieu de ~~205,40 €~~

Tarif valable uniquement en France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter : Europe 34 € – autres pays 72 €.

J'indique mes coordonnées :

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

_____

CP: _____ Ville : _____

Pays : _____ Tél. : _____

Pour le suivi client (facultatif)

Je choisis mon mode de règlement :

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

❑ Par carte bancaire

Numéro de carte _____

Date d'expiration _____

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

Signature obligatoire

Mon 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 cette case ❑.**

PLS434 • Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 31/12/2013

SCIENCE & GASTRONOMIE

Et si la cuisine traditionnelle était la vraie malbouffe ?

Il est possible de concevoir des aliments moins riches en énergie et qui ont pourtant autant de goût, voire plus.

Hervé THIS

Une pandémie d'obésité s'est abattue sur le monde, notamment parce que, jamais dans l'histoire de l'espèce humaine, cette dernière n'a disposé de tant de composés énergétiques dans les aliments (dans les pays riches et industrialisés s'entend). Aussi la question de l'allégement n'a-t-elle jamais été autant d'actualité.

Les expériences montrent toutefois que nous sommes irrésistiblement attirés par les composés les plus énergétiques – gras et sucre – lesquels sont en abondance dans la pâtisserie, assortis de polysaccharides, dont l'hydrolyse lente libère du glucose, carburant de l'organisme. Depuis quelques décennies, dans nos pays, la « cuisine » se trouve donc dans cette position paradoxale de devoir produire des aliments ne contenant pas les composés que nous apprécions le plus !

Et si l'on décidait enfin que cassoulets, pot-au-feu, choucroutes et foie gras sont des dangers, parce qu'ils datent d'une époque où l'activité physique permettait de les consommer, époque révolue pour beaucoup de citadins du XXIe siècle ?

À cette proposition, j'entends les cris d'orfraie des gastronomes : quoi, on voudrait nous empêcher de manger ce qui est « bon » ? Passons sur ce « bon » qui n'a pas de valeur universelle (ce que nous mangeons et apprécions dépend de notre culture), et observons que la proposition n'est pas d'interdire les « bons petits plats », mais plutôt de les perfectionner. Comment faire ?

Analysons : un aliment sera considéré comme goûteux s'il contient du gras et du sucre, ou, du moins, s'il donne la sensation de contenir de tels composés, pour lesquels la bouche a des récepteurs appropriés. De ce fait, nous devons stimuler ces récepteurs, par les composés que l'évolution biologique a attribué aux récepteurs. En réalité, l'évolution s'est faite sans doute plutôt dans l'autre sens, les récepteurs s'adaptant aux composés, ou, pour être encore plus précis, une mutation aléatoire ayant amené chez un individu un récepteur plus sensible aux aliments riches en énergie, cet individu aura plus de chances de survivre jusqu'à la reproduction et de transmettre cette particularité à sa descendance. Aujourd'hui, l'absence de ce récepteur serait plutôt un avantage adaptatif, qui accroît les chances de reproduction !

Revenons à nos récepteurs du gras et du sucre. La proposition consiste à ne libérer ces composés qu'en quantité suffisante pour stimuler les récepteurs, et non pas à les utiliser pour faire la masse des aliments. En d'autres termes, on veut une masse inerte sur le plan nutritif, avec une libération rapide, en bouche, des composés que nous aimons.

Un exemple ? À l'aide d'une centrifugeuse de cuisine, séparons un jus de carotte et récupérons les « fibres », faites essentiellement de cellulose, matière quasi inerte pour la digestion. De cette matière, nous ferons la masse de l'aliment ; mais, afin de percevoir graisses et sucres, nous disperserons les fibres dans un mélange de ces composés que nous redoutons. En pratique, mêlons en une « pâte » les composés qui devront stimuler les récepteurs et ajoutons les fibres en abondance. De ce mélange intime, faisons une mince couche d'enrobage, sensoriellement intéressante, mais pas trop riche en énergie en raison de sa minceur.

Et le goût ? Les particules inertes étant enrobées d'une pâte qui contient de la matière grasse, il ne sera pas difficile d'y dissoudre des composés odorants, souvent hydrophobes. Pour ceux qui veulent un goût de poulet rôti ou de fromage grillé, l'industrie des composés odorants sait parfaitement produire ces odeurs. Pour les saveurs, dues aux ions, sucres, acides aminés, il faudra sans doute soit des cristaux très petits (pensons aux cristaux de sucre réduits en une poudre de consistance imperceptible, lors du « conchage » du chocolat), soit des solutions concentrées qui seront mêlées à la matière grasse, sous forme émulsionnée.

Et c'est ainsi que pourra se construire une cuisine à la fois « bonne » et tellement mieux adaptée au monde d'aujourd'hui ! ■

Hervé THIS, physico-chimiste au sein du Groupe INRA de gastronomie moléculaire, est 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° 434 - Décembre 2013

BIOLOGIE MARINE

Plancton

Christian Sardet
Ulmer, 2013
(192 pages, 40 euros).

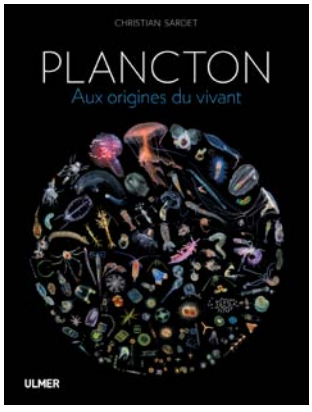
Virus, bactéries, algues, organismes unicellulaires – protistes – variés (diatomées, coccolithophoridés, foraminifères), cnidaires (méduses), larves de mollusques, crustacés, oursins ou poissons : le plancton – l'ensemble des organismes marins dérivant au gré des courants – renferme une diversité inégalée, estimée à plus de 1,2 million d'espèces, de quelques micromètres à plusieurs mètres. Depuis une vingtaine d'années, Christian Sardet, fondateur du Laboratoire de biologie du développement du CNRS de Villefranche-sur-Mer, récolte le plancton des océans et mers du globe, de la Méditerranée au Japon en passant par la Caroline du Sud, et a récemment contribué à l'expédition *Tara Oceans*. De retour au laboratoire, il a observé et photographié ces échantillons à l'aide de techniques de microscopie et d'imagerie de pointe. Il publie ici un magnifique ouvrage de 500 photographies qui révèle la beauté de ces organismes.

À chaque chapitre, le lecteur découvre une famille planctonique, caractérisée par les formes, les symétries et les constituants des organismes. En lumière visible et sur fond noir apparaissent leurs constituants internes et leur composition biochimique. Éclairés par des lasers, certains composés ou pigments sont fluorescents. Des clichés en microscopie électronique à balayage dévoilent l'architecture intracellulaire de ces êtres microscopiques, tels les fins dessins des squelettes en sulfate de strontium des acanthaires ou la tunique protéique des ciliés tintinnides, en forme d'amphore ou de trompette.

On peut aussi admirer des types cellulaires complexes apparus chez ces organismes, tels les cnidocystes, les cellules urticantes des méduses, ou les cils contenant des flagelles à l'origine du mouvement de la plupart des cellules. Présents chez de nombreuses algues et protistes, de tels cils ornent aussi les palettes ciliaires des peignes des cténophores – des animaux transparents carnivores et proches des méduses.

Des séquences photographiques témoignent d'anecdotes insolites sur le comportement de divers animaux planctoniques, tel ce petit cténophore (un beroe) mordant et avalant une partie d'un autre cténophore (leucothea) plus gros que lui.

Le texte qui accompagne les photographies distille des informations sur la biologie de ces espèces. En situant leur histoire évolutive, il montre à quel point le plancton, majoritairement constitué d'organismes unicellulaires à la base de la chaîne alimentaire océanique, n'en est pas moins un exemple remarquable de diversité et d'inventivité. Une immersion passionnante dans le vaste peuple invisible des océans !



Cécile Fourrage
Institut universitaire d'hématologie, Paris

SCIENCES DE LA TERRE

Volcans

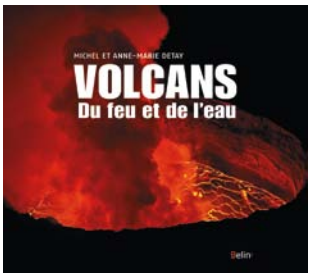
Michel et Anne-Marie Detay
Belin, 2013
(208 pages, 30 euros).

Premier ouvrage de vulgarisation sur le volcanisme, les fameux *Campi Flegrei* de l'érudit écossais William Hamilton (1731-1803) comportaient de magnifiques gouaches qui, par-delà leur intérêt esthétique, visaient aussi à illustrer le nouveau discours savant de la fin du XVIII[e] siècle. Comme l'attestent les beaux livres qui leur sont régulièrement consacrés, les volcans n'ont depuis lors en rien perdu leur pouvoir de fascination sur le grand public.

S'il s'inscrit dans une production promouvant le côté spectaculaire des photos, le livre de Michel et Anne-Marie Detay a néanmoins pour objectif de s'en démarquer en suivant les *Campi Flegrei* pour faire de l'image le support d'une explication raisonnée de la volcanologie. À cet effet, l'Indonésie, l'Islande, mais aussi l'Éthiopie, l'Égypte ou la Nouvelle Zélande donnent lieu à une splendide galerie de photos.

Malgré leur incandescence, les familiers torrents et fontaines de lave font pâle figure face aux caldeiras, lacs de cratère, geysers, croûtes salines ou boues étonnantes dont les formes éphémères ont été figées par des prises de vue ultrarapides. Mais l'immobilité totale sied aussi aux productions des volcans, comme l'illustre un fragment de dyke du rivage islandais, évoquant on ne sait quelle monstrueuse bête pétrifiée à sa sortie de l'océan.

Et puisque le papier glacé transmet mal les remugles de vapeurs sulfurées ou les borborygmes des laves, les auteurs ont eu la bonne idée de commenter brièvement les conditions de leur travail sur le terrain. Au risque de les vexer, on pourrait donc goûter leur ouvrage sans rien lire de leurs explications ! Ce serait dommage, parce que leur partie didactique décrit l'essentiel de ce qu'on voudrait savoir sur le volcanisme et ses effets divers. L'importance de l'eau est justement soulignée, quoique les fantaisies de mise en page aient conduit à illustrer l'explication du dégazage des laves par de magnifiques coulées de basalte prismée…



Par ailleurs, les auteurs sont allés un peu trop loin en évitant de jargonner. La typologie de volcans gris et rouges est trop réductrice, tandis que des termes comme andésite méritaient d'être employés. Et comme rien n'apprend plus sur l'anatomie que la dissection d'un cadavre, de belles entrailles volcaniques rongées par les ans manquent un peu dans le panorama présenté. Enfin, diverses erreurs n'ont pas été évitées. Le lecteur corrigera de lui-même le 1,8 million de victimes du Pinatubo en 1985 (en réalité entre 20 000 et 30 000), mais sans doute pas l'idée qu'on peut faire fondre plus facilement les roches en les arrosant (toute eau versée étant aussitôt vaporisée sans pouvoir abaisser leur point de fusion).

Péchés véniels, dira-t-on cependant en refermant ce très joli livre après l'avoir lu avec grand plaisir…

Pascal Richet
IPGP, Paris

© Pour la Science - n° 434 - Décembre 2013

→ ENTOMOLOGIE

Surprenants insectes

Vincent Albouy et *Biosphoto* (photographies)
Glénat, 2013
(192 pages, 19,99 euros).

Le monde des insectes est immense et compliqué avant d'être plein de surprises. Un livre sur les insectes, tous les insectes, c'est à la fois une très ancienne tradition et un défi à chaque nouvelle mouture d'un sujet qu'il paraît bien difficile de renouveler. Dans un cadre savant, technique ou scolaire, l'exercice est relativement simple. Il s'agit de rassembler dans le nombre de volumes et de pages convenu les connaissances à jour correspondant au niveau donné des lecteurs, sans omettre le parcours des 30 et quelques ordres petits et grands et des familles qu'ils comportent. Les lecteurs de ces ouvrages, public quelque peu captif, ne bénéficient pas moins de textes très bien documentés et écrits, et d'illustrations de qualité.

Les ouvrages de grande vulgarisation demandent un effort supplémentaire de choix et de présentation. Ainsi, *Le monde des insectes* de Paul Pesson, paru en 1956, est un beau livre, grand format, pour le « public éclairé », qui joint à un texte dense – une excellente synthèse des connaissances de l'époque, rédigée avec pédagogie – des « héliogravures », de place en place. La présentation a vieilli, le contenu aussi.

Le moderne ouvrage de Vincent Albouy, *Surprenants insectes*, a la même ambition. Pour amener les gens à s'intéresser à ce monde des insectes, et à les considérer autrement que comme des êtres insignifiants ou hostiles, compliqués et assez répugnants (sauf les gentils papillons et les vers frits à la mode), l'aspect de grand livre sérieux n'est plus de mise. L'image doit être abondante, colorée, étonnante. Elle attire et retient les lecteurs, le temps d'un parcours rapide, tandis que le discours accompagne les illustrations et que le titre promet des surprises…

Ce *Surprenants insectes* est un exemple réussi de cette nouvelle

ligne éditoriale, appliquée à la vulgarisation d'un sujet difficile. Grâce en premier lieu au choix des photographies, puisées dans un riche fonds d'agence, toutes de grande qualité, saisissant des insectes exotiques et banals, de très près comme dans leur milieu de vie, enrichies de légendes précises. Grâce aussi aux textes que l'on aborde dans un second temps et qui donnent en très peu de pages un panorama assez complet des particularités des insectes ; rédigés dans une langue simple, mais rigoureuse, ils sont accessibles à tous.

Ce livre facile et agréable à prendre en main est vite lu. Il fournit la clé pour entrer dans un monde proche, mais différent et étonnant, qu'on aura envie de mieux connaître, morceau par morceau et *via* d'autres médias sans doute, qu'on apprendra à considérer et à respecter.

→ Alain Fraval
INRA, OPIE, Guyancourt

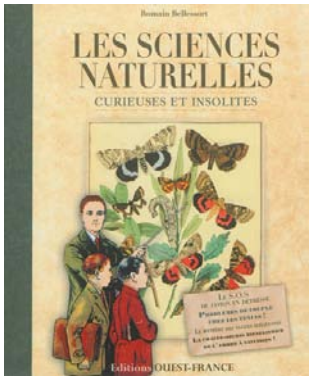
→ HISTOIRE NATURELLE

Sciences naturelles

Romain Bellessort
Ouest-France, 2013
(224 pages, 27 euros).

Avant de vouloir satisfaire la curiosité, ne faut-il pas la piquer ? Avant d'exposer l'arsenal scientifique difficile de la théorie, ne faut-il pas montrer le résultat exemplaire inattendu ? Le livre de Romain Bellessort répond bellement à cette volonté d'intéresser le lecteur, quels que soient son âge et sa culture (en dehors de sa spécialité, le scientifique le plus compétent est un enfant).

Savez-vous à quoi sert le bec énorme du toucan, sur lequel Darwin s'était interrogé ? À la régulation thermique de l'animal. Quel est l'inventeur de l'agriculture ? La fourmi. Comment l'indicateur, petit oiseau friand de cire d'abeille, obtient-il sa gourmandise ? En mobilisant et guidant vers la ruche un mammifère fouineur. Et bien d'autres questions que vous prendrez plaisir à picorer : comment les Grecs savaient-ils que la Terre était ronde ? Pourquoi les masses d'air tournent-elles en spirale ? Les pluies de bêtes existent-elles ? Les vagues assassines de plus de 20 mètres de haut sont-elles responsables de la disparition de navires ? Alec le Perroquet parlait-il véritablement



Brèves

Fritz Kahn

Uta et Thilo von Debschitz
Taschen, 2013
(392 pages, 39,99 euros).

Aimez-vous imaginer votre corps comme une usine complexe régulée par une multitude de minuscules bonshommes ? Cet ouvrage est pour vous. C'est dans le foisonnant Berlin du début du XX[e] siècle que Fritz Kahn (1888-1968), alors jeune médecin, a l'idée d'expliquer la science de son temps à un large public par des illustrations minutieuses, fondées sur des analogies qui les touchent. Moteur cardiaque, machinerie cellulaire, mécanique sensorielle, saut quantique, circulation de l'air... 350 illustrations issues de ses ouvrages – la plupart détruits par les nazis – sont rassemblées ici, offrant un voyage insolite entre science, art et conte.

Le voyage des mots

Alain Rey et Lassaâd Metoui
Guy Trédaniel, 2013
(446 pages, 29,90 euros).

La gazelle, parfois svelte antilope, parfois nom séducteur donné aux femmes, nous vient, avant le latin, du mot arabe *ghazāl*, dont les déclinaisons offraient déjà ces nuances ; le jasmin, cet arbuste arrivé de Chine et d'Inde, a suivi un parcours lexical tout aussi riche, entre persan, arabe, grec, latin, italien et catalan ; le terme guitare est né dans le Proche-Orient arabe… À travers l'histoire de ces mots, et nombre d'autres, venus de l'Orient arabe, persan ou turc, c'est à un parcours linguistique et poétique de nos racines qu'invite ce magnifique livre, mariant avec bonheur textes et arabesques calligraphiques.

Patagonie

Patrick Escudero et Cécile Domens
Glénat, 2013
(160 pages, 39,50 euros).

Côtes désertiques balayées par le vent, montagnes enneigées, pampa à perte de vue, glaciers majestueux, grands lacs glaciaires au pied de la cordillière des Andes, fjords, forêts... Pays des grands espaces, la Patagonie offre une confrontation brute avec la nature et les éléments. Les auteurs, photographes, nous la laissent entrevoir au fil d'un carnet de voyage fourmillant d'informations sur la terre, la faune, la flore et la vie locale.

Brèves

Des images pour les dieux

J. Clottes, M. Dubey-Pathak
Errance, 2013
(143 pages, 39 euros).

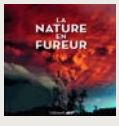
Dans l'État du Madhya Pradesh, au centre de l'Inde, vivent des aborigènes : les Korkus, Gonds, Kols et Bhill. Afin de comprendre l'art rupestre ornant les abris des jungles de leur région, les auteurs ont interrogé ceux des aborigènes qui pratiquent encore les rites d'offrandes traditionnels et ont étudié de nombreux abris. De ces témoignages, ils concluent que depuis des milliers d'années, les chasseurs-cueilleurs de la région, puis les paysans qui leur ont succédé, ont dessiné des images à cause de leurs pouvoirs bénéfiques.

Espace > Terre

Yann Arthus-Bertrand (dir.)
La Martinière, 2013
(256 pages, 35 euros).

D'un effet esthétique certain, les fausses couleurs des nombreuses images satellitaires rassemblées dans ce recueil traduisent souvent tragiquement à quel point la Terre est petite. Grignotée partout par les activités humaines, qui la restructurent de façon géométrique, elle ne garde son aspect naturel qu'en certaines régions. Pour autant, les caractères curieux des structures humaines et la beauté irrésistible des paysages, qu'ils soient sculptés par l'homme ou pas, éclatent à toutes les pages de ce magnifique ouvrage.

La nature en fureur



Gilbert Grellet
Gallimard/AFP, 2013
(192 pages, 29,90 euros).

L'un des effets du réchauffement climatique est censé être le déchaînement des éléments. Vous n'y croyez pas ? Regardez la section « Eau » et la section « Air » de cette collection de 100 photographies de catastrophes naturelles. Dénommées « Terre » et « Feu », les deux autres sections ne sont pas moins spectaculaires : elles montrent que les effets des phénomènes violents de la nature bouleversent souvent la vie des hommes. Et ce qui surprend, c'est que certains de ces phénomènes se produisent en des endroits que nous sommes nombreux à avoir traversés, tels la baie des Anges sur la Côte d'Azur, le port de Wimereux dans le Nord de la France, ou encore ce parking souterrain à New York.

anglais ? Pourquoi observe-t-on des cercles de champignons ?

Après avoir brièvement, mais clairement, énoncé les faits, R. Bellessort, en termes simples et concrets, montre comment la connaissance scientifique éclaire ces questions.

Les articles sont brefs, entre deux et trois par page, illustrés de gravures qui sentent bon la leçon de choses de l'École de Jules Ferry à cette époque, reculée mais intrépide, où le monde était un livre à découvrir et expliquer. Le vulgarisateur R. Bellessort n'est pas loin du naturaliste Jean-Henri Fabre !

Libre au lecteur d'approfondir les sujets qui l'intéressent par de plus amples lectures. Il se pourrait d'ailleurs que notre enseignement scolaire pêche par une diminution des sujets abordés, restreignant l'éventail des possibles intérêts de l'élève et par conséquent les vocations : ce livre comble une lacune. Une seule remarque de détail, à mon goût les chiffres manquent parfois aux citadins que nous sommes devenus : qui a vu un grain de blé et qui connaît sa taille ? D'autres données numériques renforceraient l'intérêt des sujets abordés : à quelle distance est la Lune ? Quelle est la taille des transitions entre les différentes couches de l'atmosphère ? Etc.

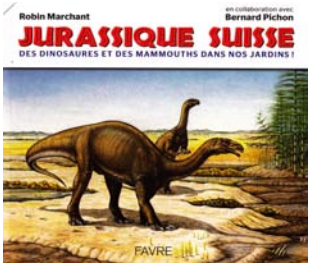
L'ouvrage de R. Bellessort est une ode à l'évolution, un séduisant panorama des différentes solutions imaginées par l'auto-organisation darwinienne pour la survie des individus et la continuation des espèces. Pour préserver la biodiversité, les incantations politiques bien pensantes deviennent une mélopée lancinante : il est plus intéressant, plus utile, donc plus convaincant de connaître les multiples réussites organiques répondant à des conditions changeantes.

→ Philippe Boulanger

→ PALÉONTOLOGIE

Jurassique Suisse

Robin Marchant et Bernard Pichon
Favre, 2013
(232 pages, 27 euros).



Lorsqu'on évoque les sites où les paléontologues découvrent les restes des dinosaures et autres spectaculaires animaux du passé, on ne pense pas à la Suisse. Le désert de Gobi ou l'Ouest américain viennent plus aisément à l'esprit, tant nous sommes formatés par un certain battage médiatique autour de ces lieux exotiques riches en fossiles. Ce livre vient nous rappeler combien le patrimoine paléontologique suisse est impressionnant, tant par son abondance que par sa qualité (et encore les auteurs se sont-ils cantonnés aux restes de vertébrés !).

Depuis le plus ancien vertébré suisse, un poisson vieux de 290 millions d'années trouvé dans une carotte de forage, jusqu'aux mammouths, ours des cavernes et néandertaliens de la dernière période glaciaire, c'est une histoire mouvementée et bien remplie que nous racontent les auteurs (avec, pour mieux suivre, un poster retraçant l'évolution des vertébrés par A. Escher). Les étonnants reptiles aquatiques du Trias moyen du Tessin voisinent avec les magnifiques squelettes de *Plateosaurus* des environs de Bâle, le très ancien ptérosaure des Grisons, les petits chevaux et les oiseaux géants éocènes de Soleure, les rhinocéros miocènes de Berne et les requins géants de Zurich – pour ne citer qu'une petite partie des trésors fossiles que révèle ce livre.

Les ossements ne sont pas tout : tant dans les Alpes que dans le Jura, les dinosaures et leurs précurseurs ont laissé nombre d'empreintes de pas, sur des dalles rocheuses parfois presque inaccessibles. On peut s'étonner d'une telle richesse sur un territoire assez restreint, mais, comme les auteurs nous le rappellent avec humour, la Suisse est « une confédération de continents et microcontinents », où des roches d'âges divers sont représentées, ce qui explique l'abondance et la variété des fossiles rencontrés. Qui plus est, depuis Conrad Gesner à la Renaissance, la Suisse n'a pas manqué de paléontologues éminents, et les Agassiz, Pictet, Heer, Rütimeyer, Stehlin et leurs successeurs ont fait de leur pays un des hauts-lieux de la science des fossiles.

De cet ouvrage, on ne regrettera que le titre : pourquoi encore une fois faire allusion à un film plutôt médiocre et vieux de 20 ans dès lors qu'il s'agit de paléontologie ? Pour le reste, c'est un fort beau livre, riche d'informations et bien illustré de photos de fossiles, documents anciens, cartes paléogéographiques, qui donne envie d'aller visiter les nombreux musées et sites paléontologiques suisses.

→ Eric Buffetaut
CNRS, Laboratoire de géologie de l'École normale supérieure

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 – Décembre 2013 – N° d'édition 077434-01 – Commission paritaire n° 0917 K 82079 – Distribution : NMPP – ISSN 0 153-4092 – N° d'imprimeur 101/185 833 – Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé.

Avec plus d'1 million de Sociétaires, on peut déplacer des montagnes

Quand une banque tire sa force de l'esprit coopératif, elle s'appuie sur des valeurs de solidarité, d'écoute et de confiance. *Créée par des enseignants, la CASDEN s'engage ainsi auprès de plus d'un million de Sociétaires à réinvestir leur épargne dans le financement des projets de chacun.*

Rejoignez-nous sur **casden.fr** ou contactez-nous au **0826 824 400***

*Accueil téléphonique ouvert de 8h30 à 18h30 du lundi au vendredi (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

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 - Société anonyme à directoire et conseil de surveillance au capital de 467 226 960 € | Siège social : 50 avenue Pierre Mendès France | 75201 Paris Cedex 13 | RCS PARIS n° 493 455 042 | Immatriculation ORIAS n° 08 045 100
BROCA & WERNICKE | Illustration : Kid Offer

PERMETTRE À VOTRE ÉPARGNE DE FAIRE DES PETITS C'EST AUSSI ÇA LA GMF.

TBWA\PARIS

Une **épargne** performante et sûre pour préparer les **projets de demain.**

Avec les contrats d'assurance vie et les supports en euros de la GMF, vous vous constituez petit à petit une épargne performante qui vous permettra de financer tous vos projets d'avenir, en toute sécurité.

ÉPARGNE
3,05%*
TAUX SERVI EN 2012

Trophées d'or •2013• des Contrats d'Assurance Vie
Le Revenu
MULTÉO
Catégorie contrats et fonds en euros

Rendez-vous sur www.gmf.fr
ou appelez le
N° Vert 0 800 88 11 62
APPEL GRATUIT DEPUIS UN POSTE FIXE

GMF
Assurément Humain

*3,05 %, taux servi en 2012 : frais de gestion déduits et avant prélèvements sociaux pour tous les contrats d'assurance vie en euros de la GMF et les supports réguliers de Multéo et de Certigo. Les performances passées ne préjugent pas des performances futures.

GMF VIE - Société anonyme au capital de 179 676 528 € entièrement versé. Entreprise régie par le Code des assurances. R.C.S. Paris B 315 814 806 - Siège social : 76, rue de Prony - 75857 Paris Cedex 17 - Adresse postale : 1, rue Raoul Dautry - 95127 Ermont Cedex.