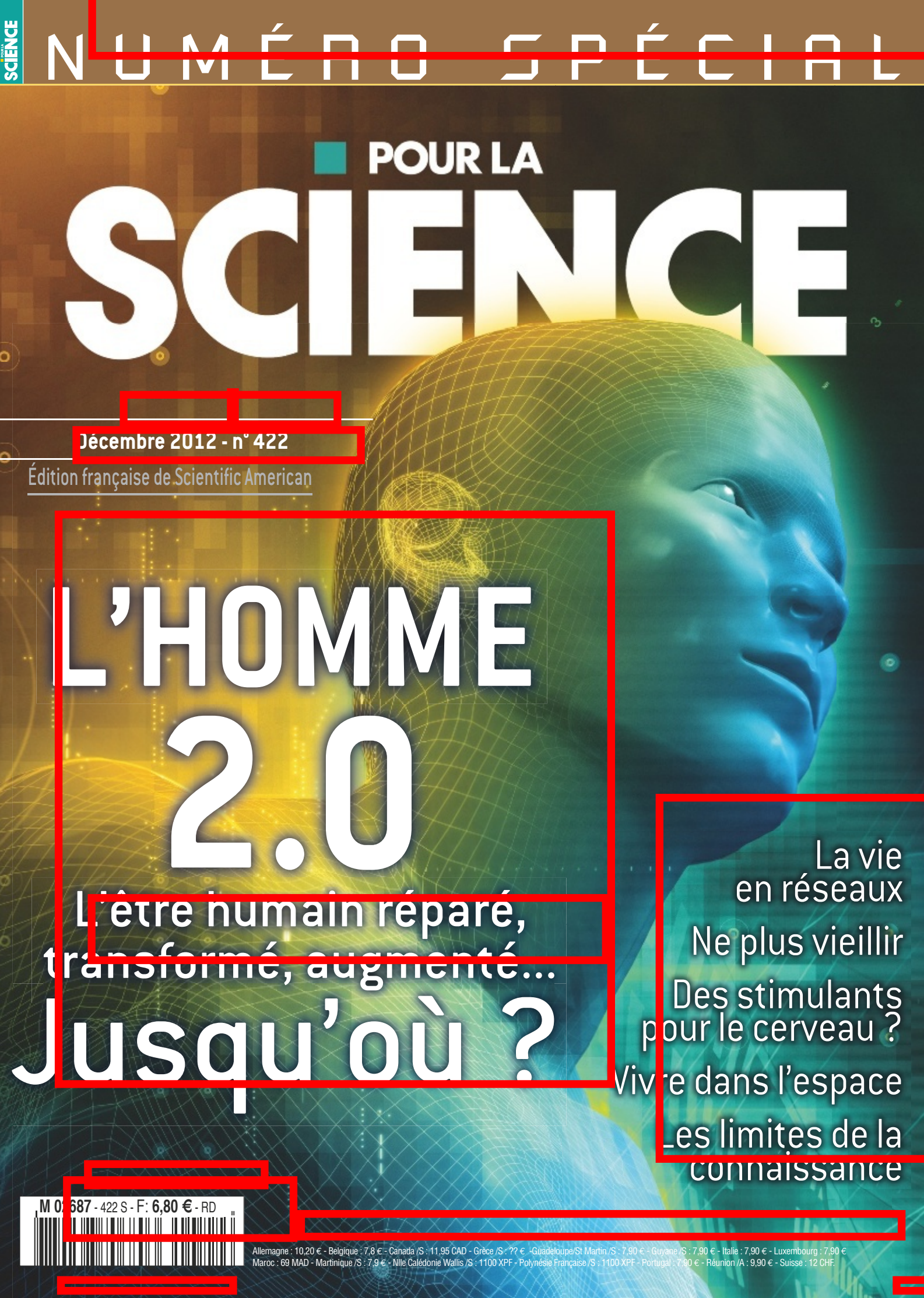
POUR LA SCIENCE

NUMÉRO SPÉCIAL

Décembre 2012 - n° 422

Édition française de Scientific American



L'HOMME 2.0

L'être humain réparé, transformé, augmenté...

Jusqu'où ?

La vie en réseaux

Ne plus vieillir

Des stimulants pour le cerveau ?

Vivre dans l'espace

Les limites de la connaissance

M 0[illegible]687 - 422 S - F: 6,80 € - RD

Allemagne : 10,20 € - Belgique : 7,8 € - Canada /S : 11,95 CAD - Grèce /S : ?? € -Guadeloupe/St Martin /S : 7,90 € - Guyane /S : 7,90 € - Italie : 7,90 € - Luxembourg : 7,90 €
Maroc : 69 MAD - Martinique /S : 7,9 € - Nlle Calédonie Wallis /S : 1100 XPF - Polynésie Française /S : 1100 XPF - Portugal : 7,90 € - Réunion /A : 9,90 € - Suisse : 12 CHF.



La CASDEN affirme ses valeurs d'entraide et de solidarité
et donne à tous les personnels de l'Éducation, de la Recherche et de la Culture
la possibilité de réaliser leurs projets dans les meilleures conditions.
Partager avec vous une relation de confiance, à la CASDEN c'est une priorité.

Contactez votre Chargée de Relation Enseignement Supérieur et Recherche

Pour votre région, coordonnées disponibles sur
www.casden.fr

casden
BANQUE POPULAIRE

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. ● **AvisdeTempête** - Illustration : Killofer.

CASDEN, la banque coopérative de l'éducation, de la recherche et de la culture

POUR LA SCIENCE

www.pourlascience.fr

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

Groupe POUR LA SCIENCE
Directrice de la rédaction : Françoise Pétry
Pour la Science
Rédacteur en chef : Maurice Mashaal
Rédacteurs : François Savatier, Marie-Neige Cordonnier, Philippe Ribeau-Gésippe, Guillaume Jacquemont, Sean Bailly

Dossiers Pour la Science
Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin

Cerveau & Psycho
Rédactrice en chef : Françoise Pétry
Rédacteur : Sébastien Bohler
L'Essentiel Cerveau & Psycho
Rédactrice : Bénédicte Salthun-Lassalle

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

Site Internet : Philippe Ribeau-Gésippe assisté de Yoan Bassinet

Marketing : Élise Abib
Direction financière : Anne Gusdorf
Direction du personnel : Marc Laumet
Fabrication : Jérôme Jalabert assisté de Marianne Sigogne
Presse et communication : Susan Mackie
Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé
Conseillers scientifiques : Philippe Boulanger et Hervé This
Ont également participé à ce numéro : David Boilley, Gilles Cambonie, Yves Dauvilliers, Vincent Delourmel, Alain Finkel, Alain Gestreau, Stéphanie Girardclos, Pierre Kuhn, Dominique Langin, Alain Lieury, Jérémie Mattout, Christian Naulin, Bernard Schmitt, Nicole Scotto di Carlo, Olivier Sorlin, Christelle Stobiel, Thierry Stoecklin, Daniel Tacquenet, Pascal Tassy, Sophie Tempere, Jérôme Weiss

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

SERVICE ABONNEMENTS
Ginette Bouffard. Tél. : 01 55 42 84 04

Espace abonnements :
http://tinyurl.com/abonnements-pourlascience
Adresse e-mail : abonnements@pourlascience.fr

Adresse postale :
Service des abonnements - 8 rue Férou - 75278 Paris cedex 06

Commande de livres ou de magazines :
0805 655 259 (numéro vert)

DIFFUSION POUR LA SCIENCE
Contact kiosques : À juste titres ; Benjamin Boutonnet
Tel : 04 88 15 12 41
Canada : Edipresse
Québec, H3N 1V3 Canada.
Suisse : Servidis, Chemin des châlets, 1979 Chavannes - 2 - Bogis
Belgique : La Casterman : 303, rue du Pré-aux-oies - 1130 Bruxelles.
Autres pays : Éditions Belin : 8, rue Férou - 75278 Paris Cedex 06.

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

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

© Pour la Science S.A.R.L. Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial « Scientific American » sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à « Pour la Science S.A.R.L. »
En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie (20, rue des Grands-Augustins - 75006 Paris).

OJD PRESSE PAYANTE Diffusion Certifiée 2011

Quelle humanité pour demain ?

Personne ne voudrait de la société que l'écrivain britannique Aldous Huxley a décrit dans son roman *Le meilleur des mondes* (1932). La génétique y a progressé au point que la reproduction des êtres humains ne se fait plus que dans des éprouvettes. On maîtrise suffisamment le développement de l'embryon pour ajouter dans le milieu où il est élaboré des substances qui orientent infailliblement son devenir social. Les enfants sont conditionnés pendant leur sommeil. Tous les individus sont « heureux », et si l'euphorie vient à faiblir, une substance, le « soma », la fait instantanément réapparaître. Amour et émotions sont prohibés…

Comme souvent, les romans de science-fiction poussent le trait, mais certaines de leurs « prédictions » apparaissent *a posteriori* comme des anticipations. À ceci près que les innovations d'aujourd'hui ne visent pas à asservir l'être humain, mais à l'aider. Ainsi, les techniques d'assistance médicale à la procréation offrent aux couples stériles la possibilité de devenir parents. Des prothèses commandées par le cerveau devraient permettre à des personnes amputées de remarcher. Des généticiens parviennent à modifier « facilement » l'identité d'une cellule, ouvrant la voie à des techniques de réparation de tissus lésés. Ces travaux, publiés en 2006, ont été récompensés par le prix Nobel de médecine 2012 avec une rapidité qui souligne les espoirs thérapeutiques sous-jacents à la découverte.

Et si nous cultivions mieux notre jardin ?

Ne nous leurrons pas. Tout ne va pas pour le mieux dans le meilleur des mondes, pour paraphraser le Candide de Voltaire. Ainsi, les molécules supposées améliorer les performances cognitives sont sans effet sur le cerveau sain. Plusieurs des nouvelles techniques envisagées soulèvent des questions éthiques. Par ailleurs, leur accès au plus grand nombre reste un enjeu essentiel : elles ne devront pas creuser de fossés entre ceux qui en bénéficieront et les autres. Il faudra également veiller à ce qu'elles ne renforcent pas l'isolement des individus, dont certains vivent déjà dans un monde quasi virtuel.

Et si, à l'image de Candide, nous cultivions mieux notre jardin ? L'espoir d'un homme augmenté – l'homme 2.0 – est dans les esprits. N'en négligeons pas pour autant sa version 1.0, l'homme d'aujourd'hui, social, doué d'émotions, de créativité, de joie de vivre, d'aspiration à se cultiver, apprendre, découvrir, aimer, partager, rêver…

SOMMAIRE

1 [illegible]

4 BLOC-NOTES
Didier Nordon

Actualités

6 Lutter contre l'inflammation chronique de l'intestin

8 Le long périple d'une météorite martienne

9 Onde, particule ou entre les deux

12 Pourquoi l'atmosphère manque de xénon

... et bien d'autres sujets

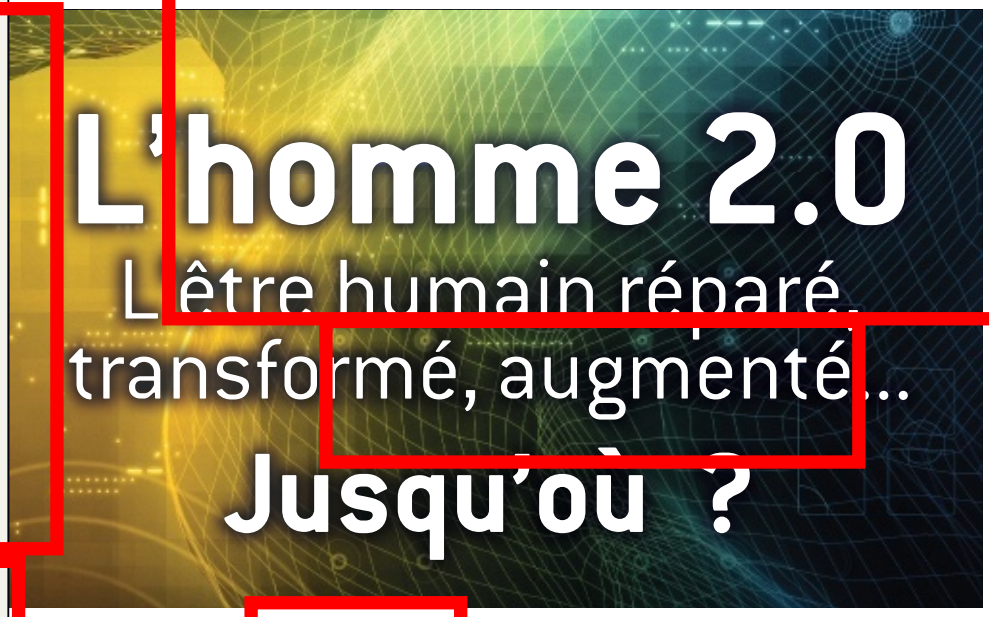
Opinions

16 POINT DE VUE
Le tout anglais, une doctrine obsolète
Michaël Oustinoff

17 DÉVELOPPEMENT DURABLE
Alimentation durable : agir du champ à l'assiette
Catherine Esnouf

20 VRAI OU FAUX
Être ébloui par les phares d'une voiture, est-ce une fatalité ?
Laurent Laloum





L'homme 2.0

L'être humain réparé, transformé, augmenté... Jusqu'où ?

22 BIOLOGIE
Aux limites de l'être humain
François Savatier

28 PHILOSOPHIE
De l'humain au transhumain
Jean-Michel Besnier

36 SCIENCE ET SOCIÉTÉ
Les records sportifs auront-ils une fin ?
G. Berthelot, A. Sedeaud, M. Guillaume et J.-F. Toussaint

44 ÉPISTÉMOLOGIE
Les limites de la connaissance
Hervé Zwirn

52 SOCIOLOGIE
L'homme en réseau et les sociabilités distantes
Nicolas Auray

58 MÉDECINE
Vivre dans l'espace
Nathalie Pattyn et Pierre-François Migeotte

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012

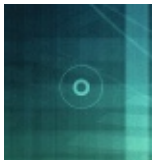
66 MÉDECINE
Quelle prescription pour demain ?
Pierre Souannet

74 MÉDECINE
Prématurité : une nouvelle génération d'enfants
Hugo Lagercrantz

82 BIOLOGIE CELLULAIRE
Des cellules souches pour réparer et régénérer les tissus ?
Laure Coulombel

90 NEUROSCIENCES
Les prothèses pilotées par la pensée
Miguel Nicolelis







98 NEUROSCIENCES
Augmenter les performances du cerveau : un leurre ?
Hervé Chneiweiss

106 NEUROSCIENCES
La conscience : comment la déceler ?
Olivia Gosseries et Steven Laureys

114 BIOLOGIE MOLÉCULAIRE
Toujours jeunes ?
Miroslav Radman

Ce numéro comporte deux encarts d'abonnement *Pour la Science* « Offre spéciale Noël » brochés sur la [illegible] et une sélection [illegible]

Illustration de couverture : © Ken Brown

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012

Regards

122 HISTOIRE DES SCIENCES
Wegener, le Darwin de la géologie
Eric Buffetaut
L'idée d'une dérive des continents, proposée il y a un siècle, a mis plus de 40 ans pour s'imposer.

126 LOGIQUE & CALCUL
Être normal ? Pas si facile !
Jean-Paul Delahaye
La notion de normalité, qui porte sur les chiffres du développement d'un nombre réel, est née en 1908. Elle s'est révélée riche.

132 SCIENCE & FICTION
L'homme du futur dans la science-fiction
J.-S. Steyer et R. Lehoucq

134 ART & SCIENCE
L'art abstrait, une question de bon sens
Loïc Mangin

136 IDÉES DE PHYSIQUE
Les brouillards de mélange
Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

140 SCIENCE & GASTRONOMIE
L'invention de nouveaux gels
Hervé This

142 À LIRE

Rendez-vous sur

SCIENCE.fr

Le site de référence de l'actualité scientifique internationale

- **Toutes les sciences en un clic**
  - Des actualités
  - Des articles en libre accès
  - Votre magazine numérique en ligne*
  - Plus de 13 ans d'archives*
- **Des services exclusifs**
  - Les réactions aux articles**
  - Des offres d'emploi scientifiques
  - Des newsletters**
  - Un espace abonnement

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

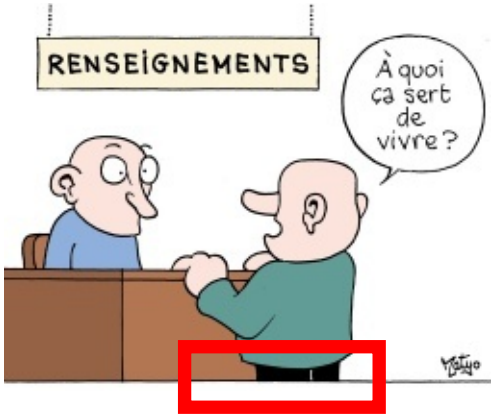
de **Didier Nordon**

ODE À L'INUTILE

Le grand public, paraît-il, n'a pas encore assimilé les conceptions apportées par les révolutions scientifiques – Einstein, Newton et même Copernic. Cela ne prouve pas qu'il soit spécialement fermé aux sciences. Il existe une leçon de vie, bien plus ancienne que Copernic et bien plus immédiate à vérifier, qu'il n'a pas retenue non plus, celle de Zhuang Zi (ou Tchouang tseu) : « Les gens comprennent tous l'utilité de ce qui est utile, mais ils ignorent l'utilité de l'inutile. »

Le sel de la vie n'est pas tant dans les moments où l'on remplit une fonction, que dans ceux, petits ou grands, qui ne servent à rien sinon à être des moments de la vie. Socrate pensait sans doute ainsi, lui qui apprenait un air de flûte la veille du jour où il devait boire la ciguë. « À quoi ça te sert ? », lui demanda-t-on. « À savoir cet air avant de mourir », répondit-il. Voltaire n'était pas loin de la même idée, sur un mode annonçant le consumérisme, lorsqu'il écrivait : « Le superflu, chose très nécessaire. »

Si éminents, si convaincants, soient les auteurs ayant montré qu'on se trompe quand on prend l'utilité pour une valeur suprême, la question « À quoi ça sert ? » revient comme une ritournelle presque toujours accusatrice. La remarque de Zhuang Zi, vieille de 25 siècles et facile à comprendre, reste incomprise. Pourquoi les difficiles changements de perspective induits par les révolutions scientifiques devraient-ils cheminer plus vite dans les esprits ?



AVEC OU SANS SUR ?

Le nombre d'articles écrits sur ordinateur. Les universitaires littéraires écrivent sur Cicéron ou sur la monnaie mycénienne.

L'homme ordinaire travaille son anglais ou son piano. Les chercheurs scientifiques travaillent sur les nombres premiers ou sur le boson de Higgs.

Bref, scientifiques ou littéraires, les chercheurs se distinguent de l'homme ordinaire par un idiotisme : leur usage très particulier de la préposition *sur*.

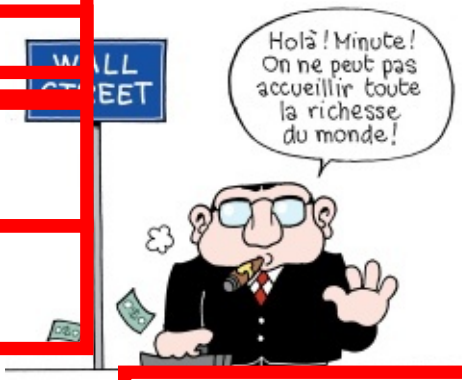
WALL STREET, NOUS VOILÀ !

« Nous allons dans le mur ! », s'exclament à tout propos nos hommes politiques. Mais depuis le temps qu'ils annoncent cette catastrophe, nous ne nous sommes toujours pas fracassés. Problème.

Ils disent « le » mur, non « un » mur. Ils songent donc tous au même. Le Mur des Lamentations ? La Muraille de Chine ? Il n'y a aucune raison. Non, ils songent à un mur bien plus connu, sur lequel ils ont les yeux rivés eux comme le monde entier : celui qui a donné son nom, à New York, à une certaine « rue du mur », Wall Street.

Ce mur ayant été détruit en 1699, on peut sans danger foncer vers lui. Mieux, même, il faut rêver : les instituts de langues promettent de nous enseigner « l'anglais de Wall Street » ; nombre de gens aimeraient dicter leur loi à la planète comme les financiers de Wall Street, etc. Sans doute, donc, avais-je fait un contresens. Une mesure qui nous fait aller dans « le » mur nous rapproche symboliquement de Wall Street, c'est-à-dire va nous faire obtenir un peu du pouvoir mythique qu'ont ses traders. Bref, c'est une mesure judicieuse.

Je vais réécouter les déclarations des hommes politiques en donnant ce sens à l'expression « aller dans le mur ». Peut-être leur découvrirai-je une pertinence qui m'avait échappé.



COMMENT SE SOUVENIR ?

Chateaubriand, après la Terreur, disait la crainte qu'un « monument élevé dans le but d'imprimer l'effroi des excès populaires donnât le désir de les imiter : le mal tente plus que le bien ; voulant perpétuer la douleur, on en fait souvent perpétuer l'exemple. Les siècles [...] ont assez de sujet présent de pleurer sans se charger de verser encore des larmes héréditaires » (*Mémoires d'outre-tombe*). Cette observation déstabilise trop pour que nous nous résolvions à la prendre en compte. Nous voulons croire en l'éducation comme en un rempart contre la barbarie. Nous ne voulons pas voir le dilemme devant lequel nous sommes : ne pas honorer les victimes de l'histoire serait insulter leur mémoire et leurs souffrances ; mais commémorer leur martyre risque de lasser, de faire naître l'indifférence, voire de susciter de l'émulation chez les bourreaux.

Il est difficile de ne pas éprouver un malaise devant le flot d'ouvrages que le nazisme suscite. Les auteurs, en cherchant à comprendre comment cette horreur a pu s'installer, pensent-ils aider à ce qu'aucune horreur ne puisse se réinstaller ? Pas plus aujourd'hui qu'au temps de Chateaubriand la marche du monde n'apporte de crédibilité à un tel projet. Il serait plus rassurant de voir les auteurs se passionner pour un épisode (s'il y en a eu...) pendant lequel des hommes ont vécu en paix, sans s'exploiter les uns les autres ni asservir la justice. Sans doute, l'espoir de trouver un

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012

moyen de faire renaître cet heureux état, à force de multiplier les analyses de sa genèse, serait-il illusoire. Mais l'espoir de conjurer l'horreur est aussi illusoire, et une fascination ne s'exprime-t-elle pas dans une description surabondante de celle-ci ?

TECHNIQUE D'ÉCRITURE

L'écriture est un procédé inventé, elle augmente un pouvoir d'action (celui de communiquer), elle accroît la maîtrise sur le monde. Bref, elle est une technique. Cependant, l'école s'y est si intimement adaptée qu'elle en est venue à la voir non comme un véhicule de savoir et de culture, mais comme le savoir et la culture mêmes. Nous sommes tous enclins à la même erreur ; l'écriture est, me semble-t-il, la seule technique que nous utilisons sans la percevoir comme telle.

Apparemment, le geste d'enseigner est antérieur à l'écriture. En ce cas, la question de la place qu'il convenait de donner dans l'enseignement à cette technique nouvelle a dû se poser un jour. Le débat sur le rôle que l'ordinateur doit jouer en classe est peut-être moins neuf que nous ne croyons. Qui sait s'il n'est pas la simple actualisation du débat qui, voilà quelques milliers d'années, a opposé les modernistes, promettant qu'un manuel écrit ferait merveille pour aider les jeunes à apprendre à tailler les silex, et les traditionalistes, convaincus qu'introduire l'écriture dans les ateliers signifierait une dégradation catastrophique de l'enseignement... ■



Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques

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



Preservation of Plastic Artefects in Museum Collections
Édité par Bertrand Lavédrine, Alban Fournier et Graham Martin
328 pages, ill. couleur, 50,70 €
This book is not an art picture book although it contains pictures of works of art, and this is not a scientific treatise although it does include chemical formulae! This book is about both art and science and represents a significant milestone in the journey towards understanding the issues associated with plastics in museum collections, and equally importantly, it helps point the way forward for future work.

isbn 978-2-7355-0770-2



François Bordes et la préhistoire
Sous la direction de Françoise Delpech et Jacques Jaubert
232 pages, ill. couleur, 45 €
Voici 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.

isbn 978-2-7355-0766-5



Les arpenteurs des confins
Explorateurs de l'intérieur de la Guyane (1720-1860)
Textes réunis et présentés par Francis Dupuy
296 pages, ill. noir et blanc, 40 €
À compter des années 1720, quelques explorateurs intrépides se lancent à l'assaut de l'immensité amazonienne en partant du littoral guyanais. Ils tentent de pénétrer au plus loin, dans l'espoir d'établir une jonction avec le grand fleuve Amazone. Par l'entremise de ces personnages au caractère bien trempé, mêlant l'ambition personnelle et la mission nationale, un continent inconnu des Européens ouvre ses portes, non sans résistance, à l'aventure et au rêve.

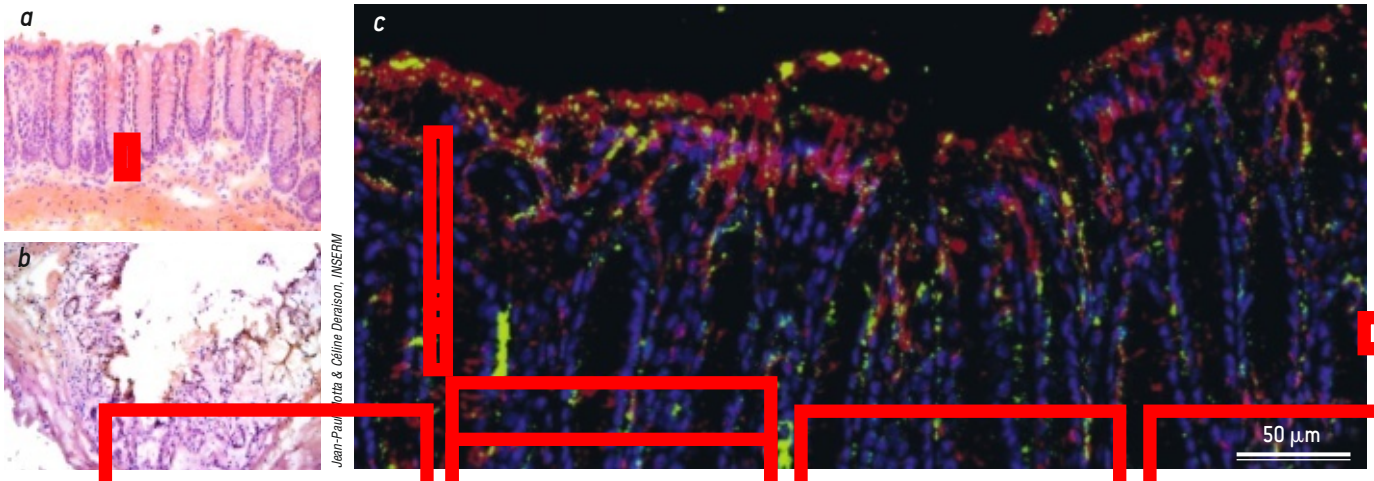
isbn 978-2-7355-0758-0

* ventes@cths.fr * vente en librairie ou sur notre site : www.cths.fr * Distribution S

Biomédecine

Une bactérie pour lutter contre l'inflammation chronique de l'intestin

Des biologistes ont protégé des souris contre cette pathologie en libérant dans leur intestin, grâce à une bactérie, une protéine humaine aux propriétés anti-inflammatoires.



Jean-Paul Motta & Céline Deraison, INSERM

Traitée à l'élafine, une protéine humaine, le côlon d'une souris soumise à une inflammation chronique de l'intestin présente des microvillosités régulières *(a, ici une coupe colorée à l'hématoxyline et à l'éosine)*. Non traité, il se désorganise complètement *(b)*. L'élafine est administrée *via* des bactéries génétiquement modifiées. En quatre heures, les bactéries avalées par une souris se retrouvent à la surface de l'intestin, où elles expriment l'élafine *(c, en vert)*, qui diffuse dans les muqueuses *(en rouge, les cellules épithéliales qui tapissent l'intestin et, en bleu, les noyaux cellulaires)*.

Des traitements thérapeutiques qui protégeraient l'organisme contre les maladies inflammatoires chroniques de l'intestin, telles que la maladie de Crohn et la rectocolite hémorragique : c'est là ce qu'ont imaginé Nathalie Vergnolle, du Centre de physiopathologie de Toulouse Purpan (INSERM/Université Toulouse III – Paul Sabatier/CNRS), Philippe Langella, de l'Institut Micalis (INRA/AgroParisTech), et leurs collègues, en collaboration avec l'Institut Pasteur.

Les biologistes ont déjà franchi une première étape considérable dans ce sens : d'une part, ils ont modifié génétiquement des bactéries alimentaires utilisées dans les produits laitiers pour qu'elles produisent une protéine anti-inflammatoire de l'intestin humain, l'élafine ; d'autre part, ils ont montré que ces bactéries diminuent les symptômes sur des souris et des lignées de cellules intestinales humaines en culture.

En France, près de 200 000 personnes souffrent de maladies inflammatoires chroniques de l'intestin, et leur nombre augmente chaque année. Les crises se manifestent par des douleurs abdominales, des diarrhées fréquentes, parfois sanglantes, et des ulcérations. Les traitements actuels sont souvent insuffisants : les anti-inflammatoires non stéroïdiens ne soulagent que les cas modérés ; quant aux molécules utilisées lors de crises importantes – des glucocorticoïdes ou des anticorps qui bloquent l'activité de la cytokine TNF, impliquée dans la réponse inflammatoire –, elles ont des effets secondaires importants et 20 à 40 % des patients sont résistants. La dernière issue est l'ablation de la portion d'intestin atteinte.

Produite dans l'intestin humain, l'élafine participe à la protection de celui-ci contre les agressions inflammatoires. Toutefois, les individus atteints d'inflammation chronique de l'intestin n'expriment plus cette protéine. Une nouvelle source suffirait-elle à protéger leurs intestins ? Pour le savoir, les biologistes ont introduit le gène de l'élafine dans des bactéries *Lactococcus lactis* et *Lactobacillus casei*, utilisées dans la fabrication de produits laitiers, et ont administré oralement ces bactéries à des souris soumises à une inflammation chronique de l'intestin. Effectivement, l'élafine était bien sécrétée dans l'intestin des souris, mais elle les protégeait de l'inflammation.

Aucun effet secondaire n'a été observé chez la souris, et les biologistes ont bon espoir qu'il en soit de même chez l'homme. « L'élafine est un inhibiteur de protéases à spectre étroit, et est, de plus, déversée après l'estomac, elle ne devrait donc pas perturber la digestion. Sans compter que l'élafine a déjà été administrée à l'homme en intraveineuse sans effet secondaire, explique Nathalie Vergnolle. Quant aux bactéries lactiques, elles sont couramment utilisées dans des yaourts et les fromages sans effet secondaire observé. » Une compagnie américaine de biotechnologies a déjà racheté le brevet déposé par l'équipe et prépare les essais cliniques.

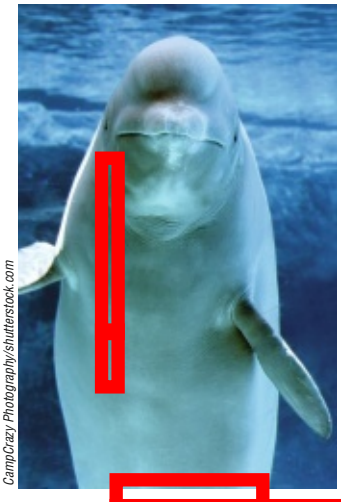
→ Marie-Neige Cordonnier

J.-P. Motta et al., Science Translational Medicine, vol. 4, p. 140, 2012

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012

Zoologie

Un bélouga qui parle



CampCrazy Photography/shutterstock.com

Dans le delphinarium de la Fondation américaine pour les mammifères marins à San Diego, un plongeur est en train d'intervenir dans un bassin quand il entend « Out, out, out ! » (dehors en anglais). Il rejoint d'urgence la surface, mais constate que personne ne peut l'avoir appelé. Personne ? Personne, sauf... Noc, la baleine blanche. Depuis, Sam Ridgway et ses collègues de la Fondation pour les mammifères marins ont analysé les vocalisations de ce bélouga *(Delphinapterus leucas)* et ont conclu qu'il tentait spontanément d'imiter les humains. Ses cris présentent en effet des fréquences fondamentales comprises entre 200 et 300 hertz, avec un maximum d'énergie dans les harmoniques. Ce spectre est très différent de celui des sons émis d'ordinaire par les bélougas, dont les fréquences fondamentales se situent plusieurs octaves plus haut, mais il est typique des [illegible]. Noc émettait ses sons en groupes séparés de 0,05 à 0,5 seconde et suivant un rythme rappelant celui de la parole. [illegible] témoin de conversations entre dresseurs, ait décidé de les imiter.

➜ François Savatier

S. Ridgway et al., Current Biology, vol. 22, pp. R860-861, 2012

Préhistoire

Un mammouth à Changis-sur-Marne

Le troisième squelette quasi complet de mammouth trouvé en France depuis 150 ans vient d'être découvert à Changis-sur-Marne par l'équipe de Grégory Bayle, de l'INRAP. Piégé dans une ancienne berge de la Marne, l'animal semble avoir été exploité par les Néandertaliens.

Il s'agit sans doute d'un mammouth à poil laineux. D'environ trois mètres au garrot, l'animal a pu peser jusqu'à cinq tonnes. Il vivait manifestement dans un environnement comparable à la Sibérie actuelle, qu'avait créé dans le Nord de la France le climat plus clément d'une phase interglaciaire.

Sans doute habitué à fouler des berges gelées, donc fermes, pour aller boire, le mammouth aurait été victime d'un regain de température qui aurait ramolli le sol. Une fois enfoncé jusqu'au garrot dans la vase, il est mort d'épuisement. Sa carcasse s'est décomposée, puis ses ossements ont été recouverts par les fins sédiments qu'apportait, en périodes de hautes eaux, le très lent flux vaseux du méandre de la Marne à cet endroit. Quand s'est produit ce drame ? Pour le moment, il est seulement possible de dire que la strate où a été retrouvé le mammouth date d'au moins 130 000 ans.



Denis Gliksman, INRAP

Le squelette du mammouth découvert est presque complet. Il date d'au moins 130 000 ans.

Le climat plus clément, qui permettait à ces troupeaux de mammouths de vivre dans le Nord de la France, était aussi favorable aux Néandertaliens, dont on sait qu'ils exploitaient beaucoup ces animaux. Rien n'indique qu'ils aient eu besoin d'abattre celui de Changis-sur-Marne. Deux éclats de silex à bords tranchants ont été retrouvés au contact immédiat de certains os. Cela suggère que ces hominidés sont juste venus profiter de l'aubaine que représentait cette importante réserve de viande et d'autres ressources, tels les tendons… L'étude détaillée des ossements permettra peut-être d'obtenir des indices sur ce que ces Néandertaliens ont plus particulièrement exploité.

➜ F. S.

En bref

UNE EXOPLANÈTE TOUT PRÈS

Les étoiles d'Alpha Centauri, qui forment un système triple distant d'environ 4,3 années-lumière, sont nos plus proches voisines. Une équipe d'astronomes européens a détecté une planète autour d'une de ces étoiles par la méthode dite des vitesses radiales. À peine plus massive que la Terre, c'est l'exoplanète la plus légère découverte autour d'une étoile de type solaire. Elle est toutefois trop proche de son astre pour abriter de l'eau liquide, et donc [illegible].

LED À LUCIOLE

Des LED plus puissantes inspirées des lucioles ? C'est ce que propose une équipe sud-coréenne. Les physiciens ont montré que la couche externe de la lanterne des insectes, constituée de nanostructures linéaires régulières, est un système efficace pour empêcher les réflexions de la lumière vers sa source. Adaptée aux LED, cette géométrie donne de meilleurs résultats que les lentilles actuelles et des résultats comparables aux traitements antireflets par couches minces, avec un coût de fabrication moindre.

LE POIDS DE L'ÂGE

Les personnes âgées ont souvent l'impression de soulever des poids plus lourds qu'ils ne sont en réalité. Jessica Holmin et Farley Norman, aux États-Unis, ont montré qu'elles surestiment toujours le rapport entre le poids de deux objets, contrairement aux personnes plus jeunes (moins de 31 ans). Peut-être parce que les régions cérébrales du lobe pariétal impliquées dans la perception du poids dégénèrent précocement avec l'âge…

Planétologie

Le long périple d'une météorite martienne

La météorite tombée en juillet 2011 près de Tissint, dans le désert sud-marocain, et dont environ 17 kilogrammes de fragments ont été retrouvés l'hiver dernier, est une aubaine pour les géologues. Contrairement à la plupart des météorites, elle n'a pas été altérée par un long séjour sur Terre. En outre, il s'agit d'une « shergottite picritique », une roche magmatique caractéristique… de la planète Mars ! En analysant la structure et la composition de divers fragments, un consortium international dirigé par Hasnaa Chennaoui-Aoudjehane, de l'Université Hassan II à Casablanca, au Maroc, et professeur associé à l'Université Pierre et Marie Curie (Paris), a retracé le scénario de formation de cette météorite.

La météorite est constituée de macrocristaux d'olivine enveloppés dans une matrice de minéraux plus fins. La roche est fracturée et certains interstices en forme de poches et de fissures sont comblés par un verre noir constellé de bulles et contenant des traces de fluor et de soufre.

Sur Mars, des fluides aqueux acides auraient usé une roche magmatique remontée à la surface du sol. Lessivés de la roche, certains éléments tels que le fluor et le soufre se seraient déposés dans les fissures. Il y a environ 700 000 ans, des fragments de la roche auraient été éjectés de Mars lors de la chute d'un corps étranger. Sous la chaleur produite par l'impact, la roche aurait fondu préférentiellement le long des fissures, produisant des veines de verre noir contenant les éléments qui avaient été déposés par les fluides. La fonte brutale aurait aussi emprisonné, dans de petites bulles, de l'atmosphère martienne.

En juillet 2011, la météorite arrivait sur Terre… Un nouvel indice en faveur de la présence passée d'eau sur Mars, qui s'ajoute aux photographies récemment envoyées par le robot *Curiosity* d'une région qui pourrait être le lit d'un ancien cours d'eau !



© Muséum d'histoire naturelle de Londres

Le plus gros fragment connu à ce jour de la météorite de Tissint a une masse de 1,1 kilogramme. Il est recouvert d'une croûte de fusion noire.

→ M.-N. C.

H. Chennaoui-Aoudjehane et al., Sciencexpress, 11 octobre 2012

IL Y A 2 830 A 2 846 ANS : c'est la date à laquelle l'homme a commencé à coloniser la Polynésie, d'après l'analyse de restes coralliens

D. Burley et al., PLoS ONE, vol. 7(11), e48769, 2012

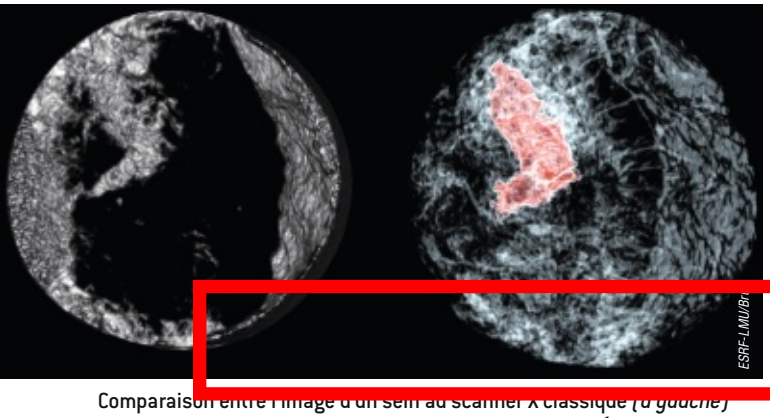
Imagerie médicale

Dépister le cancer du sein au scanner ?

Quelques clichés de radiographie du sein – une mammographie – constituent le principal moyen de dépistage du cancer du sein. Une technique aussi routinière mais plus efficace est-elle à l'horizon ? On peut le penser : une équipe de chercheurs de l'Université de Californie à Los Angeles, de l'ESRF (le synchrotron européen, situé à Grenoble) et de l'Université Ludwig Maximilians, en Allemagne, a réalisé une tomographie (image 3D reconstruite à partir d'une série d'images 2D) mammaire avec une dose de rayonnement 25 fois inférieure à celle qu'infligerait un scanner X d'hôpital, et ce avec une résolution meilleure que 0,1 millimètre.

La dose de rayonnement a été réduite grâce à trois principales améliorations. D'abord, Paola Coan, Jianwei Miao, Alberto Bravin et leurs collègues ont utilisé des rayons X de plus haute énergie (50 kiloélectronvolts), moins absorbés par les tissus. Ensuite, l'imagerie habituelle, fondée sur les différences d'absorption des rayons par les tissus biologiques, a été remplacée par une technique d'imagerie par contraste de phase, où l'on exploite le déphasage que subissent les rayons X en traversant les différents tissus. Enfin, la reconstruction 3D a été réalisée à l'aide d'un algorithme récent, nommé ESART (*Equally Sloped Tomography*), qui nécessite quatre fois moins de rayonnement à qualité d'image égale.

Au total, la dose de rayonnement est inférieure à celle requise pour une mammographie ordinaire à double vue. Moins de rayonnement, une résolution supérieure, un meilleur contraste et une vue tridimensionnelle : les avantages sur la mammographie classique sont évidents. Toutefois, la technique doit encore mûrir. En particulier, l'imagerie X par contraste de phase nécessite un faisceau X de longueur d'onde très bien définie – ce que fournit le grand synchrotron ESRF, mais pas encore les sources compactes de rayons X.



ESRF-LMU/Bravin

Comparaison entre l'image d'un sein au scanner X classique *(à gauche)* et celle du même sein obtenue par la nouvelle technique *(à droite, avec la tumeur soulignée en rose)*. Les doses de rayonnement absorbées par l'échantillon sont respectivement de 49 et 2 milligrays.

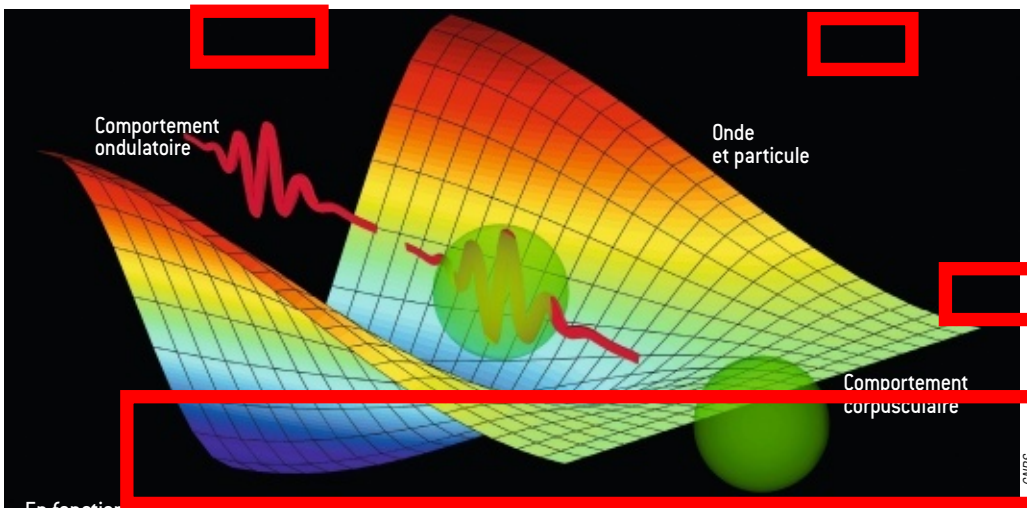
→ Maurice Mashaal

Y. Zhao et al., PNAS, en ligne, 22 octobre 2012

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012

Physique

Onde, particule ou entre les deux



F. Kaiser et al., Tanzilli – CNRS

En fonction [illegible] se comporte comme une onde, une particule ou une superposition cohérente des états « onde » et « corpuscule ». Les points expérimentaux dessinent une surface, le plan horizontal repérant deux paramètres de l'expérience (un angle de polarisation et un déphasage) ; sur la verticale est mesurée la probabilité de coïncidence entre plusieurs détecteurs.

En 1924, le physicien français Louis de Broglie découvrait la dualité onde-corpuscule : tout objet a des propriétés à la fois ondulatoires et corpusculaires. Puis, en 1927, le physicien danois Niels Bohr proposait le principe de complémentarité : plus un objet quantique se comporte comme une onde, moins il se comporte en corpuscule, selon l'expérience à laquelle l'objet est soumis. La lumière se comporte ainsi tantôt comme une onde, dans les expériences d'interférence par exemple, tantôt comme une particule (le photon), comme dans l'effet photoélectrique. Deux équipes, l'une en France, l'autre en Grande-Bretagne (Jeremy O'Brien, Université de Bristol), ont mis au point des dispositifs permettant d'étudier finement cette complémentarité, et montrent que la lumière peut être dans une combinaison cohérente d'un état corpusculaire et d'un état ondulatoire.

Explicitons l'expérience française, menée par Sébastien Tanzilli du Laboratoire de physique de la matière condensée à Nice (CNRS et Université Nice-Sophia Antipolis), en collaboration avec le Laboratoire [illegible] matériaux et phénomènes quantiques à Paris (CNRS et Université Paris Diderot). Elle utilise un interféromètre où la lumière doit traverser deux miroirs semi-réfléchissants avant d'atteindre deux détecteurs placés en sortie. Dans cette configuration dite fermée, la lumière a deux chemins possibles pour parvenir à chaque détecteur. Elle présente alors un comportement ondulatoire : l'onde empruntant les deux chemins à la fois, ce qui se traduit par des interférences sur les détecteurs (la probabilité de détection par chaque appareil dépend de la différence de parcours).

Si l'on retire le second miroir semi-réfléchissant, le dispositif est dans une configuration « ouverte », où il n'y a plus d'interférence : chaque photon arrive sur l'un ou l'autre détecteur avec une même probabilité de 50 pour cent, ce qui correspond à un comportement corpusculaire.

L'expérience de l'équipe de S. Tanzilli a consisté à superposer les deux situations, ouverte et fermée. Pour ce faire, les physiciens ont conçu un miroir semi-réfléchissant quantique, qui est présent si le photon incident a une polarisation verticale, et absent si cette polarisation est horizontale.

Ainsi, une polarisation mixte créerait une superposition quantique des états ouvert et fermé de l'interféromètre, donc une superposition des états corpusculaire et ondulatoire. Pour contrôler la superposition, les physiciens ont utilisé une paire de photons intriqués, système où les propriétés des deux photons restent intimement corrélées l'une à l'autre quelle que soit leur distance. Un photon-test est envoyé dans l'interféromètre tandis que son jumeau est envoyé dans un autre appareil qui en contrôle la polarisation.

En faisant varier la polarisation du photon jumeau, donc celle du photon-test, les physiciens ont fait varier la superposition des états corpusculaire et ondulatoire : ils passent ainsi continûment d'un comportement purement corpusculaire de la lumière à un comportement purement ondulatoire (la situation étant caractérisée par les corrélations entre plusieurs détecteurs).

➜ Sean Bailly

Science, vol. 338, pp. 634-640, 2012

En bref

STRIATUM SOUS INFLUENCE

Le striatum est une aire cérébrale qui régule les mouvements. Il est influencé par diverses régions du cerveau, telles l'aire tegmentale ventrale et la *substantia nigra pars compacta*, via la dopamine, un neurotransmetteur. Des chercheurs américains ont montré que leurs neurones à dopamine relâchent aussi un autre neurotransmetteur, nommé GABA, qui inhibe les neurones du striatum. Cette cotransmission de neurotransmetteurs aidera peut-être à comprendre les troubles moteurs, tels la maladie de Parkinson.

BLEU CONTRE SOMNOLENCE

La lumière bleue, en stimulant les cellules ganglionnaires de la rétine, augmente la vigilance. Des chercheurs français et suédois ont étudié la somnolence de conducteurs soumis à cette lumière ou ayant bu du café ou du café décaféiné (placebo). Les résultats montrent que la lumière bleue permet de garder la même vigilance que le café. Le nombre de franchissements inappropriés des lignes latérales au sol, moins fréquent que dans le cas du placebo, l'indique.

LE POULS DES VOLCANS

En utilisant des images prises par satellite, Estelle Chaussard et Falk Amelung, de l'Université de Miami, ont effectué un suivi de l'ensemble de l'arc volcanique de Sunda, en Indonésie. Sur la période allant de 2006 à 2009, ces chercheurs ont constaté un gonflement du sol autour de six volcans, correspondant au remplissage en magma de réservoirs sous les volcans. Trois de ces volcans sont entrés en éruption depuis. Une méthode prometteuse pour anticiper une éruption !

Géosciences

Le tsunami du lac Léman en 563 modélisé

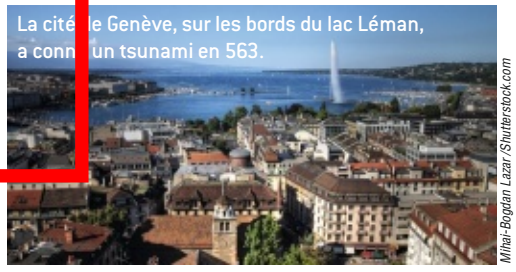
La plupart des raz-de-marée se déroulent sur les côtes maritimes à la suite d'un tremblement de terre. Les lacs ne sont cependant pas à l'abri de ce genre de désastres. Par exemple, en 563, un tsunami sur le lac Léman, déclenché par l'écroulement d'une montagne proche du Rhône, a provoqué des destructions importantes et fait de nombreuses victimes.

Pour comprendre l'origine de cette vague destructrice, Katrina Kremer et ses collègues, de l'Université de Genève, ont analysé les sédiments du fond du lac, en effectuant un sondage de sismique réflexion (des ondes sont créées, se propagent dans le sol et sont réfléchies à l'interface de deux couches géologiques) et des prélèvements de carottes de 7 à 12 mètres de long. L'étude montre qu'il existe dans la partie la plus profonde du lac une couche de turbidite, un dépôt sédimentaire, longue de dix kilomètres, large de cinq et épaisse d'environ cinq mètres.

Compte tenu de ce volume de turbidite, K. Kremer et ses collègues ont modélisé numériquement la propagation et la taille de la vague dans le lac. Celle-ci aurait atteint près de 13 mètres près de Lausanne, située sur la rive Nord, et près de 8 mètres à Genève, à l'autre bout du lac. Le tsunami aurait traversé le lac d'Est en Ouest en près de 70 minutes. Comme l'indiquent les témoignages de l'époque, une telle vague aurait détruit le pont de Genève, des moulins et passé par-dessus les murs de la ville.

➔ S. B.

K. Kremer et al., *Nature Geoscience*, en ligne le 28 octobre 2012



La cité de Genève, sur les bords du lac Léman, a connu un tsunami en 563.

Mihai-Bogdan Lazar/Shutterstock.com

PLANÈTE À QUATRE ÉTOILES

Seules six exoplanètes étaient connues pour être en orbite autour d'un système de deux étoiles. Découverte grâce au télescope *Kepler* et au travail d'astronomes amateurs et professionnels, la planète PH1 a une période de révolution de 138 jours autour d'un système binaire formé d'une naine blanche et une naine rouge, tournant l'une autour de l'autre en 20 jours. Deux autres étoiles sont en orbite autour des deux premières à une distance équivalente à 1 000 fois la distance Terre-Soleil. Ainsi, PH1 apparaît à un système global en interaction gravitationnelle contenant pas moins de quatre étoiles !

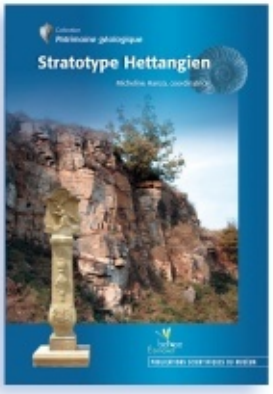
Muséum national d'Histoire naturelle

Le stratotype Hettangien

Coordonné par Micheline **Hanzo**

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

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



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

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

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES DU MUSÉUM

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

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012

Paléontologie

Déguster un tricératops

Certains mets ne se dégustent que selon un rituel particulier. Ainsi, les ortolans s'avalaient rôtis, en une seule bouchée. L'amateur averti se couvrait la tête d'un linge pour ne rien perdre de leurs odeurs et ne recrachait rien… De même, les tyrannosaures respectaient quelques règles pour consommer un tricératops fraîchement abattu. C'est ce qu'a montré le paléontologue Denver Fowler, du Muséum des Rocheuses à Bozeman, dans le Montana.

Son équipe a étudié de nombreux spécimens de tricératops et s'est intéressée à ceux qui présentaient des traces de dents de tyrannosaure. Le plus intrigant était les nombreuses perforations et marques de traction mises au jour sur la collerette des tricératops, des organes pourtant dépourvus de valeur nutritive.

Selon les paléontologues, ces traces témoignent d'une volonté de la part des prédateurs d'accéder aux muscles dodus du cou. Pour ce faire, rien n'est plus efficace qu'une décapitation de la proie. D'autres marques à la base du crâne soutiennent ce scénario.

Les tyrannosaures étaient ainsi des gourmets qui savaient pour atteindre leur morceau de choix, les sotl'y-laisse du Crétacé !



Blink

Un tricératops

➜ Loïc Mangin

Journal of Vertebrate Paleontology, sous presse, 2012

Physique nucléaire

Élément 113 : fin de la quête ?

L'uranium, dont le noyau atomique contient 92 protons, est le dernier élément du tableau périodique qui existe à l'état naturel. Les éléments dont les noyaux contiennent davantage de protons sont instables et sont produits artificiellement. Depuis les années 1940, les éléments plus lourds sont créés dans différents laboratoires du monde. En août 2012, une équipe japonaise, du Centre Nishina du RIKEN, a observé une réaction dans laquelle l'élément 113 (noyau à 113 protons) a été produit sans ambiguïté.

En bombardant une mince couche de bismuth (noyaux à 83 protons) avec un faisceau énergétique de zinc (noyaux à 30 protons), les physiciens ont produit, par une réaction de fusion, l'élément 113. Pour valider une telle observation, il faut étudier en détail les produits de la désintégration en cascade du noyau instable en éléments plus légers, qui s'accompagne de l'émission de particules alpha. Après six désintégrations, l'élément 113 produit un noyau de mendélévium bien connu. Si la découverte est confirmée, l'équipe japonaise aura le privilège de nommer le nouvel élément. Le nom de japonium est évoqué ; il s'agirait du premier noyau lourd découvert en Asie de l'Est.

➜ S. B.

K. Morita et al., Journal of the Physical Society of Japan, vol. 81, 103201, 2012

Chimie

La chimie ultrafroide dopée par des effets quantiques

Près du zéro absolu, le monde n'est pas aussi figé qu'on ne le pense. Les atomes peuvent réagir et former des états liés. À ces températures, des effets quantiques tels que des résonances deviennent visibles. Ces effets purement quantiques ne sont pas prévus par la mécanique classique et peuvent augmenter la réactivité. Une équipe en Israël les a mis en évidence pour une réaction d'ionisation.

Pour révéler de tels phénomènes, plusieurs équipes ont conçu des dispositifs permettant de réduire l'énergie de collision entre molécules, ce qui équivaut à réduire la température. L'équipe de Michel Costes, de l'Institut des sciences moléculaires de l'Université de Bordeaux et du CNRS, a utilisé deux jets de molécules à basse température qui se croisent. La vitesse relative des molécules des deux faisceaux définit la température de collision. En juillet dernier, M. Costes et ses collègues ont observé pour la première fois des résonances dont la forme, conforme aux modèles, dans des collisions de faisceaux à environ trois kelvins.

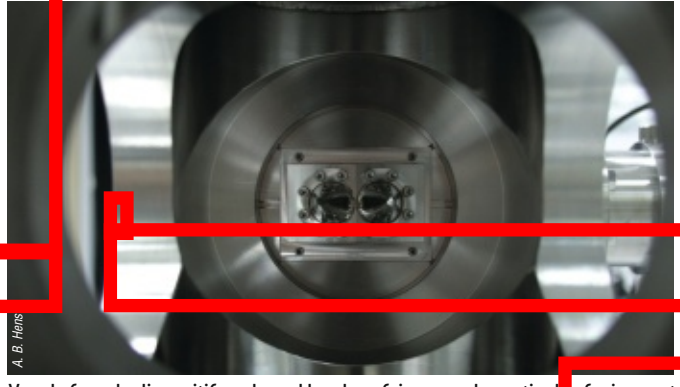
Pour réduire encore la température de collision, l'équipe de Edvardas Narevicius, de l'Institut Weizmann en Israël, a été de faire fusionner deux faisceaux moléculaires arrivant parallèles l'un à l'autre, de façon que la vitesse relative des molécules soit nulle. Pour ce faire, un premier faisceau est émis sur une trajectoire rectiligne tandis que le second est progressivement dévié, à l'aide de champs magnétiques appropriés, pour fusionner avec le premier.

L'équipe israélienne s'est concentrée sur un type de réaction : l'ionisation de Penning. Lors d'une collision entre un atome neutre excité et un autre atome neutre dans son état fondamental, l'énergie d'excitation du premier sert à ioniser le second. Pour une température de collision supérieure à dix kelvins, les chercheurs ont retrouvé un comportement compatible avec la chimie classique. À des températures inférieures et jusqu'à dix millikelvins, ils ont observé des résonances, donc la formation d'états liés qui conduisent à la réaction d'ionisation de Penning.

Ces dispositifs de très basse température permettront d'étudier des réactions chimiques, notamment, pourraient jouer un rôle dans les nuages moléculaires du milieu interstellaire.

➜ S. B.

S. Chefdeville et al., Phys. Rev. Lett., vol. 109, 023201, 2012 ; A. B. Henson et al., Science, vol. 338, pp. 234-238, 2012



A. B. Henson

Vue de face du dispositif par lequel les deux faisceaux de particules fusionnent.

En bref

TESTOSTÉRONE ET SINCÉRITÉ

Et si l'hormone de l'agressivité était aussi celle de la sincérité, du moins chez les hommes ? Armin Falk, de l'Université de Bonn, et de ses collègues ont élaboré un gel dermique riche en testostérone. Ils ont ensuite invité 91 hommes à jouer aux dés seuls dans des cabines et à reporter, sans témoins, les résultats de leurs tirages qui, s'ils étaient gagnants, étaient rémunérés. Les 48 hommes dont le niveau de testostérone a été augmenté par application du gel ont moins triché.

DES POISSONS JARDINIERS

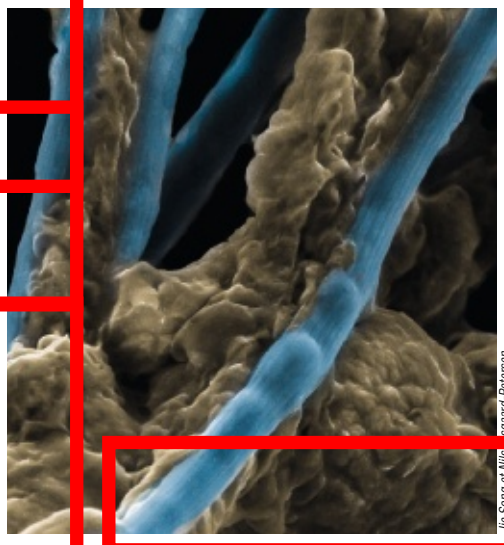
Les coraux sont souvent envahis par des algues qui peuvent les étouffer. Danielle Dixson et Mark Hay, de l'Institut de technologie de Géorgie, ont montré que face à cette menace, ceux de l'espèce *Acropora nasuta* émettent une substance à laquelle sont sensibles les poissons gobies. En quelques minutes, ces poissons se rapprochent de la zone infestée et broutent les algues. Les poissons ingèrent une toxine de l'algue, qui les rend encore plus toxiques et leur sert de protection contre des prédateurs.

Microbiologie

Un réseau électrique bactérien

Dans la baie d'Aarhus au Danemark, l'élément clé concernant des réactions chimiques énigmatiques vient d'être découvert. Dans les sédiments marins, à une profondeur d'un centimètre, on observe l'oxydation de sulfures alors que ce milieu est dépourvu d'oxygène. Comment ces réactions, qui nécessitent un échange d'électrons, se produisent-elles ?

Nils Risgaard-Petersen, du Centre de géomicrobiologie à Aarhus, et ses collègues danois et américains ont d'abord établi qu'un courant électrique circule entre les sulfures au sein des sédiments et la surface de ces derniers, où de l'oxygène est présent. Plus étonnant, ils viennent de montrer que le transfert des électrons est assuré par des bactéries qui forment des filaments sur près d'un centimètre de long. Chaque filament bactérien, dont l'épaisseur est comprise entre 0,4 et 0,7 micromètre, comporte une quinzaine de stries conductrices sur toute sa longueur, le tout recouvert d'une membrane qui isole ces conducteurs de l'extérieur. Le réseau électrique constitué par ces micro-organismes de la famille des *Desulfobulbaceae* est très dense : il atteint une longueur cumulée de plusieurs dizaines de milliers de kilomètres par mètre carré de fond marin.



Jie Song et Nils Risgaard-Petersen

Les bactéries *Desulfobulbaceae (en bleu)* observées au microscope électronique à balayage. Chaque filament compte une quinzaine de stries qui conduisent les électrons sur environ un centimètre.

Ces microcâbles bactériens, grâce auxquels les micro-organismes en question puisent leur énergie, sont un système biologique inédit. Il reste maintenant à comprendre comment ils fonctionnent, et à préciser leur rôle dans l'environnement marin.

→ S. B.

C. Pfeffer et al., Nature, en ligne, 24 octobre 2012

Géosciences

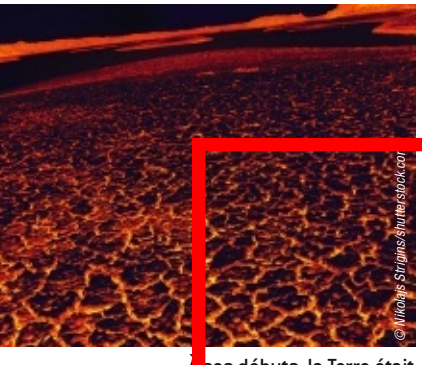
Pourquoi l'atmosphère manque de xénon

Le xénon est un gaz noble dont les atomes sont bien plus lourds que ceux d'argon et de krypton, deux autres gaz nobles présents dans l'atmosphère terrestre. Pourtant, notre atmosphère contient beaucoup moins de xénon, comparé aux gaz nobles plus légers tels que l'argon, que les météorites chondritiques – faites du même matériau rocheux qui a donné naissance à la Terre. Selon Svyatoslav Shcheka et Hans Keppler, de l'Université de Bayreuth, en Allemagne, la réponse réside dans la faible solubilité du xénon au sein des pérovskites de $MgSiO_3$, composante principale du manteau inférieur de notre planète. En soumettant une telle pérovskite à des températures et des pressions similaires à celles régnant dans le manteau inférieur, les deux chercheurs ont trouvé que l'argon se dissout à raison de un pour cent en masse, alors que la solubilité du xénon est plus de 30 fois inférieure.

Ces résultats suggèrent aux deux géochimistes le scénario suivant. Avec la cristallisation de la pérovskite à partir de l'océan de magma en fusion, au tout début de l'histoire de la Terre, de l'argon et du krypton, mais très peu de xénon, ont été piégés dans le manteau inférieur. Simultanément, l'essentiel de l'atmosphère primitive s'est perdu dans l'espace en raison des hautes températures, de l'intense rayonnement ultraviolet et des impacts de météorites. Plus tard, avec les mouvements de convection au sein du manteau, de la matière provenant du manteau inférieur est parvenue à proximité de la surface terrestre et a dégazé, libérant de l'argon et du krypton qui ont repeuplé l'atmosphère en ces gaz primitifs, mais beaucoup moins en xénon. Un processus similaire pourrait aussi expliquer le déficit en xénon constaté dans l'atmosphère de Mars.

→ M. M.

Nature, en ligne le 24 octobre 2012



© Nikolais Strigins/Shutterstock.com

À ses débuts, la Terre était probablement une boule de magma en fusion. Très peu de xénon s'y serait dissous, ce qui expliquerait sa faible abondance aujourd'hui.

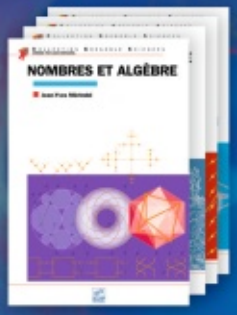
© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012

GRENOBLE SCIENCES

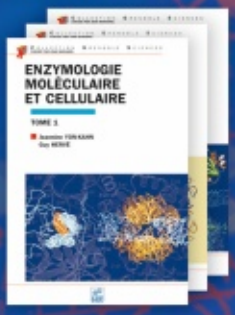
■ CONSEIL ET EXPERTISE ■ LABELLISATION ■ ÉDITION

■ **2012, une année anniversaire**
plus de 100 ouvrages labellisés
plus de 200 000 exemplaires vendus

en MATHÉMATIQUES,



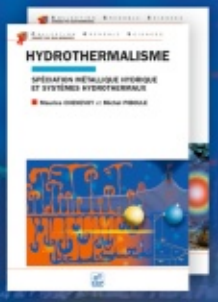
SCIENCES DE LA VIE,



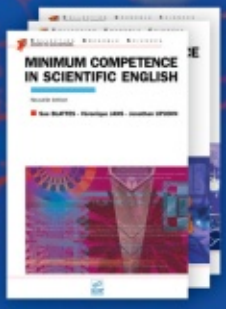
SCIENCES DE LA MATIÈRE,



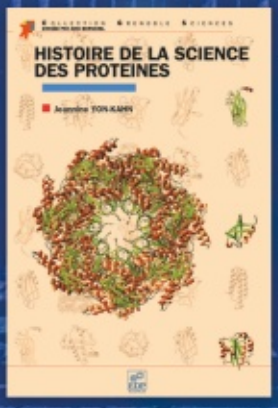
SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS,



ANGLAIS DE SPÉCIALITÉ.



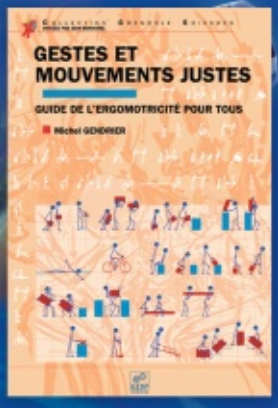
■ **et des ouvrages pour un public plus large qui feront de beaux cadeaux de Noël !**
(Éditeur EDP Sciences)







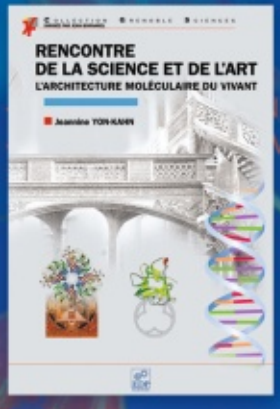














GRENOBLE SCIENCES
UNIVERSITE JOSEPH FOURIER

Grenoble Sciences, Université Joseph Fourier, Bât. B de Physique, 230, av. 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

http://grenoble-sciences.ujf-grenoble.fr

Région RhôneAlpes

Biologie animale

Le rôle des poils d'éléphant

Le corps des éléphants est couvert de poils épars. Conor Myhrvold, de l'Université de Princeton, aux États-Unis, et ses collègues ont montré que ces poils accroissent notablement les échanges thermiques avec l'air ambiant, et améliorent ainsi la régulation thermique de ces grands animaux.

Le métabolisme produit en permanence de la chaleur, qui doit être évacuée de l'organisme pour éviter la surchauffe. C'est d'autant plus difficile pour les éléphants qu'ils ont le plus petit rapport surface/volume de leur corps parmi tous les mammifères terrestres, et qu'ils vivent sous des climats chauds. Les chercheurs ont calculé les échanges dits convectifs entre l'air et leur peau grâce à des formules empiriques de la mécanique des fluides, dans des cas divers… Quel que soit le scénario considéré, cette peau faiblement poilue perd plus de chaleur qu'une peau glabre. La différence est de cinq pour cent en moyenne, et atteint 23 pour cent quand le vent est faible – précisément quand le refroidissement est le plus difficile.

→ Guillaume Jacquemont

C. Myhrvold et al., PLoS ONE, en ligne le 10 octobre 2012

Pharmacologie

Une molécule anticalvitie ?

Le glaucome est une maladie de l'œil qui se traite notamment par administration de collyres diminuant la pression intraoculaire. Comme les patients utilisant les collyres à base de bimatoprost voient leurs cils s'épaissir, pousser et se multiplier, l'idée est venue que cette molécule pourrait agir contre la chute des cheveux. Valerie Randall et ses collègues, de l'Université de Bradford en Grande-Bretagne, [illegible] follicules pileux en culture ou prélevées sur du cuir chevelu humain, ainsi que sur le pelage du dos de souris : dans tous les cas, la pousse des cheveux ou des poils est stimulée.

Le bimatoprost est un analogue des prostaglandines, molécules ayant notamment des propriétés « contractiles » et que synthétisent toutes les cellules. Les chercheurs [illegible] récepteurs spécifiques aux prostaglandines bloque l'effet du bimatoprost sur la pousse des cheveux. On en déduit que cette molécule agit directement en se liant aux récepteurs du follicule pileux.

→ Bénédicte Salthun-Lassalle

[illegible] octobre 2012

Physico-chimie

Le dioxyde de carbone fragilise la glace

Le dioxyde de carbone (CO_2) présent dans l'atmosphère et en solution dans l'eau pourrait fragiliser la glace *via* la formation de bulles, bien qu'il soit difficile d'estimer l'importance de ce phénomène. Mais le dioxyde de carbone aurait aussi une action à l'échelle moléculaire, les atomes d'oxygène du CO_2, chargés négativement, pouvant interagir avec les atomes d'hydrogène des molécules d'eau (H_2O). En modélisant ce type de liaisons, Zhao Qin et Markus Buehler, du MIT aux États-Unis, ont montré que le CO_2 rompt des liaisons hydrogène et rend la glace plus fragile et moins tenace, c'est-à-dire moins résistante à la propagation des fissures.

Les chercheurs ont modélisé un morceau de glace formé de 288 molécules d'eau, où une fissure est créée en retirant un groupe de molécules. Des molécules de CO_2 sont introduites aléatoirement dans la fissure. Libres de se déplacer dans cet espace, elles se dirigent vers les bords de la fissure, sous l'action des forces de van der Waals, puis forment des liaisons hydrogène avec les molécules d'eau.

De plus, la molécule de CO_2 ne reste pas liée à la même molécule H_2O : elle se déplace de molécule d'eau en molécule d'eau, détruisant ainsi plusieurs liaisons hydrogène sur son passage. Ce mouvement provient du fait que chacun des deux atomes d'oxygène aux extrémités de la molécule de CO_2 tend à établir une liaison hydrogène ; cela crée un mouvement de balancier de la molécule, qui la fait se déplacer de proche en proche. Après le passage de la molécule CO_2, les liaisons hydrogène ne sont pas rétablies. La glace est ainsi fragilisée. Reste à estimer l'impact de ce phénomène à l'échelle de glaciers ou de la banquise.

→ S. B.

Journal of Physics D : Applied Physics, vol. 45, 445302, 2012



© Karl Joss/Shutterstock.com

En défaisant des liaisons entre les molécules d'eau, le dioxyde de carbone réduit la résistance de la glace.

DERNIÈRE minute ...

UN CODE POUR DÉMASQUER LE COUCOU

Les mérions superbes, des oiseaux d'Australie, sont confrontés au parasitage d'œufs de coucous. Leur parade a été révélée par Sonia Kleindorfer, à Adélaïde, et ses collègues : les parents chantent pour leurs œufs. Avant l'éclosion, les oisillons apprennent ainsi un son qu'ils devront reproduire pour quémander de la nourriture. Le poussin coucou, lui, éclot plus tôt et n'a donc pas eu le temps d'apprendre le « mot de passe », sans lequel les parents abandonnent le nid.

DES LANCES DE 500 000 ANS

Des pointes de lances en pierre étaient déjà utilisées il y a 500 000 ans, soit 200 000 ans plus tôt qu'on ne le pensait. C'est ce qu'a montré une équipe internationale, à partir de pointes retrouvées sur le site de Kathu Pan, en Afrique du Sud, dans une couche sédimentaire vieille de 500 000 ans. [illegible] de lances est indiqué par l'usure de ces vestiges, plus prononcée à leur extrémité et symétrique par rapport à l'axe central.

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

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012

Inscription et programme détaillé sur :
http://smai.emath.fr/forum-emploi/

Santé, industrie, environnement, marketing, finance, TOUS LES DOMAINES RECRUTENT !

2e FORUM EMPLOI MATHÉMATIQUES

- Stands recruteurs
- Témoignages
- Informations carrières

11 JANVIER 2013

Conservatoire National des Arts et Métiers
292 rue Saint-Martin - PARIS 3e

12H : CONFÉRENCE GRAND PUBLIC

E. Le Pennec et E. Trélat (Prix F. Klein 2012)

Recherche et industrie : de la puce à l'espace

- Étudiant-e-s ou jeunes diplômé-e-s : venez vous informer sur les débouchés professionnels des cursus, rencontrer les employeurs, déposer des candidatures.
- Entreprises : ingénieur-e-s, chargé-e-s d'études, DRH, présentez vos métiers, des offres de stage, d'emploi ou de thèse.
- Universitaires : venez vous informer, rencontrer des industriels, représenter vos formations et laboratoires.
- Pour tous : informez vous sur les divers aspects du métier de mathématicien-ne, les formations, les besoins des entreprises, les emplois, la recherche universitaire ou industrielle.

CAMILLE
Doctorante CIFRE dans un grand groupe
« J'utilise des techniques d'arrêt optimal sur des processus de Markov pour améliorer les maintenances des équipements vendus par mon entreprise »

FABIEN, bac + 5
ingénieur R&D dans une jeune PME
« Je participe au développement de logiciels de génération automatique de maillage : nos clients font des économies grâce à nos codes car les simulations numériques sont plus rapides »

DELPHINE, bac + 5
Ingénieur CNRS
« J'apporte mon expertise statistique à des chercheurs en géographie physique qui travaillent sur des thèmes variés: éruptions volcaniques, séismes, avalanches... »

Pour concevoir, analyser, décider, optimiser, prévoir, crypter, les entreprises et la recherche ont besoin des mathématiques !

SMAI
amies
AGENCE POUR LES MATHÉMATIQUES EN INTERACTION AVEC L'ENTREPRISE ET LA SOCIÉTÉ
SFdS
SOCIETE FRANÇAISE DE STATISTIQUE

POINT DE VUE

Le tout-anglais, une doctrine obsolète

L'adoption globale de l'anglais comme panacée de la communication internationale est une idée dépassée et aux effets néfastes. Les anglophones sont les premiers à le reconnaître.

Michaël OUSTINOFF

Avec près de 7 000 langues présentes dans le monde, c'est enfoncer une porte ouverte que de souligner l'utilité de disposer d'une langue internationale, *a fortiori* « planétaire ». Mais s'arrêter à cette évidence est un peu court.

En 1990, une grammaire de la langue anglaise nous expliquait tout de go que l'anglais était « the world's most important language ». Aujourd'hui, c'est au sein même du monde anglophone que cette vision des choses est remise en question. Il est curieux qu'en France, où la défense du tout-anglais atteint des sommets, on s'en fasse si peu l'écho. Pourtant, les faits sont là : à l'heure de la mondialisation, les insuffisances du modèle du tout-anglais sont criantes, y compris dans les sciences, qu'elles soient humaines ou « dures ».

Dès 1997, le linguiste David Graddol publiait une étude prospective pour le *British Council* intitulée *The Future of English ? A Guide to Forecasting the Popularity of the English Language*. Le message était clair : le tout-anglais constitue une impasse, et ce pour deux raisons. La première, c'est l'émergence du Brésil, de la Russie, de l'Inde, de la Chine au sein d'un monde multipolaire. En haut de la pyramide, l'anglais est rejoint par l'espagnol, le hindi/urdu, l'arabe ou le chinois. C'est ainsi que le *New York Times* lancera en 2013 une version portugaise à l'intention du Brésil, après avoir lancé une version en 2012. Autrement dit, les Américains n'attendent plus que les Chinois et les Brésiliens se mettent au tout-anglais. C'est là un renversement de situation assez spectaculaire.

La seconde raison invoquée par D. Graddol est que, dans un monde multilingue, ne connaître que l'anglais devient un handicap majeur, car cela empêche d'accéder à de vastes quantités d'information. Le réseau Internet en est l'illustration parfaite. Au début des années 2000, la part de l'anglais y avoisinait 80 pour cent ; en une dizaine d'années, elle est descendue au-dessous de 30 pour cent. Or selon qu'une langue représente près de l'ensemble d'Internet ou seulement le quart, la perspective n'est pas du tout la même.

AU DÉBUT DES ANNÉES 2000, la part de l'anglais sur Internet était d'environ 80 pour cent. Elle est aujourd'hui inférieure à 30 pour cent.

En 2009, c'était au tour de la *British Academy* d'enfoncer le clou dans son rapport *Language Matters* (« La langue, ça compte ») en apportant la preuve, par l'absurde, des méfaits du tout-anglais. Le Royaume-Uni avait décidé en 2004 de rendre optionnelles les langues étrangères à l'école à partir de 14 ans : pourquoi s'encombrer quand on parle déjà la « langue de la mondialisation » ? Selon le rapport, les effets collatéraux de cette politique sont aujourd'hui patents, à commencer dans l'enseignement supérieur et la recherche.

La maîtrise des langues étrangères y joue en effet un rôle central. Dans les humanités et les sciences sociales, il faut s'appuyer sur des études qui ne sont pas traduites notamment en allemand, en français, en espagnol, en italien ou en russe. Ce sont en réalité toutes les disciplines qui sont touchées. Or, affirme le rapport, « un manque de connaissances en matière de langues inflige un handicap certain aux chercheurs de nombreux secteurs du système universitaire britannique, ce qui a pour effet d'affaiblir la compétitivité du système dans son ensemble ».

Même son de cloche à la CBI (*Confederation of British Industry*), l'équivalent du MEDEF français : un rapport de 2012 déplore les lacunes de la Grande-Bretagne en la matière, car « un marché mondialisé exige des compétences en langues ». Et selon une étude réalisée en 2006 pour le gouvernement britannique, le manque à gagner dû aux langues serait d'environ 100 milliards d'euros pour les petites et moyennes entreprises européennes.

D'après la CBI, de quelles langues les entreprises britanniques ont-elles besoin ? En premier lieu, de l'allemand (50 pour cent), mais le français le talonne (49 pour cent), n'en déplaise à ceux qui, en France, ne cessent de prétendre que le français est une langue mineure par rapport à l'anglais... Viennent ensuite l'espagnol (32 %), le mandarin (25 %), le polonais (19 %), l'arabe (19 %), le cantonais (12 %), le russe (11 %), le japonais (11 %), le portugais (3 %) et le

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012

coréen (3e). On est très loin du tout-anglais dont on nous vante les bienfaits…

Cette prise de conscience, dont il existe d'autres exemples, n'a pas lieu qu'en Grande-Bretagne ou aux États-Unis. C'est aussi le cas en Allemagne, où la HRK, la Conférence des présidents d'université, demande à ce que l'on fasse machine arrière sur le tout-anglais. Dans une résolution de 2011, la HRK va jusqu'à parler de « distorsion de la concurrence », les chercheurs qui ne sont pas de langue maternelle anglaise n'étant pas à égalité avec les anglophones pour publier dans les revues scientifiques à facteur d'impact élevé, la plupart en anglais.

On connaît l'adage *Publish in English or perish*. Ce n'est nullement une fatalité. Il y a quelques décennies, le physicien bengali Satyendra Nath Bose, voyant son article rejeté par les revues de langue anglaise, s'adressa en désespoir de cause à Einstein, qui le traduisit en allemand dans la revue *Zeitschrift für Physik*. L'article parut en 1924, donnant naissance à la statistique dite de Bose-Einstein et au terme de bosons, type de particules dont l'une d'elles, le boson de Higgs, a récemment défrayé la chronique.

Avant la Seconde Guerre mondiale, la science était polyglotte. N'est-il pas temps qu'elle le redevienne, et n'est-ce pas ce qui est en train de se produire ? Et plutôt que de préférer le tout-anglais au moment où le monde anglophone le considère comme obsolète, ne vaut-il pas mieux promouvoir un plurilinguisme raisonné et raisonnable, afin de faire face aux enjeux cruciaux de notre époque ? Comme le démontre le Cadre européen commun de référence pour les langues, sorte de guide en vue de l'apprentissage des langues élaboré par le Conseil de l'Europe dès 2001, un tel objectif n'a rien d'utopique. N'est-ce pas là un « investissement d'avenir » stratégique, où la traduction (dont le coût, réputé exorbitant, ne représente en réalité que un pour cent du budget des institutions de l'Union européenne, soit moins de deux euros par citoyen et par an) est appelée à jouer un rôle majeur, puisqu'il est impossible d'apprendre toutes les langues ? Poser la question, c'est y répondre. ■

Michaël OUSTINOFF, maître de conférences à l'Université Paris 3- Sorbonne Nouvelle, est actuellement en délégation à l'Institut des sciences de la communication du CNRS à Paris. Il est l'auteur de **Traduction et communication à l'heure de la mondialisation** *(CNRS Éditions, 2011).*

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

DÉVELOPPEMENT DURABLE

Alimentation durable : agir du champ à l'assiette

Une analyse globale des systèmes alimentaires donne des pistes pour les rendre plus durables.

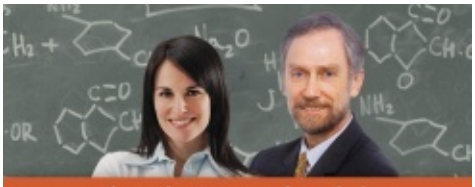
Catherine ESNOUF

Comment nourrir le monde aujourd'hui et demain tout en intégrant la notion de « durabilité » ? Lancé en 2009 par l'INRA (Institut national de la recherche agronomique) et le CIRAD (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement), achevé en 2011, le projet duALIne (Durabilité de l'alimentation face à de nouveaux enjeux) s'est penché sur la question. À l'inverse de nombreuses études, il ne s'est pas focalisé sur l'agriculture, mais a surtout considéré les systèmes alimentaires situés en aval : la transformation, la distribution et la consommation (le régime alimentaire, les quantités consommées…).

Quelque 125 chercheurs du secteur public et de l'industrie ont ainsi dressé l'état des lieux des systèmes alimentaires à l'échelle de la planète. Un exemple illustre bien la nécessité de prendre en compte ces systèmes de façon globale : en l'an 2000, aux États-Unis, l'agriculture ne représentait que 22 pour cent de la consommation d'énergie liée à l'alimentation, le reste était lié aux diverses opérations en aval : 13 pour cent pour le transport, 31 pour cent pour la préparation domestique (stockage, cuisson…), etc.

Le transport, notamment, entraîne des flux considérables, les produits alimentaires représentant 20 pour cent des flux de marchandises ; s'y ajoutent les déplacements des consommateurs vers les lieux d'achat. Précisons qu'une plus grande distance parcourue n'implique pas toujours un impact environnemental supérieur. La viande de mouton congelée importée par bateau de Nouvelle-Zélande, par exemple, peut avoir moins d'impact que la viande locale, l'agriculture y étant pratiquée de façon extensive et le transport par bateau étant écologique.

Le projet duALIne a apporté de nouveaux éléments à plusieurs controverses majeures, telles que l'impact carbone (la quantité de gaz à effet de serre émise par la production, la transformation et le transport des produits, en équivalent CO_2) d'une alimentation majoritairement carnée. Celle-ci est réputée entraîner plus d'émissions de gaz à effet de serre qu'une alimentation fondée sur des



Nouveau 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

produits végétaux. La réalité est plus complexe. Prenons la consommation française moyenne de viande et de charcuterie, qui est de 100 grammes par jour et par personne (sans compter les plats préparés). Une réduction de 20 pour cent de cette consommation entraînerait une baisse de quatre pour cent des émissions de gaz à effet de serre sans compensation calorique, et des émissions identiques si l'on compensait cette réduction par des fruits et légumes. Si l'on réduisait la consommation de moitié, les émissions baisseraient de 12 pour cent sans compensation calorique et de 2,7 pour cent avec compensation. La baisse serait donc réelle mais faible.

Cela peut sembler étonnant, car les produits animaux sont associés à plus d'émissions de gaz à effet de serre par kilogramme que les produits végétaux. Cependant, ces derniers doivent être ingérés en quantité supérieure. De façon plus générale, l'analyse de différents régimes alimentaires français montre qu'en moyenne, les régimes nutritionnellement adéquats (apportant la quantité de calories et de nutriments nécessaires) sont associés à des émissions aussi importantes (cas des hommes), voire légèrement plus (cas des femmes), que les régimes nutritionnellement inadéquats.

Ces résultats restent à confirmer par des études plus poussées, et d'autres impacts environnementaux que les gaz à effet de serre doivent être pris en compte (consommation d'eau, surfaces mobilisées...). Quoi qu'il en soit, une modification des types d'aliments consommés ne suffira sans doute pas à réduire notablement les émissions de gaz à effet de serre associées à l'alimentation : il faudrait aussi diminuer les quantités totales produites. Si ce constat était confirmé, il remettrait en cause de nombreuses études et poserait la question de la faisabilité d'une telle limitation : dans quelle mesure, sous quelles conditions et dans quels délais les acteurs économiques du secteur agro-alimentaire et les consommateurs y seraient-ils prêts ?

Il faudrait notamment convaincre les « surmangeurs » – ceux qui mangent plus que les 2 000 kilocalories par jour qu'on estime nécessaires (avec bien sûr des variations en fonction du sexe, de la taille...) – de consommer moins. Un autre moyen, plus indolore, de diminuer les quantités produites serait de limiter les pertes tout au long de la chaîne alimentaire. Au niveau mondial, elles représentent 30 à 40 pour cent de la masse des denrées. En Europe, les produits jetés chaque année tout au long de la chaîne de l'alimentation pèsent en moyenne 280 kilogrammes par personne. Une partie d'entre eux sont difficiles à récupérer, tels les os ou les épluchures, mais certains rejets correspondent à un gâchis. Selon une étude de l'ADEME

LES PERTES REPRÉSENTENT
30 à 40 pour cent de la masse des denrées alimentaires.

(Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) réalisée en 2007, chaque consommateur français jette plus de 72 kilogrammes de produits par an, dont au moins 20 kilogrammes sont gaspillés (sept kilogrammes d'aliments encore sous emballage et 13 kilogrammes de restes comestibles).

Le projet duALIne a dégagé de nombreuses pistes d'études : quelles incitations (du type taxes et subventions) et quelles modifications des normes sociales permettraient l'adoption de nouveaux comportements ? Comment valoriser les déchets liés à l'alimentation ? Ces pistes donneront lieu à des programmes de recherche publics et privés, visant à augmenter la durabilité des systèmes alimentaires. L'INRA coordonne à ce titre un nouveau réseau européen consacré à ce sujet. L'un des défis sera d'intégrer les impératifs alimentaires dans une agriculture sollicitée par d'autres applications telles l'énergie (biocarburants) et la chimie (substituts aux produits pétrochimiques). La tâche est compliquée par le fait qu'aujourd'hui, selon le critère retenu (acceptabilité sociale, limitation des impacts environnementaux, etc.), les préconisations peuvent différer. Dans un premier temps, nous devrons donc améliorer nos méthodes d'évaluation de la durabilité... ■

Catherine ESNOUF est directrice scientifique adjointe en charge de l'alimentation à l'INRA.

C. Esnouf *et al.* (coordinateurs), ***Pour une alimentation durable***, Quæ, 2011.

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012

Lavoisier



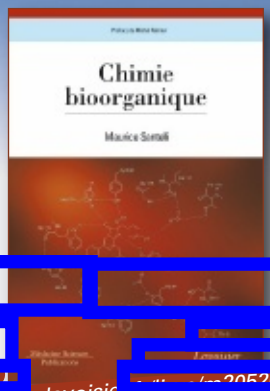
R. DAJOZ
336 pages, 17 x 24 cm, 2012
ISBN : 978-2-7430-1376-9, **79 €**



C. FRELIN, B. SWYNGHEDAUW
178 pages, 16 x 24 cm, 2011
ISBN : 978-2-257-20423-3, **40 €**



L. CHATENOUD, J.-F. BACH
569 pages, 19,4 x 26 cm, 2012
ISBN : 978-2-257-20529-2, **49 €**



M. SANTELLI
269 pages, 17 x 24 cm, 2012
ISBN : 978-2-257-20526-1, **59 €**



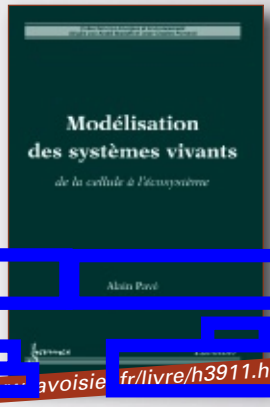
B. ALBERTS *et al.*
864 pages, 21 x 27,5 cm, 3e éd. 2012
ISBN : 978-2-257-20402-8, **85 €**



A. CHANCHOLLE, C. SUREAU
160 pages, 15 x 24 cm, 2011
ISBN : 978-2-257-20431-8, **51 €**



T. STRACHAN, A. READ
810 pages, 21 x 27,5 cm, 2012
ISBN : 978-2-257-20419-6, **125 €**



A. PAVÉ
634 pages, 16 x 24 cm, 2012, relié
ISBN : 978-2-7462-3911-1, **195 €**



G. DAVID, R. HENRION, P. JOUANNET, C. BERGOIGNAN-ESPER
246 pages, 15,5 x 24 cm, 2011
ISBN : 978-2-257-20449-3, **61 €**



O. VANBÉSIEN
ISBN : 978-2-7462-3137-, **110 €**



Sous la direction de J. TROCCAZ
448 pages, 16 x 24 cm, 2012, relié
ISBN : 978-2-7462-3218-1, **155 €**



C. GROSSET-FOURNIER, A. DACHEUX
384 pages, 15,5 x 24 cm, 2012
ISBN : 978-2-7430-1449-0, **59 €**

Médecine Sciences Publications

Editions TEC & DOC

Hermes Science

En vente chez votre libraire, par correspondance chez Lavoisier ou sur

www.lavoisier.fr

Lavoisier • 14, rue de Provigny • 94236 Cachan Cedex

VRAI OU FAUX

Être ébloui par les phares d'une voiture, est-ce une fatalité ?

Non. Pour l'éviter, il suffirait de doter les phares et les pare-brise de filtres polarisants circulaires de sens inverses. Cependant, ces filtres devraient être installés sur tous les véhicules…

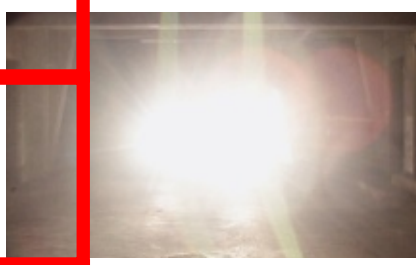
Laurent Laloum

De nombreux conducteurs roulent toujours en feux de route ou ont des feux de croisement mal réglés. Les automobilistes venant en sens inverse sont alors éblouis, ce qui constitue une gêne importante. Celle-ci s'accroît à mesure que l'on vieillit, car le délai pour récupérer une bonne vue après l'éblouissement augmente avec l'âge. Même quand le véhicule passe en feux de croisement et que ceux-ci sont bien réglés, la lumière reçue reste fatigante. Pourrait-on la masquer ?

Les systèmes de séparation entre les deux sens de circulation (barrières, haies…) remplissent ce rôle. Toutefois, on ne peut les installer que dans certains cas (surtout sur les autoroutes), ils sont coûteux et leur efficacité est variable.

On pourrait fabriquer un pare-brise « intelligent » à cristaux liquides, capable de s'opacifier point par point : il mesurerait en temps réel la position des yeux du conducteur et celle des sources de lumière éblouissantes (les phares, le soleil et les reflets), puis calculerait les pixels à opacifier. Un tel système serait complexe, mais réalisable dès maintenant. En revanche, il serait trop cher pour être généralisé. Plus simples, mais moins confortables, des lunettes ou des surlunettes à cristaux liquides pourraient être élaborées sur le même principe.

On envisage un système alternatif à la fois bon marché et confortable. Il consisterait à poser sur les phares et le pare-brise des filtres polarisants circulaires d'orientations opposées (droite ou gauche) : le pare-brise intercepterait la lumière émise par les phares, tout en laissant passer les images de ce qu'ils éclairent. En effet, un filtre polarisant circulaire est un peu comme un écrou à pas de vis à droite ou à gauche, qui ne laisse passer que la lumière « ondulant





© Laurent Laloum

DES FILTRES POLARISANTS GAUCHES devant les phares, associés à un filtre polarisant droit sur le pare-brise (ici sur l'appareil photo), réduiraient nettement l'éblouissement.

dans le même sens » que lui (la lumière est une onde électromagnétique). Dans notre cas, la fraction de la lumière des phares qui franchit le premier filtre a une polarisation inverse de celle que laisse passer le pare-brise. Elle est donc bloquée par ce dernier (en pratique, elle ne l'est jamais totalement, le filtre n'étant pas parfait).

La lumière des phares doit être atténuée avant de parvenir aux yeux d'un conducteur, mais elle doit aussi éclairer convenablement les alentours. Est-ce bien le cas ? Chaque fois qu'une lumière polarisée se réfléchit sur une surface, soit sa polarisation disparaît, soit elle s'inverse (prenant alors la même orientation que le filtre du pare-brise), selon la nature de la surface (dans le second cas, la surface est dite à réflexion métallique). Dans tous les cas, une fraction importante de la lumière franchit le pare-brise et les objets sont visibles pour le conducteur.

Les inconvénients d'un tel système ne sont pas rédhibitoires. Les filtres polarisants feraient perdre une partie de la luminosité, risquant de nuire à la visibilité et à l'efficacité des appels des phares, mais diverses adaptations pourraient y remédier : augmentation de la puissance des phares, filtres volontairement imparfaits pour trouver un compromis entre visibilité et éblouissement)… L'idée d'utiliser la polarisation a déjà été évoquée il y a plusieurs dizaines d'années. Elle n'a pas été appliquée pour diverses raisons techniques, surmontables aujourd'hui. L'éblouissement devenant un problème important avec le vieillissement de la population, les constructeurs automobiles devraient se pencher à nouveau sur ce type de système – tout comme les législateurs, car il ne pourra fonctionner que si tous les véhicules en sont dotés… ■

Laurent LALOUM est neuro-ophtalmologiste et strabologue à Paris.
www.strabisme.

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012

ANALYSE ET MISE EN FORME DES DONNÉES

NOUVELLE VERSION



ORIGIN® 9

Data Analysis and Graphing Software



- Une interface intuitive
- Une gestion souple des données
- Des graphiques de qualité publication
- Des outils de programmation

Disponible pour Windows.

www.ritme.com/fr/product/origin

RITME - Distributeur Officiel - 24, bd Haussmann - 75009 Paris - France
Tél. : +33 (0)1 42 46 00 42 • Fax : +33 (0)1 42 46 00 33
info@ritme.com • www.ritme.com

Sauf indication contraire : logiciel et documentation en anglais, et livraison par téléchargement ou par CD-Rom.
© Copyright 2012 RITME. Origin est une marque déposée par OriginLab.
Toutes les marques déposées sont la propriété de leurs sociétés respectives.

RITME
NOTRE MÉTIER : FACILITER LE VÔTRE
Distributeur officiel en France

Aux LIMITES de l'être humain

François Savatier

Les performances extrêmes réalisées par certains individus sont étonnantes et, parfois, mystérieuses. En voici un petit florilège et quelques clefs.

Depuis que les records de toutes sortes, des plus stables aux plus idiots, sont recensés, on cerne mieux les capacités ultimes de l'homme. Courir à une vitesse approchant 40 kilomètres par heure, ne pas respirer pendant plus de 11 minutes, détecter une molécule odorante parmi 10 000 milliards d'autres, mémoriser une suite de 10 000 chiffres, etc. : l'anthologie qui suit présente dix exemples de performances hors du commun. Ces prouesses d'aujourd'hui donnent une idée des capacités physiologiques et psychologiques auxquelles pourrait prétendre l'homme 2.0, cet être transformé et augmenté par les technologies qui pourrait nous succéder.

Des yeux de lynx


© Peshkova/shutterstock.com

Le champion automobile Sébastien Loeb est réputé avoir une acuité visuelle supérieure à 14/10. Qu'est-ce que cela signifie ? Par convention, une personne ayant une acuité visuelle de 10/10 est capable de distinguer deux points séparés par une minute d'arc, soit deux points écartés de 0,3 millimètre vus de un mètre, ou de 1,46 millimètre vus de cinq mètres. Un individu ayant une acuité visuelle de 15/10 distingue deux points distants de 2 millimètre à un mètre ou de 2 centimètres à 100 mètres, ce qui est nettement plus petit qu'un obstacle sur la route…

“ 16/10, ”

Pour qu'un œil discrimine deux points voisins, il faut que leurs images sur la rétine se forment sur deux cônes photorécepteurs différents et séparés par un cône non stimulé. Dès lors, théoriquement, c'est-à-dire quand l'œil est exempt de défauts optiques, les 2,5 micromètres qui séparent deux photorécepteurs sur la région centrale de la rétine permettent de distinguer deux points séparés par une demi-minute d'arc (pour une distance focale oculaire typique de 17 millimètres), soit 0,73 millimètre à cinq mètres, ou 1,5 centimètre à 100 mètres. Cela correspond dans le système français à une acuité visuelle de 20/10 ! Cependant, même quand l'œil est parfait, la diffraction de la lumière sur les bords de la pupille réduit cette performance théorique, qui n'est que très rarement approchée. Tout de même, les ophtalmologues constatent que, chez les jeunes gens, l'acuité visuelle peut atteindre 16/10. Et chez les lynx ?

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012


© JordiDelgado/shutterstock.com

Vite comme ceci… ou comme cela

Cent mètres en 9,58 secondes pour le Jamaïcain Usain Bolt (soit 37,6 km/h) ou 42,195 kilomètres en 2 heures 3 minutes et 38 secondes pour le Kényan Patrick Makau (20,5 km/h). Qu'est-ce qui distingue ces deux régimes de course, le sprint et le marathon ?

Les muscles impliqués mettent en jeu trois métabolismes distincts. Le premier, le métabolisme anaérobie alactique, consiste en une hydrolyse de l'ATP (l'adénosine triphosphate, qui stocke l'énergie cellulaire) en l'absence d'oxygène, et ne suffit que pour deux ou trois secondes de contraction musculaire explosive. Dans un effort de plus de cinq secondes, comme au cours d'un sprint, s'enclenche le métabolisme anaérobie lactique, qui permet de regénérer de l'ATP à partir de la créatine, un dérivé d'acide aminé. Finalement, lorsque l'effort se poursuit au-delà de

“ 37,6 km/h „

quelques dizaines de secondes, la respiration musculaire, c'est-à-dire la production continue d'ATP en présence d'oxygène par des usines cellulaires (les chaînes respiratoires des mitochondries), prend le relais. Plus efficaces en conditions anaérobies, les fibres musculaires dites rapides sont plus volumineuses que les fibres dites lentes, elles-mêmes plus performantes en métabolisme aérobie. Usain Bolt est sans doute né avec davantage de fibres rapides, mais les a aussi multipliées au cours de sa jeunesse dans les écoles jamaïcaines dont les programmes sportifs ont produit les meilleurs sprinteurs…

Patrick Makau a aussi subi un entraînement adéquat pour développer ses fibres lentes. Cet entraînement avait déjà commencé quand il était enfant : il est né au sein de la population kényane rurale, dont les écoliers courent de nombreux kilomètres chaque jour pour rejoindre leurs écoles… lesquelles ont fourni les meilleurs marathoniens mondiaux.

Un odorat très fin

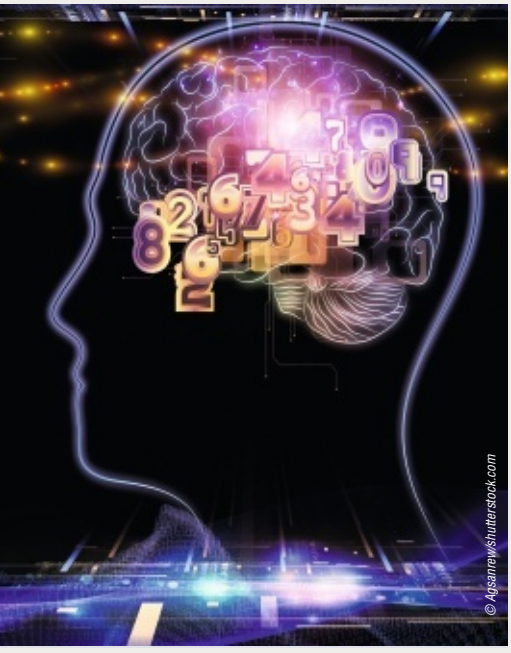
Un créateur de parfums est entraîné à reconnaître les odeurs de ses matières premières. Certains de ces « nez » apprennent ainsi à en maîtriser plusieurs centaines, voire des milliers. Pour autant, la plupart des stimulus olfactifs sont complexes, de sorte qu'avoir un odorat fin consiste davantage à déceler une odeur parmi des centaines, plutôt que la reconnaître quand elle est pure.

Les goûteurs de vin professionnels sont dans cette situation, lorsqu'ils cherchent par exemple à repérer la présence d'une composante olfactive désagréable dans la boisson dégustée. Sophie Tempère et ses collègues de l'Université de Bordeaux ont testé, sur dix molécules odorantes clefs, les capacités olfactives de 200 dégustateurs professionnels, et mis en évidence leur extrême variabilité. Les chercheurs ont découvert que chez ces experts, la capacité à détecter une odeur peut varier, en fonction de la concentration, d'un facteur 1 000. En d'autres termes, certains sont 1 000 fois

“ 5 ng/L „

plus sensibles que d'autres à une molécule donnée : ils détectent jusqu'à quelques nanogrammes par litre seulement. Pour autant, il n'existe pas de dégustateurs sensibles à toutes les odeurs : ils peuvent être très sensibles à l'une et indifférents à une autre. Un manque de sensibilité peut s'expliquer en partie par des variations génétiques (portant sur les gènes qui codent les récepteurs olfactifs), mais aussi par un manque de familiarité. Il est donc possible d'améliorer cette capacité par un entraînement spécifique, ce qui est utile, par exemple pour rechercher des défauts caractéristiques dans le vin. Cependant, les goûteurs professionnels s'entraînent surtout à former, à partir de la répétition de leurs sensations, des représentations mentales de types de vin. Que ces représentations correspondent à des sensations différentes d'un dégustateur à l'autre est sans importance, car cela ne les empêche pas de se comprendre quand ils parlent du même vin.


© Hasloum/shutterstock.com



Calculer de tête

Shakuntala Devi est une prodige du calcul mental si… prodigieuse que tous les autres calculateurs doutent de ses performances. En 1977 à Dallas, elle aurait calculé la racine cubique de 188 138 517 plus vite qu'un ordinateur. En 1980, à Londres, elle a réalisé en 28 secondes la multiplication 7 686 369 774 870 × 2 465 099 745 779, deux nombres à 13 chiffres choisis au hasard par ordinateur. Comment a-t-elle obtenu le résultat exact (18 947 668 177 995 426 462 773 730) ? Gaston Darboux, mathématicien qui a étudié au XIXe siècle le calculateur prodige Inaudi, avait conclu : « Signalons tout d'abord que les résultats dont nous avons été témoins reposent avant tout sur une mémoire prodigieuse. […] Dans une de nos réunions, nous avons donné à Inaudi un nombre de 32 chiffres. Huit jours après, il pouvait nous le répéter, bien que nous ne l'eussions pas prévenu… » Ainsi, les calculateurs prodiges sont des mnémonistes des chiffres ; ils appliquent, dit Darboux, des « procédés, à coup sûr très simples […] imaginés par le calculateur lui-même ».

Quels types de procédés ? « Inaudi ajoute facilement deux nombres de 4 ou 5 chiffres ; mais il procède successivement, ajoutant les deux premiers, puis la somme, au suivant, et ainsi de suite. Il commence

“ 3 √188 138 517 „

toujours l'addition par la gauche, comme le font aujourd'hui les Hindous, au lieu de la commencer par la droite comme nous. » Manifestement, c'est la facilité avec laquelle les calculateurs prodiges mémorisent les résultats intermédiaires qui leur permet d'appliquer des méthodes de calculs simplifiées (par eux), ou héritées d'une tradition arithmétique millénaire, comme c'est peut-être le cas de S. Devi.

Se faire entendre de loin

Un chanteur wagnérien émet des sons dont l'intensité est comparable à celle d'un réacteur d'avion qui décolle. En termes

“ 120 décibels „

acoustiques, cela revient à dire qu'il atteint 120 décibels à un mètre, soit une pression d'environ 20 pascals sur le tympan. C'est considérable… mais nous apprécions le chanteur pour les performances et la beauté de sa voix plutôt que pour sa puissance !

La beauté de la voix dépend en particulier de son timbre, c'est-à-dire de la façon dont la résonance de sa voix dans le cavité pharyngo-buccale renforce certains harmoniques (les fréquences multiples entières de la fréquence fondamentale du son). Toutefois, le timbre étant propre à chaque individu, les grands interprètes dotés d'un timbre plaisant ne font aucun effort technique pour l'acquérir.

Ils en font en revanche pour se faire entendre des spectateurs du dernier rang dans d'immenses salles de concert. Pour ce faire, ils se sont entraînés afin de placer leur « formant », c'est-à-dire le maximum d'énergie de leur spectre sonore, aux alentours de 3 000 hertz. Cette plage de fréquences est en effet celle de l'acuité auditive optimale. C'est ce qui permet de chanter sans microphone malgré un orchestre de 80 à 100 musiciens, et ce sans forcer la voix. Les chanteurs parviennent ainsi à émettre des sons de très faible intensité (pianissimi) qui portent néanmoins jusqu'au dernier rang.

Insomnies et hypersomnies

En 2007, le Britannique Tony Wright est resté éveillé sous la surveillance d'une caméra durant 266 heures, soit plus de 11 jours. Son objectif : Dépasser le record de privation de sommeil de 264 heures de Randy Gardner, établi en 1964 sous la surveillance de William Dement, médecin et fondateur du premier Centre du sommeil au monde, à l'Université Stanford. W. Dement avait alors étudié de près les effets de la privation de sommeil sur R. Gardner, constatant que ce dernier restait capable, au bout de

“ 11 jours „

de mieux se servir que lui d'une batte pour renvoyer une balle…

Plus sérieusement, W. Dement nota aussi des changements cognitifs et comportementaux : outre une fatigue générale et des sautes d'humeur, il constata une perte notable de la mémoire immédiate, une tendance à la paranoïa, des accès de délire et même de hallucinations… Cette expérience visait à étudier les effets de la privation extrême de sommeil qui est un tout autre type de privation que celle, chronique mais partielle, dont souffrent les très nombreux insomniaques. Tandis qu'environ un tiers des adultes souffrent de troubles occasionnels du sommeil, dix pour cent sont harassés par une insomnie chronique.

Il existe au moins neuf sortes d'insomnies, mais il est admis que les causes les plus fréquentes de mauvais sommeil sont, d'une part, les douleurs et les digestions difficiles, d'autre part, le stress, les angoisses et les troubles de l'humeur. Ces causes sont à l'origine des insomnies primaires dont souffrent 20 à 30 pour cent des Français…

L'hypersomnie, le contraire de l'insomnie, peut soit être liée à une autre maladie – par exemple la narcolepsie qui provoque des endormissements le jour et des accès de faiblesse musculaire –, soit prendre la forme de l'hypersomnie idiopathique, qui allonge le sommeil nocturne et rend le réveil difficile. Plus rares, les hypersomnies ne touchent qu'environ une personne sur 2 000, et ne sont guère diagnostiquées.

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012

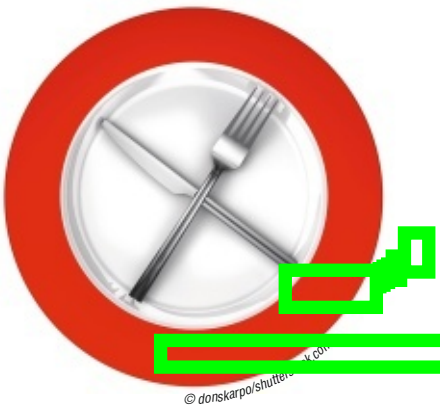
Sans boire ni manger

Un être humain en bonne santé tient en général huit jours sans manger ni boire, et 40 s'il boit ; toutefois, des cas de survie pendant des durées doubles ont été rapportés. Certains mystiques, telle la catholique Marthe Robin, qui aurait vécu plus de 50 ans sans s'alimenter, ou le yogi Prahlad Jani, qui prétend ne plus s'être alimenté depuis 70 ans, entretiennent l'association répandue entre jeûne et spiritualité. Quoi qu'il en soit, il est vraisemblable que la faculté de jeûner sans séquelle a été sélectionnée au cours de l'évolution humaine : les exemples abondent dans l'histoire, et les anorexiques, voire les mannequins, en sont la preuve vivante.

La capacité à modifier son métabolisme pour conserver son énergie passe notamment par la combustion des graisses de réserve (des triglycérides). En l'absence d'insuline (pas de sécrétion par le pancréas, puisque pas d'absorption de glucose), l'hydrolyse des triglycérides aboutit à l'acétyl-coenzyme A. Ce dernier ne peut être incorporé dans le cycle de Krebs, métabolisme cellulaire qui produit de l'énergie sous forme d'adénosine triphosphate (ATP). Le métabolisme de l'acétyl-coenzyme A est alors dévié vers la formation de corps cétoniques (acide acétoacétique, acide β-hydroxy-butyrique et acétone), seules sources d'énergie utilisables par le cerveau en l'absence de glucose.

“ 8 jours ”

Quand le jeûne se poursuit au-delà de plusieurs semaines, l'organisme se met en « hibernation » (diminution du métabolisme de base). À mesure que les réserves graisseuses s'épuisent, la dégradation des protéines musculaires libère des acides aminés qui entrent dans le cycle de Krebs. Modulée par la génétique, l'efficacité de la mise en place de ces mécanismes de survie est très variable d'un individu à l'autre. De nombreux gènes seraient à la fois impliqués dans ces mécanismes et dans l'épidémie d'obésité. Il semble que nous soyons davantage faits pour jeûner de temps en temps que pour manger à satiété trois fois par jour !



© donskarpo/shutterstock.com



© Dudarev/shutterstock.com

Un bain dans la glace

Le 23 janvier 2009, le Néerlandais Wim Hoff est resté 1 heure 42 minutes et 22 secondes nu dans un récipient empli de 700 kilogrammes de glaçons. Pareil séjour dans la glace, comparable à ceux qui tue les alpinistes pris dans une avalanche, aurait pu aboutir à la mort par hypothermie. Comment W. Hoff résiste-t-il ?

Avec neuf autres chercheurs, Maria Hopman de l'Université de Nimègue, aux Pays-Bas, a suivi l'état de W. Hoff pendant une immersion de 80 minutes dans la glace et l'a comparé à celui de 112 autres sujets ayant déjà participé à des expériences comparables. Pour elle, il est clair qu'une personne n'ayant pas l'entraînement de W. Hoff mourrait d'hypothermie dans les conditions qu'il supporte apparemment sans efforts démesurés. Pour y parvenir, W. Hoff emploie une technique méditative inspirée du yoga, qu'il nomme le « feu intérieur ».

“ 102 min ”

Selon le physiologiste Dominique Langin de l'INSERM et du CHU de Toulouse, il est probable que la technique élaborée par W. Hoff lui sert avant tout à contrôler la douleur due au froid. Les effets bénéfiques de la méditation mis à part, sa résistance extrême au froid ne peut qu'être liée à une constitution exceptionnelle. L'être humain a en effet trois façons de résister au froid : en s'isolant par de la graisse sous-cutanée, en frissonnant, ou en activant son tissu adipeux brun.

L'électroencéphalogramme subi par W. Hoff pendant son immersion dans la glace a trahi une activité musculaire, suggérant que ses muscles produisent de la chaleur en frissonnant. Les chercheurs hollandais ont par ailleurs relevé chez W. Hoff une forte circulation de catécholamines. Or ces neurotransmetteurs jouent un rôle essentiel dans l'activation du tissu adipeux brun, qui produit de la chaleur quand il est activé. Jusqu'à récemment, ce tissu n'était réputé présent que chez les bébés, mais on vient de le mettre en évidence chez des adultes. Il est donc plausible que W. Hoff, de par son patrimoine génétique et son entraînement acharné au froid, a développé plus de tissu adipeux brun que la moyenne de la population, et qu'il sait aussi l'activer mentalement.

Mémoires phénoménales

Le mnémoniste chinois Lu Chao est le détenteur du record de mémorisation de décimales de π. En 24 heures et 4 minutes, il a réussi à réciter 67 890 décimales du nombre π, commettant une erreur à la 67 891e décimale… Il aurait mis un an pour mémoriser 100 000 décimales. Pour comparaison, le record français du même sport est Fabrice Lamborelle, qui a récité 555 décimales en 2001.
Et il existe aussi des records de mémorisation des décimales de *e*, de la racine carrée de 2, de nombres binaires, de nombres dictés, de nombres écrits, de dates historiques, de mots aléatoires, de paires jamais publiés de cartes de jeu, etc.

Toutes ces performances de facilités naturelles qui expliquent leur intérêt pour ce type de performances mentales, les mnémonistes s'entraînent aussi et utilisent des moyens mnémotechniques.

“ 67 890 décimales ”

Le Rennais Vincent Delourmel, par exemple, emploie la méthode des lieux : elle consiste à définir des repères mentaux qui aideront à s'y retrouver dans la masse d'informations à mémoriser, puis à les associer mentalement à des lieux familiers ou bien d'un parcours parfaitement connu. Dans ses jeux de mémorisation de séries de cartes, V. Delourmel emploie par exemple une succession de stations successives dans les pièces de son logement.

Cette méthode peut être amplifiée en associant des chiffres aux repères mentaux. V. Delourmel, qui apprend actuellement une encyclopédie de 600 pages, procède en associant au numéro de chaque page des images mentales représentant ce qui y est traité.

Après, il reste le travail de mémorisation, pour lequel il n'y a qu'un secret : y passer du temps. Et là, les performances dépendant de l'entraînement mais aussi de facilités innées : V. Delourmel estime ainsi qu'il lui faudra quelque 200 heures pour mémoriser son encyclopédie ; l'Allemand Simon Reinhard, pour sa part, n'a besoin que de 21,19 secondes pour mémoriser l'ordre d'un jeu de 52 cartes.



© Pixelfabrik/shutterstock.com

Retenir sa respiration

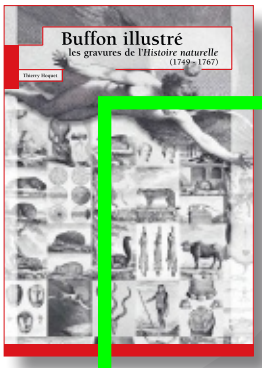
Deux hommes sont déjà restés volontairement plus de dix minutes sans respirer : l'Allemand Tom Sietas (10 minutes et 11 secondes) et le Français Stéphane Mifsud (11 minutes et 52 secondes). Ces performances d'apnée statique, qui se pratique couché sur le ventre dans l'eau, le visage vers le fond, restent mal comprises.

“ 11 mn 52 s ”

L'être humain est doté d'un système d'alarme chimique, mettant en jeu des récepteurs spécialisés dans la détection de l'oxygène et du dioxyde de carbone dans l'air des poumons. Pourtant, l'alarme qui inciterait le plus à reprendre sa respiration ne serait pas liée à la composition de l'air ou à la quantité emmagasinée. De fait, les capacités pulmonaires des deux hommes sont très différentes (11 litres pour le Français et 7 litres pour l'Allemand), en dépit d'un temps d'apnée similaire. Les apnéistes parviennent en fait à arrêter la commande rythmique respiratoire imposée par le tronc cérébral (situé à la base du cerveau) et transmise aux muscles de l'appareil respiratoire. Selon les dernières recherches, l'activité corticale volontaire nécessaire à l'arrêt de la respiration entraînerait une contraction de certains muscles, et particulièrement du diaphragme, qui sépare les cavités thoracique et abdominale. C'est la fatigue musculaire qui en résulte qui donnerait l'alarme au cerveau. Seule une volonté de fer, obtenue par entraînement mental, permettrait aux apnéistes de maintenir cette contraction prolongée du diaphragme.


© EpicStockMedia/shutterstock

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012



Buffon illustré

les gravures de l'*Histoire naturelle* (1749-1767)

Thierry **Hoquet**

Le *Buffon illustré* rassemble en un format maniable l'intégralité des 599 illustrations des quinze premiers tomes consacrés aux mammifères.
En première partie, une étude historique et épistémologique dégage les principaux caractères et la grande harmonie de ce corpus, en le comparant à d'autres ouvrages illustrés (Ruysch ou Perrault) ou au contraire privés d'images (Linné). À tirer ainsi les leçons de l'illustration pour la lecture de l'*Histoire naturelle*, on est alors surpris de découvrir la profonde unité de l'ouvrage, à travers les contributions des différents collaborateurs : Buffon bien sûr, Daubenton évidemment, mais aussi de Sève.

ISBN 978-2-85653-601-8 • format 170 x 240 mm • 620 fig. • 816 p. • 59 € TTC

L'histoire des sciences naturelles de Cuvier



vingt-quatre leçons de l'Antiquité à la Renaissance

Nouvelle édition de Theodore W. **Pietsch**

L'édition de *L'histoire des sciences naturelles depuis leur origine jusqu'à nos jours* est présentée ici pour la première fois en version bilingue. Ce volume, amplement annoté et commenté, est le premier d'une série de cinq tomes regroupant les cours professés par Georges Cuvier de 1829 à 1832. Cette étude, éblouissante par son envergure et son degré de précision, couvre de manière chronologique l'histoire des sciences naturelles sur une période de plus de trois millénaires. Cuvier parlait couramment plusieurs langues, notamment l'anglais, l'allemand, l'espagnol, et le latin. Il était donc bien préparé pour rechercher des documents de première main et interpréter la littérature scientifique européenne. Cet ouvrage témoigne de la connaissance encyclopédique de Cuvier, de son expertise en matière de littérature scientifique et historique, et de son incroyable mémoire. En outre, cet ouvrage se réfère à un riche corpus de littérature ancienne qu'il est difficile de trouver ailleurs. Cette extraordinaire mine d'information donne ainsi un aperçu unique du concept des sciences naturelles vu par Cuvier et de l'envergure et du progrès de cette entreprise humaine. Grâce à cette œuvre, Cuvier comble une lacune importante dans l'histoire de la pensée philosophique, entre Carl von Linné et Charles Darwin.

Bilingue anglais/français • ISBN 978-2-85653-684-1
170 x 240 mm • 50 fig. • 734 p. • 49 € TTC

L'extinction d'espèce



histoire d'un concept & enjeux éthiques

Julien **Delord**

« Durant les neuf derniers millénaires, l'humanité s'est conduite en tant qu'espèce pionnière envasive. Cette espèce est individualiste, agressive et envahissante. Elle tente d'exterminer ou de supprimer d'autres espèces ». Et en toute inconscience, pourrait-on ajouter au constat implacable du philosophe Arne Naess ! Comment cet événement écologique massif, cette destruction inconsidérée de nos espèces-sœurs a pu rester si longtemps invisible et demeurer si obstinément impensée ? À moins que les tentatives de reconnaissance et de formalisation de ce phénomène ne se soient heurtées à des résistances d'ordre théologique, scientifique et culturelle profondément ancrées. Mais alors, comment s'assurer que cette « sixième extinction de masse », en tant que conséquence (éco-) logique du développement de l'espèce humaine, peut légitimement faire l'objet d'une condamnation morale ? Sur quelles bases éthiques fonder la conservation des espèces et proposer une norme de vie commune au sein de l'odyssée de l'évolution ? C'est en réponse à ces questionnements essentiels où s'entrecroisent les perspectives millénaires de l'histoire environnementale des civilisations humaines et l'urgence de la crise de la biodiversité contemporaine que ce livre suggère nombre d'éclaircissements historiques et philosophiques à même de nourrir une indispensable réflexion écologique.

ISBN 978-2-85653-656-8 • format 170 x 240 mm
140 fig. couleur • 603 p. • 45 € TTC

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

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES DU MUSÉUM

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

De l'humain au TRANSHUMAIN

Jean-Michel Besnier

Après l'homme réparé, puis l'homme augmenté, l'union intime de la technologie et de l'être humain engendrera-t-elle une espèce nouvelle, qualifiée de transhumaine ? Certains courants de pensée le prônent.



Dans un article du magazine américain *Popular Science*, le journaliste Ryan Bradley raconte que l'on demanda à un chirurgien esthétique controversé, Joe Rosen, s'il accepterait de greffer des ailes à un patient qui le lui demanderait. Percevant sans doute l'arrière-pensée de son interlocuteur, J. Rosen répondit lui-même par quelques questions : « Qui n'essaie pas d'envoyer ses enfants dans les meilleures écoles dans l'espoir d'améliorer leurs capacités ? Qui ne s'entoure pas d'une carapace de métal pour foncer sur la route à des vitesses défiant la mort ? Nous nous sommes transformés à des fins de beauté ou de pouvoir et tant que nous ne causons de mal à personne, pourquoi devrions-nous cesser de le faire ? » Pourquoi, en effet ?

Les innovations technologiques qui servent à transformer l'homme appellent tou-



jours la même plaidoirie : depuis au moins Descartes, l'homme assume pleinement sa vocation prométhéenne. Autrement dit, il accepte de braver les dieux et d'être responsable de son destin. C'est pour cela qu'il se définit comme « moderne » : il a rompu avec l'attitude des Anciens qui pensaient que la nature était parfaite, que les techniques pouvaient ceux-ci en réaliser les potentialités, mais en aucune façon lui ajouter quoi que ce soit. Il s'est résolu à être la mesure de toutes choses et à se vouloir « comme maître et possesseur de la nature ».

Comment ne pas accueillir comme autant de bienfaits les innovations médicales qui promettent de prolonger la vie jusqu'à 100 ans (ainsi que l'espérait déjà Descartes) ou même d'abolir la mort non voulue (comme l'annoncent aujourd'hui quelques visionnaires) ? Comment ne pas se réjouir que l'individu tout-puissant consomme désormais l'offre des sciences et des techniques sans plus de limite que ses désirs ?

Les réglementations qu'imposait jadis une morale fondée sur la divinité, la nature ou les traditions ne fonctionnent plus depuis longtemps. Le progrès est devenu en lui-même une valeur pour l'homme de la modernité ; il doit donc être sans frein et balayer les objections à son développement. Contemporaine des exigences individualistes, la seule morale qui puisse demeurer est minimale : elle enregistre comme un fait l'impossibilité pour les hommes de s'entendre sur ce qui serait un Bien ultime pour tous ; elle considère à tenir pour également justifiés les intérêts et les fins que chacun poursuit ; et elle considère comme acceptable tout ce qui ne nuit pas à autrui.

Fort de cette morale, l'individu moderne ne saurait craindre d'outrepasser les limites de son actuelle condition. Au contraire, il devrait attendre des sciences et des techniques qu'elles amplifient son appétit de croissance, sinon qu'elles satisfassent son désir d'immortalité. Pourquoi se donner des limites, « tant que nous ne causons de mal à personne… » ?

Mais en ce début de XXIe siècle, l'homme se révèle peut-être moins moderne qu'il ne croyait l'être. Il résiste encore à ce qu'il considère comme la transgression d'interdits : les transplantations d'organes, le clonage reproductif, l'utérus artificiel, la cyborguisation… Il considère parfois la nature comme un organisme vivant, pour ainsi dire sacré, qui a besoin de notre protection sinon de notre amour. Mais cette résurgence de sentiments animistes ou de comportements archaïques ne fait que s'ajouter à la désillusion causée par l'histoire du XXe siècle. L'homme moderne a appris que le progrès se paie le plus souvent au prix fort, que des catastrophes sont imputables à ses activités, fussent-elles bien intentionnées, et que les ressources de la planète étant limitées, tout ne lui est pas permis. Il a découvert que sa volonté de transformer le monde et de se remodeler lui-même pour être en phase avec lui est peut-être mal inspirée, voire nocive. Sans être forcement disqualifiée, la science n'appelle plus l'enthousiasme qui la portait jadis et l'on n'attend plus qu'elle rassure et pacifie.

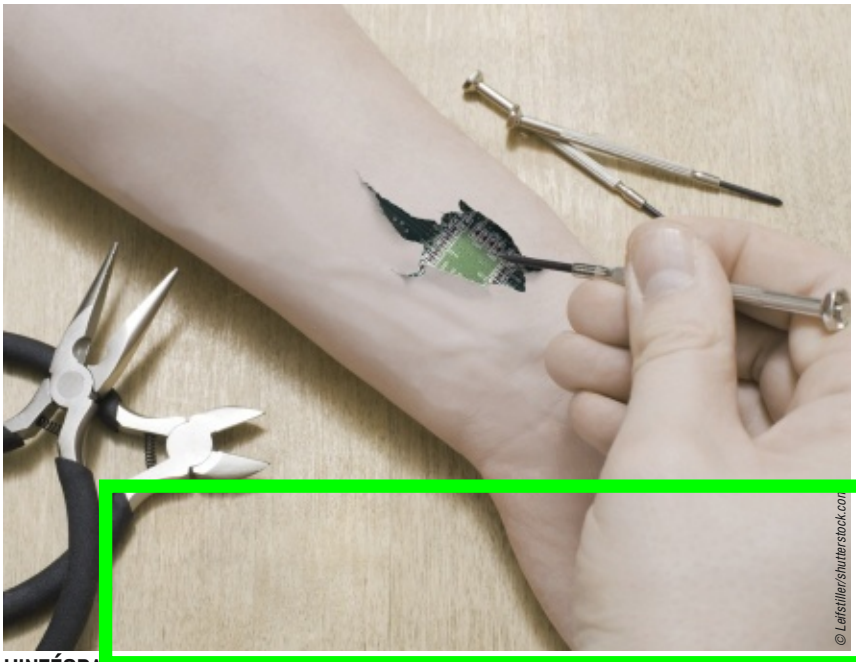
Bref, la lucidité a eu raison des rêves d'émancipation par la science. Et la question de savoir si nous pouvons mettre à exécution l'intégralité de ce que nous savons faire se pose à présent au-delà des seuls comités d'éthique. De même, se répand l'inquiétude relative à une mauvaise maîtrise par les ingénieurs et les industriels d'un nombre croissant de technologies. Ainsi, les débats sur les nanotechnologies, les OGM (organismes génétiquement modifiés) ou la biologie de synthèse ont récemment contribué à fragiliser les idéaux de la modernité.

L'éthique réclamée par nos sociétés technologisées est contemporaine de la prise de conscience des incertitudes, que ne parvient pas à supprimer [illegible] tifique, et de l'insécurité que font naître

L'ESSENTIEL

- Les progrès techniques sont ambivalents, à la fois bienvenus et dangereux.
- Malgré cela, les courants transhumanistes ont foi dans un développement sans limites des technologies, de l'informatique et des neurosciences, grâce auxquelles l'être humain atteindra une condition de perfection.
- Cette croyance en une rédemption de l'homme par les machines reflète une perte de foi en l'humain et constitue une illusion dangereuse.

© Tomis Pan/shutterstock.com



© Leifstiller/shutterstock.com

L'INTÉGRATION DE DISPOSITIFS ARTIFICIELS AU CORPS BIOLOGIQUE crée, par définition, des cyborgs. La [illegible] déjà ici [illegible] avec [illegible] thèses auditives ou les stimulateurs cardiaques. Quand l'objectif ne sera plus uniquement de réparer le corps, l'être humain entrera-t-il dans une nouvelle ère ?

nos entreprises techniques. Les annonces d'innovations les plus prometteuses pour notre espèce – par exemple l'augmentation des facultés cognitives ou sensorimotrices, liée à la production de psychostimulants, de prothèses, d'organes artificiels ou d'exosquelettes – sont perçues comme emphatiques par les scientifiques rigoureux. Ces derniers jugent néfastes à la cause de la science les discours avant-gardistes ou « hype » annonçant la prochaine « augmentation » de l'humain comme la dernière étape du progrès, avant l'immortalité et le « posthumain ».

Temporiser l'ardeur visionnaire des technoprophètes

Que l'on soit attentif ou sourd aux réserves des scientifiques qui voudraient temporiser l'ardeur visionnaire des technoprophètes, il ne fait de doute pour personne que, assujettis à la dynamique des sciences et des techniques, nous avons perdu la liberté de ne pas nuire à autrui et qu'il conviendrait d'être moralement plus exigeants en cherchant à maîtriser – quitte à borner... – le pouvoir que nous nous sommes assuré sur les choses. L'analyse des effets [illegible] initiatives ne relève plus seulement de l'esprit critique de penseurs comme Ivan Illich (1926-2002), qui accusait par exemple la médecine moderne, malgré la longévité qu'elle assure, d'avoir fait surgir de nouvelles maladies, d'avoir engendré des vulnérabilités jusque-là inconnues et conduit les sociétés dans les impasses que rencontre à présent la demande de couverture sociale.

Il est clair pour le plus grand nombre, aujourd'hui, que les biotechnologies sont ambivalentes et, plus généralement, que les technologies sont comme les médicaments, à la fois des poisons et des remèdes. Ainsi les instruments permettant un diagnostic prénatal sont salutaires, mais le tri embryonnaire auquel ils peuvent inciter est pernicieux ; la possibilité de détecter, à partir de son activité cérébrale, l'objet auquel se fixe l'attention d'un patient est sans aucun doute intéressante, mais la perspective qu'elle offre de lire dans les pensées est redoutable ; l'implantation d'électrodes de stimulation dans le cerveau d'un parkinsonien est très prometteuse, mais elle est abusive si elle sert à contrôler l'humeur de personnes à leur insu ; la circulation d'ondes électromagnétiques dirigeant l'activation neuronale d'un tétraplégique vers la commande d'un ordinateur pour lui assurer la maîtrise de son environnement est une bénédiction, tant qu'elle n'est pas dévoyée vers des objectifs militaires, éventuellement sans foi ni loi...

La plupart de ces exemples ont un point commun : ils mettent en évidence le formidable accélérateur d'innovations biomédicales que constitue depuis longtemps l'imagerie. Voir, c'est pouvoir : tel est l'axiome de nombre des ambitions qu'on qualifiera de technoscientifiques, parce qu'elles se trouvent clairement subordonnées à la mise au point d'instruments d'imagerie élaborés, essentiellement rendus possibles grâce à l'informatique.

Le mirage de l'imagerie

Que de progrès réalisés depuis la première radiographie, en 1895 ! Visualiser les os, les tissus ou les organes, identifier sur écran les anomalies, détecter, prélever ou exciser des tumeurs sous spectroscopie, cartographier dans le cerveau les fonctions cognitives... : l'art du médecin traditionnel a changé devant l'échographie, le scanner à rayons X, l'IRM (imagerie par résonance magnétique), etc. Les techniques d'imagerie servent non seulement à établir le diagnostic, mais aussi à soigner, ainsi qu'on le voit en cancérologie où les ultrasons brûlent des tumeurs visualisées par échographie ou IRM. Et de plus en plus la robotique guidée par l'imagerie relaie la main du chirurgien, afin de gagner en efficacité.

Qui ne se féliciterait de pouvoir profiter de tant de ces progrès, auxquels ont contribué des informaticiens et les mathématiciens ? Qui s'aviserait de soupçonner l'imagerie de fasciner abusivement le patient et le dissimuler la part d'artifices et de constructions intellectuelles dont elle est le produit ? Reste que le discours « hype » vient rappeler que, dans le contexte des compétitions auxquelles sont livrées aujourd'hui les sociétés, condamnées à innover pour survivre, on ne promet jamais assez : il faut proclamer que l'imagerie permet de visualiser un organe sans filtrer les données, puis de construire un double virtuel en trois dimensions de l'organe, copie sur laquelle on pourra opérer et ainsi maîtriser l'impact des gestes thérapeutiques.

Plus loin encore, on laisse imaginer par exemple que l'on modélisera le contenu d'un cerveau, avant de simuler son fonctionnement. Un laboratoire à Lausanne promet déjà par [illegible] et [illegible] la compréhen-

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012

sion du mécanisme des maladies dégénératives telles que la maladie de Parkinson ou celle d'Alzheimer. Mais certains attendent aussi de ce laboratoire la possibilité de télécharger le contenu de ce cerveau, transformé en logiciel grâce à sa modélisation informatique, sur des matériaux inaltérables qui préserveraient ni plus ni moins que la conscience de son propriétaire, rendu par là-même immortel...

Dans les sociétés technologisées, l'hyperbole est toujours à la clef de l'annonce des performances des laboratoires qui ont besoin de financements importants. Ainsi, les limites du pouvoir des sciences et des techniques doivent être en quelque sorte structurellement abolies. Tout ce qui est techniquement réalisable sera réalisé, et rien n'est *a priori* impossible à l'inventivité humaine, surtout si elle n'est pas soumise à un principe de précaution ou aux impératifs moraux d'un autre âge.

On réalise combien l'emballement des promesses est désormais nécessaire aux politiques nationales de recherche, au détriment parfois du fonctionnement des équipes de chercheurs, exposées à être déqualifiées par les déceptions que, immanquablement, elles provoquent. À l'heure où l'on réclame à juste titre des scientifiques qu'ils assument leurs responsabilités, il serait temps d'examiner les logiques et les contraintes économico-politiques qui les dépossèdent de plus en plus de l'initiative et qui instrumentalisent leurs résultats. Cette dépossession trouve une traduction dans l'imaginaire engendré par les découvertes ou les innovations techniques, tel que l'exploitent le cinéma, la science-fiction ou même certains courants culturels qui ont parfois l'oreille des décideurs politiques ou industriels.

Le transhumanisme, symptôme de crise

Le transhumanisme et l'annonce de l'avènement d'un posthumain font partie de ces courants. Le transhumanisme constitue le symptôme d'une mise en crise des idéaux modernistes. Avant de prédire l'émergence quasi mystique d'un « au-delà de l'humain », cette nébuleuse de croyances et de fantasmes, officiellement née en 1998 avec la *World Transhumanist Association*, affiche une ambition toute humaniste : celle de solliciter les technologies sous l'angle de leur prétention à « améliorer et prolonger la vie des individus et de l'espèce humaine » (voir les statuts de *Technoprog !*, nom de l'Association française transhumaniste). Un rapport sur le programme américain dénommé NBIC *(Nanotechnology-Biotechnology-Information technology-Cognitive science)* et commandité par la *National Science Foundation* a donné le ton en 2002 : « Ces technologies et convergence vont permettre l'unification des sciences et des techniques, le bien-être matériel et spirituel universel, l'interaction pacifique et mutuellement avantageuse des humains et des machines intelligentes, la disparition complète des obstacles à la communication généralisée, en particulier ceux qui résultent de la diversité des langues, l'accès à des sources d'énergie inépuisables, la fin des soucis liés à la dégradation de l'environnement. » Rien de moins !

Des courants de pensée disparates

Mais il serait vain de chercher une orthodoxie au sein de ce mouvement transhumaniste. Entre le Suédois Nick Bostrom (cofondateur, avec David Pierce, de l'Association mondiale du transhumanisme), l'Anglais Max More (à l'origine des « Extropiens ») et l'informaticien américain Ray Kurzweil (qui a été directeur de l'Institut de la singularité), l'absence d'accord est à peu près totale. Le premier annonce qu'il veut réaliser le bien-être et la perpétuation de l'humanité, le deuxième souhaite éliminer l'entropie de l'Univers qui nous voue à l'extinction, et le troisième veut préparer la venue d'un stade d'évolution technologique, la « singularité », qui rendra notre espèce obsolète…

Dans ces conditions, il est difficile de faire allégeance à quelque chose qui se nommerait « transhumanisme » et qui dessinerait les contours du posthumain : tantôt l'intention semble hyperhumaniste (perfectionner l'homme), tantôt elle paraît cynique (abandonner l'homme pour une autre espèce). Dans le premier cas, le posthumain ne serait guère plus que « l'homme augmenté » ; dans le second, il désignerait un être inédit, résultat de variations, de mutations puis de la sélection induites dans notre environnement par les manipulations technologiques.

L'imaginaire du transhumanisme se borne à extrapoler à partir des possibilités technologiques identifiables dans le présent, qu'elles relèvent des nanotechnologies,

L'AUTEUR



J.-M. BESNIER est professeur de philosophie à l'Université de Paris IV-Sorbonne et membre du Centre de recherche en épistémologie appliquée (CREA, CNRS/École polytechnique), à Paris.

BIBLIOGRAPHIE

J.-M. Besnier, **Demain les posthumains**, Pluriel, 2012.

J.-M. Besnier, **L'homme simplifié**, Fayard, 2012.

R. Kurzweil, **Humanité 2.0 : La bible du changement**, M21 Éditions, 2007.

M. More, **Principes extropiens 3.0**, 2003 : http://editions-hache.com/essais/more/more1.html

M. C. Roco et W. S. Bainbridge (éds.), **Converging technologies for improving human performance. Nanotechnology, Biotechnology, Information technology and Cognitive science**, NSF/DOC-sponsored report, National Science Foundation, juin 2002 : www.wtec.org/convergingtechnologies/1/NBIC_report.pdf).

Institut de la singularité : http://singularity.org/

des biotechnologies, des neurosciences ou de l'intelligence artificielle.

Ainsi, dans son livre de 1986, *Engines of Creation : The Coming Era of Nanotechnology*, l'ingénieur américain Eric Drexler annonce comme prochaine la réalisation de nanomachines capables de réparer l'ADN des cellules, de soigner les maladies et d'aider la vie à se répandre au-delà des limites de la Terre.

Dans *L'Humanité 2.0*, R. Kurzweil prévoit l'apparition dans quelques décennies d'une intelligence non biologique qui marquera la fin de la civilisation humaine. Dans sa *Lettre à mère Nature* (1999), M. More envisage de doter les humains d'un « métacerveau », réseau distribué de capteurs, de processeurs et d'intelligence, qui les propulsera dans une condition ultra-humaine…

S'il s'agit de donner figuration aux visions d'avenir du transhumanisme et à l'émergence du posthumain, on prend à témoin quelques technoprophètes champions en effets d'annonce. Par exemple le cybernéticien anglais Kevin Warwick, de l'Université de Reading, qui s'autoproclame « le premier cyborg » au monde bientôt capable, entre autres prouesses, de communiquer avec ses semblables par télépathie grâce à l'implantation dans leur corps d'émetteurs-récepteurs d'ondes électromagnétiques.

C'est cela le transhumanisme : l'annonce plus ou moins dramatisée qu'une transition se dessine sous nos yeux et qui appelle notre adhésion à ses promesses, sinon notre désir. Mais il serait exagéré de soutenir que ce mouvement encourage à la militance politique ou au complot sectaire, comme on l'a dit en se fondant sur la réputation du sociologue des religions et coauteur du rapport sur les NBIC, William Bainbridge. Les NBIC résument seulement – si l'on ose dire – les promesses qui, une fois réalisées, convergeront sur l'au-delà de l'humain : naissance calculée (grâce aux biotechnologies), souffrance conjurée (grâce aux neurosciences), vieillissement neutralisé (grâce à la nanomédecine), mort involontaire écartée (grâce au téléchargement de l'esprit), dépollution de l'environnement assurée (grâce à la biologie de synthèse)…

D'où vient cette impatience chez nos contemporains à se transformer au point d'abdiquer la condition humaine ? Assurément pas de l'optimisme dont nous avons hérité du siècle des Lumières. L'épanouissement de l'humanité ne signifiait aucunement, à l'époque, qu'on abandonne le fil qui unit les générations, mais, au contraire, que l'on se berce de l'idéologie d'un progrès continu et irréversible. Quelque chose s'est produit qui expliquerait que la projection d'un horizon posthumain, hors histoire par conséquent, remplace aujourd'hui les lendemains qui chantent et l'idéal du bonheur pour tous, que les plus candides des transhumanistes continuent de revendiquer.

D'où vient cette impatience chez nos contemporains à se transformer au point d'abdiquer la condition humaine ? Assurément pas de l'optimisme dont nous avons hérité du siècle des Lumières.

Le posthumain, substitut à l'humanité dont nous avions rêvé

Pour le dire sans ambages : les utopies posthumaines paraissent le revers des désillusions modernes. À une désaffection pour l'histoire partagée par toutes les utopies), elles associent en définitive la croyance en une rédemption par les technologies, au sein desquelles l'humain n'a plus tout fait sa place.

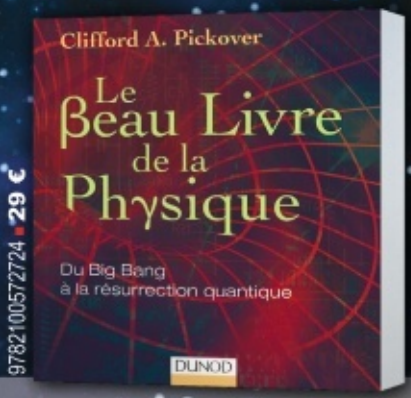
C'est en effet dans la rupture et l'arrachement de l'humanité à elle-même que consisterait désormais la seule issue. Les technologies que nous avons inventées et qui révèlent à présent des comportements autonomes rendraient possible cet arrachement prétendument salutaire. Il faut les laisser se développer et se confier aux objets intelligents qu'elles produisent. Nous leur avons délégué le soin de réaliser l'autonomie que nous nous promettions à nous-mêmes dans le contexte des idéologies révolutionnaires, à titre d'idéal émancipateur. Le posthumain qu'engendreront les technologies est ainsi présenté comme le substitut à l'humanité accomplie dont nous avons rêvé et que nous avons laissée en route.

Il est donc compréhensible que le transhumanisme s'impose, malgré la disparité de ses versions, à la fois comme le symptôme de la démesure moderniste et la tentative pour lui donner une issue. Être moderne, c'était en un premier temps « vouloir le perfectionnement indéfini », ce fut ensuite « vouloir l'augmentation des facultés innées », et c'est à présent « vouloir être relevé par les machines ».

Le ressort de la fascination pour les thèmes transhumanistes et posthumanistes

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012

VARIEZ LE PLAISIR DES SCIENCES



9782100572724 ■ 29 €

250 théories physiques pour découvrir les clés de notre univers



9782100576398 ■ 27,50 €

Plongez dans l'énigmatique concept de Multivers : l'Univers de tous les univers possibles



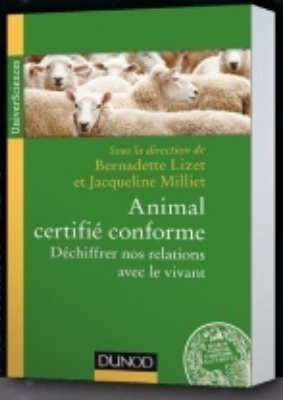
9782100582976 ■ 16,90 €

Un recueil d'énigmes stimulantes et ludiques écrit avec humour et fantaisie



9782100573059 ■ 19,90 €

Une cinquantaine de découvertes et de savants qui ont révolutionné la science (presque) par hasard



9782100582853 ■ 22 €

Protéger la Nature ne suffit plus, il faut la conserver et la gérer



9782100573042 ■ 22 €

Un voyage au microscope qui nous dévoile l'extraordinaire diversité du monde

Tous nos ouvrages sont disponibles en librairie

www.dunod.com

DUNOD
ÉDITEUR DE SAVOIRS

Fragments de discours transhumanistes

Déclaration transhumaniste (http://humanityplus.org/) :
« L'humanité sera dans le futur profondément marquée par la science et la technologie. Nous prévoyons la possibilité d'étendre le potentiel humain en surmontant le vieillissement, les défauts cognitifs, la souffrance involontaire et notre confinement à la planète Terre. [...] Nous reconnaissons que l'humanité est exposée à de graves risques, surtout d'une mauvaise utilisation des nouvelles technologies [...] Nous préconisons le respect de toute entité sensible, y compris les humains, les animaux non humains et les futurs intellects artificiels, formes de vie modifiée ou autres intelligences auxquels les avancées scientifiques et technologiques pourraient donner lieu [...] »

Principes extropiens 3.0 (M. More, www.maxmore.com/extprn3.htm) :
« Nous voyons les humains comme une étape de transition entre notre héritage animal et notre futur posthumain [...]. Nous [illegible] aspects indésirables de la condition humaine [...]. Les extropiens affirment un environnement [illegible] mentalistes rationnel et non coercitif, destiné à soutenir et renforcer les conditions de notre épanouissement [...]. Nous coévoluerons avec les produits de nos esprits, [...] intégrant notre technologie intelligente à nous-mêmes dans une synthèse posthumaine [...]. »

Ray Kurzweil (www.kurzweilai.net/) :
« Avec un corps version 3.0 capable de se transformer [...] à volonté et un cerveau majoritairement [illegible] la question de savoir ce qui est humain fera l'objet d'une reconsidération poussée. »

tient pour beaucoup à « la honte prométhéenne d'être soi » du penseur allemand Günther Anders (1902-1992), c'est-à-dire au sentiment d'insuffisance et à la dépression produite par un monde qui a éliminé l'homme au profit des machines, qui a fait prévaloir leur loi, en réduisant l'humain à l'élémentaire de schémas comportementalistes ou au simplisme d'explications neurobiologiques.

Dans ce qu'il a de plus positif, le posthumain, associé au programme transitoire d'une humanité augmentée (symbolisée par l'écriture H+), fonctionne comme un anxiolytique : il remédie à l'inquiétude existentielle moderne, telle que Alexis de Tocqueville avait prévu qu'elle se développerait dans les démocraties individualistes et de plus en plus désenchantées. Sous cet angle, il relève d'une hypermodernité réconciliatrice dans laquelle la valeur de dépassement de soi est associée à l'ambition de fusionner avec les machines issues du génie humain – des machines désormais capables de nous surprendre et de nous transfigurer.

Il faut aller plus loin dans le sens de cette élimination paradoxale des limites qui finit par dissoudre ce qu'elles contenaient. Avec la figure indéterminée du posthumain, le transhumanisme entretient jusqu'à un certain point le fantasme d'une maîtrise de l'évolution biologique – une maîtrise qui sollicite, pêle-mêle, l'eugénisme adaptatif de Francis Galton pour garantir que, transformés, nous saurons répondre aux exigences des machines ; la référence au biologiste Julian Huxley et son contrôle néolamarckien de l'évolution ; le recours à une vulgate inspirée de Teilhard de Chardin pour donner à espérer l'avènement d'une Conscience déliée des pesanteurs du corps autant que du péché originel...

L'argumentaire emprunte aussi bien à la paléoanthropologie qu'au néodarwinisme : l'évolution biologique a sélectionné *Homo faber* qui a développé une civilisation technoscientifique ; on se dit que la technique pourrait aujourd'hui s'appliquer rétroactivement à [illegible] et lui imposer de sélectionner l'espèce qui émergera de ses réalisations.

Un inédit né d'une évolution darwinienne

Le transhumanisme s'imagine donc en passe de faire la démonstration de l'effet réversible de l'évolution darwinienne et de la coévolution de l'homme et de son milieu. Chaque réalisation technique apparaît comme l'introduction d'une variation soumise aux pressions sélectives d'un environnement de plus en plus contrôlé technologiquement ; cette variation est susceptible de laisser s'installer des mutations appelées à être indéfiniment dupliquées, de sorte qu'en émergera l'inédit finalement sélectionné dans le cours de l'évolution. On appellera cet inédit la « Singularité », le « Succès ultime », le « Point Oméga »..., comme on voudra. Mais il achèvera la transition et nous projettera dans le posthumain.

Toute utopie porte en creux la réalité d'une société invivable. Celle du posthumain trouve une humanité qui ne se supporte plus. Les limites que l'homme repousse sans cesse, parce qu'il est d'abord un être de défi, sont celles qui le conduiraient à tolérer la vulnérabilité et l'imperfection, faute desquelles il n'est pas de justifications aux communautés humaines.

Perfection, mais aussi solitude généralisée

La perfection signifierait en effet, pour le posthumain réalisé, une souveraine autosuffisance, mais aussi une solitude généralisée. À supposer naturellement que la perfection puisse être le lot commun, c'est-à-dire que les bénéfices de la technologie soient universellement distribués et autorisent l'enfermement de chacun en soi-même. L'utopie est sans doute le plus qu'ailleurs : dans la croyance en l'accessibilité possible de tous à la médecine régénérative, aux ressources en augmentation cognitive offertes par la neurobiologie et par la nanomédecine, dans la jouissance des technologies du virtuel... bref, dans l'élimination de toute fracture au sein de l'humanité.

Lorsqu'elles deviennent intenables, les illusions ne peuvent qu'engendrer le ressentiment voire la violence. Déjà pointent certaines déceptions de taille : les démographes et les biologistes s'attendent à ce que les progrès de la longévité se tassent, les climatologues à ce que nous soyons exposés à des risques qui ne ménageront pas les riches d'aujourd'hui, les économistes à ce que les crises deviennent endémiques et incontrôlables...

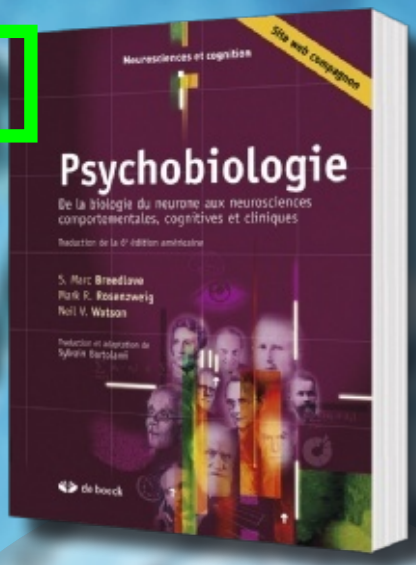
Des voix s'élèvent, par ailleurs, pour exprimer la conviction que le plus n'est pas forcément le mieux, ce qui constitue une objection aux perspectives valorisées par les transhumanistes : l'homme augmenté devrait vivre plus longtemps, être plus mobile, disposer d'une acuité visuelle et auditive supérieure, être doté de capacités de calcul accrues, d'un pouvoir de mémoriser étendu...

Et si l'utopie se délivrait de cette obsession de performance tellement en phase avec l'agitation de nos sociétés ? Et si l'augmentation changeait de régime pour servir la cause d'un homme qui sache mieux réfléchir, se confier à la beauté, inventer des histoires, éprouver et exprimer des émotions, jouir des œuvres de la pensée... ?

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012

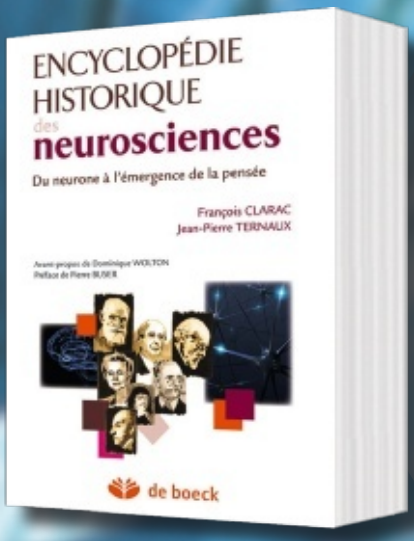
DES LIVRES POUR ALLER PLUS LOIN

Une introduction aux NEUROSCIENCES COMPORTEMENTALES

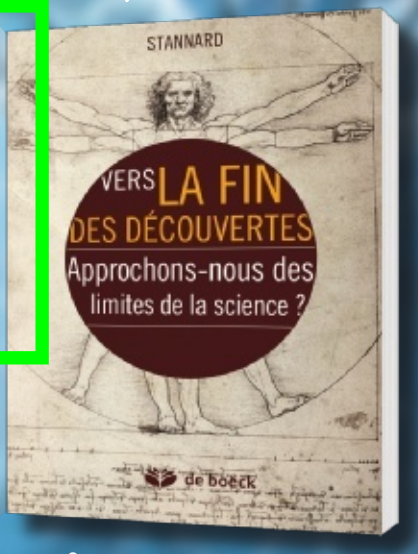


Breedlove • Rosenzweig • Watson
760 pages • 60 €

Approchons-nous des LIMITES DE LA SCIENCE ?



Clarac • Ternaux
1042 pages • 75 €



Stannard • 323 pagess • 19 €

Du neurone à L'EMERGENCE DE LA PENSÉE



Thomas • Lefèvre • Raymond
840 pages • 90 €

Tous les concepts de la biologie evolutive LA référence

Disponible en librairie ou sur **www.deboeck.fr**

de boeck

LES RECORDS SPORTIFS auront-ils une fin ?

G. Berthelot, A. Sedeaud, M. Guillaume et J.-F. Toussaint

Dans de nombreuses disciplines sportives, les facteurs de progrès ont été très largement exploités. Conséquence : de moins en moins de records du monde sont battus.

Plus vite, plus haut, plus fort : dit la devise olympique. Jusqu'où l'être humain pourra-t-il aller ? Depuis les premiers jeux Olympiques modernes de 1896, plus moins de 3 263 records mondiaux ont marqué la progression sportive. Alors qu'à Pékin, en 2008, 42 nouveaux records avaient été établis, cette année à Londres, seuls 20 l'ont été, dont celui du 4 × 100 mètres avec le Jamaïcain Usain Bolt *(voir la figure 1)*.

Cette différence pourrait bien illustrer une tendance à long terme qu'éclairent de nombreux constats scientifiques. Sur ce terrain, deux interprétations s'affrontent depuis longtemps : pour certains, l'augmentation des performances serait linéaire ; pour d'autres, elle ne peut être que limitée. Or on constate aujourd'hui un ralentissement des progressions sportives, manifestement dû au fait qu'après un siècle de développement, l'environnement de la performance a été largement optimisé. La détection des jeunes athlètes, les volumes d'entraînement, la récupération, l'équipement, la nutrition, le suivi médical font désormais l'objet d'une attention systématique. Ont-ils été poussés jusqu'au bout ? C'est [illegible] avant d'envisager l'avenir.

L'ESSENTIEL

- Les performances sportives dépendent de l'influence conjointe des gènes et de l'environnement.
- Outre les facteurs physiques, la progression des records dépend de l'influence des contextes historique et politique.
- Malgré les substances dopantes illicites et les progrès techniques, l'optimisation des facteurs de performance est à peu près achevée, d'où le plafonnement actuel des records.





©Shutterstock/Vaveridis Vasilis

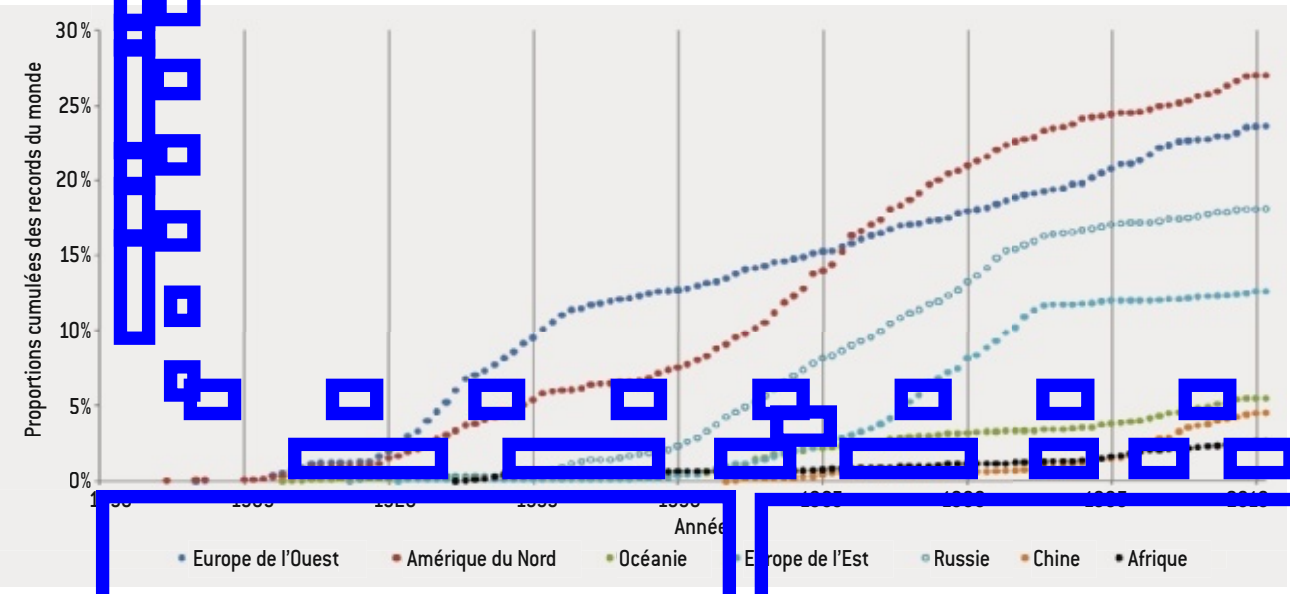
1. CENT MÈTRES EN 9,58 SECONDES : c'est la performance du Jamaïcain Usain Bolt aux championnats du monde d'athlétisme de Berlin, en 2009. Ce record fait de lui l'être humain le plus rapide ayant jamais vécu. Ici, il manifeste sa joie après avoir remporté l'épreuve du 200 mètres en 19,53 secondes la même année à Thessalonique, en Grèce.

Si l'on établit l'évolution du cumul des records du monde et des meilleures performances, que constate-t-on ? De nombreuses études, dont certaines récemment menées à l'IRMES, l'Institut de recherche biomédicale et d'épidémiologie du sport, ont montré qu'ils suivent une croissance par paliers, ralentie par les guerres et accélérée par l'introduction de nouvelles techniques *(voir les figures 2 et 3)*.

Cette croissance est le résultat des progrès accomplis pour entraîner les sportifs, optimiser leur condition physique et leur état de santé. Souvent fondés sur de longues observations et, parfois, sur des recherches scientifiques poussées, ils sont aujourd'hui connus des meilleurs entraîneurs (on ne dira jamais assez leur rôle essentiel dans la détection des talents et leur encadrement), du moins dans les pays qui ont les moyens de cultiver un haut niveau sportif. Nous ne discuterons pas ici de ces savoir-faire, qui dépendent de la discipline sportive en question.

Guerres contre records

L'étude approfondie des performances met en lumière le rôle de l'histoire et de l'économie sur les volontés nationales d'optimisation. Si très peu de records du monde ont été battus durant les deux guerres mondiales, la guerre froide, caractérisée par une compétition générale entre deux systèmes politiques, a eu un tout autre impact. Ainsi, pendant cette période (1945-1989), l'Europe de l'Est a décuplé ses performances et accumulé 249 records du monde. Depuis la publication des archives de la Stasi (la *Staatssicherheit*, c'est-à-dire le ministère est-allemand de la Sécurité d'État), nous savons que l'Allemagne de l'Est optimisait par la pharmacologie les capacités de ses athlètes, dans le cadre de programmes étatiques de dopage. Pendant la même période, les évolutions équivalentes de l'Union soviétique (210 records du monde) et des États-Unis (200 records) révèlent des politiques différentes d'optimisation des



2. LES PROPORTIONS CUMULÉES DE RECORDS MONDIAUX par pays ou grande région et par année depuis les premiers jeux Olympiques traduisent les effets sur le sport de la puissance économique et des politiques nationales. Les sportifs de l'Europe de l'Ouest et des États-Unis obtiennent presque 50 pour cent de tous les records jusqu'à aujourd'hui. Mais pendant la guerre froide, l'Europe de l'Est et la Russie, sous la coupe de l'Union soviétique, avaient un taux cumulé de records comparable ; or ce taux cumulé plafonne depuis la fin de la guerre froide... Fermée sur elle-même pendant cette période, la Chine multiplie les records depuis qu'elle a une économie puissante et qu'elle s'est ouverte au monde. L'Afrique et l'Océanie, dont les économies se développent plus lentement, accroissent lentement, mais sûrement, leurs contributions aux records mondiaux.

LES AUTEURS

Geoffroy BERTHELOT, Marion GUILLAUME et Adrien SEDEAUD, épidémiologistes, travaillent à l'Institut de recherche biomédicale et d'épidémiologie du sport (IRMES), que dirige Jean-François TOUSSAINT, cardiologue et professeur de physiologie à l'Université Paris-Descartes.

performances (masculinisation des performances féminines d'un côté, initiatives privées de dopage, puis couverture par les instances sportives des athlètes contrôlés positifs de l'autre), aboutissant à des résultats très similaires *(voir la figure 2)*. On voit avec la victoire olympique du cycliste Alexandre Vinokourov, ou les révélations de l'affaire Lance Armstrong, toujours dans le cyclisme, à quels systèmes, officiellement qualifiés de mafieux, ont pu conduire de telles pratiques.

La confrontation Est-Ouest était ainsi un puissant catalyseur des performances sportives, qu'elle a stimulées exactement comme elle a nourri la compétition spatiale. En matière sportive, l'influence politique peut toutefois aller dans le sens inverse : on constate que les records soviétiques, comme l'espérance de vie, cessent de progresser peu avant la chute de l'URSS, à l'époque où la volonté politique et les moyens s'évanouissent. De même, la Chine de la révolution culturelle (1966-1969), repliée sur elle-même, n'a produit aucun record du monde, et a interrompu complètement le développement de ses performances sportives. Mais depuis que la Chine s'est ouverte à l'économie de marché et manifeste une volonté de domination économique et politique, ses athlètes ont battu 117 records mondiaux (mais plus de la moitié le sont en haltérophilie féminine). La volonté d'affirmation d'un État reste donc un facteur essentiel de l'optimisation des performances de ses athlètes.

Hormis les paramètres politiques, les facteurs environnementaux peuvent aussi favoriser les records. La température, l'altitude, le taux d'humidité, la pression atmosphérique, le vent, ont une influence, jusqu'ici peu étudiée. Nos recherches récentes et celles de confrères montrent par exemple le lien entre température et performance *(voir la figure 4)*. Cela suggère que de nouveaux records pourraient être établis si l'on planifiait les compétitions pour des températures optimales.

Vers une sélection génétique ?

Ces circonstances mises à part, que peuvent faire les sportifs et leurs entraîneurs pour obtenir de nouveaux records ? L'un des leviers consiste à coordonner la détection à l'échelle de toute la population, de futurs athlètes. Pour le moment, ces talents sont essentiellement repérés dans les résultats des jeunes sportifs. Mais les entraîneurs commenceront peut-être bientôt à sélectionner les porteurs de certains gènes favorables.

Une telle sélection est, en théorie, envisageable. On conçoit aisément que chaque discipline sportive nécessite des qualités

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012

différentes liées à des caractères génétiques portant sur la taille, les fibres musculaires, le métabolisme, la psychologie, etc. *(voir l'encadré page 41)*. Les chercheurs ont déjà identifié plusieurs gènes associés à la performance sportive. Par exemple, la vitesse de course implique notamment le gène *ACNT3*, qui joue sur l'ancrage des filaments d'actine aux stries Z du sarcomère (l'unité de base des microfibrilles dont sont constitués les muscles squelettiques).

De nombreuses recherches à travers le monde suggèrent que des variations existent dans l'expression du gène VEGF (de l'anglais *Vascular Endothelial Growth Factor*) à l'origine du facteur de croissance de l'endothélium vasculaire. Ce facteur de croissance qui circule dans le sang favorise l'angiogenèse, c'est-à-dire la croissance des vaisseaux sanguins et donc la croissance tissulaire, ce qui semble particulièrement important pour une récupération rapide des muscles et des tendons après les entraînements de plus en plus intenses.

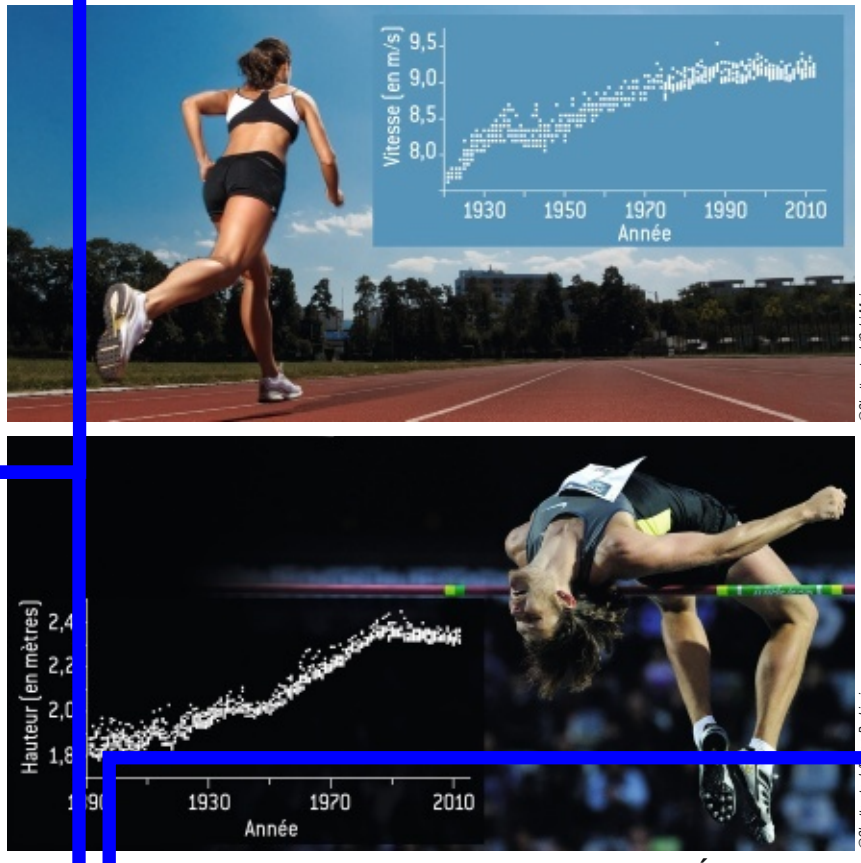
Récemment, le gène *HFE* dont l'expression produit la protéine HFE (pour *Human Hemochromatosis Protein*), qui régule le métabolisme du fer et facilite le transport de l'oxygène, a été l'objet de nos recherches et de celles de nombreux collègues : les mutations de ce gène seraient plus fréquentes chez certains athlètes de haut niveau pratiquant des sports énergivores. Repérables, ces mutations influencent favorablement la performance. La génétique est aussi impliquée dans certaines formes d'hyperandrogénisme associées à une sécrétion trop importante de testostérone, qui augmente les performances des athlètes féminines affectées par ce syndrome.

Sans doute favorisés par certains gènes, les talents sportifs se traduisent d'autant plus en records qu'ils s'expriment au bon âge. On constate en effet un âge optimal pour chaque performance. Cet optimum est plus tardif pour le marathon, plus précoce pour les nageurs. Les études ont également précisé la relation âge-performance : elle comprend une phase de croissance, pendant laquelle on se rapproche rapidement de l'optimum, puis une phase de décroissance, liée au vieillissement. Les deux phases sont exponentielles. Cette relation entre âge et performance se retrouve dans tous les sports individuels, collectifs ou intellectuels *(voir la figure 5)*, chez d'autres espèces et à plusieurs échelles biologiques… On la retrouve ainsi dans les organismes simples tels que [illegible]

ditis elegans, tant pour les organes que pour les cellules. Mais les entraîneurs n'ont pas attendu ces études pour tenir compte intuitivement de l'âge !

L'expansion biométrique, ressource du XXe siècle

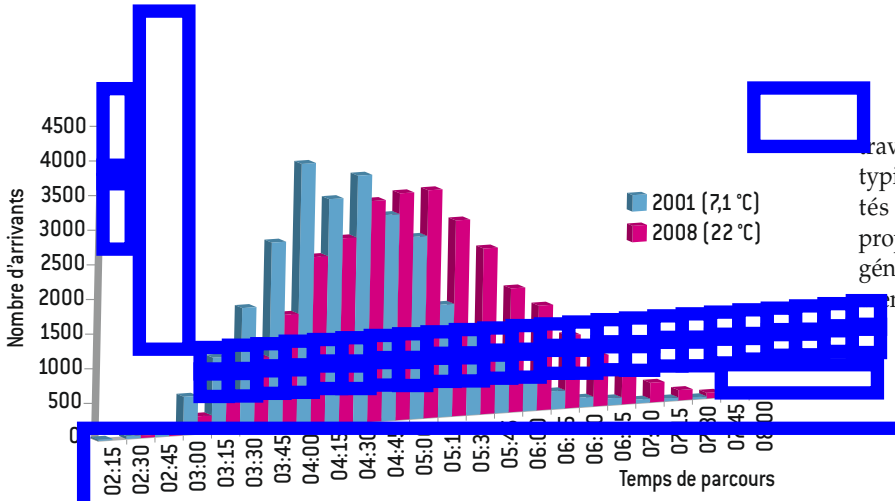
Au cours du XXe siècle, les entraîneurs ont aussi exploité une ressource d'origine à la fois génétique et socio-économique : l'expansion biométrique des populations. Le poids, la taille, l'indice de masse corporelle au sein des populations européennes et américaines ont en effet augmenté en même temps que l'espérance de vie, à mesure que s'amélioraient les conditions



©Shutterstock/Gabi Moisa

©Shutterstock/Diego Barbieri

3. LA PROGRESSION DES DIX MEILLEURES PERFORMANCES PAR ANNÉE dans le sprint féminin sur 100 mètres *(en haut)* et au saut en hauteur masculin *(en bas)* montre l'influence de l'histoire sur les records. Ainsi, pendant les deux guerres mondiales, périodes de faibles investissements nationaux dans les sports, les performances baissent alors que la plupart des jeunes athlètes masculins sont au front et que les athlètes féminines contribuent à l'effort de guerre en travaillant. Et les meilleurs sportifs ne sont plus sur les stades et n'ont plus la motivation des temps de paix. À l'inverse, la guerre froide, période d'intense rivalité internationale, s'accompagne d'une progression presque linéaire des performances, qui conduit en 1988 au point singulier du record de l'Américaine Florence Griffith-Joyner, à ce jour inégalé, puis au plateau, traduisant désormais la maturité des disciplines (le décrochage de 1975 sur la course du 100 mètres correspond à l'arrivée du chronométrage électronique au centième de seconde).



4. LA TEMPÉRATURE AMBIANTE INFLUE SUR LES PERFORMANCES DES MARATHONIENS, montrent les histogrammes de la répartition des résultats du marathon de Chicago en 2001 et en 2008. Il en est ainsi de toutes les pratiques sportives associées à une élévation thermique corporelle importante, tels les sports d'endurance (efforts longs et soutenus). Toutefois, dans le sprint, un optimum thermique se révèle aussi. L'influence de la température extérieure [illegible] les performances et les métabolismes [illegible] duit un phénomène essentiellement thermodynamique.

de vie. La taille moyenne des Américains est ainsi passée de 169,5 centimètres en 1880 à 172,2 centimètres en 1940, puis à 175,8 centimètres en 2010 *(voir la figure 6)*. Leur poids moyen a augmenté encore plus vite, puisqu'il est passé de 64 kilogrammes en 1880 à 87 kilogrammes en 2010. Les Français, quant à eux, mesuraient en moyenne 167 centimètres avec un poids moyen de 65 kilogrammes en 1867 ; ces valeurs étaient de 177 centimètres et 77 kilogrammes en 2007. L'amélioration de l'alimentation et de l'hygiène, la réduction des maladies infectieuses maternoinfantiles, l'accès généralisé aux soins, etc. expliquent ces augmentations.

Dans leur livre *The Changing Body*, Roderick Floud, Robert Fogel, Bernard Harris et Sok Chul Hong donnent une explication à ce phénomène fondée sur l'influence du statut nutritionnel sur la santé. Les connaissances nouvelles en épigénétique indiquent que la santé de la mère détermine celle de l'enfant à la naissance, mais aussi une part de ses maladies à l'âge adulte. Si l'enfant est ensuite confronté à un environnement favorable lui fournissant les apports nécessaires, il atteindra sa taille maximale. Dans l'hypothèse où l'alimentation joue un rôle majeur, la transmission de conditions nutritionnelles optimales de génération en génération, après la Seconde Guerre mondiale, aurait favorisé la taille optimale de chacun, et par là même celles des athlètes de haut niveau. Validé par nos récents travaux, le concept d'expansion phénotypique montre la croissance des capacités humaines dans des circonstances propices et décrit l'optimisation de notre génome dans les conditions environnementales clémentes du [illegible].

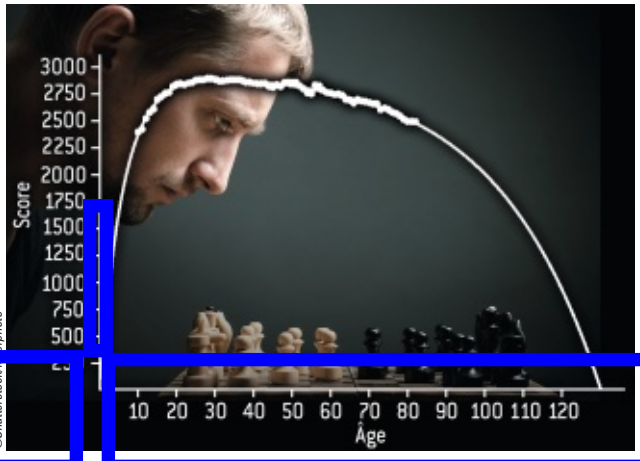
Le vivier morphologique bientôt épuisé ?

Il existe un lien direct entre la taille ou le poids des athlètes et leurs performances. Nombre d'auteurs pensent ainsi que les records de vitesse resteront dominés par les athlètes les plus grands et les plus lourds. De même, dans le rugby, le poids des avants et la taille des arrières restent des facteurs discriminants de la performance des équipes. Cependant, la morphologie ne peut à elle seule expliquer la totalité de la performance : elle détermine simplement des champs de potentiels – ou des fenêtres de sélection – dans lesquels les traits anthropométriques les plus adaptés peuvent être trouvés. La combinaison de ces différentes fenêtres (morphologiques, techniques, tactiques, psychologiques…) associée à un entraînement adéquat détermine la performance.

La volonté des entraîneurs de trouver leurs athlètes au sein de ces fenêtres de sélection a ainsi produit une « course aux armements » tout au long du XXe siècle, aboutissant à une optimisation des morphologies. Cette exploitation du vivier mondial va-t-elle se poursuivre ou faut-il anticiper un prochain « arrêt de crois-



©Shutterstock/Denis Kuvaev



©Shutterstock/[illegible]rphoto

5. LES PERFORMANCES ÉVOLUENT AVEC L'AGE, que ce soit dans les sports physiques *(à gauche, cas du 400 mètres féminin)* ou dans les sports intellectuels *(à droite, dans le cas des échecs)*. Les diminutions du nombre de fibres musculaires, de la fonction cardio-vasculaire ou de la vitesse de conduction de l'influx nerveux déterminent un pic de capacité entre 25 et 30 ans. Ce maximum est suivi par une diminution rapide des performances physiques. Les performances intellectuelles diminuent de la même façon, mais plus lentement.

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012

sance », liés aux limites biométriques du corps humain ?

La seconde hypothèse est clairement la plus probable. Dans certains sports où la taille est un avantage majeur (basket, volley, rugby, lancers…), la sélection a déjà été orientée depuis longtemps pour recruter les athlètes de poids et de tailles les plus élevés. Le cas de la NBA (*National Basketball Association*) américaine est particulièrement démonstratif. Après l'ouverture à l'international en 1984, les joueurs de plus de 2,03 mètres ont été recrutés dans le monde entier. La taille moyenne des équipes américaines de basket a immédiatement augmenté, mais elle a aussi très vite atteint un plateau. Il en a été de même dans la plupart des autres sports professionnels, où l'on observe depuis 20 ans une diminution nette du taux de croissance de la taille des athlètes *(voir la figure 6)*. Ces constatations s'expliquent facilement si l'on prend en compte le fait que les tailles des populations suivent le même rythme. Après des gains très importants au début du XXe siècle, les augmentations de la taille moyenne au sein des nations sont désormais bien plus modestes. Et l'on sait que les conditions environnementales (et nutritionnelles) qui nous ont [illegible]

L'acmé est proche

Si le recrutement d'athlètes aux mensurations très supérieures à la moyenne devient de plus en plus difficile, quel en sera l'impact sur la performance ? Quand on examine la situation dans chaque discipline, il apparaît que de nombreux facteurs ont été exploités au maximum. Désormais, on ne peut guère plus que les améliorer à la marge, soit par des modifications des règlements, soit par le recours à des moyens biotechnologiques illicites (amphétamines, [illegible], EPO, [illegible]).

En athlétisme, seule une poignée d'athlètes en sprint ou en marathon, semblent avoir les capacités de repousser encore un peu les limites, mais deux tiers des épreuves ne progressent déjà plus. Affiner les mesures au millième de seconde permet peut-être d'établir de nouveaux records, mais cela ne fera en réalité que rééchantillonner les courbes. Tous ces constats laissent penser que, pour des raisons de limites endogènes autant que de contraintes croissantes sur les ressources, l'amélioration de la performance, à l'instar de celle de l'espérance de vie, approche de son acmé.

Les derniers jeux Olympiques, à Londres, ont accentué ces tendances. Comme nous l'avons déjà noté, en comparaison des 42 records du monde battus à Pékin en 2008, seuls 2 nouveaux records du monde ont été établis à Londres. Avec quatre records (relais 4 × 100 mètres féminin et masculin, [illegible] mètres masculin, 20 kilomètres

Génétique et performance

Les paramètres morphologiques et métaboliques d'un coureur sur 800 mètres sont à mi-chemin de ceux des sprinteurs et des marathoniens. Que [illegible] dans leurs différences ? Parmi ceux qui ont été récemment identifiés, on peut citer :

– *ACNT3* : ce gène est présent dans les fibres musculaires associées aux efforts de sprint. Son impact sur la performance de course fait l'objet d'un large consensus entre chercheurs. Les génotypes des marathoniens internationaux (l'allèle X est présent chez 50 pour cent d'entre eux) diffèrent de ceux des sprinteurs de même [illegible] (l'allèle [illegible] sent chez plus de 95 pour cent d'entre eux). Le gène *ACNT3* est fréquent dans la population jamaïcaine.

– *HFE* : ce gène régule le métabolisme du fer. Son lien avec la performance en endurance (en aviron comme en ski de fond) a été mis en évidence par quatre équipes françaises (CNRS Hématologie Necker, Labex Globules Rouges, IBT Troyes & Parrc INSERM associées à l'IRMES). La pratique du [illegible] niveau s'accompagne d'une augmentation des pertes de fer et d'une diminution de son absorption intestinale. Le manque de fer limite alors les capacités à réduisant la production de globules rouges, mais aussi les fonctions musculaires et cardiaques. Dès prend la fréquence élevée d'une mutation associée à une plus grande absorption du fer chez les sportifs d'endurance qui trustent les podiums internationaux. Toutefois, cette mutation, lorsqu'elle se présente sous forme homozygote (lorsque les deux allèles, maternel et paternel, sont concernés), est habituellement responsable d'une maladie héréditaire : l'hémochromatose, qui entraîne une intoxication des tissus par le fer en excès. Cet effet, dit de superdominance, est important pour comprendre la persistance de certaines maladies génétiques récessives (se déclarant à l'état homozygote), mais dont l'état hétérozygote se révèle très favorable à la survie dans certaines conditions [illegible] res et pendant hémorragiques étaient plus fréquentes et où la transfusion n'existait pas).

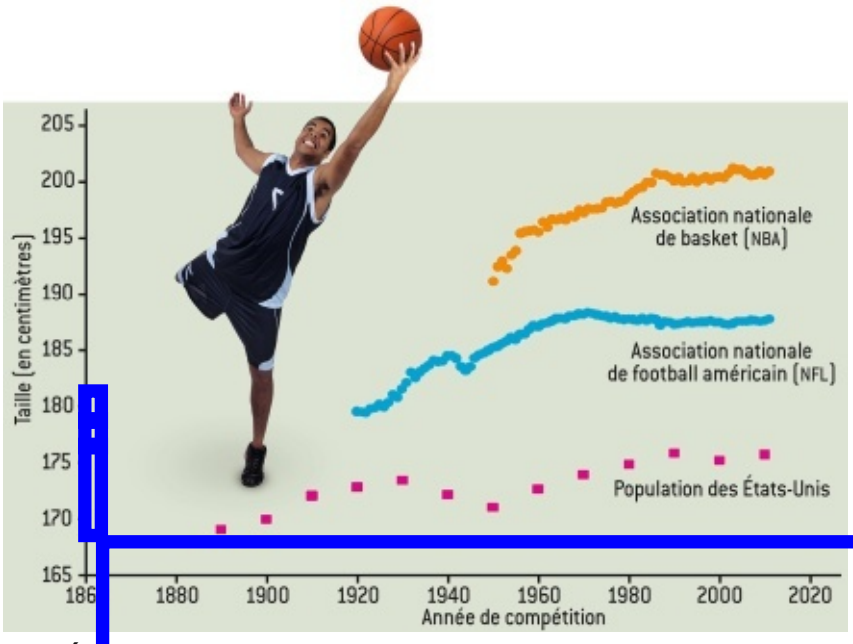
– Les gènes influant sur la taille : un consortium international, associant [illegible] tions, a récemment mis en évidence la complexité des interrelations génétiques dans la détermination de la taille, un paramètre « héritable ». Au-delà du locus codant l'hormone de croissance ou ses récepteurs, plus de 1 [illegible] sites du génome, associés dans [illegible] voies métaboliques cohérentes, ont ainsi été découverts. Mais à eux tous, ils n'expliquent que dix pour cent de l'héritabilité. Il reste encore un long chemin à parcourir pour l'identification de chacun des autres locus, mais on comprend mieux comment ces génotypes favorables se transmettent « en bloc » de parents grands à enfants grands.

On suppose aujourd'hui que certains athlètes, tels qu'Usain Bolt ou Florent Manaudou, cumulent plusieurs gènes favorisant la performance. Leur équation pourrait être du type : *ACNT3* + gènes associés à la taille (dont l'effet prédomine sur les membres inférieurs pour l'un, et sur les membres supérieurs pour l'autre) + [illegible] musculaire et vasculaire (facilitant la résistance et la récupération après des entraînements intenses) + allèle X = titre olympique [illegible] binée avec une innovation technique [illegible] cord du monde.

L'apparition d'athlètes génétiquement taillés pour la performance résulte de deux facteurs. Le premier est un effet démographique mondial (de un à sept milliards d'êtres humains en cinq générations). Avec l'augmentation du nombre d'individus, la probabilité de voir apparaître des personnes aux performances exceptionnelles augmente selon des lois statistiques précises. Le second facteur est l'optimisation des processus de détection : la probabilité conjointe de cumuler [illegible] bénéficiers des hasards de la sélection conduisant aux qualifications olympiques reste encore perfectible.

Un dernier exemple de l'influence des gènes sur la performance est celui de coureurs skieurs qui avaient été temporairement interdits de course aux derniers jeux Olympiques d'hiver, en raison de taux d'hémoglobine sérique trop élevés. On les pensait dopés ! En réalité, ces athlètes synthétisent naturellement plus d'hémoglobine que la normale grâce à une prédisposition génétique. Dès lors, et compte tenu des plafonds de performances objectivés, la question principale redevient celle des limites physiologiques [illegible] sées au regard de notre génétique ?

Jean-François Toussaint,
[illegible]



©Shutterstock/Luis Louro

6. LES ÉVOLUTIONS DE LA TAILLE MOYENNE DES JOUEURS de basket-ball (NBA), de football américain (NFL) et de la population américaine illustrent les plafonds observés depuis la fin du XXe siècle. Dans ces deux sports où les critères biométriques reflètent des avantages cruciaux, la croissance de la taille moyenne des athlètes a cessé dès les années 1980 : l'exploitation du vivier mondial des très grands gabarits est alors complète.

marche féminin), l'athlétisme stagne, voire régresse dans certaines épreuves (les lancers notamment). Ce phénomène se manifeste désormais pour toutes les disciplines « matures ». Malgré l'annonce d'une « pluie de records » en natation, il n'y en a eu que huit, contre 25 à Pékin… Ces nouvelles performances concernent d'ailleurs des épreuves (brasse, papillon et longues distances) qui avaient le moins bénéficié des progrès hydrodynamiques apportés par les combinaisons en polyuréthane. Leur marge de progression reste encore possible et est en tout cas supérieure à celles des épreuves dont les records avaient explosé en 2008 et 2009 (nage libre, dos et courtes distances).

Dans un contexte de maturation de plus en plus fréquent, comment produire encore des records ? La création de gestes techniques est une voie. L'exemple le plus frappant est l'invention du rouleau dorsal *(Fosbury-flop)* au saut en hauteur. Introduite dans les années 1970, cette technique a permis une nette amélioration des performances. Quatre ans à peine après son introduction par Dick Fosbury en 1968, 28 des 40 compétiteurs en saut en hauteur l'utilisaient déjà. Aujourd'hui, cette méthode, qui a permis de porter le record du monde à 2,45 mètres pour les hommes et à 2,09 mètres chez les femmes, est la plus couramment utilisée.

Encore faut-il que les techniques inventées respectent la physiologie, tant pour l'efficacité du geste que pour la sécurité de l'athlète. Quand bien même, une technique apte à changer les performances de haut niveau ne s'invente pas facilement. Dans les sports qui nécessitent un équipement, tels le saut à la perche, le ski ou le patinage, le recours à de nouvelles techniques dans la conception du matériel sportif peut sans doute plus facilement changer la situation. Cela s'est par exemple produit en patinage de vitesse, quand furent introduits les klaps pour patins (fixation de la lame seulement à l'avant de la chaussure).

Un cas similaire s'est produit entre 2007 et 2009 en natation. Élaborées en collaboration avec des ingénieurs de la NASA, les combinaisons en polyuréthane ont entraîné une augmentation sans précédent des vitesses de nage (plus de deux pour cent). Mais, en janvier 2010, la Fédération internationale de natation, arguant d'un bénéfice technique trop important au regard de la composante physiologique et du coût trop élevé de ces équipements, a interdit leur usage. Les vitesses moyennes de nage ont aussitôt baissé de 1,8 pour cent… Le dopage technologique est une question de règle et de convention, puisqu'il change la nature du sport et biaise les compétitions s'il n'est pas universellement partagé.

Moins de dopage, moins de records…

Le dopage pharmacologique, lui, existe depuis fort longtemps. Il n'a toutefois pas empêché le plafonnement des performances observé aujourd'hui. Depuis plusieurs années un renforcement de la lutte contre ce dopage a été mis en place. À Londres, plus de 6 000 tests urinaires et sanguins ont été effectués, de sorte que plus d'un athlète sur deux a été contrôlé pendant cette olympiade. Ce nombre important pourrait dissuader certains de frauder, d'autant qu'il a été complété, pour la première fois, par le passeport biologique : un suivi des athlètes permettant de déceler des anomalies du profil sanguin (afin de cibler les suspects à contrôler). Certaines substances ou procédés restent cependant encore difficiles à détecter, telle la transfusion autologue, qui consiste à se réinjecter son propre sang pour augmenter le nombre de globules rouges, donc l'apport d'oxygène aux muscles.

Le renforcement de la lutte antidopage dirigée par l'AMA (l'Agence mondiale antidopage) entraîne un nouveau recul des performances. Cela avait été observé lors

■ BIBLIOGRAPHIE

N. Lanotte et S. Lem, **Sportifs high tech**, Belin/Pour la Science, 2012.

G. Dine *et al.*, **HFE mutations associated with high level sport performance**, *Hematologica*, vol. 96(2), p. 229, 2011.

R. Floud *et al.*, **The Changing Body : Health, Nutrition and Human Development in the Western World since 1700**, Cambridge University Press, 2011.G.

G. Berthelot *et al.*, **Athlete atypicity on the edge of human achievement : performances stagnate after the last peak, in 1988**, *PLoS ONE*, vol. 5, e8800, 2010.

R. Neptune *et al.*, **The influence of muscle physiology and advanced technology on sports performance**, *Annual Review of Biomedical Engineering*, vol. 11, pp. 81-107, 2009.

J. Charles, **The evolution of speed, size and shape in modern athletics**, *The Journal of Experimental Biology*, vol. 212, pp. 2419-2425, 2009.

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012

des derniers championnats du monde d'athlétisme en 2011. Les valeurs établies à Daegu, en Corée du Sud, étaient en effet inférieures de quatre pour cent aux records du monde en vigueur.

Le plafonnement des performances révèle que, malgré le recours aux produits dopants, les performances associées au phénotype humain (l'ensemble des caractères de notre espèce) sont intrinsèquement limitées par nos gènes et par les conditions de leur expression, c'est-à-dire par l'environnement. Si ce dernier se révélait moins favorable dans une ou plusieurs de ses composantes (climatique, économique, démographique ou culturelle), les performances optimales autorisées par le génome humain se restreindraient fortement. De fait, avec leur mesure précise et leur archivage sur plus d'un siècle, les maxima physiologiques, certifiés par le sport de haut niveau, révèlent un processus beaucoup plus global, en cours dans l'ensemble des activités humaines. En effet, les principes qui gouvernent ces progressions limitent aussi nos taux de croissance actuels – qu'ils soient génétiques, économiques, agricoles, technologiques ou démographiques. Et si certains frisent le zéro, beaucoup plongent déjà dans le négatif.

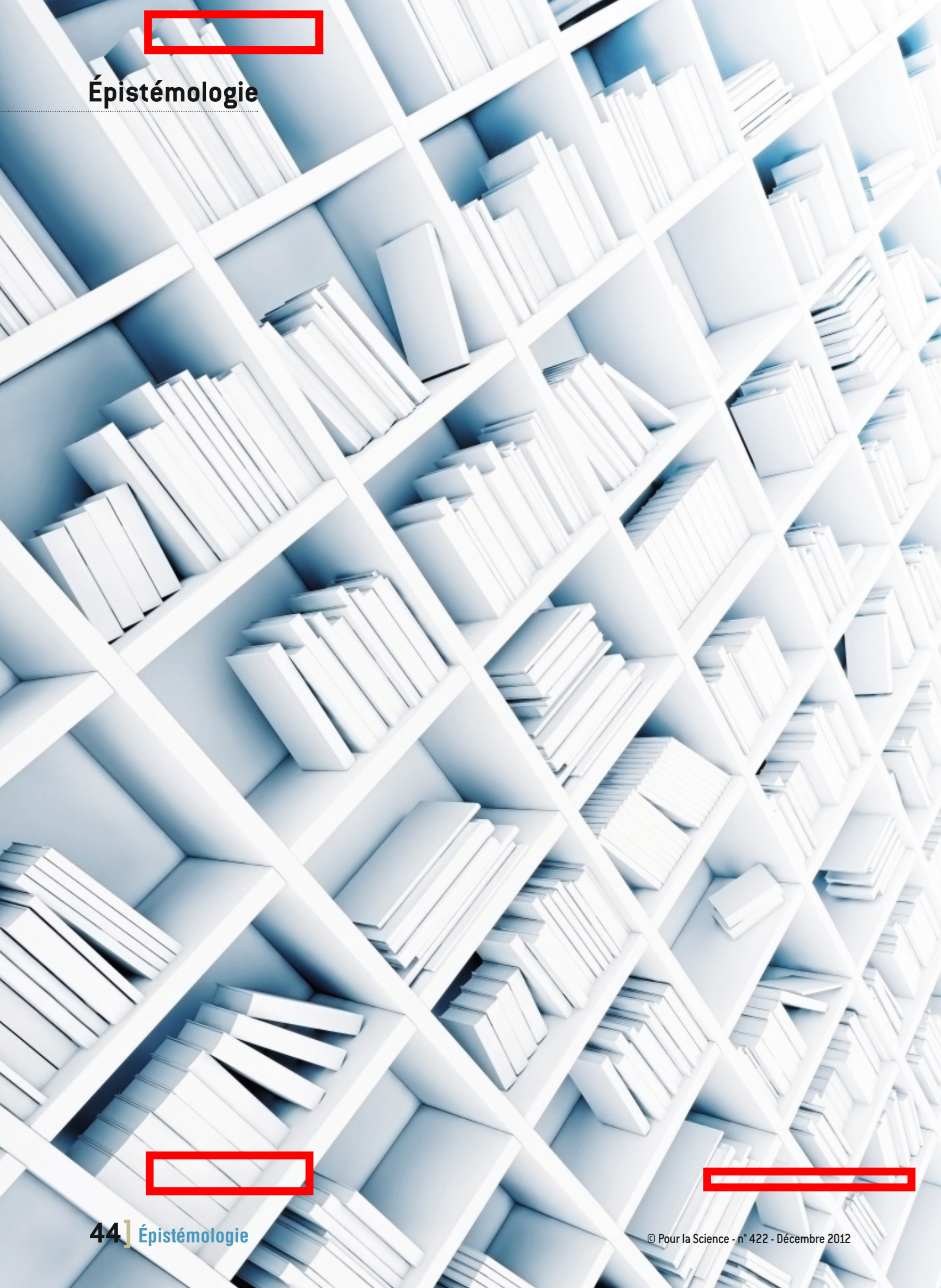
IL EST DIFFICILE D'IMAGINER comment progressera la recherche à laquelle se livre l'humanité pour tenter d'accroître encore ses performances.

Dès lors, que va-t-il se passer à court terme ? Un premier recul des performances se produira très probablement dès 2013. Cette périodicité est en effet observée tous les quatre ans à l'issue de chaque olympiade. Elle traduit le renouvellement des générations sportives autant que la fatigue des meilleurs, une fois récompensés et rassasiés dans leur quête de gloire.

Les athlètes continueront cependant d'éprouver leurs limites, mais dans des marges de progression de plus en plus restreintes. Ce stress supplémentaire poussera certains à s'orienter vers de nouveaux procédés illicites et indétectables. Le dopage génétique par détournement des thérapies géniques apparaît comme l'ultime utopie de ces tentatives. Son échec est cependant prévisible tant sa maîtrise est, à ce jour, incertaine. De plus, la multitude des interactions entre les gènes cibles rend très aléatoire le gain de performance espéré, sans parler des déséquilibres physiologiques que ne manquera pas d'occasionner toute altération d'un génome aussi complexe que celui de l'homme. Les nombreux échecs qu'essuient les manipulations génétiques des végétaux en témoignent.

Il est donc difficile d'imaginer comment progressera la recherche à laquelle se livre l'humanité pour accroître encore ses performances sportives. Cette quête est soumise à des contraintes croissantes d'ordre technique, économique, environnemental ou socio-politique. Une seule chose est certaine ; comme les chercheurs à l'orée d'une découverte ou les politiques à la veille d'une élection, les athlètes vont continuer à mettre tout leur talent en jeu pour atteindre leur objectif : monter sur la plus haute marche dans leur discipline. ■





© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012

Les limites de la connaissance

Hervé Zwirn

La science pourra-t-elle tout prévoir, tout calculer, tout démontrer ? Non. Depuis le XXe siècle, les mathématiciens et les physiciens découvrent des limites infranchissables au savoir.

L'humanité a toujours cherché à comprendre le monde et à accroître ses connaissances. L'invention de l'imprimerie, l'édition d'encyclopédies, la constitution de grandes bibliothèques, puis, plus récemment, l'avènement de l'informatique et de mémoires électroniques permettant de stocker sur un dispositif de la taille d'une main l'équivalent d'une grande bibliothèque nationale, ont révolutionné l'accès au savoir. Pourtant, nous sommes encore loin de tout connaître et tout comprendre. On pourrait se dire que c'est une question de temps et de patience. Mais outre des obstacles d'ordres technique, biologique ou social – par exemple, aucun individu, quelle que soit son intelligence, n'est capable d'assimiler tout le savoir disponible aujourd'hui –, il existe des difficultés plus fondamentales. Comme nous allons le voir, ces dernières ont été mises au jour dans les deux champs scientifiques où l'espoir de parvenir à une connaissance parfaite était pourtant le moins utopique : les mathématiques et la physique.

Ainsi, en 1931, le logicien autrichien Kurt Gödel publia deux théorèmes qui ont brisé le rêve du grand mathématicien allemand David Hilbert de construire une mathématique où tout théorème serait démontrable sans ambiguïté. Gödel prouva formellement que, dans tout cadre mathématique, il existe des énoncés qui, bien que vrais, ne pourront jamais être démontrés. Les travaux de Gödel, ainsi que d'autres développements des mathématiques et de la physique, ont eu des conséquences sur la réflexion philosophique sur les limites de la connaissance humaine. Simultanément à de grandes révolutions scientifiques telles que la théorie quantique, les mathématiques et la physique du XXe siècle ont montré qu'il existe des limites infranchissables au champ du savoir.

L'importance de ce bouleversement ressort davantage lorsqu'on connaît le contexte scientifique de la fin du XIXe siècle et du début du XXe siècle. Chez les savants du XIXe siècle, on trouvait un certain optimisme et l'idée que tout problème pouvait être résolu ; ce n'était qu'une question de temps, de moyens et d'ingéniosité. La plupart des scientifiques pensaient que la science apporterait des réponses à presque toutes les questions possibles sur le monde qui nous entoure. Bien sûr, peu d'entre eux prétendaient que ce stade final était déjà atteint. Mais le cadre théorique de la fin du siècle leur paraissait assez solide pour servir de base aux explications qui seraient développées ultérieurement. La conviction des scientifiques était que les théories existantes, une fois améliorées, seraient suffisantes pour rendre compte de façon satisfaisante de l'ensemble des phénomènes connus ou à découvrir.

Certes, tous ne partageaient pas ce sentiment. Le physiologiste allemand Emil du Bois-Reymond l'a exprimé en 1872 à travers la maxime latine « *ignoramus et ignorabimus* » qui signifie « nous ne savons pas et ne saurons jamais ». Mais sa position n'était pas majoritaire. À l'inverse, le physicien britannique lord Kelvin, vers la fin du XIXe siècle, prétendait que « la science

L'ESSENTIEL

- Les mathématiques et la physique ne permettront pas de tout comprendre. Certaines théories prédisent des limites au savoir.
- Les théorèmes d'incomplétude de Gödel sont parmi les premiers exemples de limites fondamentales en mathématiques.
- Il existe des limites cognitives et ontologiques, car il est impossible de calculer certains objets mathématiques comme la plupart de ses décimales existent.
- Les systèmes chaotiques posent une limite prédictive : il n'est pas possible de déterminer l'état du système au-delà d'un avenir limité.

© Zastol'skiy Victor Leonidovich/shutterstock.com

physique forme aujourd'hui, pour l'essentiel, un ensemble parfaitement harmonieux, un ensemble pratiquement achevé. Il n'y a plus rien de nouveau à découvrir. Tout ce qu'il reste à faire, ce sont des mesures de plus en plus précises ».

Hilbert ne pensait nullement que les mathématiques étaient achevées puisqu'il proposa, en 1900, une liste de 23 grands problèmes ouverts. Il travailla aussi sur un programme visant à développer une théorie de la démonstration, afin de donner des fondements solides aux mathématiques. Selon lui, toute vérité mathématique devait pouvoir être démontrée, et cela d'une façon qui ne laisse aucun doute quant à la validité de la démonstration.



G. Guerreiro

1. KURT GÖDEL (1906-1978), mathématicien autrichien qui prit la nationalité américaine, a énoncé et démontré en 1931 deux théorèmes d'incomplétude. Ils indiquent que toute mathématique suffisamment riche pour contenir l'arithmétique contient des énoncés indécidables, et que la non-contradiction du système est l'un d'eux.

Éliminer le doute en mathématiques

S'opposant à du Bois-Reymond, Hilbert déclara : « En mathématiques, il ne doit pas y avoir d'*ignorabimus* ». On retrouve ces projets dans le courant de pensée des empiristes logiques du cercle de Vienne, un groupe de philosophes des années 1920 qui pensaient que le savoir pouvait être assis sur des fondations solides.

Selon cette école de pensée, il devrait être possible de construire le savoir de proche en proche, en s'assurant par vérification, à chaque étape de sa construction, que les théories élaborées sont vraies. L'édifice total ainsi constitué serait une description adéquate de la réalité, non seulement dans ses manifestations empiriques, mais aussi dans sa structure profonde. Par cette méthode, il n'y aurait pas le moindre doute sur la véracité des énoncés ainsi, la science serait capable de prévoir qualitativement et quantitativement les événements futurs avec une précision arbitraire et sur une durée infinie.

La science du XX[e] siècle a rapidement détruit ces espoirs. Comme nous l'avons vu, Gödel a mis fin au programme de Hilbert à travers la démonstration de ses célèbres théorèmes d'incomplétude. Ces derniers prouvaient que, dans tout cadre mathématique, il existe des énoncés qui sont vrais, mais qu'il est impossible de prouver dans ce cadre.

Par ailleurs, la physique du XIX[e] siècle, constituée essentiellement de la mécanique newtonienne, de la thermodynamique et de l'électromagnétisme, a donné naissance à deux révolutions majeures, la théorie de la relativité et la théorie quantique. Ces édifices, auxquels il convient d'ajouter la physique des systèmes non linéaires qui s'est beaucoup développée dans les années 1980-1990, ont porté un coup fatal aux espoirs de Kelvin.

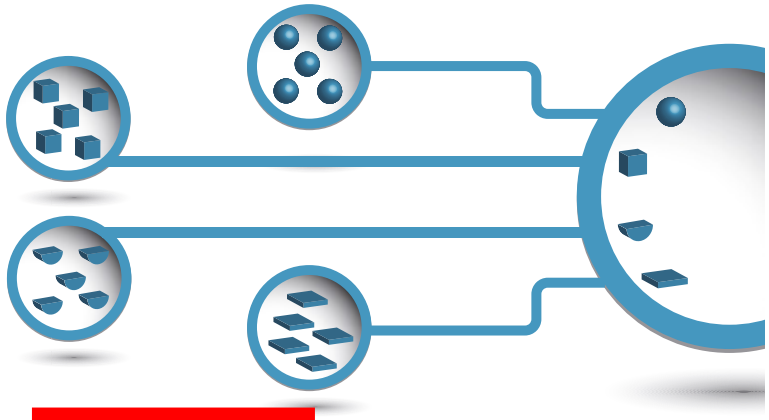
La science construit ses propres limites

L'idée de tout expliquer n'est aujourd'hui plus tenable en raison de la mise en évidence, par la science elle-même, de limites infranchissables à son propre discours. Il est commode de classer ces limites en quatre catégories que nous développerons dans la suite. Les limites *constructives* sont relatives à l'impossibilité de construire un discours scientifique qui échappe à tout doute et qui repose sur des fondements sûrs. Les limites *prédictives* montrent l'impossibilité de prévoir certains phénomènes avec une précision arbitraire sur une échelle de temps indéterminée. On retrouve ce type de limite en physique, par exemple dans la théorie du chaos. Les limites *cognitives* concernent l'existence de domaines qui resteront hors de portée du savoir. De telles

L'AXIOME DU CHOIX

L'axiome du choix stipule qu'en présence de plusieurs ensembles non vides, il est possible de choisir un élément de chaque ensemble pour former un nouvel ensemble. Plus formellement, pour toute famille d'ensembles, il existe une fonction de choix qui associe à chaque ensemble un de ses éléments. Cet axiome est trivial et n'est pas nécessaire pour les ensembles finis. En revanche, il est utile pour des démonstrations mettant en jeu des ensembles infinis. L'axiome du choix est souvent ajouté à l'axiomatique de Zermelo-Fraenkel en théorie des ensembles. Il était d'ailleurs implicitement utilisé jusqu'à la fin du XIX[e] siècle, avant d'être rigoureusement formalisé par Ernst Zermelo.

Cependant, cet axiome est contrarié les mathématiciens intuitionnistes préfèrent ne pas l'utiliser. En effet, l'axiome du choix assure l'existence de certains objets, mais n'en donne pas une méthode de construction, ce qui est peu satisfaisant du point de vue des intuitionnistes.



© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012

limites apparaissent en mathématiques dans l'étude de nombres parfaitement définis, mais qui ne sont pas calculables – des nombres dont on ne peut déterminer, au mieux, qu'un nombre fini de décimales. Enfin, les limites *ontologiques* éliminent quelques entités conceptuelles en montrant leur inconsistance ou en les situant en dehors du champ d'appréhension du discours scientifique. C'est le cas en mécanique quantique avec le rôle privilégié de l'observateur ou, en mathématiques, avec la question de l'existence ou non de certains objets.

Ces limites se distinguent de celles résultant d'obstacles pratiques. Ces derniers sont par exemple liés à des données trop nombreuses pour être traitées, ou, au contraire, à leur insuffisance ; ils peuvent aussi être liés à des temps de calcul qui seraient beaucoup trop longs. Ces limites peuvent être repoussées (mais probablement pas abolies) par l'amélioration des techniques de mesure et de calcul, ou la collecte de nouvelles données. Les limites dont on traitera ici sont d'un autre type : elles sont intimement liées à la nature et à la construction des théories mathématiques et physiques, et elles ne pourront pas être repoussées par un progrès technique.

Des difficultés liées aux ensembles infinis

Les mathématiques sont par essence la discipline scientifique dont on attend le plus de certitude. Bien que non empiriques, elles ne sont censées dire que des choses vraies et doivent permettre de démontrer tout ce qui est vrai. C'était, en tout cas, le vœu de Hilbert et son refus de tout *ignorabimus* en mathématiques. Son programme visait à donner à ce champ scientifique une théorie de la démonstration qui ne laisse subsister aucun doute quant à la validité d'une preuve. Cette volonté était motivée par des débats animés parmi les mathématiciens de la fin du XIX[e] siècle et le début du XX[e], qui portaient sur certaines démonstrations acceptées par les uns et rejetées par d'autres. Il était notamment question de l'axiome du choix, formalisé par le mathématicien allemand Ernst Zermelo, et sur lequel reposaient de nombreuses démonstrations *(voir l'encadré page 46)*.

Les sujets disputés étaient souvent des résultats faisant appel à des quantités ou des ensembles infinis. Pour éviter ce type de controverses, le programme de Hilbert visait à construire les mathématiques sur une théorie de la preuve dite « finitiste » en ce sens qu'elle évitait le recours à tout infini considéré dans sa globalité. Hilbert espérait montrer que dans un tel édifice, toute vérité mathématique aurait été démontrable et cela d'une façon convaincante pour tous les mathématiciens. Cependant, en publiant ses théorèmes d'incomplétude en 1931, Gödel montra que cet espoir était vain.

Le premier théorème montre que dans tout système formel – un ensemble d'objets associés à un nombre fini d'axiomes et de règles de manipulation de symboles – contenant l'arithmétique, il existe des propositions vraies qu'on ne peut ni prouver ni réfuter. On les nomme des indécidables. Le second théorème énonce que la non-contradiction du système – c'est-à-dire que celui-ci ne conduit pas à la fois à une affirmation et à son contraire – est elle-même une proposition indécidable.

Cela signifie qu'il faut renoncer à l'espoir de prouver toute proposition vraie d'un système formel. Tout système formel contiendra des propositions qui, bien que vraies, ne pourront jamais être démontrées. De plus, cela montre qu'il est impossible de démontrer qu'un système formel n'est pas contradictoire en s'appuyant sur des démonstrations ne sortant pas du cadre de ce système. On ne peut donc jamais être sûr que le système formel utilisé n'est pas contradictoire, sauf à tenter de le prouver en s'appuyant sur un système formel plus large, mais dans ce cas, c'est la non-contradiction du système élargi qui est, à son tour, mise en question.

Ces théorèmes établissent une limite constructive : il est impossible de construire

Le nombre Ω de Gregory Chaitin

Le nombre Ω de Chaitin est défini comme la probabilité qu'une machine de Turing, exécutant un programme tiré au hasard, s'arrête en un temps fini. Un programme aléatoire s'exprime comme une suite binaire de 0 et de 1 où chaque bit est tiré au hasard. Le programme doit être autodélimité, c'est-à-dire contenir un signal de fin de programme, telle une séquence particulière, par exemple 11…1. Il est possible d'estimer Ω en répétant plusieurs fois le tirage aléatoire de programmes. Mais Ω n'est accessible que théoriquement, car il faudrait pouvoir tirer indéfiniment des programmes. De surcroît, il n'est pas possible de savoir si un programme aléatoire ne s'arrête jamais (c'est un problème indécidable). En pratique, on définit un temps d'exécution au-delà duquel on considère que le programme ne s'arrête pas.

Ω est donc compris entre 0 et 1, et peut être écrit comme une suite binaire infinie de la forme $0,a_1a_2…a_n…$ Il est aussi non calculable par un algorithme et ses chiffres, sauf un nombre fini d'entre eux, sont indécidables dans le sens suivant. Un système formel raisonnable peut déterminer des chiffres de Ω, c'est-à-dire démontrer certains énoncés de type « $a_i = 1$ » ou « $a_i = 0$ », mais un système raisonnable ne peut démontrer qu'un nombre fini d'énoncés de chiffres a_i de Ω, le système ne peut prouver ni un énoncé ni son contraire.

L'AUTEUR



Hervé ZWIRN est professeur associé à l'UFR de physique de l'Université Paris-Diderot et président du Collège de physique et de philosophie.

BIBLIOGRAPHIE

J.-P. Delahaye, **La logique, un aiguillon pour la pensée**, Belin-Pour la Science, 2012.

Les grands problèmes mathématiques, *Dossier Pour la Science*, n° 74 janvier-mars 2012.

H. Zwirn, **Les systèmes complexes**, Odile Jacob, 2006.

Les chemins de la logique, *Dossier Pour la Science* n° 49, octobre-décembre 2005.

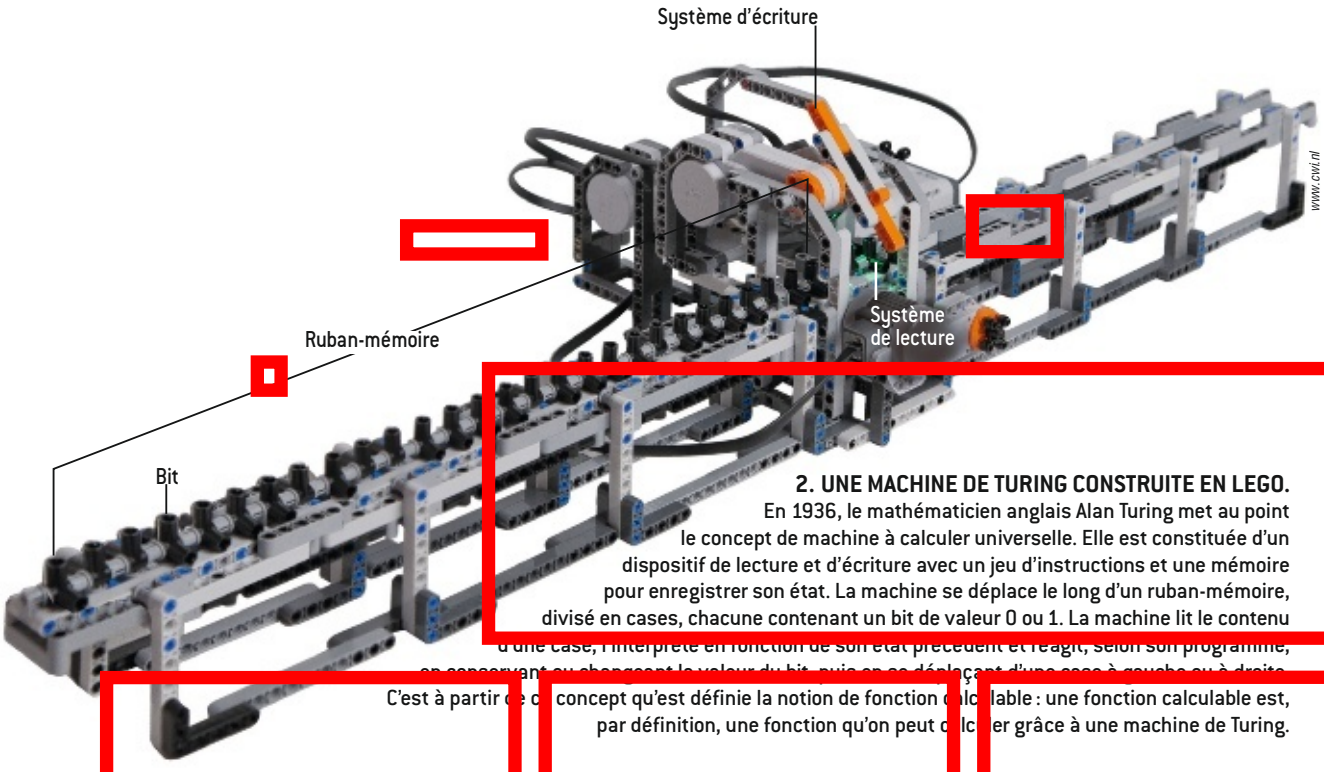
G. Guerreiro, **Gödel**, *Les Génies de la Science*, n° 20, août-novembre 2004.

H. Zwirn, **Les limites de la connaissance**, Odile Jacob, 2006.

SUR LE WEB

Site décrivant la construction d'une machine de Turing : www.legoturingmachine.org/

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012



2. UNE MACHINE DE TURING CONSTRUITE EN LEGO. En 1936, le mathématicien anglais Alan Turing met au point le concept de machine à calculer universelle. Elle est constituée d'un dispositif de lecture et d'écriture avec un jeu d'instructions et une mémoire pour enregistrer son état. La machine se déplace le long d'un ruban-mémoire, divisé en cases, chacune contenant un bit de valeur 0 ou 1. La machine lit le contenu d'une case, l'interprète en fonction de son état précédent et réagit, selon son programme, en conservant ou changeant la valeur du bit, puis en se déplaçant d'une case à gauche ou à droite. C'est à partir de ce concept qu'est définie la notion de fonction calculable : une fonction calculable est, par définition, une fonction qu'on peut calculer grâce à une machine de Turing.

un système mathématique formel non contradictoire permettant d'exprimer la totalité des mathématiques, et tel que tout énoncé vrai exprimable dans le système (en particulier sa propre non-contradiction) soit démontrable dans le système.

Une autre difficulté, liée aux raisons invoquées par Hilbert pour motiver son programme, provient de l'ambiguïté du terme « exister » pour un objet mathématique. Pour Hilbert, un objet mathématique existe s'il est non contradictoire. Pour les mathématiciens dits intuitionnistes, un objet mathématique n'existe que s'il est possible d'en donner un procédé effectif de construction. Par exemple, un ensemble est dit bien ordonné si toute partie non vide possède un plus petit élément. L'axiome du choix permet de montrer l'existence d'un bon ordre sur l'ensemble des nombres réels. Pour Hilbert, ce bon ordre existe. Ce résultat est naturel pour les nombres entiers, mais il est impossible d'expliciter un procédé effectif de construction dans le cas d'un intervalle ouvert de nombres réels. Pour les intuitionnistes, ce bon ordre n'existe donc pas.

De plus, même si l'on refuse les restrictions trop fortes des intuitionnistes, il est souvent difficile de se prononcer sur l'existence de certains objets. Dans la théorie des ensembles, on utilise des nombres dits cardinaux pour quantifier le nombre d'éléments d'un ensemble. Si l'ensemble en question est infini, le nombre cardinal est transfini – notion introduite par le mathématicien allemand Georg Cantor. L'existence de certains de ces nombres, les « grands cardinaux », n'est pas universellement acceptée, même lorsqu'elle ne conduit à aucune contradiction. Pour certains mathématiciens, l'argument de non-contradiction n'est pas suffisant pour justifier leur existence.

Des énoncés indécidables

Il n'existe et n'existera sans doute jamais de raison contraignante déterminant de façon définitive quels sont les objets mathématiques qui existent et ceux qui n'existent pas. Cette limite ontologique sur l'existence d'un objet mathématique provient du fait que le formalisme mathématique lui-même ne peut imposer cette existence. Pour les intuitionnistes, seules existent les entités qui peuvent être construites. Pour les autres mathématiciens, l'inclusion d'un objet résulte d'un choix personnel fondé sur des considérations de naturalité, de fécondité ou d'efficacité. Il faut donc renoncer à trancher de façon définitive la question de l'existence des objets mathématiques.

Même en considérant un formalisme rigoureusement défini, il est impossible de déterminer de façon non ambiguë les propriétés de certains objets. Ainsi, l'axiomatique de Zermelo-Fraenkel, sur laquelle les mathématiciens fondent généralement la théorie des ensembles, est suffisante pour une grande partie des mathématiques actuelles. En revanche, elle ne nous dit rien sur la vérité de l'axiome du choix. Cet énoncé est indécidable : il ne peut être ni prouvé ni réfuté dans l'axiomatique de Zermelo-Fraenkel. Il en est de même pour l'existence des grands cardinaux. L'axiomatique de Zermelo-Fraenkel est compatible avec l'affirmation et avec la négation de ces énoncés. L'intuition n'est pas d'un grand secours pour décider de leur vérité. Il en résulte qu'il devient difficile d'accepter le point de vue selon lequel il existe de « vrais ensembles » pour lesquels ces propriétés sont soit vraies, soit fausses.

La découverte récente de nouvelles propositions indécidables, en particulier dans le domaine de l'informatique théorique, a fait reculer encore plus loin la prétention de pouvoir trouver la réponse à toute interrogation mathématique. Le mathématicien argentino-américain Gregory Chaitin s'est intéressé aux équations diophantiennes, équations polynomiales à coefficients entiers dont les inconnues sont des nombres entiers également. Il a construit une telle équation contenant 17 000 variables et un paramètre unique noté n. En fonction de la valeur de n, l'équation a un nombre fini ou infini de solutions. Pour une valeur de n donnée, les solutions sont-elles en nombre fini ? G. Chaitin a prouvé qu'aucun système formel ne pouvait déterminer la finitude ou non du nombre de solutions de cette équation pour plus qu'un nombre fini

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012

de valeur de n. Cela signifie que, quel que soit le système formel dans lequel on se place, il est impossible de répondre de façon générale à la question « cette équation a-t-elle un nombre fini ou infini de solutions pour telle valeur de n ? ».

Ce problème est lié aux travaux de G. Chaitin sur les machines de Turing universelles, sortes d'ordinateurs théoriques capables de mener tout type de calcul *(voir la figure 2)*. G. Chaitin a défini le nombre Ω (oméga) comme la probabilité que la machine s'arrête au bout d'un temps fini quand on lui donne à exécuter un programme aléatoire écrit en code binaire, c'est-à-dire dont chaque bit (0 ou 1) est tiré au hasard *(voir l'encadré page 47)*. Le nombre Ω est bien défini, mais n'est pas calculable. Un système formel est capable de calculer au plus un nombre fini de bits de cette probabilité, écrite dans le système binaire. Le problème de l'équation diophantienne dont le paramètre n revient aussi à calculer un nombre du type de Ω pour savoir si le nombre de solutions entières est fini. Chaque bit correspond à une valeur de n et indique si les solutions sont en nombre fini (par exemple, le bit en question est égal à zéro si les solutions sont en nombre fini et égal à un sinon).

Une infinité d'énoncés indémontrables

Les nombres de type Ω n'étant pas calculables, il en résulte la limite cognitive suivante : quelque soit le système formel utilisé, il existe une infinité d'énoncés vrais qu'il est impossible de démontrer – si on énonce pour chaque bit la valeur qu'il peut prendre, nécessairement certains énoncés sont vrais. De plus, les énoncés de ce type, dont la résolution est irrémédiablement hors de portée, sont infiniment plus nombreux que ceux qu'il est possible de traiter.

Quant aux limites identifiées en physique, elles sont souvent de nature prédictive. Il n'est, en général, pas possible de fournir mieux qu'une probabilité sur une future mesure, en raison de la nature chaotique ou quantique des phénomènes. L'étude des systèmes dynamiques non linéaires en mécanique classique, dont le comportement est régi par des équations différentielles non linéaires, a mis au jour des propriétés surprenantes. Leur comportement est déterministe : la donnée de leur état initial suffit, en principe, pour calculer leur état à tout instant. De tels systèmes devraient donc être parfaitement prévisibles. On a cependant mis en évidence la propriété de « sensibilité aux conditions initiales », selon laquelle

L'irréductibilité computationnelle

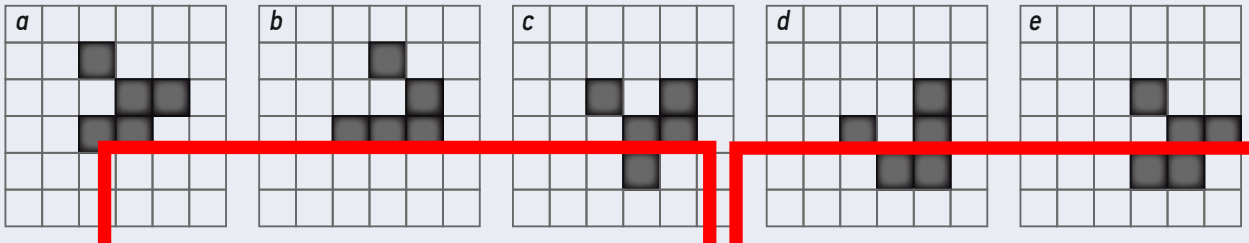
Une autre limite prédictive provient de la propriété d'irréductibilité computationnelle. Elle concerne les systèmes tels qu'il n'existe aucun autre moyen de savoir l'état dans lequel ils seront à un instant ultérieur que de les simuler, c'est-à-dire de reproduire leur comportement, pas à pas, sur un ordinateur et de le laisser ce comportement se dérouler jusqu'à l'instant en question. Cela signifie qu'il n'existe aucun raccourci pour connaître cet état, par exemple une formule permettant de calculer directement l'état à un instant donné. Le seul moyen est de laisser se dérouler toutes les étapes qui précèdent.

Cette propriété a été mise en avant d'abord dans le contexte des automates cellulaires. Ces automates fonctionnent par itération. Partant d'une configuration initiale d'une grille dont les cellules sont dans divers états, des règles simples indiquent comment la configuration suivante est obtenue. Ainsi, la situation des cellules au temps $n + 1$ dépend de la configuration au temps n.

L'exemple le plus connu en est le *Jeu de la vie* du mathématicien britannique John Conway. Pour certaines situations initiales, les configurations successives sont aisément prédictibles. C'est le cas, par exemple, lorsqu'un comportement périodique ou bien lorsqu'un mouvement régulier des cellules caractérise le passage de la configuration n à la configuration $n + 1$. Mais certaines situations de départ défient toute tentative pour prévoir leur évolution et le seul moyen pour savoir ce qu'elles deviennent est, après par exemple une centaine de pas, est de passer par les 99 états intermédiaires.

On peut même montrer que connaître l'destin ultime d'une configuration initiale est un problème indécidable : il n'existe aucun algorithme général capable de prévoir, quand on donne une configuration entrée, si elle va finir par s'éteindre ou si elle va conserver des cellules indéfiniment.

Devoir, lors du calcul, passer par le même chemin que suit le système réel sans avoir la possibilité de couper court pour connaître directement l'état qui nous intéresse est une forme d'imprévisibilité un peu particulière. Cette impossibilité de connaître cet état, puisqu'en simulant le système on y parvient. Il s'agit de l'impossibilité d'aller « plus vite que le système » pour savoir où il va. D'une certaine façon, cela signifie que le seul moyen de le savoir est d'observer le système lui-même ou son clone simulé sur un ordinateur. Cela peut devenir une véritable impossibilité si on cherche à savoir ce que devient le système à long terme, car la simulation peut prendre un temps qui excède nos capacités pratiques. L'irréductibilité computationnelle apporte un point de vue utile pour tenter de comprendre certains phénomènes qualifiés d'émergents. Il faut préciser que, bien que l'on soupçonne que de nombreux systèmes soient computationnellement irréductibles, prouver qu'un donné possède bien cette propriété reste aujourd'hui un problème mathématique ouvert.



Dans le *Jeu de la vie* de J. Conway, des règles simples définissent l'évolution des cases d'une étape à la suivante. Une cellule morte *(blanche)* devient vivante *(noire)* si elle est entourée de trois cellules vivantes et une cellule reste vivante si elle est entourée de deux ou trois cellules vivantes. Dans la séquence ci-dessus, l'évolution est périodique et le premier motif *(a)* se retrouve dans le dernier *(e)* translaté d'une ligne et d'une colonne. À l'exception de cas particuliers, il est difficile de prévoir l'évolution d'une configuration sans en calculer chaque étape.

une toute petite différence entre deux états initiaux s'amplifie de façon exponentielle avec le temps *(voir la figure 3)*.

Ce constat, annoncé par le Français Henri Poincaré dès la fin du XIXe siècle, a été popularisé par le fameux « effet papillon » d'Edward Lorenz. En 1963, ce météorologiste américain a montré, sur un système de trois équations différentielles non linéaires simples, que deux états initialement aussi proches que l'on veut (la différence étant indiscernable au degré de précision adopté), peuvent évoluer de telle façon que, au bout d'un certain temps, ils n'aient plus rien en commun. Conséquence : il est impossible de faire des prévisions au-delà d'un certain horizon temporel, malgré le fait que les lois régissant l'évolution du système soient déterministes. On parle dans ce cas de chaos déterministe, le système donnant l'impression d'évoluer de façon aléatoire, en dépit du fait qu'il soit déterministe. Ce chaos traduit notamment notre incapacité à spécifier un état initial de façon [illegible]

Un horizon de prévision pour les systèmes chaotiques

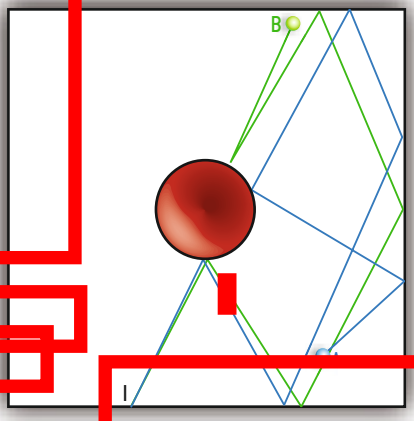
L'horizon temporel des prévisions dépend du système chaotique considéré. Il est possible de décrire jusqu'à quelques secondes le mouvement d'une boussole placée dans deux champs magnétiques, l'un fixe et l'autre tournant. La détermination des trajectoires des planètes du Système solaire s'étend sur plusieurs centaines de millions d'années. Mais au-delà de ces horizons, la plus infime variation initiale peut conduire à des états très différents.

Cette sensibilité aux conditions initiales, à laquelle sont sujets la plupart des systèmes dynamiques, impose une limite de principe sur nos capacités prédictives. En améliorant la précision sur les conditions initiales, il est possible de repousser cet horizon, mais sans pouvoir le faire disparaître. Pour de tels systèmes, on renonce à décrire en détail leur dynamique. On s'intéresse plutôt aux propriétés asymptotiques du système, c'est-à-dire à son évolution qualitative à long terme, et aux caractéristiques communes qu'il partage avec d'autres systèmes de même type. On parle [illegible] propriétés génériques et l'on doit se contenter de décrire ce qui se passe en moyenne sur un grand nombre de ces systèmes. Les prévisions deviennent alors probabilistes.

La physique quantique, elle, fait apparaître un type d'indéterminisme plus radical, où les probabilités proviennent de l'essence même des phénomènes et non plus de notre ignorance ou de notre incapacité à spécifier suffisamment un état. Par exemple, même lorsque l'état d'un électron est connu aussi parfaitement qu'il est théoriquement possible de le connaître, il est impossible de prévoir le résultat de la mesure de certaines de ses propriétés autrement que de façon probabiliste. La position, l'impulsion ou le spin de cet électron pourront prendre différentes valeurs qui ne se détermineront qu'avec la mesure, et cela de façon intrinsèquement probabiliste. Il s'agit encore une fois d'une limite prédictive, car il est impossible de prévoir à coup sûr le résultat de ce type de mesure.

Mais la physique quantique est encore plus radicale dans sa remise en cause de nos conceptions intuitives habituelles consistant à penser qu'il existe une réalité indépendante de tout observateur et ressemblant à ce que nous en percevons. L'impossibilité d'exprimer la théorie quantique sous une forme objective forte (c'est-à-dire ne faisant mention à aucune mesure ni à aucun observateur) est un argument important contre cette position. La mécanique quantique ne décrit pas la réalité en soi, mais seulement la réalité empirique des phénomènes. La plupart des tentatives visant à décrire une éventuelle réalité telle qu'elle est, grâce à des formalismes alternatifs, ont échoué. On est ainsi contraint de se contenter d'une description de l'apparence de la réalité à travers les phénomènes empiriques et de renoncer à décrire la réalité en soi. Dans cette limite ontologique, seule la réalité empirique phénoménale est accessible.

Toutes les limites évoquées ici résultent de démonstrations provenant de la science elle-même. Leur découverte est un phénomène fascinant, car elle s'est faite simultanément avec une progression inédite des connaissances apportées par la science. En nous permettant de connaître de mieux en mieux les territoires qu'elle explore, la science a fait apparaître de vastes contrées inaccessibles dont nous ne soupçonnions pas l'existence. Cette découverte, souvent ignorée, est sans doute l'une des plus remarquables de la science contemporaine sur le plan épistémologique. ■



3. LE BILLARD DIT DE SINAÏ fournit un exemple simple de chaos déterministe. Au centre d'un billard carré est placé un obstacle circulaire sur lequel rebondissent les boules de billard A et B. Celles-ci partent du même point initial I dans des directions quasi identiques. Au bout d'un certain temps, les deux trajectoires sont très différentes. Il est possible en théorie de prévoir la position des boules à tout instant, mais, en pratique, la grande sensibilité aux conditions initiales l'interdit. L'inévitable incertitude sur la condition initiale s'amplifie très vite avec le temps et brouille la connaissance qu'on peut avoir de la trajectoire.

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012



SOUTENEZ LA FONDATION POUR LA RECHERCHE MÉDICALE ET BÉNÉFICIEZ D'AVANTAGES FISCAUX

Organisme indépendant, la Fondation pour la Recherche Médicale agit grâce à la générosité de plus de 400 000 donateurs.

Il existe plusieurs possibilités de soutenir la Fondation : **en faisant un don, une donation, une donation temporaire d'usufruit, une succession, en souscrivant une assurance-vie en faveur de la Fondation... Vous bénéficierez ainsi d'avantages fiscaux*.**

Depuis 60 ans, la Fondation pour la Recherche Médicale lutte contre toutes les pathologies, sans distinction.

En choisissant d'être à ses côtés vous agissez pour votre santé et celle de vos proches et vous jouez un rôle essentiel dans le maintien, en France, d'une recherche de très haut niveau.

*Pour les personnes assujetties à l'impôt de solidarité sur la fortune (ISF), réduction d'impôt de 75% du don dans la limite de 50 000 euros (loi Tépa). Hors ISF, la réduction d'impôt est de 66% du montant du don dans la limite de 20% du revenu imposable. Si les dons dépassent cette limite, l'excédent est reportable sur les 5 années suivantes.

FONDATION RECHERCHE MÉDICALE

Depuis sa création par le Pr Jean Bernard en 1947, la Fondation soutient la recherche médicale dans tous les domaines : cancers, maladies neurologiques, maladies infectieuses, maladies cardiovasculaires, maladies des os, maladies du système immunitaire, maladies du sang...

Son Conseil scientifique composé de 32 chercheurs de haut niveau, représentant toutes les disciplines médicales et scientifiques, sélectionne les projets qui seront soutenus.

Chaque année, la Fondation finance, en moyenne, plus de 550 recherches.

La Fondation s'engage à rendre compte de ses activités, met à disposition son rapport d'activité sur son site, envoie ses comptes à l'ensemble de ses donateurs. Ses comptes sont certifiés par un commissaire aux comptes indépendant.

AGRÉÉE PAR COMITÉ DE LA CHARTE don en confiance

La Fondation pour la Recherche Médicale est agréée par le Comité de la Charte du don en confiance et reconnue d'utilité publique.

Pour plus d'informations

Stéphanie Clément-Grandcourt
Responsable philanthropie
01 44 39 75 98 • stephanie.clement-grandcourt@frm.org

Céline Ponchel-Pouvreau
Responsable libéralités et succession
Céline.ponchel@frm.org

FONDATION POUR LA RECHERCHE MÉDICALE, 54 RUE DE VARENNE 75007 PARIS - www.frm.org

Coupon à retourner à **Fondation pour la Recherche Médicale**

☐ Je fais un don de.....

☐ Je souhaite recevoir, sous pli confidentiel, la brochure philanthropie

☐ Je souhaite recevoir, sous pli confidentiel, la brochure sur les legs, donations et assurances-vie

Ces demandes ne m'engagent en aucune façon.

PFPLS1122

Nom : ..... Prénom : .....

Adresse : .....Code postal : .....

Ville : ..... Téléphone : .....

Conformément à la loi du 6/01/1978, vous disposez d'un droit d'accès, de rectification et d'opposition aux informations vous concernant, en vous adressant à la Fondation. Par notre intermédiaire, vous pouvez être amené à recevoir des propositions d'autres organismes. Si vous ne le souhaitez pas, vous pouvez cocher la case ci-jointe. ☐



L'avènement d'Internet et de ses « réseaux sociaux » transforme les relations sociales. Et la surabondance d'informations véhiculées suscite chez les individus des réactions cognitives diverses.

Nicolas Auray

L'homme en réseau

En octobre 2012, Mallaury Chotard, ancienne étudiante du MIT devenue créatrice de vêtements, a conçu un gilet qui se gonfle dès que son propriétaire reçoit un « J'aime » sur son compte *Facebook* (*voir la figure 2*).

En mars 2010, la première place du palmarès de la musique de variétés japonaise était occupée par Miku Hatsune, une star entièrement virtuelle. Cette jeune créature de manga aux longs cheveux bleus se produisait en concerts sous forme d'images de synthèse, et sa voix, fondée sur celle de la chanteuse réelle Saki Fujita, chantait ce que un logiciel créait, à partir des accords de mélodie et des indications de syllabes à jouer sur chaque note. La raison du succès de Miku Hatsune (« son du futur » en japonais) ? La société qui l'a développée en 2007 avait autorisé les fans à composer des paroles et musiques et des mouvements de chorégraphie grâce à des logiciels libres d'édition et d'animation. Les clips ont été diffusés sur les sites de partage de vidéos. Certains de ces derniers ont acquis une

Miku Hatsune une cyberdiva.

Comme l'illustrent les deux exemples décrits, le couplage entre le réseau Internet et les objets numériques personnels (micro-ordinateurs, mais aussi téléphones portables, navigateurs GPS, tablettes, etc.) est en train de bouleverser notre rapport au temps et à l'espace, en contractant ces derniers. Parmi les approches anthropologiques qui abordent ces transformations, oscillent des thèses extrêmes.

Internet rend-il humain ou bête ?

D'un côté, par exemple, le philosophe Michel Serres pointe que cette nouvelle réticularité numérique rend les humains plus puissants et plus humains. Par le téléphone cellulaire, les « digital natives » (ou natifs numériques, c'est-à-dire ceux qui baignent depuis leur naissance dans un monde équipé et connecté) ont mis le monde au bout de leur pouce : ils accèdent à n'importe quelle personne ;

L'ESSENTIEL

- Les nouvelles technologies de la communication modifient la structure et la nature des liens sociaux, mais aussi notre rapport à l'information et au savoir.
- D'un monde juxtaposant des collectivités unies chacune par des liens forts, on passe à un individualisme en réseaux, structurés par des liens faibles.
- Face à la surabondance d'informations et de sollicitations, différentes réactions et régimes d'attention sont possibles.

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012



© Simon Dawson/ZUMA Press/Corbis

et les sociabilités distantes

à n'importe quel lieu, avec le GPS ; à tout le savoir, par la Toile. Ils hantent désormais un espace topologique de voisinages, alors que nous vivions plutôt dans un espace métrique, préféré par les distances physiques.

De l'autre côté, des auteurs montrent qu'une telle contraction de l'espace et du temps fait vaciller le sujet. Le réseau Internet offre une telle profusion de directions potentielles que sa consultation a été considérée, notamment dans le pamphlet *Internet rend-il bête ?* de l'essayiste américain Nicholas Carr, comme la cause d'un déclin de notre capacité à lire, du déclin de notre vigilance attentionnelle.

Ainsi, les changements d'ordre cognitif, mais aussi sociaux, politiques, relationnels et corporels dus au réseau Internet suscitent des positions tranchées. Mais les discussions sont souvent polluées par un décalage entre les postures et la réalité, entre les thèses messianiques et les discrets changements d'une réalité plus inerte. Les mouvements de panique morale sont courants lorsqu'émerge une innovation radicale – qu'on pense à la critique de l'imprimerie au XVI[e] siècle, invention ayant notamment permis la diffusion des *95 thèses à propos de la pratique des Indulgences* qui a déclenché la Réforme de Luther. Nous allons à l'inverse tenter de présenter quelques travaux de sociologie qui, par une approche empirique, ont porté sur cet âge du réseau né à la fin des années 1990. Cela aboutira au passage à évacuer quelques idées reçues.

Des liens sociaux d'un nouveau genre

L'âge du réseau a fait passer nos sociétés d'un monde formé de la juxtaposition de petites unités collectives (familles, amis, villages, etc.) structurées par des liens mutuels forts, à la fois fréquents et chaleureux à l'individualisme en réseau où ce qui compte est, au contraire, « la force des liens faibles » *(voir la figure 3)*.

En 1973, le sociologue américain Mark Granovetter avait déjà insisté sur la force des liens faibles dans certaines tâches : ainsi, dans le contexte de recherche d'emploi, de placement d'un produit auprès d'un nouveau public, les stratégies les plus efficaces s'appuient sur les connaissances éloignées. Dans son enquête, il avait demandé à des centaines de personnes comment elles avaient trouvé leur premier emploi : il avait découvert que c'était grâce à une tierce personne, qui était le plus souvent un contact faible, un contact éloigné. Quelqu'un ayant d'amis proches, mais un grand cercle de relations occasionnelles, avait plus de chances de réussir.

Depuis les années 1970, en phase avec un nouvel esprit du capitalisme dans la société américaine, une autre structure semble se développer : elle est fondée sur la multiplication des relations interpersonnelles dans des cadres variés, par la multi-appartenance

1. DES JOUEURS EN RÉSEAU.
Les personnes présentes dans cette salle sont parfois en lien plus fort avec des joueurs situés à des milliers de kilomètres qu'avec leurs voisins immédiats.



Melissa Chow

2. UN GILET QUI SE GONFLE dès que son propriétaire reçoit un « j'aime » sur son compte *Facebook*. Cette invention de l'Américaine Melissa Chow illustre le bouleversement de notre rapport à l'espace et au temps dû au réseau Internet et aux appareils associés.

à des réseaux différents (famille, travail, association, etc.). D'une société faite d'agglomérations étroitement soudées, on passe à un entrelacement d'individus séparés (*voir la figure 3*), phénomène que certains sociologues nomment « glocalisation », terme qui réunit les mots « local » et « global ».

Toutefois, cette évolution a précédé l'arrivée du réseau Internet. Dans ce contexte d'individualisme connecté déjà installé, que change le réseau Internet ? D'une part, il accroît le nombre de nos liens faibles. Pour donner une idée de la prolifération extraordinaire des contacts, Nicholas Christakis et Kevin Lewis, à l'Université Harvard, ont montré sur un échantillon représentatif que la valeur qui sépare les étudiants utilisateurs du réseau *Facebook* en deux groupes de taille égale (la médiane) est de 130 amis. Autrement dit, la moitié des utilisateurs ont moins de 130 amis, et l'autre moitié plus de 130. Et les individus médians ayant 130 amis ont en moyenne 13 500 amis d'amis (c'est-à-dire 13 500 voisins à distance 2 dans le graphe qui représente ces relations).

En d'autres termes, Internet renforce « l'effet petit monde », phénomène déjà mis en évidence sur les échanges par courrier postal aux États-Unis par le psychologue américain Stanley Milgram, dans les années 1960. On s'était demandé combien d'intermédiaires étaient nécessaires pour que l'on puisse faire parvenir un message à l'attention d'une personne que l'on ne connaissait pas, uniquement en le faisant suivre à quelqu'un que l'on connaissait, qui lui-même pouvait le faire suivre à son tour à l'une de ses connaissances, et ainsi de suite jusqu'au destinataire final. La réponse, que certains interprétèrent déjà comme une provocation, avait été qu'il suffisait de cinq ou six passages pour que la communication atteigne son but. La thèse fut popularisée comme le fait que, entre deux individus quelconques, il y a au maximum « six degrés de séparation ».

DE MÊME QUE DES PRIMATES se toilettent l'un l'autre, certains internautes font du commérage mutuel, s'échangent des flâneries sur la Toile, de petites remarques bienveillantes, etc.

Or avec Internet, n'importe quel individu est à portée de clic *via* des intermédiaires encore moins nombreux, ce qu'a montré Albert-László Barabási, physicien à la *Northwestern University*, aux États-Unis. Loin d'éclater, la société façonnée par les réseaux numériques se resserre.

Le problème des « liens faibles » est qu'ils ne sont pas investis de chaleur humaine. Comment la connexion Internet modifie-t-elle, vers le pire ou vers le meilleur, cette absence d'empathie ? Prenons l'exemple du lien *Facebook* déjà cité. Alors que la philosophie classique (Sénèque, Cicéron, Montaigne) décrit l'amitié comme un lien privé, le lien de type *Facebook* s'affiche en public (selon le paramétrage par défaut du portail *Facebook*). Cette publication fait du lien non plus vraiment une privauté entre amis, mais une exhibition un peu ostentatoire.

De plus, comme l'a montré l'Américaine Danah Boyd, le « friending », qui consiste à ajouter quelqu'un à sa liste d'« amis » sur un réseau social, contient un élément d'utilité, d'exploitation réciproque ; à la différence de l'amitié classique, qui est considérée comme authentique parce qu'inutile. Ainsi, je me connecte avec quelqu'un sur Internet parce que j'ai envie de télécharger certaines de ses photos, vidéos, fichiers MP3, contenus en ligne ; il y a un donnant-donnant, accepté d'ailleurs par tout le monde, qui fonde la relation.

Des liens plus intéressés et plus fugaces

Sur le réseau, la mémorisation du lien est plus brève que dans la vie réelle : les relations perdent de leur importance si elles ne sont pas réactivées régulièrement. Par exemple, à l'intérieur d'un site de partage de contenus, le fait d'émettre un commentaire sur la page d'un autre utilisateur est un engagement peu coûteux, au point que la relation ainsi créée doit être renouvelée tous les mois pour être tenue pour significative par les partenaires.

Pourtant, sur cette base de faiblesse en chaleur émotionnelle, il peut se construire, même à distance sur le réseau, du lien fort. Face à la déliquescence du lien social (la part des personnes vivant seules dans leur logement a crû en France d'environ 50 pour cent entre 1990 et 2009 et dans toutes les catégories de logements), Internet donne le sentiment de réaliser la « présence connectée » à distance : on peut toujours faire signe à l'autre, lui envoyer un *hug* (une étreinte) ou un *poke* (une petite tape pour attirer l'attention) ou bien un court SMS par le téléphone, qui auront essentiellement une fonction « phatique », non informative (*voir la figure 4*).

De même que des primates se toilettent l'un l'autre, activité qui joue le rôle de stabilisateur social en facilitant plus tard leur entente et en réduisant la probabilité d'entrer en conflit, certains internautes font du commérage mutuel, s'échangent des flâneries sur la Toile, de petites remarques bienveillantes, voire des petites sanctions locales et légères, mêlant réprimandes et

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012

encouragements, ce qui contribue à entretenir des relations réciproques et à rendre les liens plus chaleureux.

Par ailleurs, face à une société marquée par un effacement des formes usuelles de solidarité, les amorces de soutien et de reconnaissance mutuelle prodigués par les sites Web communautaires jouent un rôle d'entraide. Les expressions publiques de la tristesse qui accompagnaient le deuil sont aujourd'hui refoulées, et ce pour de nombreuses raisons (laïcisation de nos sociétés, dispersion des familles, fait que la démonstration publique de son malheur ne soit plus très acceptée, etc.). Or Internet vient combler ce manque de rituel, et le site *www.traverserledeuil.com* en est un exemple. Le besoin de soutien social, éprouvé à la disparition d'un être cher, est comblé en célébrant la mémoire du défunt, en partageant son ressenti avec des personnes ayant connu la même expérience.

Un havre de consolations sociales

Un besoin de même nature se retrouve dans la multiplication des sites de partage et d'écoute mutuelle entre patients souffrant d'une même maladie, entre travailleurs partageant leur stress, entre blogueurs victimes de la même persécution politique. Et il compense l'insuffisance ou le délitement des lieux institutionnels spécialisés dans ces formes d'écoute mutuelle.

Notre sociabilité s'organise autour d'une articulation entre le « bonding » (action de sympathiser) et le « bridging » (établissement de contacts). Le « bonding » consiste à s'entourer de personnes qui sont capables de nous donner un soutien, de la connectivité et de l'entraide, tandis que le « bridging » consiste à accroître la connectivité sociale, c'est-à-dire à se connecter avec des personnes éloignées de notre sociabilité initiale.

La part du « bridging » est plus importante que dans le passé, même si la plupart des relations nouées restent des échanges avec des personnes que l'on connaissait déjà. Ainsi, sur l'exemple du site de partage de photos en ligne *Flickr*, Christophe Prieur et Stéphane Raux, de l'Université Paris-Diderot, ont mesuré pour chaque commentaire émis à l'instant t la distance qui séparait l'émetteur du destinataire à l'instant $t - 1$; ils ont montré en 2009 que 75,6 pour cent des commentaires représentent des échanges avec quelqu'un avec qui le membre avait déjà échangé (nouant ainsi un lien dit « répété »).

Un point déterminant est la possibilité qu'offre Internet d'activer des liens avec ceux qui sont nos « amis d'amis ». Cette transitivité des réseaux sociaux peut être quantifiée par un indicateur donnant la probabilité pour que, si un individu A est ami d'une personne B qui est amie avec une troisième personne C, les deux termes A et C de la triade soient eux-mêmes amis. Des études convergentes, tentant de mesurer la transitivité sociale sur des sites connectés à Internet, montrent que celle-ci est beaucoup plus élevée que dans un milieu hors ligne constitué des mêmes nombres d'individus et de liens interpersonnels (elle le serait jusqu'à 40 fois).

Internet rétrécit le monde

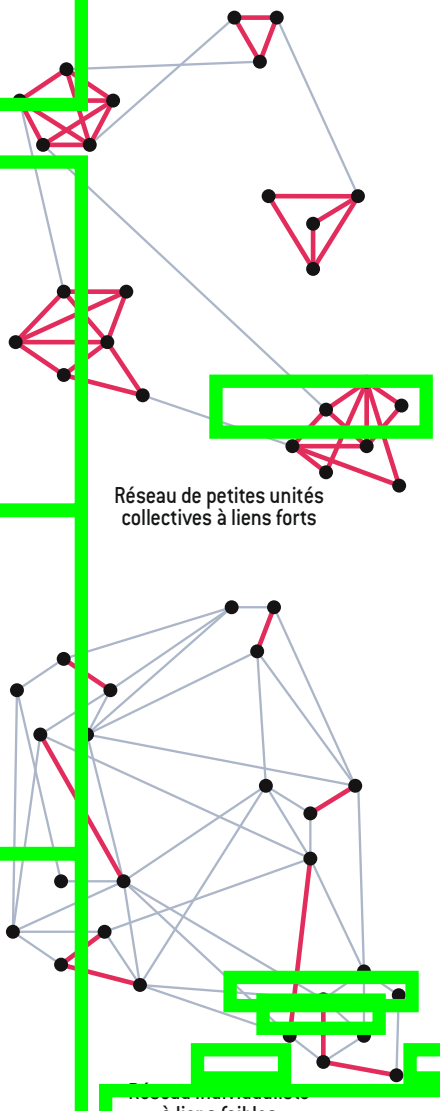
Le petit monde d'Internet est resserré, car il crée des relations de traverse. La structure des liens interpersonnels sur des plateformes de partage de contenus est fortement déformée par rapport à la structure des liens interpersonnels dans le monde réel. Comme le montrent toutes les études, la composante connexe d'un réseau social sur Internet – le plus grand sous-réseau dont les membres sont reliés – est trois à quatre fois plus grande que dans le monde réel : sa taille atteint 85 pour cent de la taille totale du réseau (même en adoptant des règles strictes, en imposant une ancienneté de trafic de 15 jours entre deux personnes pour dire qu'elles ont eu une activité mutuelle).

Mais ce constat doit être modéré. D'une part, l'épaisseur de cette exploration sociale à distance est très inégalement distribuée dans la population. De façon étonnante, une inégalité de distribution se reconstitue à l'intérieur même de populations socialement homogènes, y compris favorisées. Une étude, réalisée en 2002 par Lada Adamic, aux Laboratoires de Hewlett-Packard, et ses collègues, illustre. Elle portait sur un réseau social constitué d'étudiants d'une grande université américaine. Bien que ces étudiants soient pour la plupart d'origine sociale favorisée et hautement diplômée, l'étude a montré que 20 pour cent des membres du réseau concentraient 80 pour cent des liens d'amitié. Une courbe similaire de la distribution des liens a été retrouvée dans

■ L'AUTEUR



Nicolas AUBAY est maître de conférences en sociologie à *Télécom ParisTech* et membre du Laboratoire de traitement et de communication de l'information (CNRS-*Télécom ParisTech*).



3. À L'ÈRE D'INTERNET, les sociétés passent d'une organisation en petites unités structurées par des liens forts *(en haut)*, à un individualisme en réseau où dominent les liens faibles et plus distants *(en bas)*.



© Shutterstock/Chardchanlin

4. L'ENVOI DE MESSAGES anodins, dépourvus de véritable information, a pour fonction d'entretenir des relations et de les rendre plus chaleureuses. De tels échanges contribuent aussi à compenser la déliquescence du lien social classique.

la plupart des réseaux sociaux, au point d'en faire la principale régularité statistique gouvernant les sociabilités en ligne : il s'agit d'une loi de puissance, ce qui signifie que le nombre de membres ayant n amis est à peu près proportionnel à n^a, où a est un exposant négatif fixé.

D'autre part, la connectivité se modère d'elle-même par des sortes de rites et d'implicites qui structurent le fonctionnement des réseaux sociaux. Comme l'a montré Antonio Casilli, de l'EHESS (École des hautes études en sciences sociales, à Paris), une surabondance d'amitiés affichées peut impliquer que l'usager en question est « trop léger » dans ses relations sociales. Il est alors un « collectionneur de liaisons », un superficiel, qui papillonne d'un ami à l'autre. Ainsi, sur *Myspace*, ces êtres prêts à poster des photos ou des remarques aguicheuses pour se faire ajouter par des milliers, voire des centaines de milliers, de contacts sont explicitement traités de *whores*, de putains. Il faut savoir élaborer son réseau d'amis pour qu'il ait la bonne taille, la bonne composition, la bonne densité et les bonnes articulations. Ne serait-ce que pour paraître humain : sur *Twitter*, par exemple, une surabondance d'abonnements indique souvent que l'on a affaire à un spammeur ou bien à un *bot* (un logiciel qui simule une présence humaine).

Un dernier débat, central pour les designers des outils, existe sur la question de savoir quelle serait la façon « optimale » d'arbitrer sur la taille de ces dynamiques exploratoires. Il a été ouvert aux États-Unis par Sinan Aral et Marshall van Alstyne. Ces chercheurs en sciences de l'information ont voulu mettre en évidence que, s'il est vrai que nos contacts éloignés (les fameux « liens faibles ») sont en meilleure position pour nous apporter des informations nouvelles, ils le font rarement car, par définition, nous interagissons peu avec eux et de manière espacée dans le temps.

S. Aral et M. van Alstyne ont notamment étudié pendant dix mois les courriels d'une société de recrutement de cadres. Les recruteurs qui étaient liés à un nombre restreint de contacts forts recevaient davantage d'informations nouvelles (le nom de nouveaux candidats) par unité de temps que ceux ayant de nombreux liens faibles. Les deux chercheurs ont développé un modèle qui montre que la supériorité des liens forts est limitée à l'acquisition d'un certain type d'informations : celles qui ont une valeur stratégique. Il y a donc aussi un surprenant pouvoir des liens forts.

Une insécurité cognitive

La transformation qu'apporte Internet concerne enfin le rapport à l'information et au savoir. Dans ce cadre, Internet fait advenir des phénomènes d'insécurité et de remise en cause des autorités. Les technologies de l'information et de la communication ont augmenté la quantité globale d'informations qui nous parviennent ; mais elles ont surtout développé une situation d'insécurité cognitive, du fait de l'ignorance sur la source de l'information.

À côté des témoignages venus de proches, où l'information est enchâssée dans une structure d'interconnaissance interpersonnelle qui permet d'en garantir la crédibilité, à côté également des médias de masse qui offrent une information vérifiée ou certifiée, voire officielle, émergent des canaux de communication transversaux ou horizontaux par lesquels arrivent des informations non garanties, surprenantes mais officieuses, et susceptibles de poser des problèmes de confiance. Notamment, Internet constitue une caisse de résonance pour la circulation d'histoires urbaines ou de rumeurs : c'est un « formidable amplificateur de rumeurs », selon les termes de Pascal Froissart, sociologue à l'Université Paris VIII.

Avec la multiplication et la fragmentation en petits morceaux et en versions



© Shutterstock/kurhan

5. L'ACCUMULATION DE PLUSIEURS CANAUX D'INFORMATION conduit à une intense sollicitation du sujet. Ce dernier, s'il en a les capacités, peut réagir positivement à cette situation en développant un régime d'hyperattention.

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012

multiples de notre documentation quotidienne, nous sommes confrontés à une « crise » d'hypersollicitations.

Un nouveau style cognitif : l'hyperattention

Ainsi, d'après Katherine Hayles, de l'Université Duke aux États-Unis, à côté de l'attention profonde – une concentration de longue durée avec inhibition des activités concurrentes – se développe, auprès des plus chanceux, un nouveau style cognitif, fondé sur « l'hyperattention », une attention portée à des stimulations multiples et simultanées *(voir la figure 5)*. Mais cette capacité est-elle le lot de tout un chacun ? Ne voit-on pas apparaître de nouvelles fractures cognitives, là où l'installation du réseau Internet à tout le territoire tend à résorber peu à peu la fracture numérique ?

Il n'y a ainsi pas de lien naturel entre l'augmentation de la densité en informations et le goût pour la curiosité et l'exploration. Sous peine d'être saturée, la curiosité demande que la complexité de l'environnement soit modérée. Cela force même à penser que, dans une société de l'information, un premier régime optimal d'attention serait de se laisser porter par les indications et les nouvelles que les métriques de l'information – c'est-à-dire les nouvelles façons de la classer et de la hiérarchiser –mettent en avant pour nous. Il se développe ainsi naturellement une tendance à déléguer notre attention à des systèmes de notification – capteurs, compteurs, avertisseurs, alarmes –, qui ont pour effet de substituer aux choix conscients des traitements immédiats et non réfléchis.

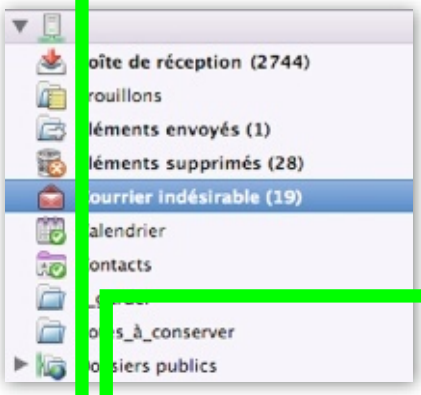
Au nom de l'impératif de réactivité, de plus en plus de cadres laissent même aujourd'hui délibérément leur activité être pilotée par les interruptions plutôt que de la conduire de façon planifiée *(voir la figure 6)*. Parallèlement, l'abondance d'offres culturelles proposées par les médias tend à substituer à des publics actifs et créatifs des audiences « sérielles », qui consacrent de moins en moins de temps à un nombre de plus en plus grand d'œuvres consommées à la va-vite, au fil de l'actualité et de l'urgence. Dans un contexte saturé de représentations émerge une tendance naturelle à se laisser passivement aller à la première urgence, à s'incliner à la procrastination, enterrant sous un amas de petites tâches urgentes nos activités complexes, incertaines et dispendieuses en temps.

Pourtant, en contrepoint à ce régime d'attention réactive, subsiste sans doute une possibilité pour l'exploration curieuse. Les ethnographes de l'automation ont mis en relief qu'un tel monde saturé d'informations, où les objets sont complexes et engendrent des questions, ouvre à un régime d'enquête où les individus ont la volonté curieuse, d'explorer l'ensemble. Contre la recherche organisée et planifiée, la curiosité signale une disponibilité à la trouvaille à la découverte au hasard. Elle explique, comme je l'ai montré récemment sur l'exemple des victimes de spams, que la communication en ligne rende plus crédule, et vulnérable aux tromperies.

Dans la société de l'information, on est ainsi en droit de voir se conjuguer trois régimes d'attention : réactif, planifié et curieux. La prédilection pour l'un ou l'autre n'est pas liée aux dispositifs techniques auxquels on a affaire. Comme l'a montré en 2010 Christian Licoppe, à *Télécom ParisTech*, les alertes, au lieu d'être des interpellations ou des sommations, deviennent de plus en plus, pour celui qui les reçoit, des suggestions suffisamment subtiles et fugaces pour que leur traitement fasse l'objet d'une hésitation, d'une délibération intense, d'un traitement différé ou d'une ignorance.

L'image de l'homme modifiée ?

Ainsi, nous avons vu que l'arrivée d'Internet a engendré des sociabilités plus distantes et a accru l'insécurité cognitive. Au-delà, c'est probablement l'image de l'homme qui s'en trouve modifiée. Des siècles durant, les hommes, riches comme ordinaires, ont cherché à illustrer leur existence et leur rang à travers des portraits ou des images. La croyance physiognomonique, répandue au XVII[e] siècle, permettait à un Rembrandt ou un Velázquez d'inscrire les vertus morales (générosité, courage, etc.) dans des traits de visage et des postures comportementales grâce à des conventions iconographiques bien connues. Désormais, c'est de plus en plus autour de la mise en valeur de la connectivité, des liens d'affiliations à des espaces réservés – clubs, associations d'anciens, amitiés professionnelles construites par le carnet d'adresses – que se forge la valeur d'un individu. Le grand homme, c'est désormais le mailleur, le faiseur de réseaux. La sveltesse connexionniste a pris le pas sur l'obésité du propriétaire de biens. ■



6. QUAND LES SOLLICITATIONS sont trop nombreuses, par exemple quand on reçoit plusieurs centaines de courriels par jour, beaucoup de cadres d'entreprise se laissent aller délibérément à une activité régie par les interruptions plutôt que planifiée.

BIBLIOGRAPHIE

N. Auray, **Manipulation à distance curieuse : les pièges liés au spam**, *Réseaux*, n° 171, pp. 104-13[illegible], 2012.

S. Raux et D. Prieur, **Stabilité globale et dynamique des commentaires de *Flickr***, *R[illegible]*, vol. 29(2), pp. 155-18[illegible], 2011.

A. A. Casilli, **Les liaisons numériques**, Seuil, 2010.

K. Lewis *et al.*, **Tastes, ties, and time: A new (cultural, multiplex, and longitudinal) social network Facebook.com**, *Social Networks*, vol. 30(4), pp. 330-34[illegible], 2008.

K. Hayles, **Hyper attention. The general divide in cognitive modes**, *Profession*, n° 13, pp. 1[illegible]7-199, 2007.

P. Noris, **The bridging and bonding role of online**, P. N. Howard et S. Jones (dir.), *Society Online – the Internet in Context*, Sa[illegible], pp. 21-41, 2004.

A.-L. Barabási, **Linked. The New Science of Networks**, Perseus Books Group, 2002.

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012

Vivre dans l'espace

Nathalie Pattyn et Pierre-François Migeotte

Les futurs astronautes au long cours devront surmonter les effets délétères de l'impesanteur et du rayonnement cosmique, ainsi que les périls psychologiques d'une vie isolée, en petit groupe et dans un lieu confiné.

En avril 2011, on fêtait les 50 ans du vol inaugural de l'astronaute soviétique Youri Gagarine. Et le décès récent de l'astronaute américain Neil Armstrong, le 25 août 2012, a été l'occasion de rendre un nouvel hommage au premier homme ayant marché sur la Lune, en 1969, suivi par 11 de ses compatriotes jusqu'en 1972. La conquête spatiale par des vols habités connaît depuis une longue pause, même si des hommes sont régulièrement envoyés en orbite à bord de la Station spatiale internationale. Mais ces premiers succès ont inspiré les auteurs de science-fiction, pour qui les voyages spatiaux seront monnaie courante dans le futur. La série *Star Trek* écrite par Gene Roddenberry en 1964, le roman *2001 : L'odyssée de l'espace* écrit par Arthur Clarke et adapté au cinéma par Stanley Kubrick (1968) ou des films plus récents, tel *Avatar* de James Cameron en 2009, l'illustrent. Ces œuvres évoquent souvent les difficultés de la vie dans l'espace dues à l'absence de pesanteur et un séjour prolongé dans un espace confiné sans contacts ou presque avec le monde extérieur.

Malgré le ralentissement de la conquête de l'espace par des astronautes, l'Agence spatiale européenne (l'ESA) et l'Agence spatiale américaine (la NASA) maintiennent des projets d'exploration de Mars ou de retour sur la Lune, fortement motivés par le succès des sondes robotisées martiennes. Or l'une des grandes questions est de savoir comment préparer l'homme physiquement et psychologiquement à des explorations de longue durée dans un milieu – l'espace – particulièrement hostile.

Dès les premiers vols, dans les années 1960, les scientifiques se sont intéressés aux conséquences d'un séjour dans l'espace sur le corps humain. Ces études ont suivi de près les programmes spatiaux russes et américains. Nos connaissances des problèmes liés à la présence de l'homme dans l'espace ont progressé, mais il reste beaucoup de questions ouvertes et de défis à relever avant de pouvoir se lancer dans l'aventure des vols habités de longue durée. Au-delà des limitations techniques actuelles liées au mode de transport, nous allons évoquer les principales difficultés physiologiques liées à l'état d'impesanteur et au rayonnement cosmique, d'une part, et les difficultés psy

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012


© Rue des Archives/BCA

chologiques auxquelles sera confronté un petit groupe devant séjourner en autarcie et de façon prolongée dans un environnement confiné, d'autre part.

Notre compréhension de la physiologie humaine en état d'impesanteur est fondée sur de nombreuses expériences scientifiques, accumulées depuis les débuts des vols habités. L'impact du milieu spatial sur le corps d'un astronaute n'était pas connu : il importait donc de mesurer le plus possible de paramètres physiologiques afin de comprendre comment le corps humain se comporte dans cet environnement. Les recherches actuelles prolongent les résultats des premières missions russes et américaines, avec la différence appréciable qu'avec la fin de la guerre froide, une coopération scientifique internationale s'est mise en place.

La différence la plus frappante entre la vie sur Terre et dans l'espace est l'absence de pesanteur, qui conduit les astronautes à flotter dans leur vaisseau. Si l'impesanteur est naturelle à grande distance des planètes, pourquoi observe-t-on ce phénomène à bord de la Station spatiale internationale – à moins de 400 kilomètres d'altitude – alors que la gravité terrestre n'y est pas nulle ? La station est bien attirée par la Terre dans un mouvement de « chute libre ». Toutefois, elle ne tombe pas en ligne droite, car une vitesse latérale adéquate, imprimée dès le départ, lui permet de chuter en permanence, en décrivant une orbite régulière autour de notre planète. De même, la Lune est en « chute libre » sur la Terre, même si elle décrit une orbite à peu près circulaire.

L'astronaute, à bord de la station en chute libre permanente, est lui-même en

L'ESSENTIEL

- Envoyer des hommes sur Mars signifie des missions de très longue durée.
- L'impesanteur a des conséquences néfastes sur le corps humain. L'exercice physique permet de les limiter.
- Une longue exposition aux rayons cosmiques peut déclencher des tumeurs. Des boucliers adéquats sont à l'étude.
- L'impact psychologique du confinement et de l'isolement devra être atténué.

1. L'*ENTERPRISE*, vaisseau d'exploration de la série télévisée *Star Trek*, symbolise les espoirs des années 1960 de pouvoir voyager dans l'espace et explorer l'univers au-delà du Système solaire. Aujourd'hui, des projets pour envoyer l'homme sur Mars posent notamment la question de l'impact physiologique de tels voyages.

■ LES AUTEURS





Nathalie PAUTYN est professeur de psychologie biologique à la Vrije Universiteit Brussel et à l'École [illegible] de Belgique, au sein de l'unité de recherche VIPER *(Vital signs and PERformance monitoring)*.

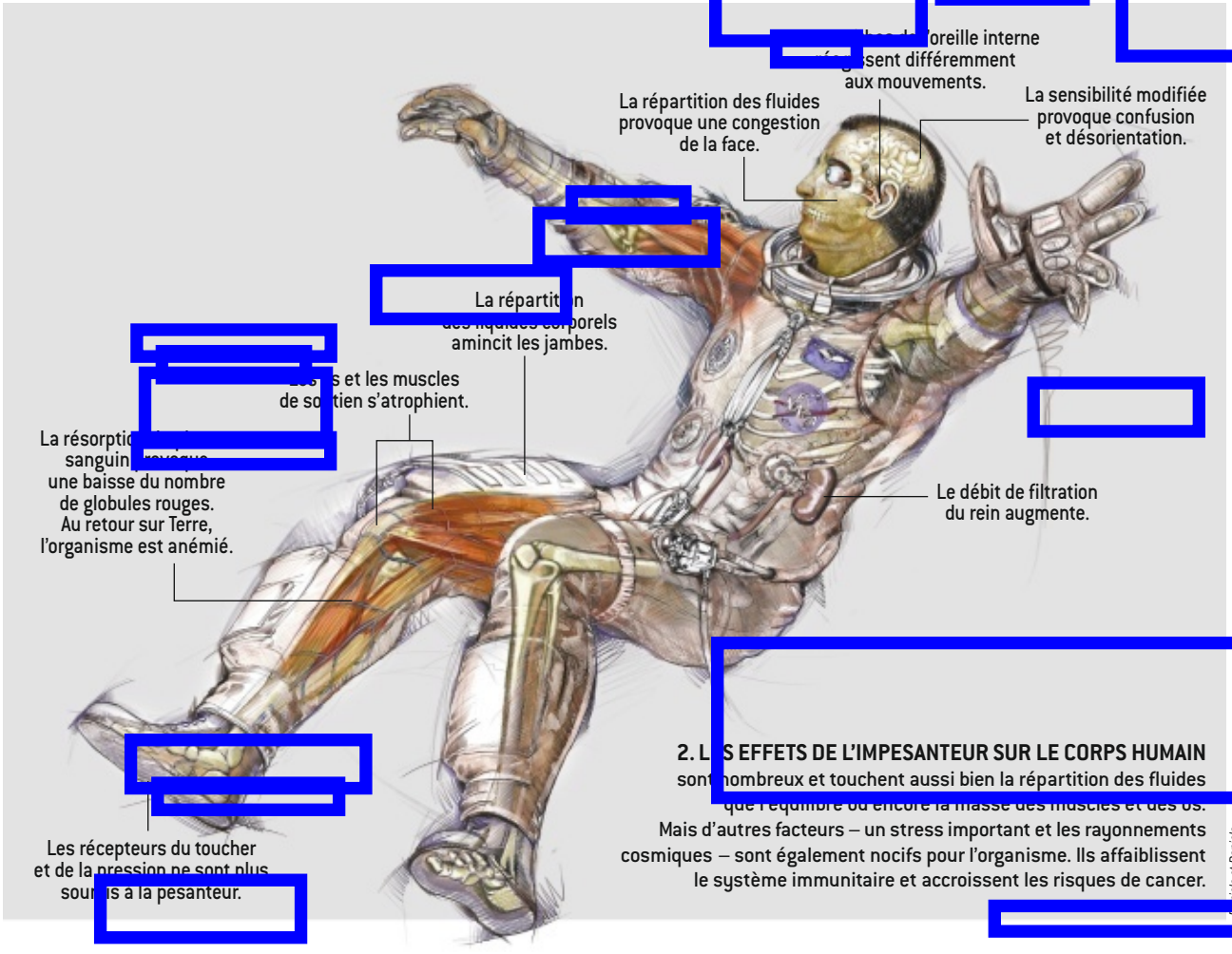
Pierre-François MIGEOTTE est chercheur également dans l'unité de recherche VIPER.

chute libre, à la même vitesse que la station. Par conséquent, les parois du vaisseau n'exercent plus l'équivalent de la force de réaction du sol sur les pieds, qui donne habituellement la sensation du poids. Ainsi les astronautes flottent dans l'habitacle et expérimentent ce qu'on nomme l'impesanteur.

La conséquence physiologique directe est que les différences de pression hydrostatique existant, sur Terre, au sein de notre organisme et qui s'appliquent sur les fluides et les organes, disparaissent. Par exemple, la pression est, au sol, plus forte dans les pieds que dans la tête, différence qui est abolie dans l'état d'impesanteur. Ainsi les mécanismes physiologiques qui luttent habituellement contre la gravité perdent leur utilité. Tous les capteurs de poids et de pression sont perturbés, puisque l'information principale qui structure leur organisation a disparu. Les conséquences de l'impesanteur touchent surtout le système cardio-vasculaire, la neurophysiologie sensorimotrice et le fonctionnement osseux et musculaire.

Sur Terre, pour lutter contre les variations de pression, une série de réflexes mis en place depuis notre naissance maintiennent une tension artérielle normale et une perfusion cérébrale adéquate lors des changements (éventuellement brusques) de position. Ainsi, quand on se lève, le rythme cardiaque et la tension artérielle augmentent pour compenser l'accroissement du gradient de pression entre la tête et les pieds. Les personnes qui souffrent d'un défaut de ces réflexes sont sujettes aux étourdissements ou s'évanouissent faute d'un apport suffisant de sang au cerveau.

Dans l'espace, après quelques minutes d'impesanteur, ces réflexes devenus inutiles entraînent un afflux de sang en direction de la tête et du thorax. On dit même de façon imagée que les astronautes ont « la tête bouffie et des jambes de poulets ». Les fluides se répartissent différemment ; les jambes, par exemple, perdent chacune un litre de fluide. Le volume d'éjection cardiaque augmente et le rythme cardiaque diminue. Après quelques jours, les astronautes ont perdu environ 0,5 litre de plasma san-



2. LES EFFETS DE L'IMPESANTEUR SUR LE CORPS HUMAIN sont nombreux et touchent aussi bien la répartition des fluides que l'équilibre ou encore la masse des muscles et des os. Mais d'autres facteurs – un stress important et les rayonnements cosmiques – sont également nocifs pour l'organisme. Ils affaiblissent le système immunitaire et accroissent les risques de cancer.

D. Daniels et Daniels

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012

guin, qui s'échappe des capillaires et se retrouve dans la lymphe interstitielle. Ces modifications du volume et de la concentration plasmatiques sont responsables d'autres adaptations métaboliques. Les reins filtrent plus rapidement. La régulation des hormones, des globules rouges et des sels minéraux dans le sang est perturbée.

Une conséquence importante de l'impressionnante capacité d'adaptation de la physiologie à l'état d'impesanteur est que les astronautes perdent leur habitude de la gravité. On dit qu'ils souffrent d'intolérance orthostatique. Cet effet pose problème lors du retour sur Terre et il pourrait être dangereux, voire critique, pour une mission sur Mars. Après un long séjour dans l'espace, lorsque les astronautes doivent à nouveau marcher, ils peuvent être sujets à des étourdissements et tomber ou perdre l'équilibre.

Perte de référence en impesanteur

L'équilibre est au cœur des modifications neurophysiologiques liées à l'impesanteur. La perception du monde qui nous entoure et la façon de nous mouvoir en trois dimensions sont liées à l'organisation de notre champ de perception et d'action, organisation déterminée par la gravité terrestre. Le corps humain possède de nombreux capteurs adaptés à la pesanteur, dans l'organe vestibulaire de l'oreille interne – l'organe de l'équilibre –, dans les muscles et les articulations, qui nous renseignent sur la position relative des différentes parties du corps.

L'appareil vestibulaire détecte les accélérations grâce à deux types de capteurs : les canaux semi-circulaires (trois tubes remplis de liquide et tapissés de cellules ciliées) sensibles à l'accélération angulaire, donc aux rotations de la tête, et les otolithes (des cristaux de carbonate de calcium), sensibles à l'accélération linéaire, donc à la pesanteur. Tous ces signaux dépendent de l'intensité et la direction de la gravité terrestre. Or, en impesanteur, il n'y a plus d'accélération de référence pour l'organisme, qui est alors comme une boussole en l'absence de champ magnétique. L'incohérence entre le mouvement perçu par les yeux et l'absence de déplacement enregistrée par l'oreille interne peut causer le mal de l'espace, suivant le même principe que la banale cinétose, ou mal des transports. Ce mal de l'espace, qui affecte une grande proportion d'astronautes, est de durée variable, mais heureusement suivi d'une adaptation du cerveau.

D'un point de vue neurophysiologique, toute la coordination sensorimotrice est perturbée par la modification de la gravité. En effet, sur Terre, nous anticipons le mouvement des objets qui nous entourent suivant un calcul inconscient de leurs vitesses et leurs accélérations en fonction de la gravité. Il en est de même pour les mouvements que nous devons effectuer. Avec la perte de cette grille de référence sensorielle que constitue la gravité, l'intégration des informations visuelles, sensorielles et motrices est déréglée, de même que la manière dont nous déclenchons nos mouvements.

Par exemple, lorsque les astronautes s'agrippent aux parois et tirent dans un sens, ils se sentent immobiles et ont l'impression que c'est le vaisseau qui se déplace. De nombreux astronautes ont aussi la sensation de voyager la tête en bas.

Le mouvement est au cœur du troisième grand problème lié à l'impesanteur : l'impact sur la fonction musculaire et le métabolisme osseux. En effet, en l'absence de gravité, les mouvements consomment moins d'énergie et les sollicitations mécaniques des muscles, tendons, ligaments et leur retentissement sur les os sont moindres. Sans contre-mesures, la perte de masse musculaire et osseuse est rapide et importante. La disparition de la gravité n'est pas le seul facteur : s'y ajoutent les dommages tissulaires causés par les rayonnements cosmiques et les modifications du métabolisme osseux qui accélèrent la résorption, c'est-à-dire la dissolution de l'os. Ce fut l'un des premiers problèmes observés lors des vols spatiaux et le retour sur Terre.

Concordia : vivre l'isolement en Antarctique


Nathalie Pattyn

La station franco-italienne *Concordia* est située sur le plateau antarctique à 3 200 mètres d'altitude. Depuis 2005, ce centre de recherche accueille des équipes qui y passent l'hiver austral de mars à novembre en isolement total, sans possibilité d'aide extérieure en raison des conditions extrêmes de température, de l'ordre de – 70 °C. Cette situation est idéale pour étudier l'impact de l'isolement tel qu'y seront confrontés des astronautes partant en mission vers Mars.

Nathalie Pattyn coordonne la campagne de recherches en sciences de la vie de l'ESA depuis 2010. En effet, différents projets scientifiques étudient les conséquences physiologiques et psychologiques d'une vie en autarcie dans un groupe restreint d'une quinzaine de personnes. Quatre catégories d'éléments stressants très similaires à ceux qu'ils, ont été identifiées : l'environnement hostile – les températures extrêmes, la nuit polaire de trois mois, le manque de repères circadiens et la dépendance de la survie à la technique –, l'habitat *(voir encadré page 63)* ; la mission – alternance de périodes d'activité intense pour obtenir des données scientifiques ou résoudre des difficultés techniques et d'autres plus monotones, sources d'ennui et de démotivation –, enfin la situation sociale [illegible] cie, ce qui crée nécessairement des tensions, voire des conflits qu'il importe de gérer au mieux.

Il se traduisait par une perte de masse musculaire et une ostéoporose.

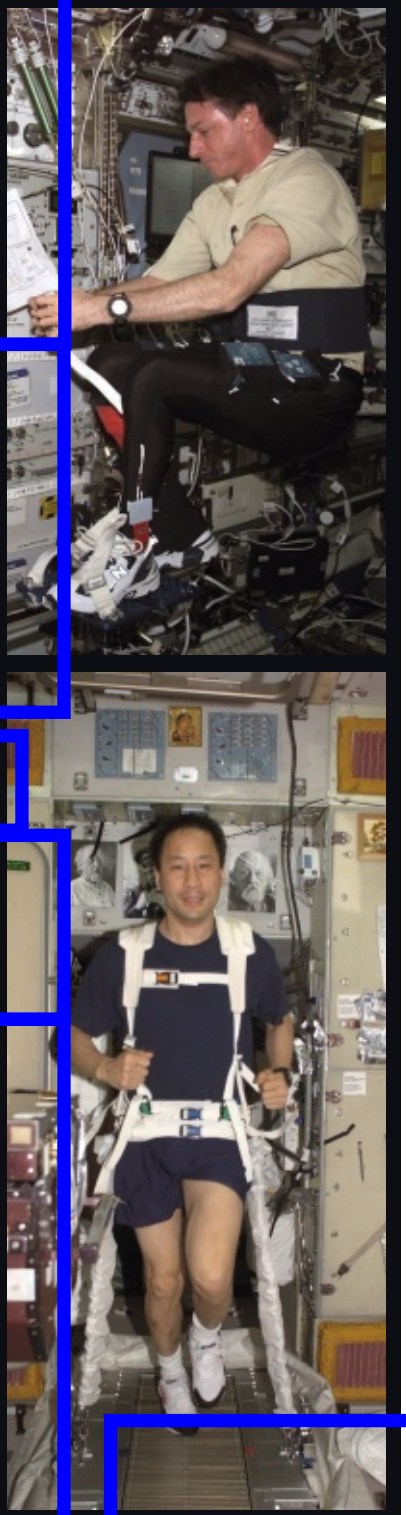
Pour réduire les risques et désagréments d'un séjour dans l'espace, les agences spatiales attachent une grande importance au développement d'un programme de contremesures efficaces. En ce qui concerne les conséquences négatives de l'impesanteur, l'intervention actuelle au sein de la Station spatiale internationale est l'exercice physique, destiné à compenser la perte de contraintes mécaniques *(voir la figure 3)*. Les astronautes se soumettent à un programme d'exercice intensif durant une à deux heures par jour.

Ces heures de gymnastique, qui réduisent d'autant les activités directement liées à la mission, représentent un coût important. Aussi a-t-on avancé l'idée de créer une gravité artificielle au moyen d'une centrifugeuse (dont différents projets sont à l'étude, d'une simple chaise rotative à une centrifugeuse à long rayon comprenant non plus des nacelles, mais tout un habitacle), où les astronautes pratiqueraient des exercices physiques, voire dormiraient.

Un rayonnement cosmique intense

Contrairement aux perturbations liées à l'absence de pesanteur, l'exposition aux rayons cosmiques n'a pas encore de réelle solution et est considérée comme le risque majeur pour les explorateurs humains du Système solaire.

Sur Terre, l'atmosphère nous protège des rayonnements cosmiques de haute énergie constitués principalement de protons et d'ions. L'atmosphère contient environ un kilogramme d'air par centimètre carré de surface au sol, ce qui ramène la dose annuelle de rayonnement au niveau de la mer à 0,3 millisievert (le sievert, égal à un joule par kilogramme, est l'unité d'irradiation qui prend en compte la dose et la dangerosité des rayonnements reçus). Une mission vers Mars pourrait correspondre à une dose de 800 millisieverts par an, soit près de 5 000 protons traversant le corps humain par seconde et détruisant des liaisons chimiques sur leur passage. Le risque essentiel est l'endommagement irréversible de l'ADN des cellules, qui peut entraîner l'apparition de tumeurs. Les autres principaux effets biologiques [illegible] sont des effets dégénératifs correspondant à un vieillissement accéléré des tissus, des effets aigus (des destructions tissulaires similaires à des brûlures principalement dans le système nerveux et les yeux en cas d'exposition très intense, c'est à dire pas dans les conditions actuelles des vols vers la Station spatiale internationale).



3. UNE ACTIVITÉ PHYSIQUE ET UN SUIVI sont nécessaires pour les astronautes séjournant à bord de la Station spatiale internationale. On voit ainsi l'astronaute Michael Foale *(en haut)* équipé d'une vingtaine de capteurs qui mesurent l'effort des muscles et des articulations lors d'un exercice, et Edward Lu *(en bas)* courant sur un tapis roulant pour limiter la perte musculaire.

NASA

Éruptions solaires : danger !

Une exposition longue au rayonnement cosmique pourrait avoir des conséquences graves. Mais une exposition exceptionnelle à une éruption solaire s'accompagnant d'une éjection de masse coronale (un flux dense de particules de grande énergie) serait responsable d'une irradiation potentiellement mortelle.

Cela a des conséquences importantes sur la conception du vaisseau spatial. Il est inimaginable de munir ce dernier de boucliers, par exemple une couche isolante de plomb d'une épaisseur d'environ un mètre, car ils seraient bien trop lourds. L'une des solutions envisagées est de prévoir une zone de survie entourée de réservoirs d'eau ou d'ergol, tel l'hydrogène, qui constituent la meilleure protection passive contre les rayonnements. À l'heure actuelle, on parle davantage de protection active, fournie par exemple par le champ magnétique que créeraient des moteurs de propulsion à plasma. L'objectif serait de réduire le flux de particules à une dose que l'on définirait comme acceptable. Il faudrait cependant des champs magnétiques intenses, d'environ 20 teslas, mais on ignore les effets d'une exposition prolongée du corps humain à de tels champs.

Par ailleurs, un vol d'exploration de longue durée met à rude épreuve la santé psychologique des membres de l'équipage. Il y a d'abord le fait de vivre en petit groupe, en autarcie, dans un espace restreint et confiné, sans possibilité d'évacuation vers la Terre. De plus, une mission peut alterner des moments où la pression de travail est très intense avec des moments où l'ennui s'installe, étant donné la monotonie du cadre et de la vie quotidienne. Il faudrait aussi maintenir un bon esprit d'équipe au sein du groupe et entretenir les compétences techniques et professionnelles de chacun. Une durée d'environ trois ans selon le scénario actuel d'un voyage vers Mars. Mission impossible selon certains… Contrairement aux défis physiologiques, les éléments de réponse ne nous sont pas

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012

ou peu, apportés par les vols spatiaux précédents ou par les missions dans la Station spatiale internationale, mais par des recherches portant sur des environnements analogues, c'est-à-dire des situations reproduisant les mêmes caractéristiques, ou au moins plusieurs d'entre elles.

Les environnements analogues peuvent se classer en deux catégories : les simulations et les situations naturelles. La simulation la plus connue est sans doute *Mars500*, qui s'est achevée en novembre 2011. Il s'agissait d'une mission simulant un voyage vers Mars, comprenant un équipage de six personnes enfermées dans un vaisseau reconstitué, à Moscou, pour la durée d'un voyage fictif vers la planète rouge. Si ces simulations permettent de nous renseigner sur des évolutions particulières liées à l'enfermement et à l'isolement, leur principal défaut est que la perception psychologique du danger et de l'éloignement manque.

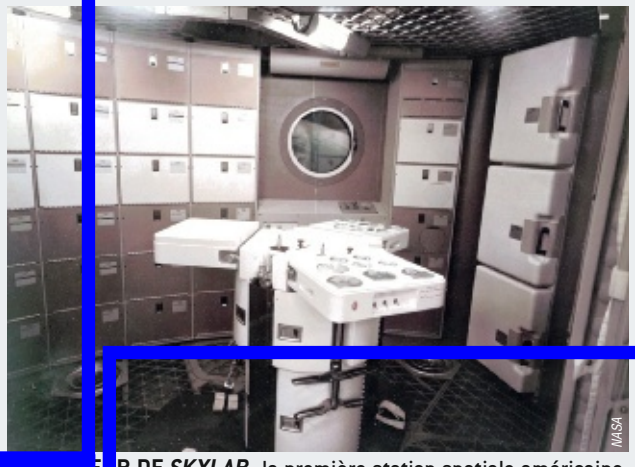
Les participants savent en effet que si une crise majeure impliquant un risque vital survenait, les agences organisant l'expérience interrompraient la mission. Or c'est précisément cet élément de danger et d'impression d'être seul au monde avec ses compagnons qui est cité par plusieurs chercheurs comme le déclencheur de ce qu'on appelle le « stress salutogène ». Concrètement, l'idée est qu'il faut un certain niveau de danger et de menace pour que nous soyons capables de mobiliser des ressources exceptionnelles, tant en termes de connaissances techniques que de compétences humaines, qui nous permettront de surmonter un problème grave survenant lors d'un voyage vers Mars. Tout se passe comme si notre cerveau gérait pour stimuler notre immunité, il faut une menace réelle pour que nous surmontions nos limites habituelles.

Les missions militaires des sous-marins nucléaires, les longs séjours dans des environnements hostiles – surtout en Arctique et en Antarctique – sont des situations d'étude idéales. L'Antarctique offre l'un des seuls environnements sur Terre où l'évacuation médicale est impossible pendant une longue période hivernale, et c'est précisément cet élément qui en fait un analogue des plus productifs pour la recherche spatiale. Au sein de la station polaire franco-italienne *Concordia*, l'Agence spatiale européenne conduit chaque année depuis 2005 une campagne de recherche en sciences de la vie pour tester les difficultés psychologiques et physiologiques liées à une mission de très longue durée dans un milieu confiné et isolé de tout *(voir l'encadré page 61)*.

Le design au service des équipages

Avec des missions spatiales de longue durée telles que les futurs voyages vers Mars, les vaisseaux et les bases spatiales constitueront pour les astronautes un lieu de vie, et non plus un simple environnement de travail. Il s'agira alors de concevoir des architectures adaptées à la vie personnelle et collective de l'équipage, c'est-à-dire à l'ensemble des besoins physiques, psychologiques et sociaux des individus. Sur ce chantier de l'habitabilité, les architectes classiques et les designers industriels ont leur part, qui est de concevoir un aménagement [illegible] répondant à ces critères et compatible avec les contraintes matérielles et opérationnelles de la mission.

Le premier designer industriel à avoir été sollicité par la NASA pour travailler sur l'habitabilité d'une station spatiale a été le Franco-Américain Raymond Loewy (1893-1986), dès les premiers coups de crayons de *Skylab*, en décembre 1967. Les propositions de Loewy furent décisives pour établir de grands principes d'habitabilité : des espaces individuels (en pratique minuscules, jusqu'à présent) où les astronautes peuvent se retirer et dormir, une table [illegible] des trois astronautes ne « préside » les repas, et surtout un hublot permettant à l'équipage de s'échapper mentalement. Loewy travailla aussi beaucoup sur l'éclairage et les couleurs, afin de rétablir une distinction visuelle entre le sol et le plafond, deux notions physiques absentes en impesanteur, et de rompre la monotonie du lieu. Ces préconisations ont encore tout leur sens. Mais, notamment avec l'avancée des connaissances biomédicales sur les séjours dans l'espace, [illegible] eux un nouveau champ de réflexions pour intégrer à la vie de l'équipage des dispositifs palliant les effets négatifs de l'isolement, du confinement ou de l'impesanteur.

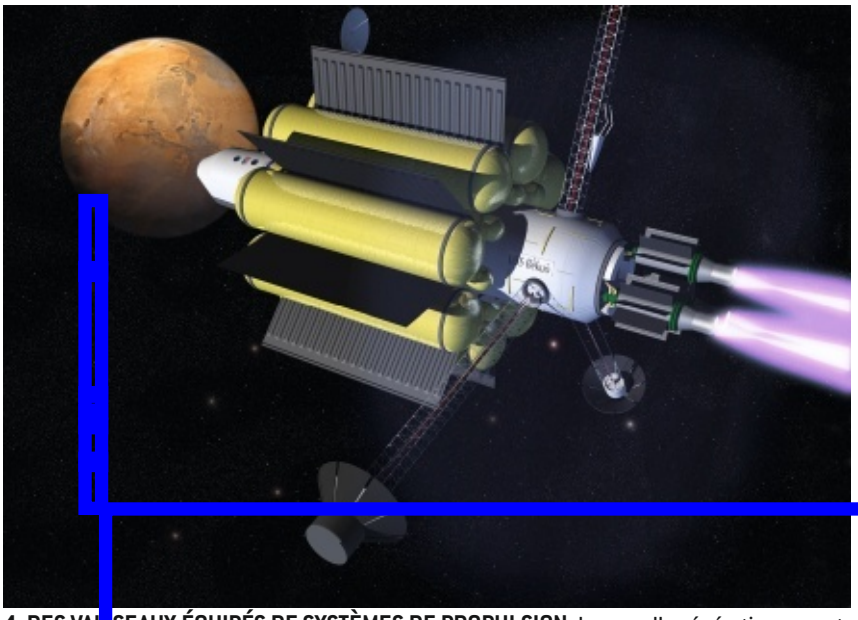


L'INTÉRIEUR DE *SKYLAB*, la première station spatiale américaine, lancée en 1973 (et qui avait été précédée par la station russe *Saliout 1*, lancée en 1971). On voit le carré des astronautes, avec la table triangulaire caractéristique du travail du designer Raymond Loewy et le hublot observant sur les étoiles.

Un exemple est l'obligation faite aux astronautes de la Station spatiale internationale de pratiquer du sport deux heures par jour. Actuellement, les équipements sportifs, placés dans l'habitacle parmi les câbles et autres outils de travail, ne font pas de cette activité un plaisir. Les futurs équipa[illegible]ble et spécialement consacré à cette activité, avec peut-être des dispositifs de réalité virtuelle permettant par exemple aux astronautes de pédaler en se croyant en train de parcourir une petite route champêtre. Autre exemple : une bonne conception de l'éclairage, en collaboration avec des chronobiologistes et des luminothérapeuthes, sera essentielle pour que les rythmes biologiques des astronautes soient préservés. Des démarches similaires sont déjà à l'œuvre à bord des [illegible] qui consistent des environnements analogues (espace réduit, plongées de plusieurs mois…).

De même, les designers auront à créer une salle de « bains » confortable, même si la toilette est faite [illegible], la personne puisse se retrouver seule avec elle-même ; de même des repas qui, malgré le conditionnement des plats en portions, nécessitent un peu de préparation culinaire et créent ainsi de la convivialité ; de penser les zones de repli des individus – la chambre, le lit, les toilettes – afin que ceux-ci supportent difficilement le huis clos du vol ; et ainsi de suite. Autant de questions qui, posées isolément, peuvent sembler [illegible] conditionnent le bien-être des membres de l'équipage et, partant, le déroulement des missions longues.

Charlotte Poupon
Designer industriel, Paris



© Société Ad Astra Rocket Company, tous droits réservés

4. DES VAISSEAUX ÉQUIPÉS DE SYSTÈMES DE PROPULSION de nouvelle génération permettraient de réduire la durée des missions spatiales. Ainsi, la fusée magnétoplasma à impulsion spécifique variable, inventée en 2002 par l'astronaute et physicien Franklin Chang-Díaz, utilise des champs électromagnétiques pour chauffer, ioniser et accélérer un ergol vaporisé (hydrogène, hélium ou argon). Un prototype de son concept devrait être testé à bord de la Station spatiale internationale en 2013.

On y observe des comportements décrits en 1954 par Jean Rivolier. À l'époque médecin-chef des Terres australes et antarctiques françaises, il définit un « syndrome mental de l'hivernage » regroupant différentes perturbations psychologiques qui naissent dans les petits groupes isolés du monde : désintérêt et désinvestissement se rapprochant d'un syndrome dépressif, manque de recul et de perspective par rapport à des événements routiniers ou peu importants, apathie pouvant aller jusqu'à la neurasthénie.

Une variable essentielle de l'adaptation réussie en termes de dynamique de groupe est la personnalité du chef d'expédition. Il n'est pas évident de fédérer un groupe quand la ligne d'arrivée est très loin. Le choix des personnes pour constituer une équipe est un élément de plus en plus pris en compte. Avec ses collègues, Lawrence Palinkas, psychologue américain spécialiste des situations d'isolement, a par exemple discuté en 2009 le choix de personnalités extraverties (qui peuvent dynamiser un groupe, mais qui peuvent perdre plus facilement leur sang-froid ou communiquer leur stress), ou de personnalités introverties (qui sont plus conciliantes en groupe, mais moins dynamisantes).

Le stress permanent d'un voyage dans l'espace peut aussi conduire à des troubles psychotiques : des idées délirantes ou de fortes hallucinations. C'est ainsi que l'astronaute Vitaly Zholobov raconte qu'il était tenté d'« ouvrir le hublot pour sentir le vent frais sur son visage ».

L'Agence spatiale russe a expérimenté le suivi de différents paramètres physiques pour anticiper ce genre de crise et l'enrayer. Cette technique n'est cependant pas toujours fiable : les indicateurs de la tristesse et de la relaxation sont identiques. D'autres solutions possibles sont d'effectuer des tests qui sollicitent la mémoire, sachant que la capacité de réussir rapidement l'exercice dépend de l'état mental.

Le voyage vers Mars est-il aujourd'hui envisageable ? Lors d'un récent entretien, Charles Bolden, administrateur général de la NASA et ancien astronaute, confirmait qu'à l'heure actuelle, trois obstacles majeurs restent à régler pour qu'une exploration humaine de Mars voie le jour : la propulsion, la protection vis-à-vis des rayonnements et le facteur humain.

Réduire la durée du vol

La propulsion reste un enjeu majeur : avec les techniques actuelles de propulsion thermochimique, le voyage aller-retour vers Mars durerait au mieux trois ans environ. Depuis les années 1980, de nouveaux concepts de propulsion ont vu le jour, et pourraient réduire la durée du trajet Terre-Mars à environ un mois et demi seulement, contre plus de six mois pour la propulsion traditionnelle. Cela réduirait d'autant l'exposition des équipages à l'impesanteur, au rayonnement cosmique et aux conditions de stress et d'isolement.

Il est possible que dans le futur, les contraintes de la vie dans l'espace soient satisfaites. Mais on peut se demander si l'espace fait encore assez rêver pour y investir. Dans le contexte socio-économique actuel, les politiciens peuvent-ils justifier de prendre les décisions, avec les implications budgétaires, nécessaires à un tel effort de longue durée ? Certaines voix s'élèvent pour soutenir que l'exploration robotisée est plus rentable que la préparation d'un vol habité vers Mars. Il est clair que le rover martien *Curiosity* a des décennies d'avance sur l'exploration habitée. Il ne faut cependant pas oublier la part du rêve et la volonté d'explorer toujours plus loin.

■ BIBLIOGRAPHIE

Consortium Theseus (Towards Human Exploration of Space : a EUropean Strategy), **Cluster reports on integrated physiology, psychology and human-machine systems, radiations, habitat, management, health care**, Indigo, 2011. www.theseus-eu.org

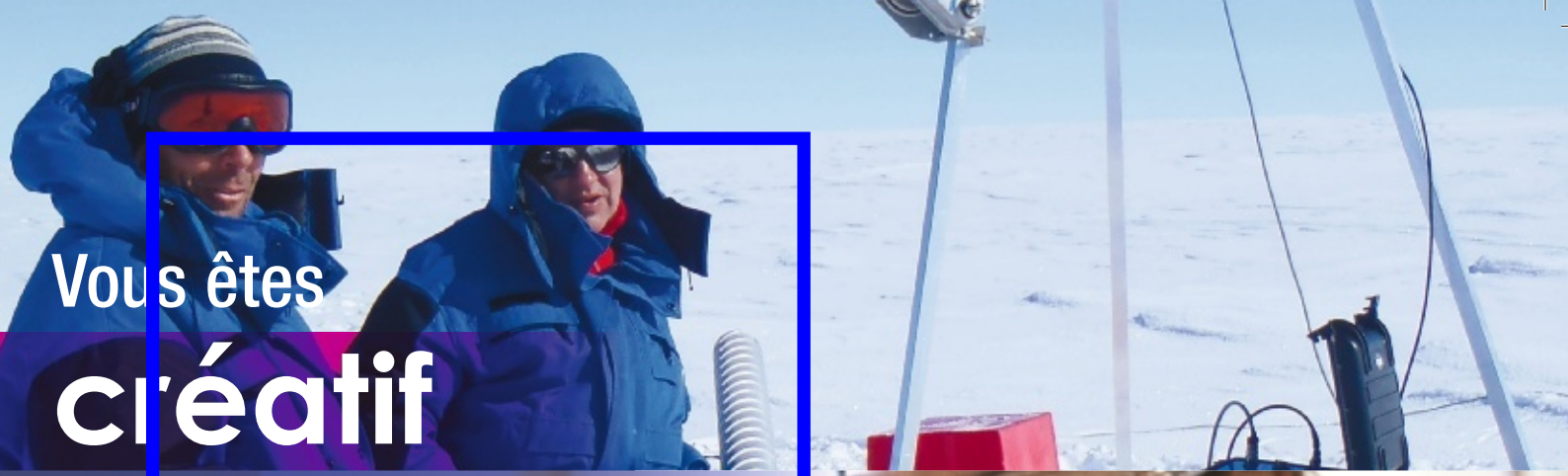
L. A. Palinkas *et al.*, **Psychology and culture during long-duration space missions**, *Acta Astronautica*, vol. 64, pp. 659-665, 2009.

B. Bolmont, **La psychologie du cosmonaute**, *Cerveau&Psycho*, n° 17, septembre-octobre 2006.

E. Parker, **Peut-on protéger les voyageurs spatiaux ?**, *Pour la Science*, n° 343, mai 2006.

R. White, **Le corps humain en impesanteur**, *Dossier Pour la Science*, n° 38, janvier-avril 2003.

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012



Vous êtes

créatif
audacieux
innovant



devenez chercheur-e
au CNRS



En 2013, le CNRS recrute 307 chercheur-e-s dans tous les domaines scientifiques.

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

© CNRS Photothèque/LGGE - Grégory Teste / © CNRS Photothèque - Cyril Frésillon / © CNRS Photothèque/DYTEM - Stéphane Jaillet

cnrs

dépasser les frontières

Inscription aux concours sur le site www.**cnrs**.fr
à partir du **3 décembre 2012**
Clôture des inscriptions : **7 janvier 2013**

Quelle procréation pour demain ?

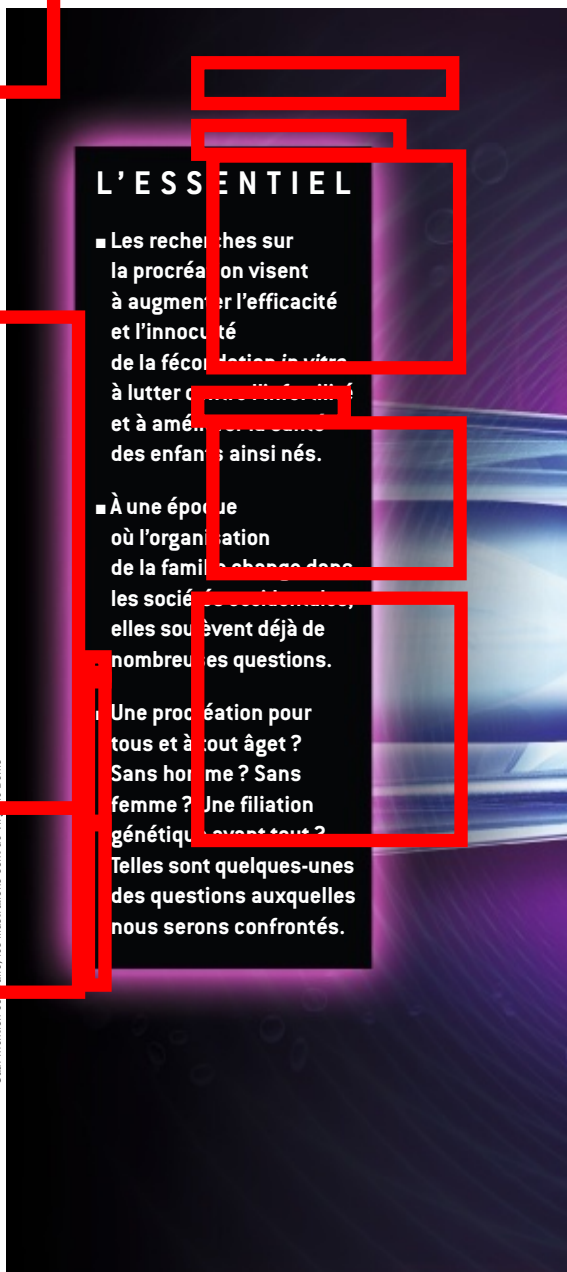
Analyse des embryons, production artificielle de gamètes, remplacement d'un génome porteur de maladie : la procréation médicalisée explore de nombreuses pistes indissociables d'une réflexion éthique et sociétale.

Pierre Jouannet

Depuis une cinquantaine d'années, la médecine intervient de plus en plus dans la procréation humaine, soit pour l'empêcher quand elle n'est pas souhaitée grâce à des méthodes de contraception efficaces, soit pour la favoriser quand elle ne peut s'exprimer naturellement. La stérilité, souvent vécue comme une frustration majeure – sinon comme une malédiction – par de nombreux couples, n'est plus une pathologie incontournable. Des techniques toujours plus complexes ont été mises au point pour maîtriser *in vitro* la conception et le développement embryonnaire pré-implantatoire. Cette évolution s'est produite au moment où de profondes mutations socio-culturelles sur l'organisation de la famille ont commencé à se manifester dans la société.

À la fin des années 1960, rares étaient les recherches sur la stérilité et la reproduction humaines (elles étaient même inexistantes en France). Aujourd'hui, l'assistance médicale à la procréation est devenue une pratique courante, sinon banale, dans la plupart des pays, quel que soit leur contexte socio-économique ou culturel. Elle peut prendre plusieurs formes selon les cas : insémination artificielle (le sperme de l'homme est prélevé et déposé dans l'utérus de la femme), fécondation *in vitro* ou FIV (des spermatozoïdes et des ovocytes sont mis en présence dans une boîte de culture, puis l'embryon obtenu est transféré dans l'utérus de la femme), dons de sperme, d'ovules, d'embryons, congélation des gamètes et des embryons…

Dans le monde, on estime à cinq millions le nombre d'enfants nés après avoir été conçus par FIV. En France, selon le dernier bilan de l'Agence de la biomédecine, 22 401 enfants sont nés à la suite d'une assistance médicale à la procréation en 2010,



L'ESSENTIEL

- Les recherches sur la procréation visent à augmenter l'efficacité et l'innocuité de la fécondation *in vitro*, à lutter contre l'infertilité et à améliorer la santé des enfants ainsi nés.
- À une époque où l'organisation de la famille change dans les sociétés occidentales, elles soulèvent déjà de nombreuses questions.
- Une procréation pour tous et à tout âge ? Sans homme ? Sans femme ? Une filiation génétique avant tout ? Telles sont quelques-unes des questions auxquelles nous serons confrontés.

Sauf mention contraire, les illustrations sont de Virginie Denis

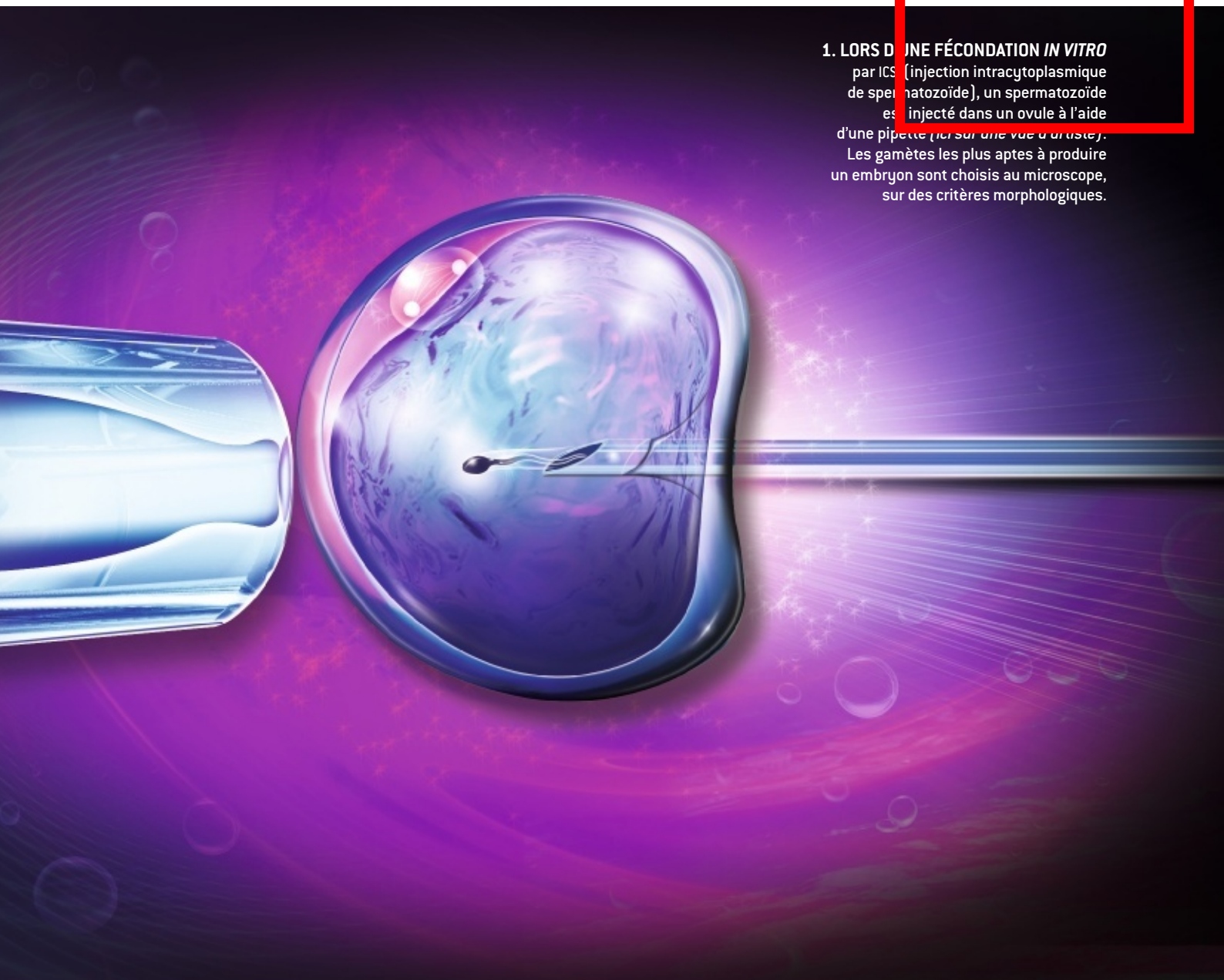
dont 15 145 conçus par FIV, ce qui représente environ 2,7 pour cent des naissances *(voir la figure 2)*.

Une meilleure efficacité de la FIV

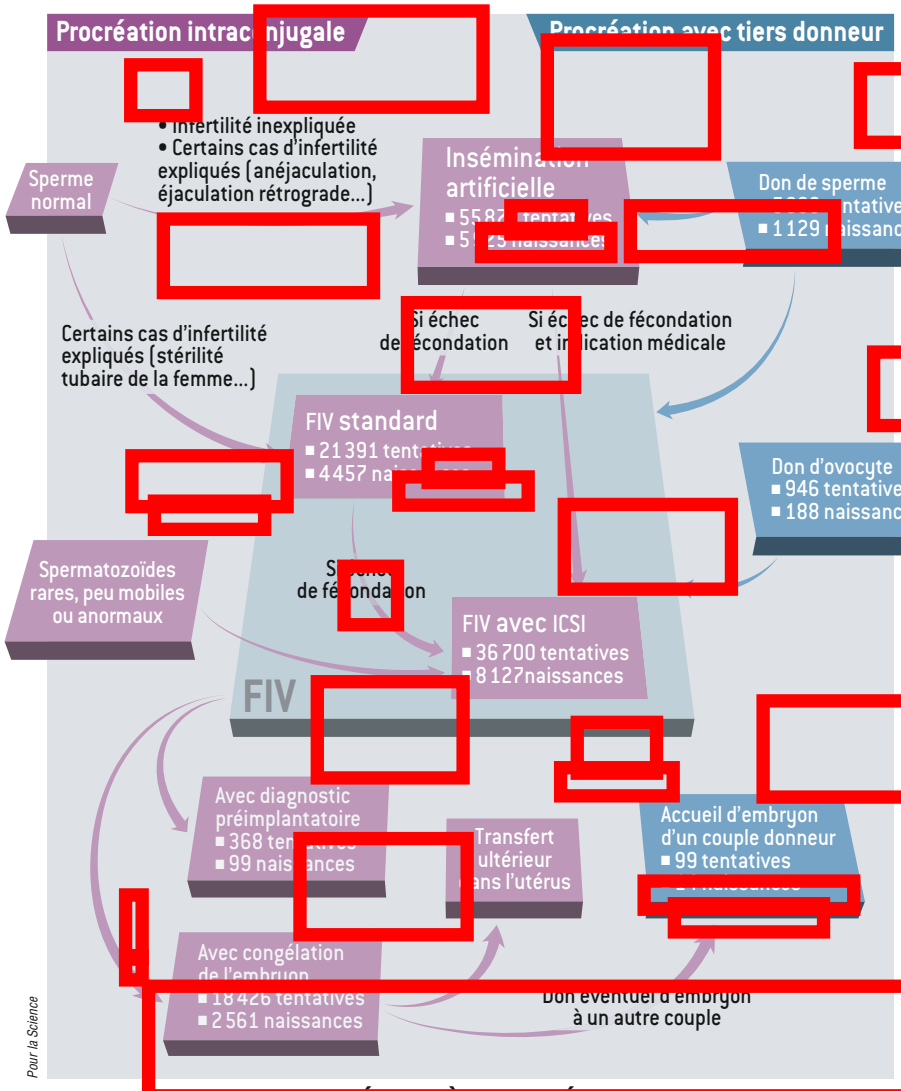
Dans quel sens la médicalisation de la procréation va-t-elle évoluer ? Faire des prévisions en la matière n'est pas aisé pour plusieurs raisons. Une partie des évolutions possibles tient aux choix sociaux et politiques qui sont faits pour définir les limites du champ d'application de ces techniques. Dans certains pays tels que la France, l'assistance médicale à la procréation est encadrée par des dispositions législatives et réglementaires strictes, qui limitent son accès aux indications médicales et aux couples hétérosexuels en âge de procréer. Dans d'autres pays tels que les États-Unis, le Royaume-Uni et les Pays-Bas, elle est accessible à toute personne souhaitant procréer, quels que soient sa sexualité ou sa situation maritale.

D'autres évolutions dépendront de nouveaux développements scientifiques et techniques dont on ne saurait affirmer aujourd'hui avec certitude la nature et les échéances. Qui aurait prévu, au début des années 1990, que l'ICSI (injection intracytoplasmique de spermatozoïde), technique consistant à introduire un spermatozoïde dans un ovule à l'aide d'une pipette *(voir les figures 1 et 3)*, révolutionnerait la prise en charge des stérilités masculines et représenterait plus de 60 pour cent des fécondations *in vitro* pratiquées dans le monde ? Les pistes de recherche sont multiples. Elles visent tant à augmenter l'efficacité et l'innocuité de l'assistance médicale à la procréation qu'à mieux lutter contre l'infertilité et à produire moins de risques pour la santé des enfants.

Si l'assistance médicale à la procréation donne souvent de bons résultats, c'est au prix de contraintes importantes que l'on essaye aujourd'hui de réduire. Avant le prélèvement chirurgical des ovocytes pour une FIV, la femme suit un traitement qui stimule la maturation des follicules, les éléments clés dans lesquels sont nichés les ovocytes dans les ovaires. Ce traitement permet de prélever plusieurs ovocytes en une seule fois. Les traitements classiques utilisés pour stimuler la maturation folliculaire sont complexes, coûteux, entraînent parfois des manifestations secondaires pénibles, et ne sont pas sans risques pour la femme. Pourtant, contrairement aux idées reçues, un traitement hormonal modéré conduisant à un recueil d'ovocytes moins nombreux, mais dans des conditions plus proches de



1. LORS D'UNE FÉCONDATION *IN VITRO* par ICSI (injection intracytoplasmique de spermatozoïde), un spermatozoïde est injecté dans un ovule à l'aide d'une pipette *(ici sur une vue d'artiste)*. Les gamètes les plus aptes à produire un embryon sont choisis au microscope, sur des critères morphologiques.



2. CHIFFRES DE L'ASSISTANCE MÉDICALE À LA PROCRÉATION EN 2010 EN FRANCE, selon le dernier bilan de l'Agence de la biomédecine. On distingue la procréation intraconjugale, réalisée sans don d'ovocyte, de sperme ou d'embryon *(en mauve)* et la procréation avec tiers donneur, plus rare *(en bleu)*.

la physiologie naturelle, ne réduit pas forcément les chances d'obtenir une grossesse. Dans l'avenir, il est probable qu'une meilleure efficacité des traitements inducteurs de l'ovulation soit obtenue par une approche plus individualisée et mieux adaptée, s'appuyant sur des éléments cliniques, endocriniens, échographiques et génétiques spécifiques à chaque femme qui permettront de prévoir sa réponse ovarienne.

Afin d'augmenter les chances de grossesse, il est souvent transféré plus d'un embryon dans l'utérus après une FIV. En conséquence, les naissances multiples sont beaucoup plus nombreuses que pour les grossesses naturelles. En France, 18 pour cent des accouchements en 2010 étaient gémellaires après FIV et 0,2 pour cent étaient triples ou plus. Les grossesses multiples et leurs risques de prématurité constituent actuellement la principale cause des complications de l'assistance médicale à la procréation pour la mère et pour les enfants. C'est ce qui a conduit de nombreux experts internationaux à recommander que la naissance d'un enfant unique en bonne santé soit l'objectif prioritaire de toute assistance médicale à la procréation. Cet objectif peut être atteint en diminuant le nombre d'embryons transférés après FIV et en identifiant mieux les embryons ayant les meilleures chances de se développer *in utero*. En Suède et en Finlande, où une stratégie de transfert mono-embryonnaire a été développée au plan national, le nombre de naissances multiples a été considérablement réduit sans que les chances d'obtenir une grossesse soient diminuées.

Avant tout transfert d'embryons dans l'utérus d'une femme, on choisit les embryons ayant le plus de chances de survie sur la base de critères morphologiques : nombre de cellules (à deux jours, l'embryon doit compter quatre cellules) ; rythme des premières divisions cellulaires, des études ayant montré que le nombre de fausses couches est plus important quand le développement de l'embryon est trop rapide ou trop lent ; degré de fragmentation des cellules de l'embryon (plus un embryon présente de fragments de cellules, moins il est viable) ; nombre de noyaux dans les cellules (les embryons à cellules pluri-nucléés sont moins viables). Après cet examen, et lorsque la femme est suffisamment jeune et fertile, on ne doit transférer en principe qu'un seul embryon : celui qui présente les meilleures chances de se développer.

Un traitement adapté à chaque embryon

Cette politique qui diminue le nombre d'enfants nés prématurément a aussi pour conséquence de réduire les coûts de l'assistance médicale à la procréation. Elle aura d'autant plus de chances d'être acceptée par les médecins et les patients qu'elle sera appliquée sans diminution des probabilités de grossesse, ce qui devrait être possible si l'on réussissait à mieux identifier les gamètes et les embryons aptes à se développer.

Aujourd'hui, les techniques utilisées sont loin d'être efficaces. Les 59 091 fécondations *in vitro* réalisées en France en 2010 ont conduit à la formation de 274 310 embryons, parmi lesquels 111 204 seulement (55 pour cent) ont été jugés aptes à se développer dans les jours suivant la fécondation. Parmi les 89 584 transférés immédiatement dans l'utérus, 12 284 seulement ont donné naissance à un enfant, soit 14,1 pour cent. Malgré les progrès réalisés depuis 30 ans, nous connaissons encore mal les mécanismes cellulaires et moléculaires du développement précoce des embryons et quelles seraient les meilleures conditions de leur développement *in vitro*.

Toutefois, indépendamment des observations morphologiques, une approche plus fonctionnelle de l'embryon est possible. Son expression génique, qui débute au troisième jour du développement chez l'homme, peut être évaluée en analysant les molécules d'ARN transcrites à partir des gènes (le trans-

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012

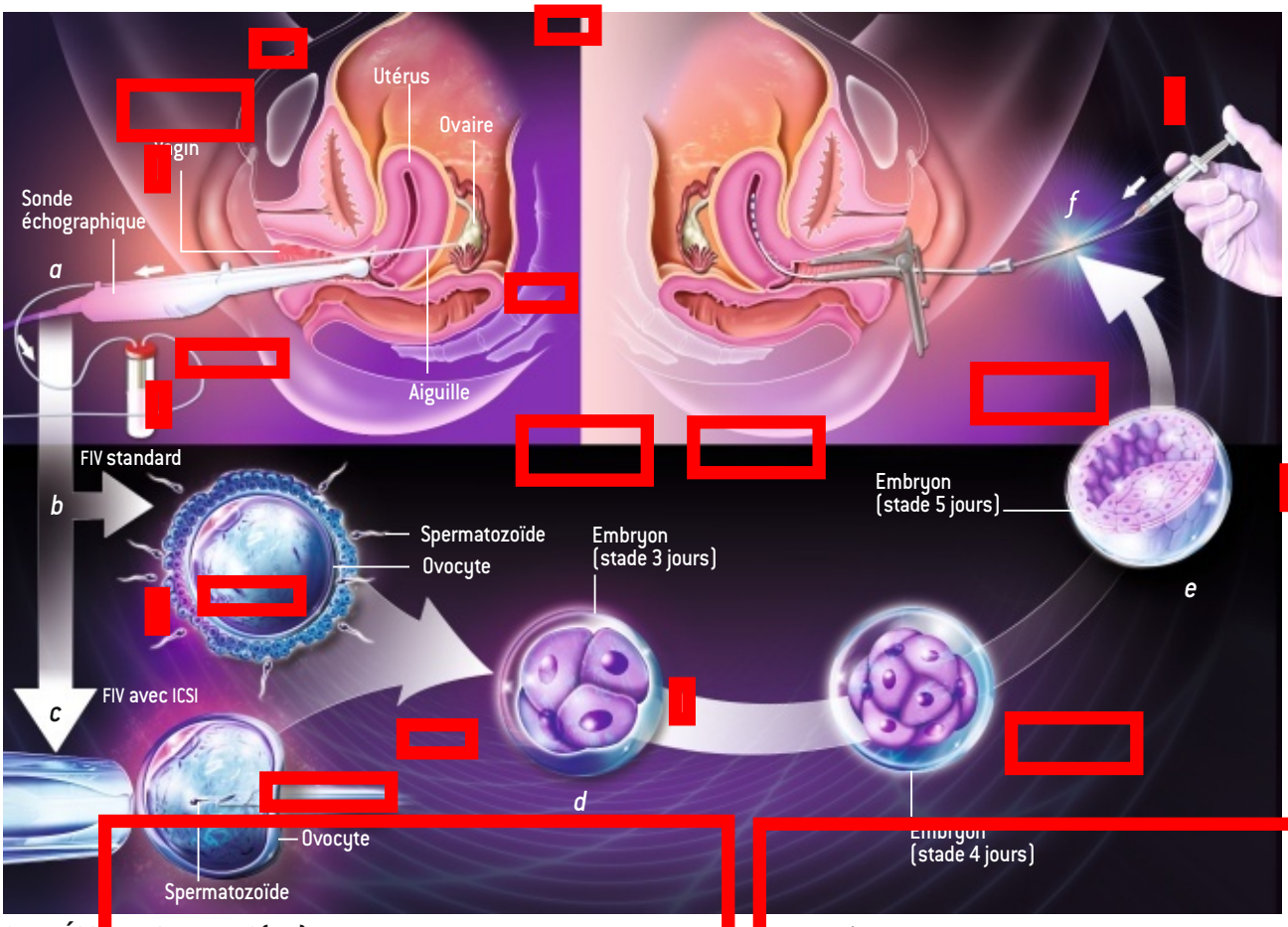
criptome). C'est ce qu'ont fait des chercheurs australien à partir de cellules du trophectoderme (les cellules qui donneront le placenta) prélevées sur des embryons de cinq jours (blastocystes) avant leur transfert dans l'utérus. Ils ont observé que le profil transcriptomique des embryons était notablement différent selon qu'ils donnaient naissance à un enfant ou non. Il est aussi possible d'apprécier le métabolisme d'un embryon de quelques jours (métabolomique) en analysant biochimiquement le milieu de culture pour mesurer les produits qu'il absorbe et qu'il rejette. Ces techniques sont délicates, car elles doivent être réalisées sur un faible nombre de cellules ou sur quelques microlitres de milieu. Mais nous entrons dans l'ère « omique » et il n'est pas impossible que nous disposions bientôt de microtechniques non invasives performantes pour évaluer l'aptitude de l'embryon à se développer.

On pourrait alors corriger les altérations du développement de chaque embryon par des conditions de culture appropriées ou transférer prioritairement dans l'utérus ceux ayant les meilleures chances de se développer *in vivo*. Prometteurs, ces travaux sont irréalisables en France, la recherche sur l'embryon y étant interdite par principe ; et quand elle est autorisée par dérogation, la loi interdit de transférer dans l'utérus un embryon ayant fait l'objet d'une recherche *(voir l'encadré page 71)*.

Une procréation pour tous et à tout âge ?

Selon la loi française, l'assistance médicale à la procréation n'est possible que si elle a pour objet de remédier à une infertilité dont le caractère pathologique a été diagnostiqué, ou d'éviter la transmission d'une maladie grave à l'enfant ou à l'autre membre du couple. D'après l'article L. 2141-2 du Code de la santé publique, « l'homme et la femme formant le couple doivent être vivants [et] en âge de procréer ». Les modifications éventuelles de ces dispositions dépendent plus de considérations sociales, politiques et éthiques que médicales. D'ailleurs, les femmes et les hommes sollicitant une aide médicale pour procréer en dehors de ce cadre légal ne cherchent-ils pas plus ou moins consciemment à faire reconnaître la légitimité de leur désir d'enfant ainsi que les nouvelles formes de filiations et de familles qu'ils souhaitent établir ?

Ces demandes d'aide sont déjà souvent prises en charge médicalement dans d'autres pays, y compris quand le contexte culturel et social n'est pas très différent de celui de la France, comme en Belgique, en Espagne ou au Royaume-Uni. L'insémination artificielle avec sperme de donneur y



3. LA FÉCONDATION *IN VITRO* (FIV) comporte plusieurs étapes. Après avoir stimulé la maturation d'ovules dans les ovaires de la femme, on prélève ces ovules à l'aide d'une aiguille guidée par sonde échographique *(a)*. Les ovules sont alors sélectionnés au microscope. Ceux qui sont aptes à être fécondés sont mis en présence de spermatozoïdes dans une boîte de culture (FIV standard, *b*), soit subissent une ICSI – l'injection d'un spermatozoïde *(c)*. Toujours en culture, les ovocytes fécondés se développent en embryons. Au stade trois jours (huit cellules, *d*), un diagnostic pré-implantatoire peut être effectué en prélevant deux cellules. Au stade cinq jours *(e)*, l'embryon est transféré dans l'utérus à l'aide d'une aiguille souple *(f)*.

■ L'AUTEUR



Pierre JOUANNET est professeur émérite de l'Université Paris Descartes et membre de l'Académie nationale de médecine.

■ SUR LE WEB

L'espace du site de l'Agence de la biomédecine dédié à l'assistance médicale à la procréation : http://www.agence-biomedecine.fr/AMP

Le rapport américain de 2009 sur l'assistance médicale à la procréation : http://www.cdc.gov/ART/ART2009

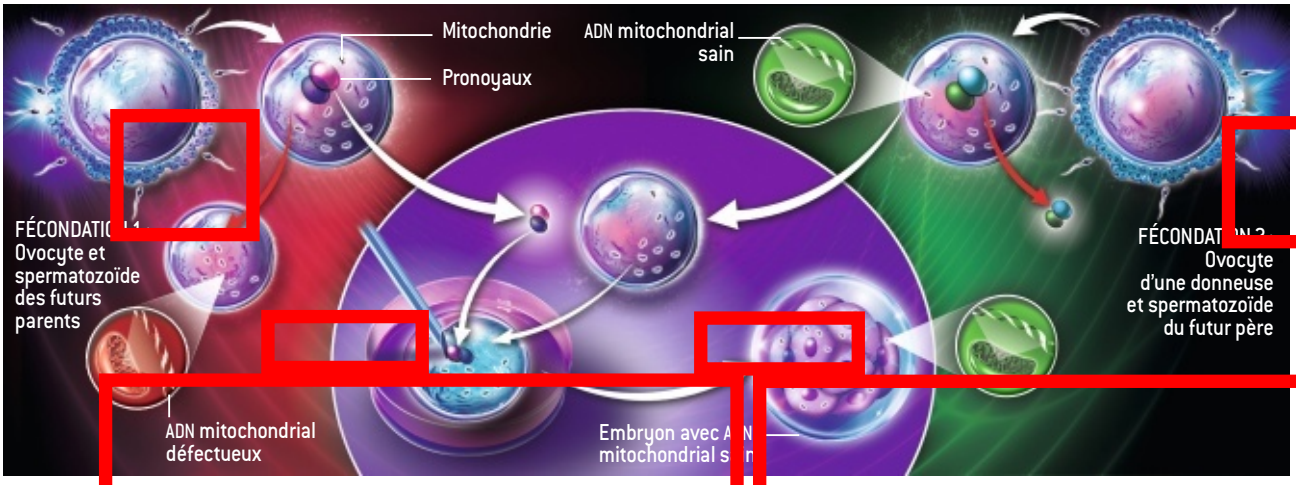
est accessible aux femmes seules ou vivant avec une autre femme. La question se posera en France si les unions homosexuelles sont reconnues, sinon les femmes concernées iront de plus en plus souvent dans les pays limitrophes pour réaliser leur projet de maternité. Et si l'accès à l'assistance médicale à la procréation était autorisé pour les couples de lesbiennes, l'équité voudrait que ce soit aussi possible pour les couples d'hommes homosexuels – ce qui impliquerait de recourir à une gestation pour autrui, une autre pratique interdite par la loi française.

La médicalisation de la procréation devrait aussi permettre de s'affranchir du temps. Les femmes souhaitant procréer de plus en plus tard et la fertilité diminuant de façon importante avec l'âge, elles sont de plus en plus nombreuses à solliciter une aide médicale pour devenir mères à un âge avancé. La baisse de la fertilité étant due pour l'essentiel au vieillissement des ovocytes, qui perdent progressivement leur capacité à produire un embryon apte à se développer normalement, l'assistance médicale à la procréation ne peut faire mieux que la fertilité naturelle et les chances de devenir enceinte diminuent considérablement au-delà de 40 ans. En revanche, les femmes plus âgées peuvent parfaitement procréer avec les ovocytes d'une donneuse plus jeune.

Dans ces conditions, la proportion de succès de l'assistance médicale à la procréation n'chute pas avec l'âge, comme le montrent les résultats obtenus aux États-Unis, où un grand nombre de femmes de plus de 42 ans ont recours au don d'ovocyte pour devenir mères. Selon le Centre américain de contrôle des maladies (CDC), 11 pour cent des 146 244 tentatives de FIV réalisées en 2009 aux États-Unis ont été menées chez des femmes de plus de 42 ans, parmi lesquelles la moitié ont eu lieu avec don d'ovocyte ou d'embryon. Alors que sans don d'ovocyte, le transfert d'embryons conduit à moins de 10 pour cent de réussites au-delà de 43 ans, environ 50 pour cent des transferts d'embryons issus d'un don d'ovocyte ont abouti à la naissance d'un enfant chez des femmes de la même tranche d'âge.

Et par-delà la mort ?

Un autre moyen de s'affranchir du temps consisterait à prélever des ovocytes ou du tissu ovarien quand la femme est jeune pour les utiliser à un âge où sa fertilité naturelle aura diminué, si elle souhaite alors devenir mère. La constitution de ces banques d'ovocytes sans aucune indication médicale est favorisée par l'amélioration des techniques de congélation comme la vitrification (forme de congélation ultrarapide) et se développe dans certains pays tels que les États-Unis et les Pays-Bas. Ce procédé, qui ne garantit pas que les gamètes seront fonctionnels ultérieurement, n'est pas non plus sans risques pour la femme. Curieusement, cependant, elle est prévue en France par la loi qui, depuis 2011, propose « d'offrir » cette possibilité à toute



4. LE TRANSFERT DES PRONOYAUX est une technique envisagée pour permettre à une femme dont l'ADN mitochondrial est porteur de mutations délétères de procréer sans transmettre ces mutations à son enfant. Cet ADN est contenu dans les mitochondries, des organites de la cellule qui participent à la production d'énergie. Seules les mitochondries de l'ovule sont transmises à l'embryon. La technique consiste à prélever les pronoyaux – les précurseurs du noyau de la première cellule embryonnaire – issus de la fécondation *in vitro* d'un ovocyte et d'un spermatozoïde des futurs parents *(à gauche)* et à les injecter dans un ovocyte d'une donneuse lui aussi fécondé par un spermatozoïde du futur père et dont on a retiré les pronoyaux au même stade *(à droite)*. L'embryon qui se forme porte les génomes paternel et maternel, et l'ADN mitochondrial de la donneuse.

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012

femme donnant ses ovocytes. Il s'agit d'une mesure unique au monde. Anticipe-t-elle l'époque où l'on conseillera à toute femme de congeler ses ovocytes à la puberté avec la perspective de pouvoir les utiliser aussi longtemps qu'elle le souhaitera ?

Et pourquoi la mort serait-elle une limite infranchissable pour procréer ? Transférer des embryons dans l'utérus d'une femme alors que le géniteur est décédé est actuellement impossible en France, mais est possible dans d'autres pays. Si le principe de la procréation *post mortem* est accepté, pourra-t-on la limiter au seul transfert des embryons ? Si un homme a clairement consenti et souhaité que ses spermatozoïdes cryoconservés puissent être utilisés après sa mort, pourrait-on refuser à sa femme ou à sa compagne la possibilité de procréer quand il est décédé ? Pourra-t-on empêcher de prélever des spermatozoïdes dans les voies génitales d'un homme décédé à la demande de sa femme ou de ses parents, comme cela s'est déjà pratiqué aux États-Unis ou en Israël ? Ici encore, les enjeux et les questions posées ne sont pas médicaux. Il n'est pas sûr que la réflexion éthique puisse apporter des réponses universelles satisfaisantes à des questions aussi complexes.

Éviter la transmission de pathologies

Si toutes ces questions sociétales sur la procréation dépendent peu des avancées scientifiques, les recherches biomédicales dans le domaine et leurs perspectives suscitent parfois de nouvelles interrogations. Ces recherches visent deux objectifs prioritaires : mieux lutter contre l'infertilité et permettre la naissance d'enfants en bonne santé.

Toute procréation implique un risque de malformations ou de maladies chez l'enfant. Le plus souvent bénignes, elles sont parfois graves au point de mettre en péril la vie de l'enfant. Certaines sont la conséquence d'accidents ou de perturbations qui se sont produits pendant le développement prénatal (tabac, alcool, perturbateurs endocriniens – ces molécules de l'environnement qui imitent ou bloquent le fonctionnement des hormones, etc.) ; d'autres résultent de la transmission de gènes défectueux. Quand des altérations géniques ont été identifiées chez l'un ou l'autre des parents, ceux-ci peuvent prendre le risque d'avoir un enfant atteint, ou choisir de ne pas avoir d'enfant. Ils peuvent aussi demander un diagnostic anténatal et ne poursuivre la grossesse que si l'enfant n'est pas porteur de la pathologie redoutée. Avec la mise au point de la FIV et les progrès de la génétique, il est possible, à partir d'une ou deux cellules prélevées sur un embryon de trois jours, de déterminer s'il est porteur d'une anomalie génétique connue (diagnostic préimplantatoire) : on évite ainsi de transférer dans l'utérus les embryons porteurs de l'anomalie et, par là-même, une interruption de grossesse ultérieure.

D'autres possibilités pourraient exister dans l'avenir, comme le montrent les travaux menés en 2010 par une équipe de l'Université de Newcastle et le débat qui s'ensuivit depuis en Grande-Bretagne. De quoi s'agit-il ? En général, les maladies héréditaires sont dues à la transmission d'anomalies contenues dans le génome nucléaire du père ou de la mère, mais elles peuvent être dues aussi à des altérations de l'ADN mitochondrial. Les mitochondries sont des organites cytoplasmiques jouant un rôle essentiel pour la production de l'énergie nécessaire au fonctionnement de toutes les cellules. L'activité des mitochondries est régulée par l'ADN qu'elles contiennent. Les anomalies de cet ADN peuvent être à l'origine de déficits majeurs de nombreux organes et responsables de décès prématurés. Il n'y a pas de traitement pour ces pathologies.

Lors de la fécondation, seules les mitochondries de l'ovule sont transmises à l'embryon ; les maladies mitochondriales sont donc à transmission maternelle. Pour éviter ce risque, il est envisagé d'utiliser l'ovocyte d'une donneuse dont on retirerait le génome nucléaire pour le remplacer par celui de la femme atteinte par la maladie. Cela peut être fait juste avant la fécondation, mais la manipulation est délicate, car à ce stade les chromosomes sont organisés autour d'un fuseau mitotique, une structure très fragile. Des biologistes américains ont néanmoins réussi l'opération chez des singes rhésus. Il est aussi possible d'agir juste après la fécondation, quand les pronoyaux d'origine paternelle et maternelle sont bien visibles et plus facilement transférables *(voir la figure 4)*, comme l'a montré l'équipe de Newcastle à partir de gamètes humains : les embryons ainsi reconstitués se sont développés normalement *in vitro* jusqu'au stade de l'implantation. Il s'agit à présent de déterminer si cette technique est cliniquement applicable.

C'est ce qui est débattu actuellement en Grande-Bretagne, car outre les questions inhérentes à l'efficacité et à l'innocuité de

De la recherche sur l'embryon... pour l'embryon

La possibilité de mener des recherches sur l'embryon humain et ses cellules fait l'objet de controverses et débats aussi vifs que nombreux. Deux types d'arguments sont avancés pour exprimer des réserves ou même refuser toute recherche sur l'embryon. Certains craignent que ces recherches aient pour objectif la manipulation génétique de l'embryon pour des motifs plus ou moins avouables, avec toutes les dérives que cela suppose, y compris le clonage reproductif. D'autres considèrent que l'embryon est un être fragile assimilé à une personne dont il convient de protéger la vie à tout prix. Mener des recherches sur l'embryon le réduirait à l'état d'objet.

Ces arguments méritent d'être entendus, mais suffisent-ils pour définir une politique de recherche ? Comme toute recherche biomédicale ou toute recherche en général, il n'est pas exclu que la recherche sur l'embryon puisse être à l'origine de dérives, mais ce risque a-t-il conduit à une interdiction de principe de la recherche dans tous les autres domaines ? Pour prévenir les dérives éventuelles, il suffirait que la recherche sur l'embryon humain et ses cellules soit strictement encadrée, comme toute recherche biomédicale, en tenant compte des spécificités inhérentes à l'embryon.

Interdire par principe la recherche sur l'embryon humain au nom de la protection de sa vie ou parce que la recherche ferait de lui un objet n'a pas de sens. Des recherches peuvent être menées sur des embryons ou décédées et sur leurs cellules à tous les âges de la vie et nul ne les considère comme des objets.

Retenir ce type d'argument conduirait à interdire toute recherche biomédicale par principe. Enfin, l'interdiction de la recherche ne protège pas la vie de l'embryon. En France, plus de 10 000 embryons cryoconservés dans les laboratoires de FIV ont été donnés à la recherche. Ils ne répondent plus au projet parental des personnes qui sont à leur origine et vont être accueillis par un autre couple. Recherche ou pas, ils n'ont pas d'autre avenir que l'arrêt de leur développement, c'est-à-dire la mort. Un embryon de trois jours qui n'a pas d'autre issue devrait-il être plus sacralisé qu'un grand prématuré vivant ou mort ou qu'une personne dans le coma vivante ou morte ? Peut-être faut-il accepter l'embryon et d'autoriser les recherches sur lui, avec tout le respect qui lui est dû.

ce nouveau traitement, cette technique pose de nouvelles questions, y compris éthiques. Une partie de l'ADN de l'enfant, même minoritaire (0,1 pour cent), provenant d'une donneuse devrait-on considérer qu'il a trois parents ? D'autre part, l'intervention se produisant avant la différenciation des cellules germinales dans l'embryon, les modifications géniques introduites par l'ADN mitochondrial externe seront transmises aux générations suivantes. Devrait-on assimiler cette technique à une thérapie génique germinale ? Ce terme s'applique aux techniques qui modifient le génome de l'embryon avant la différenciation des cellules germinales qui formeront les gamètes. Or il existe un consensus international pour ne pas les utiliser, car elles modifient non seulement le génome de l'enfant à naître, mais aussi celui de sa descendance.

Environ 10 à 20 pour cent des couples consultent à un moment ou un autre parce qu'ils ont des difficultés pour avoir l'enfant qu'ils désirent. Mais l'infertilité augmente-t-elle dans la population ? Cette question se pose d'autant plus que, selon un nombre croissant d'études scientifiques, des facteurs liés à notre environnement ou à nos conditions de vie pourraient influ

capacités reproductives. Si c'est le cas, des mesures de prévention s'imposeraient. C'est ce qu'a entrepris l'Union européenne en créant le protocole REACH, qui exige de vérifier l'innocuité des nouveaux produits chimiques mis sur le marché quand ils sont fabriqués en grande quantité. Des mesures d'interdiction de produits particulièrement nocifs pour la santé peuvent être aussi prises, comme c'est le cas pour le bisphénol A dans plusieurs pays. Enfin, sachant que la période de la grossesse est critique pour le développement de l'enfant, les femmes enceintes peuvent éviter de s'exposer inutilement à des facteurs tels que le tabac susceptibles de perturber le développement des organes génitaux du fœtus et, par conséquent, sa future fertilité.

Les recherches ont aussi pour objectif d'améliorer les traitements de l'infertilité dans l'avenir, afin que les personnes puissent procréer naturellement, sans intervention médicale. Mais tous les problèmes ne pourront être résolus, à moins que l'on devienne capable de remplacer les cellules et les organes manquants.

C'est ainsi qu'a été imaginée, par exemple, la mise au point d'un utérus artificiel. Actuellement, la seule proposition offerte aux femmes dépourvues d'utérus est d'adopter ou de recourir à une autre femme qui portera l'enfant jusqu'à la naissance. Ce n'est pas tant l'utérus artificiel qui pose problème que la mise au point d'un placenta artificiel, organe aux multiples fonctions (échanges fœto-maternels, tolérance immunitaire, production hormonale…) et très évolutif pendant la première période de la grossesse, de l'implantation jusqu'à la fin du deuxième mois.

Des gamètes à partir de cellules adultes reprogrammées

Une autre évolution serait de pouvoir fabriquer à volonté des spermatozoïdes et des ovules quand les testicules et les ovaires en sont dépourvus. Ce rêve n'est peut-être plus inaccessible : des progrès extraordinaires ont été faits dans la maîtrise de la différenciation cellulaire à partir de cellules souches embryonnaires ou de cellules souches adultes reprogrammées (cellules pluripotentes induites). De même qu'il devrait être possible de fabriquer des cellules souches cellu-

D'une procréation sans père à une procréation sans homme ?

Devenir mère quand on vit seule ou quand sa partenaire est une femme est une aspiration de plus en plus fréquente dans les sociétés occidentales. Réaliser un tel projet a toujours été possible de façon naturelle au gré des arrangements personnels des intéressées. Cependant, le phénomène a pris une autre dimension depuis quelque temps, sous l'influence de deux évolutions notables : celle de la société, qui accepte mieux et intègre à ses normes les familles monoparentales et les couples homosexuels, et celle consécutive à l'accès de l'assistance médicale à la procréation et à son ouverture aux indications non médicales.

Dans les pays où elles sont autorisées, comme la Grande-Bretagne, la Suède ou les États-Unis, les procréations médicalisées avec spermatozoïdes d'un donneur pratiquées chez les femmes seules connaissent un développement extraordinaire, au point de devenir plus nombreuses que celles faites pour les couples hétérosexuels stériles. Parfois, le donneur est choisi par la femme dans son entourage, mais cela n'est pas sans conséquences. Le donneur peut revendiquer des droits sur l'enfant et provoquer un conflit majeur, comme l'ont montré plusieurs procès récents en Grande-Bretagne et aux États-Unis. Aussi s'adressent-elles à une banque de sperme pour éviter les inconvénients d'un don non relationnel.

Dans tous les cas, l'enfant sera élevé sans père. En souffrira-t-il ? Cette question est l'objet de débats passionnés. Même si elles sont encore insuffisantes, la plupart des études publiées à ce jour sont rassurantes : les enfants se développent bien et paraissent équilibrés. On note seulement que les enfants nés dans ces familles sont, sans doute, plus désirés que d'autres, le désir de le rencontrer.

Procréer grâce à un homme qui n'est plus père, mais est cantonné dans un rôle de géniteur peut être discuté d'un point de vue anthropologique, philosophique ou même social si les parents sans filiation paternelle sont amenés à occuper une place de plus en plus importante dans la société. Mais, allant au-delà, l'homme même, réduit à son rôle de géniteur, devient-il encore utile ? Les femmes ne pourraient-elles procréer sans les gènes d'un homme ? Les recherches menées pour obtenir la création de spermatozoïdes et d'ovules à partir de cellules souches suggèrent que cette hypothèse ne peut être exclue. Si les obstacles sont encore nombreux, les résultats obtenus chez la souris que chez l'homme indiquent que ce serait un jour techniquement envisageable.

Quand tous les problèmes auront été résolus, il devrait être possible de différencier une cellule souche pluripotente en cellule germinale mâle ou femelle. En pratique, il devrait donc être possible de fabriquer aussi bien des ovules que des spermatozoïdes à partir de cellules adultes prélevées chez une femme, ou l'autofécondation réalisée à partir d'un spermatozoïde et d'un ovule provenant de la même personne éviterait de multiples problèmes supplémentaires, la fécondation de l'ovule d'une femme par le spermatozoïde créé à partir d'une cellule de cette femme. Si réalisable, l'opération a été réussie chez la souris (dans des conditions expérimentales acrobatiques).

En conséquence, seules des filles naîtraient, puisque les spermatozoïdes fabriqués ne porteraient que le chromosome X. À moins que, par une manipulation supplémentaire, on introduise un chromosome Y qui permettrait à l'embryon de se différencier dans le sens masculin. Mais serait-ce bien nécessaire ? N'y aurait-il pas intérêt à se passer des hommes ? Chez la souris, les animaux conçus à partir des gamètes de deux femelles vivent plus longtemps que les autres…

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012

les cardiaques fonctionnelles, on peut imaginer la formation de gamètes. Les résultats obtenus chez la souris indiquent que ce sera un jour possible, même si les obstacles sont encore nombreux.

Il s'agit d'obtenir, à partir de cellules pluripotentes induites, des cellules germinales primordiales – les cellules à partir desquelles se forment les ovules et les spermatozoïdes –, et de leur faire suivre le processus long et complexe de fabrication des gamètes. Il faut pour cela maîtriser trois principaux types de phénomènes : la méïose (la division des cellules germinales qui crée le génome spécifique de chaque gamète), la maturation épigénétique, c'est-à-dire de l'environnement des gènes, qui va régler notamment l'expression différentielle de certains gènes d'origine paternelle et maternelle, et enfin l'édification de tous les éléments cellulaires et moléculaires indispensables à la fécondation et au développement de l'embryon.

Pour le faire, la cellule germinale doit être placée au sein d'une niche cellulaire reconstituant ce qui se passe dans le testicule ou l'ovaire. Si ces phénomènes ont été reproduits chez la souris *(voir la figure 5)*, ils ne l'ont pas été encore complètement *in vitro*. Mais nul doute que ce sera possible un jour et que ces techniques seront utilisées par les hommes et les femmes pour devenir parents, quand on aura démontré qu'elles sont sans risque pour les enfants.

Quelle place pour les gènes dans la famille ?

Si les enfants sont encore conçus le plus souvent naturellement au gré des rencontres, des désirs et des hasards, les moyens mis à notre disposition pour devenir parents, comme notre regard sur la procréation, évoluent vite. Ces évolutions résultent principalement de deux phénomènes : une connaissance de plus en plus précise des mécanismes présidant à la conception des individus et une modification du schéma familial.

Les possibilités d'intervenir médicalement dans la procréation créent un bouleversement majeur. Cependant, les progrès réalisés jusqu'à présent sont encore modestes et les méthodes utilisées ont un coût économique et humain trop élevé. Quand la procréation naturelle est impossible ou dangereuse pour la santé de la descendance, le recours à ces techniques, à toute spermatozoïdes



K. Hayashi et al., Sciencexpress, 10.1126/science.1226889, 4 octobre 2012

5. CES SOURICEAUX ont été conçus à partir d'ovocytes dérivés de cellules souches pluripotentes induites, des cellules différenciées (ici de la peau d'un embryon de souris femelle) reprogrammées en cellules souches. Katsuhiko Hayashi, de l'Université de Kyoto, au Japon, et ses collègues ont induit la différenciation de ces cellules en cellules germinales primordiales, qu'ils ont ensuite placées dans un environnement imitant celui de l'ovaire (des cellules non germinales issues de gonades femelles embryonnaires de souris). Après maturation des cellules germinales en ovocytes dans cet environnement artificiel, ils ont implanté chez une souris, les ovocytes ont été prélevés et fécondés *in vitro*. Les souriceaux nés de cette manipulation étaient fertiles.

des, à leurs ovules, à leurs embryons ou à leurs utérus reste encore trop souvent la seule possibilité offerte aux hommes et aux femmes qui veulent devenir parents en concevant un enfant malgré tout. La dissociation qui en résulte entre les composantes affectives et génétiques de la filiation est parfois perturbante à l'époque du gène triomphant. Peut-être saura-t-on un jour intervenir de façon plus précise, efficace et sûre en amont de la conception, pendant ou en aval pour procréer en transmettant ses propres gènes en toutes circonstances, à tous les âges de sa vie et quelle que soit sa situation. Mais ne conviendrait-il pas de s'interroger sur la place si importante accordée à nos gènes dans ce que nous sommes et dans nos liens avec les générations passées et futures ?

Les évolutions auxquelles nous sommes confrontés creusent l'écart entre le rythme de l'acquisition des connaissances scientifiques et celui avec lequel les sociétés les intègrent. Dans ces conditions, il n'est pas étonnant qu'elles suscitent trouble et perplexité, et il est plus que jamais nécessaire de les accompagner d'une réflexion éthique, sociétale et politique sur la procréation de demain. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

L. Barnéoud, **Procréation assistée,** Coll. Infoscopies, Belin, à paraître en 2013.

S. M. Pudakalakattia *et al.*, **NMR studies of preimplantation embryo metabolism in human assisted reproductive techniques : a new biomarker for assessment of embryo implantation potential,** *NMR Biomed.*, doi : 10.1002/nbm.2814, 2012.

P. Jouannet (coord.), **Assistance médicale à la procréation,** *BEH*, n°23-24, 2011.

L. Craven *et al.*, **Prepronuclear transfer in human embryos to prevent transmission of mitochondrial DNA disease,** *Nature*, vol. 465, pp. 82-85, 2010.

B. Jégou *et al.*, **La fertilité est-elle en danger ?** La Découverte, 2009.

Prématurité
Une nouvelle génération d'enfants

Hugo Lagercrantz

On comprend mieux aujourd'hui le développement cérébral du nouveau-né prématuré et les risques associés. Les soins apportés en conséquence laissent entrevoir une vie meilleure pour de tels enfants.

Depuis 60 ans, les progrès en néonatologie ont considérablement amélioré l'avenir des enfants nés prématurément. D'une part, peu de champs de la médecine moderne ont autant diminué la mortalité dans un délai aussi court. Avant 1950, rares étaient les nouveau-nés de moins de 1,5 kilogramme qui survivaient. Aujourd'hui, plus de 80 pour cent de ces enfants deviennent adultes dans la plupart des pays à revenus élevés. D'autre part, la plupart de ceux nés ces dernières années mènent une vie normale. Il existe cependant une contrepartie. Plus la prématurité est grande, plus le risque de présenter un handicap fonctionnel est important. À tel point que certains pays, dont la France, ne réanimaient en général pas les enfants nés avant 24 semaines de gestation (depuis la date des dernières règles). Les enfants prématurés ont aussi un risque plus élevé d'hypertension et de diabète à l'âge adulte. Quelles sont les limites de la réanimation néonatale et de la prise en charge de la très grande prématurité aujourd'hui ? Pourrons-nous nous en affranchir un jour ?

L'ESSENTIEL

- De plus en plus de bébés prématurés survivent et la plupart suivent un cursus scolaire normal.
- Toutefois, un nombre de grands prématurés présente des troubles fonctionnels.
- En étudiant leur développement cérébral, les médecins en néonatologie affinent leur prise en charge en adaptant les soins aux périodes critiques de leur développement.
- Certains proposent de définir l'émergence de la conscience comme limite de viabilité fœtale.

© Tino Soriano/National Geographic Society

Un enfant est prématuré s'il naît avant 37 semaines de gestation, c'est-à-dire plus de trois semaines trop tôt. Selon le dernier rapport de l'Organisation mondiale de la santé, rendu public en mai dernier, 15 millions d'enfants prématurés naissent chaque année dans le monde, et l'incidence de la prématurité augmente dans de nombreux pays *(voir l'encadré page 77)*.

En Europe, 500 000 enfants naissent prématurément chaque année, selon le rapport 2009-2010 de la Fondation européenne pour les soins aux nouveau-nés (EFCNI). Avec respectivement 6,2 pour cent de naissances prématurées en 2004 et 6 pour cent en 2010 (d'après l'enquête nationale périnatale 2010), la Suède et la France font partie des pays européens où elles sont les moins fréquentes. Aujourd'hui, neuf millions d'anciens prématurés vivent au sein de l'Union européenne.

Nombre de facteurs tels que les grossesses précoces ou tardives, les maladies des reins, le stress, des infections augmentent le risque d'accoucher prématurément. L'inflammation locale liée à une infection bactérienne des voies génitales

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012



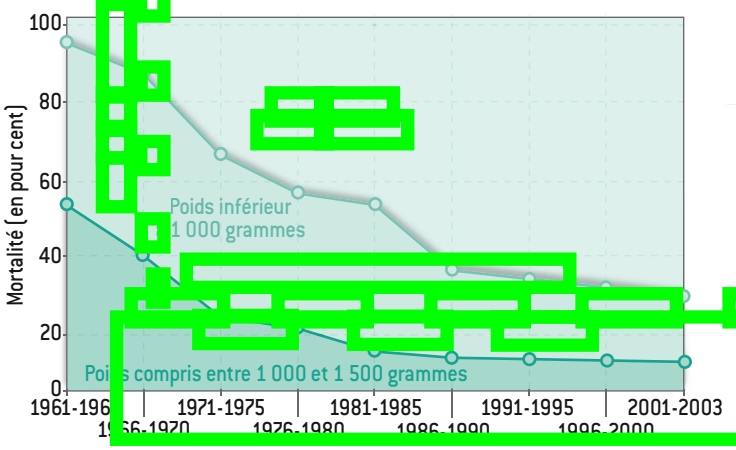
maternelles, notamment, déclencherait la cascade d'événements biologiques conduisant à l'accouchement en entraînant localement la production de prostanoïdes, des hormones qui provoquent la contraction de l'utérus. Les naissances multiples, plus fréquentes en cas d'assistance médicale à la procréation, car en général plusieurs ovocytes fécondés sont transférés dans l'utérus, sont aussi plus souvent prématurées. Il existe aussi diverses causes de prématurité induite : par exemple, la naissance peut être provoquée quand le fœtus présente un retard de croissance, signe que l'environnement utérin n'est pas favorable. Néanmoins, le mécanisme initial du déclenchement prématuré de la naissance demeure inconnu.

Des poumons immatures

La prématurité n'est pas une maladie en soi. Les difficultés sont liées au fait que l'enfant prématuré n'est pas prêt à affronter l'environnement extra-utérin. Durant le troisième trimestre de gestation, les poumons arrivent à maturation : les bronches, alvéoles et les capillaires sanguins qui les alimentent se développent, rendant la respiration possible. En outre, les alvéoles se couvrent d'une couche de substance tensioactive, le surfactant pulmonaire. Constitué de lipides, de phospholipides et de protéines, ce matériau sécrété en continu dans la lumière alvéolaire par les cellules de la paroi augmente la plasticité des alvéoles ; comme du savon, il diminue la tension de surface des parois alvéolaires, ce qui rend possible l'aération des poumons après la naissance.

C'est aussi durant ce dernier trimestre que le fœtus accumule du glycogène dans le foie, le cœur et d'autres organes, qui lui fournira l'énergie nécessaire pour survivre avant que l'alimentation au sein se mette en place. L'intestin arrive à maturation, rendant possible l'alimentation orale. La couche de graisse dans la peau s'épaissit et le tissu adipeux brun se forme en abondance. Ce tissu joue un rôle primordial dans la régulation thermique du nouveau-né, qui ne sait pas frissonner pour produire de la chaleur.

Les glandes surrénales, des glandes endocrines situées au-dessus des reins, deviennent grosses par rapport à celles d'un adulte et se mettent à produire des glucocorticoïdes et des catécholamines,





© Reflektaja/shutterstock.com

1. DEPUIS LES ANNÉES 1960, la mortalité des enfants prématurés a considérablement diminué dans les pays à revenus élevés, tant parmi les grands prématurés (poids de naissance compris entre 1 000 et 1 500 grammes) que parmi les très grands prématurés (poids inférieur à 1 000 grammes), comme le montrent les données recueillies en Suède.

des hormones qui contrôlent les réactions au stress. Ces hormones aident l'enfant à supporter le stress de la naissance et facilitent l'adaptation néonatale.

Avant les années 1990, la cause la plus fréquente de décès chez les enfants prématurés était le syndrome de détresse respiratoire, dû à l'immaturité des poumons. Les enfants présentant ce syndrome sont en tachypnée: leur respiration est rapide, ce qui produit une ventilation accélérée des poumons et nécessite un apport croissant en oxygène. Observés par radiographie, les poumons présentent un aspect neigeux caractéristique. Ces enfants ont souvent un geignement expiratoire, dû à la fermeture des cordes vocales retenant l'air dans les poumons.

Ce syndrome est souvent associé à des problèmes cardio-vasculaires, principalement une hypertension pulmonaire et la persistance du canal artériel. Habituellement, ce canal qui relie l'aorte et l'artère pulmonaire durant la vie fœtale se ferme à la naissance. Chez l'enfant prématuré présentant un syndrome de détresse respiratoire, il n'est pas rare qu'il soit resté ouvert à la naissance, entraînant une surcharge de travail pour le cœur. La persistance du canal artériel est aussi souvent associée à des troubles intestinaux et à des hémorragies cérébrales.

Grâce à un traitement préventif à base de glucocorticoïdes, donné à la mère avant la naissance, et à l'instillation d'un surfactant synthétique dans les poumons de l'enfant peu après la naissance, le syndrome de détresse respiratoire aiguë est moins fréquent aujourd'hui qu'il y a 10 ou 20 ans. Les maladies associées, telles que la persistance du canal artériel et des dommages cérébraux sont de même moins répandues.

À cause de l'immaturité de leur défense immunitaire, les enfants prématurés sont aussi particulièrement sensibles aux infections, même par des bactéries inoffensives. La plupart des très grands prématurés (nés avant 28 semaines de gestation) sont traités avec plusieurs antibiotiques pour limiter l'impact de ces agents pathogènes.

La prématurité en France

55 000 enfants environ sont nés prématurément et vivants en 2010.

20 000 enfants environ sont grands prématurés chaque année.

En 2003, il y a eu 7 pour cent de naissances prématurées en plus qu'en 1994.

73 pour cent des enfants nés à 26 semaines de gestation en 2003 ont survécu, contre 57 pour cent en 1997, selon les enquêtes *Mosaic* et *Epipage 1*.

95 pour cent des grands prématurés sont scolarisés en classe ordinaire, selon l'enquête *Epipage 1*. Ils bénéficient plus souvent d'aide éducative que les enfants nés à terme.

Des lésions du cerveau

Les autres pathologies les plus graves liées à la prématurité sont dues à l'immaturité du cerveau. En 1962, deux médecins, l'un français – Jeanne-Claudie Larroche – et l'autre américain – Betty Banker – ont décrit une lésion du cerveau particulière observée chez certains enfants prématurés: une atteinte de la substance blanche périventriculaire, une région responsable de la propagation des informations dans le cerveau. On pensait alors que la lésion observée, nommée leucomalacie périventriculaire, était due à une diminution du flux de sang dans cette région du cerveau. Aujourd'hui, les facteurs de risque les mieux identifiés sont l'infection et l'inflammation.

Certains enfants atteints ont des convulsions, mais il n'existe souvent pas de manifestation clinique de la pathologie. Et si le bébé survit, il présente un risque accru de développer une paralysie cérébrale, c'est-à-dire une infirmité motrice due à des lésions survenues durant la période périnatale. La leucomalacie pé-

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012

turbe souvent la capsule interne, un intermédiaire entre le cortex moteur et certains nerfs périphériques, tels ceux des jambes. C'est pourquoi la diplégie spastique ou paralysie des jambes est la forme la plus commune de paralysie cérébrale chez les très grands prématurés.

Des variations soudaines de la pression sanguine peuvent aussi entraîner des dommages neuronaux. Une pression sanguine trop élevée peut déclencher une hémorragie cérébrale, en particulier dans les ventricules, et conduire là encore à une paralysie cérébrale ou à une hydrocéphalie. Ainsi, il est primordial de contrôler la pression sanguine et ce d'autant plus que chez les enfants prématurés, la capacité d'autorégulation du flux sanguin cérébral est limitée.

Un QI proportionnel à l'âge gestationnel

Grâce aux progrès de la prise en charge des nouveau-nés prématurés, les cas de leucomalacie périventriculaire et d'hémorragie intraventriculaire sont plus rares aujourd'hui. Néanmoins, même si les enfants ne présentent pas ces pathologies, leur développement cérébral peut être perturbé. Au cours de sa maturation, le cerveau présente une activité spontanée d'une grande importance pour le raccordement des circuits neuronaux. Dans les années 1990, la neurobiologiste américaine Carla Shatz a montré que « les neurones qui s'activent mutuellement se raccordent, contrairement à ceux qui ne s'activent pas ». Chez l'animal, si l'activité spontanée est bloquée par une toxine, le développement du cerveau est perturbé. En outre, la prématurité semble retarder la myélinisation des nerfs, c'est-à-dire leur enrobage dans une gaine lipidique. La myélinisation augmente de plus de 100 fois la conduction nerveuse. Chez des enfants très grands prématurés, un déficit de myélinisation vers l'âge de 11 ans a été corrélé à un développement cognitif altéré.

De fait, plusieurs troubles neuropsychologiques ont été décrits chez les très grands prématurés. Selon deux études épidémiologiques, l'une réalisée en Allemagne, l'autre en Angleterre, le quotient intellectuel (QI) moyen est proportionnel à l'âge gestationnel pour les enfants nés avant 32 semaines de gestation, c'est-à-dire huit semaines trop tôt *(voir la figure 2)*.

Ces enfants présentent aussi un risque plus élevé de souffrir du trouble de déficit de l'attention avec hyperactivité et de troubles du spectre autistique. Ils ont en outre un risque plus important de développer des troubles du comportement alimentaire, une schizophrénie ou une dépression. Toutefois, même si plusieurs reportages dans les médias ont alarmé la population sur l'augmentation des risques de troubles neuropsychiatriques liée à la grande prématurité, la plupart des enfants prématurés nés après 24 semaines de gestation ont un développement quasi normal et vont à l'école. Leurs performances scolaires ne sont peut-être pas aussi bonnes que celles d'un enfant né à terme, mais ils semblent heureux de leur vie. Et même si le risque de trouble du spectre autistique peut être quatre fois supérieur chez les très grands prématurés, cela ne concerne pas plus de 2 enfants prématurés sur 1 000 (contre 1 sur 2 000 parmi les enfants nés à terme). En d'autres termes, 998 ne développent aucun trait autistique.

Surtout, les enfants prématurés aujourd'hui adultes et qui souffrent de divers problèmes psychosociaux sont nés avant que les soins néonataux plus adaptés aux spécificités des enfants prématurés aient été mis en place. Par exemple, récemment, il a été montré que la caféine, administrée au nouveau-né pour prévenir l'apnée (elle améliore la [illegible]

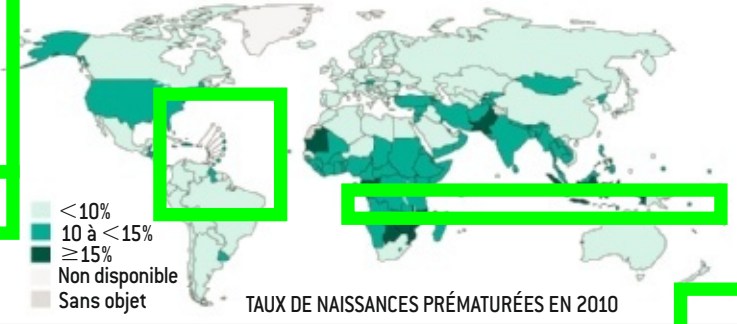
respiratoires en accélérant le rythme cardiaque et en provoquant une vasodilatation), a aussi des effets bénéfiques sur son développement neurologique. Ces effets seraient liés à l'augmentation de l'activité nerveuse que provoque la caféine. Depuis une trentaine d'années aussi, les médecins cherchent à recréer, autour du nouveau-né prématuré, un environnement plus proche des conditions *in utero*, afin de le protéger du stress, du bruit et des lumières fortes. Les soins de développement ont un effet bénéfique sur le bien-être des enfants et ont été associés à une amélioration de leur état de santé *(voir l'encadré page 79)*.

Les soins se poursuivent aussi durant les premières années de l'enfant. Dès la vie intra-utérine et pendant les premières années de vie, l'influence de l'environnement est cruciale sur le développement. C'est particulièrement le cas pour certaines périodes dites critiques, au cours du dernier trimestre de gestation et des trois premières années de l'enfant. L'étude de ces périodes critiques chez l'animal suggère que les mécanismes en jeu sont de nature épigénétique, c'est-à-dire que les conditions environnementales modifient l'expression des gènes sans pour autant changer leur séquence. Ainsi, en 2004, Michael Meaney et Moshe Szyf, de l'Uni[illegible] Canada, ont

La prématurité dans le monde

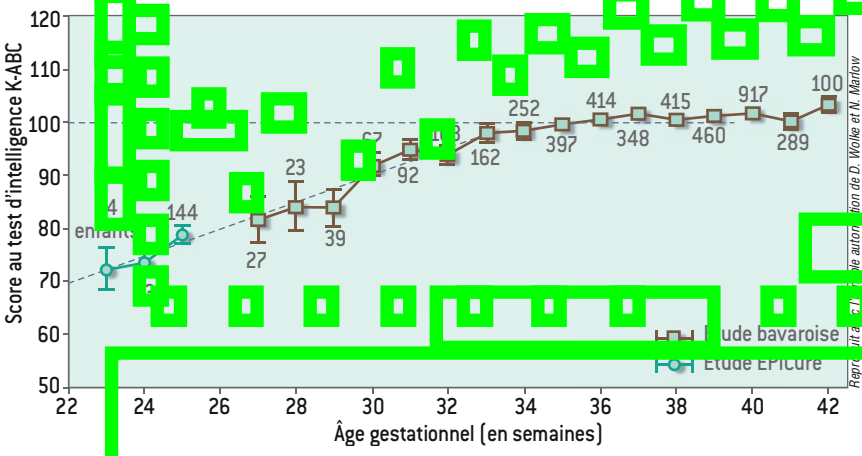
Si la mortalité des enfants prématurés baisse dans les pays à revenus élevés, la situation est tout autre dans les pays à faibles revenus. Selon le dernier rapport de l'Organisation mondiale de la santé sur les 15 millions d'enfants qui naissent prématurément chaque année dans le monde, 1,1 [illegible] meurent au cours des premiers jours de leur vie et alors que la moitié des bébés nés à la 24e semaine de gestation survivent dans les pays à revenus élevés, la moitié des bébés nés à la 32e semaine meurent dans les pays à faibles revenus.

Or ces pays sont aussi ceux qui comptent le plus de naissances prématurées : plus de 60 pour cent surviennent en Asie du Sud et en Afrique subsaharienne, avec [illegible] pour cent de naissances prématurées en 2010. Dans ces pays, les principales causes de prématurité sont les infections (paludisme, sida) et une proportion élevée de grossesses chez les adolescentes. Des mesures simples et peu coûteuses permettraient d'éviter plus de 75 pour cent des décès de prématurés : injection de glucocorticoïdes aux mères qui ont des contractions prématurées pour [illegible] naire du fœtus, méthode kangourou (peau à peau) à la naissance, antibiotiques, prévention…



TAUX DE NAISSANCES PRÉMATURÉES EN 2010

© OMS, Born too soon, 2012



2. AU-DESSOUS DE 32 SEMAINES DE GESTATION, le quotient intellectuel est proportionnel à l'âge gestationnel, selon deux études épidémiologiques, l'une réalisée en Allemagne sur une population d'enfants prématurés nés en 1985-1986 et suivis jusqu'à l'âge de cinq ans (étude bavaroise), l'autre réalisée en Angleterre sur une population d'enfants nés en 1995 et suivis jusqu'à l'âge de six ans (étude EPICure).

montré que la stimulation de souriceaux pendant les premiers jours (en les donnant à une souris qui lèche beaucoup ses petits, alors que leur mère ne les léchait pas) augmente leur résistance au stress et leurs capacités cognitives.

Des programmes d'intervention précoce sont mis en place pour stimuler les enfants prématurés durant ces fenêtres temporelles, tels que la visite régulière à la maison d'une assistante sociale ou d'une puéricultrice qui enseignerait à l'enfant diverses compétences et l'aiderait à développer son langage. Ce type de programme s'est révélé particulièrement efficace dans le cas d'enfants prématurés nés dans un milieu socio-économique défavorisé.

Même si la plupart des enfants prématurés se développent presque normalement et semblent avoir la même qualité de vie que les enfants nés à terme, la question de l'interruption du traitement des enfants les plus prématurés se pose. La limite de viabilité officielle arrêtée par l'Organisation mondiale de la santé est de 22 semaines de gestation. Les enfants nés plus tôt n'ont pas de surfactant pulmonaire et leur membrane alvéolaire, trop épaisse, ne permet pas les échanges gazeux. Toutefois, la volonté est grande de sauver la vie de tous les enfants, quel que soit leur pronostic de vie. Plusieurs arguments justifient cette attitude. D'une part, nombre de très grands prématurés ont été particulièrement désirés : ils sont souvent le fruit d'une longue période de tentatives de procréation médicalement assistée, qui a pu durer plusieurs années. D'autre part, l'exclusion d'enfants handicapés rappelle, pour beaucoup, les sombres périodes de l'histoire marquées par l'eugénisme.

En France, des recommandations de la Fédération nationale des pédiatres néonatologistes ont été publiées en 2001, après un long travail de réflexion entamé en 1986. Elles préconisaient l'absence de réanimation avant 22 semaines de gestation et la possibilité de recourir à un arrêt de vie des enfants prématurés présentant de graves lésions cérébrales ou des maladies génétiques. Des propositions plus récentes prévoient que la situation des enfants nés entre 23 et 25 semaines soit examinée au cas par cas avec les parents et que tous les enfants nés à partir de 26 semaines soient réanimés. Des codes éthiques similaires ont été établis aux Pays-Bas, en Belgique et en Suisse. La Suède, en revanche, refuse cette limitation. En 2009, un anesthésiste pédiatrique de Stockholm a été arrêté et mis en garde à vue pendant une semaine, accusé d'avoir euthanasié par surdose de sédatif un très grand prématuré atteint de graves lésions cérébrales.

Quelle limite de viabilité ?

En Grande-Bretagne, le Conseil de bioéthique de Nuffield a statué que la vie humaine doit être préservée indépendamment de l'âge gestationnel, tant que le nouveau-né a la capacité de respirer soit indépendamment, soit avec une assistance respiratoire ». Néanmoins, lorsque l'enfant est né entre 23 et 24 semaines de gestation révolues, les parents ont le droit de choisir qu'il soit réanimé et placé en soins intensifs.

Toutefois, dans un avenir proche, le choix de l'apparition de la respiration, même assistée, comme limite de viabilité pourrait se révéler douteux. Les enfants nés avant 23 semaines de gestation pourraient être maintenus en vie à l'aide d'une ventilation liquide des poumons. De même, des fœtus extraits de l'utérus maternel survivront peut-être grâce à une oxygénation extérieure de leur sang, au moyen d'un placenta artificiel. Utiliser la respiration comme seul critère de viabilité sera alors peut-être aussi obsolète que définir la mort selon le seul critère d'un arrêt cardiaque définitif.

Une autre limite de viabilité a été proposée par Michael Gazzaniga, président du Conseil américain de bioéthique dans les années 2000, et par Jean-Pierre

L'AUTEUR



Hugo LAGERCRANTZ est pédiatre de l'Unité de recherche néonatale de l'Institut Karolinska, au sein de l'Hôpital pour enfants Astrid Lindgren de Stockholm, en Suède.

BIBLIOGRAPHIE

Born too soon, OMS, www.who.int, 2012.

L'enquête nationale périnatale 2010 : les naissances en 2010 et leur évolution depuis 2003, Rapport INSERM-DREES-DGS, DREES, 2011.

Too little, too late ?, EFCNI, European Benchmarking report 2009-2010.

P.Y. Ancel *et al.*, **Devenir à l'âge scolaire des enfants grands prématurés. Résultats de l'étude Epipage**, *RSM*, vol. 16-17, pp. 189-200, 2010.

H. Lagercrantz, **Le cerveau de l'enfant**, Odile Jacob, 2008.

H. Lagercrantz et J.-P. Changeux, **The emergence of human consciousness : From fetal to neonatal life**, *Pediatric Res.*, vol. 65, pp. 255-260, 2009.

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012

Changeux, neurobiologiste de l'Institut Pasteur, alors président du Conseil consultatif national d'éthique. Un fœtus ou un enfant prématuré pourraient être déclarés viables dès que leur cerveau serait suffisamment développé pour manifester un état de conscience minimal. Toutefois, cette définition soulève une nouvelle question : comment définir la conscience ?

De façon simple, on peut la décrire comme une perception sensorielle de son corps, de soi et du monde. Mais selon le philosophe Henri Bergson, la conscience humaine implique aussi de « retenir ce qui n'est déjà plus, anticiper sur ce qui n'est pas encore » (*L'énergie spirituelle*, 1919).

Tant William James, fondateur de la psychologie en Amérique à la fin du XIXe siècle, que Sigmund Freud en Autriche voyaient les nouveau-nés comme des êtres inconscients par essence, car non conscients d'eux-mêmes ou du monde extérieur. Aujourd'hui, on sait que le nouveau-né perçoit son corps et est capable de se différencier d'autrui. Il est aussi, jusqu'à un certain degré, conscient du monde extérieur et manifeste une forme de mémoire. De plus, nous avons montré par imagerie cérébrale *(voir l'encadré page 80)* qu'il existe, dans le cerveau du nouveau-né, une activité spontanée au

maintien et de partage des données. Cette région cérébrale, aussi nommée espace de travail neuronal global, regroupe les régions centrales – formation réticulaire et thalamus – à partir desquelles des neurones se projettent vers le cortex cérébral. Cette activité pourrait correspondre au flux de conscience de l'enfant.

Il est difficile de se persuader que le fœtus est conscient, car il dort la plupart du temps, baigne avec un faible apport en oxygène (*in utero*), la quantité d'oxygène absorbée équivalant à celle que l'on respire au sommet de l'Everest) et est maintenu sous sédation par diverses neurohormones. Mais au

LES SOINS DE DÉVELOPPEMENT : ÊTRE À L'ÉCOUTE DE L'ENFANT

Depuis les années 1980, l'idée que des soins individualisés favoriseraient le développement des enfants prématurés, mise en œuvre aux États-Unis sous le nom de programme néonatal individualisé d'évaluation et de soutien au développement (NIDCAP), a été reprise dans plusieurs pays, notamment la Suède, l'Angleterre et la Belgique. En France, où il a été introduit en 1995 par Jacques Sizun au CHU de Brest, ce programme est désormais implanté dans une dizaine de services de néonatologie, qui poursuivent en parallèle des recherches sur cette thématique.

Tout a commencé en 1982, quand Heidelise Als, psychologue de l'Hôpital pour enfants de Boston, aux États-Unis, a émis l'hypothèse que les agressions subies par l'enfant prématuré en réanimation – douleur, [illegible] lations, séparations – pouvaient perturber son développement, car son système nerveux immature est encore incapable de filtrer ces stimulus. Depuis, les soins de développement visent, d'une part, à placer l'enfant au centre de l'organisation [illegible] quer les parents au maximum en les intégrant à la vie de leur enfant au sein du service.

Dès la naissance, puis régulièrement, l'équipe médicale effectue une observation de l'enfant très attentive sur des points précis afin de [illegible] son comportement, ses réactions au stress provoqué par son nouvel environnement et les capacités qu'il développe peu à peu pour le réguler. Elle met alors en place des mesures [illegible] pement [illegible] en limitant les nuisances et en évitant la surenchère des traitements.

Les réactions de l'enfant sont [illegible] trouver le sommeil ; les bruits le font sursauter, trembler ou se tortiller, ils le réveillent, augmentent son rythme cardiaque, ou parfois même provoquent une apnée qui peut entraîner changement de couleur et désaturation du sang en oxygène. Si l'enfant se tortille, pleure souvent et a du mal à respirer, peut-être est-ce parce qu'il a mauvaise [illegible] qu'il cherche des appuis, ou que les soins perturbent son sommeil, par exemple.

Jour après jour, l'environnement de l'enfant est adapté à tous ces signes, et les soins calés au mieux sur les rythmes de l'enfant. À l'aide d'une couverture enveloppant la couveuse, il est maintenu dans une pénombre proche de la luminosité intra-utérine, puis peu à peu acclimaté aux cycles jour/nuit. Dans l'entourage de l'enfant, on limite au maximum les bruits (machines, personnes). La posture de l'enfant dans [illegible] tions est aussi étudiée afin de déterminer celles qui le perturbent le moins. Les données physiologiques (température, pression, oxygénation, rythme cardiaque) sont par ailleurs enregistrées en permanence.

Enfin et surtout, les parents sont présents le plus possible, de jour comme de nuit, et sont acteurs des soins. Ils apprennent à reconnaître les signes comportementaux de leur enfant, ils aident à changer sa couche ou le dispositif de respiration installé autour de son nez, ils participent à sa toilette [illegible] et portent leur enfant en peau à peau le plus souvent possible, sur de longues périodes (plus d'une heure).

Quel que soit le débat concernant l'impact de ces soins sur le développement neurologique, nous ne revien[illegible] une chose est sûre : cette stratégie diminue considérablement le stress tant des enfants que des parents.

Mathilde Baud
Pédiatre néonatologue du Service de néonatologie du CHU de Montpellier



LES ENFANTS PRÉMATURÉS sont maintenus dans la pénombre grâce à une couverture posée sur la couveuse.

Ann-Sofi Ingman



ON ADAPTE la posture de l'enfant en fonction de ses réactions, par exemple en lui permettant de porter sa main à sa bouche.

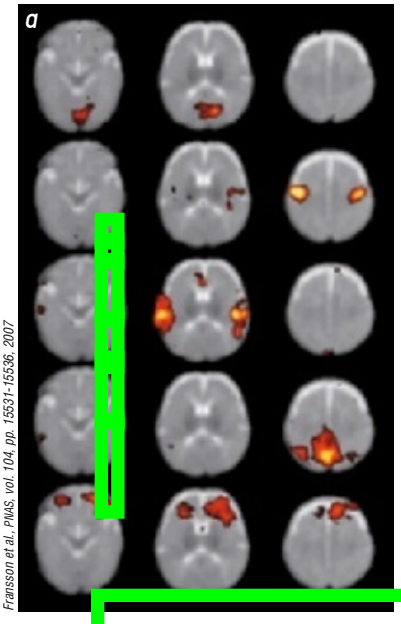
Ann-Sofi Ingman

LA CONSCIENCE DES GRANDS PRÉMATURÉS

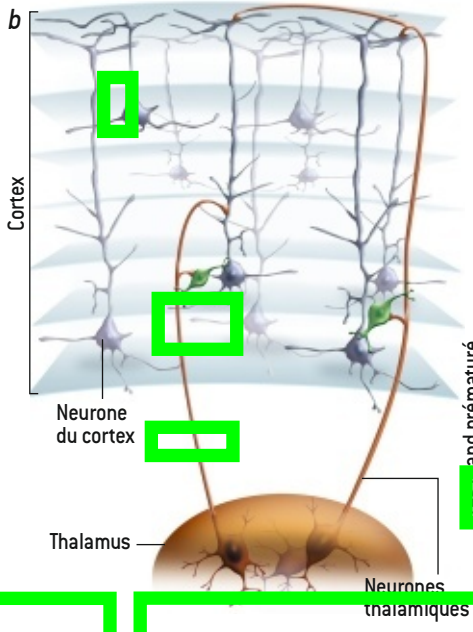
À partir de quand un enfant prématuré est-il conscient ? Des médecins te[illegible] cérébrale d[illegible] enfants prématurés, d'une part, à l'aide de l'imagerie par résonance magnétique *(a)*, d'autre part, en mesurant par électroencéphalographie les potentiels électriques émis par le cortex.

À l'Inst[illegible] équipe ont aussi observé en 2007, en scannant le cerveau de 12 enfants très grands prématurés endormis, cinq réseaux d'activité cérébrale spontanée dans diverses régions du cortex cérébral (en *a*, l'activité des cinq réseaux, un par ligne). Les enfants ont été observés à un âge équivalant à celui de la naissance à terme.

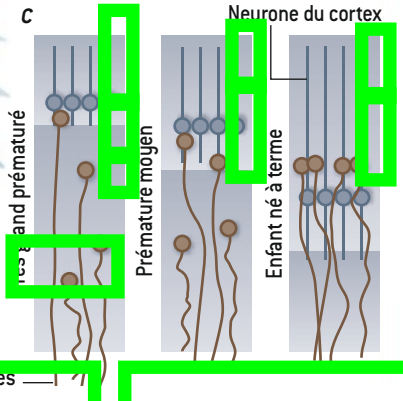
À Helsinki en Finlande, des neuroscientifiques ont montré en 2005, en comparant les électroencéphalogrammes d'enfants très grands prématurés, prématurés moyens et nés à terme, que les proportions d'activité [illegible] Cela refléterait le fait que plus l'enfant est [illegible] entre le thalamus et le cortex *(b)* sont nombreuses *(c)*. L'activité spontanée apparaîtrait quant à elle vers la 24e semaine de gestation.



Fransson et al., PNAS, vol. 104, pp. 15531-15536, 2007



CHEZ L'ADULTE, le cortex est relié au thalamus. Des neurones thalamiques se projettent vers le cortex, où ils établissent des contacts synaptiques avec des neurones corticaux *(b)*. Plus un enfant est prématuré, moins ces connexions sont nombreuses *(c)*.



Raphaël Queruel (b) ; d'après Vanhatalo et Kaila, Sem. in Fetal & Neonat. Med., vol. 11, p. 171-178, 2006 (C)

conscient qu'un fœtus d'âge gestationnel correspondant. Le cortex cérébral d'enfants nés dès la 25e semaine de gestation réagit à des stimulations sensorielles ou douloureuses. Le cortex cingulaire antérieur, impliqué dans le ressenti de la douleur, et d'autres aires de l'espace de travail neuronal global sont aussi activés – un autre indice suggérant que les enfants prématurés sont sensibles à la douleur. De plus, éveillés dès la 26e semaine, ils semblent fixer le regard plus longtemps sur les visages humains que d'ailleurs. Enfin, ils manifestent un comportement d'évitement, par exemple en réaction à un bruit, ce qui suggère qu'ils sont conscients d'eux-mêmes.

L'étude du comportement de très grands prématurés pris en charge dans le cadre des soins de développement a fini de convaincre les médecins : ces enfants sont des personnes conscientes qui requièrent le même respect que les patients adultes. Néanmoins, d'un point de vue neuroanatomique, il est difficile de savoir si un enfant est conscient avant 24 semaines de gestation, c'est-à-dire avant que les connexions entre le thalamus et le cortex soient établies. Autour de la 23e semaine, les neurones projetés par le thalamus vers le cortex immature semblent « attendre » avant de croître jusqu'à la plaque corticale. Puis, peu à peu, les connexions se font et des potentiels électriques apparaissent sur les électroencéphalogrammes. Il n'est pas certain que ces connexions s'établissent aussi bien hors de l'utérus : les rares enfants nés avant 23 semaines de gestation et ayant survécu présentent des troubles neuropsychiatriques et un retard mental.

La conscience comme critère ?

Comme on l'a vu, l'émergence de la conscience pourrait déterminer une limite de viabilité. Dans nombre de pays, l'interruption de grossesse est légale jusqu'à 22 à 24 semaines de gestation, avant que le fœtus puisse être conscient. Partout, il devrait être autorisé de refuser ou d'interrompre les soins intensifs aux enfants qui n'ont jamais été conscients et dont le cortex cérébral est si endommagé (cela peut se voir par imagerie par résonance magnétique) que l'on ne peut espérer mieux que l'apparition d'une conscience rudimentaire.

La survie et la qualité de vie des enfants prématurés sont les premiers objectifs des recherches sur leur prise en charge. La meilleure connaissance du développement cérébral, en particulier grâce à l'amélioration des techniques de neuro-imagerie, notamment l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle et la magnétoencéphalographie, devrait aider à ajuster les traitements. Les programmes de soin de développement devraient aussi favoriser les connexions neuronales et l'organisation des circuits neuronaux de l'enfant, en particulier lors des périodes critiques de son développement. On connaît déjà des médicaments qui allongent ces fenêtres temporelles et, par là-même, les phases durant lesquelles ces soins sont les plus bénéfiques.

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012

L'Institut Langevin « Ondes et Images »

Unité mixte de recherche ESPCI ParisTech – CNRS

L'excellence d'aujourd'hui

Double lauréat du Grand Emprunt – Investissements d'avenir :

- Equipex « UltraBrain »
- Labex « Wifi »

5 entreprises et plusieurs centaines d'emplois créés en 10 ans

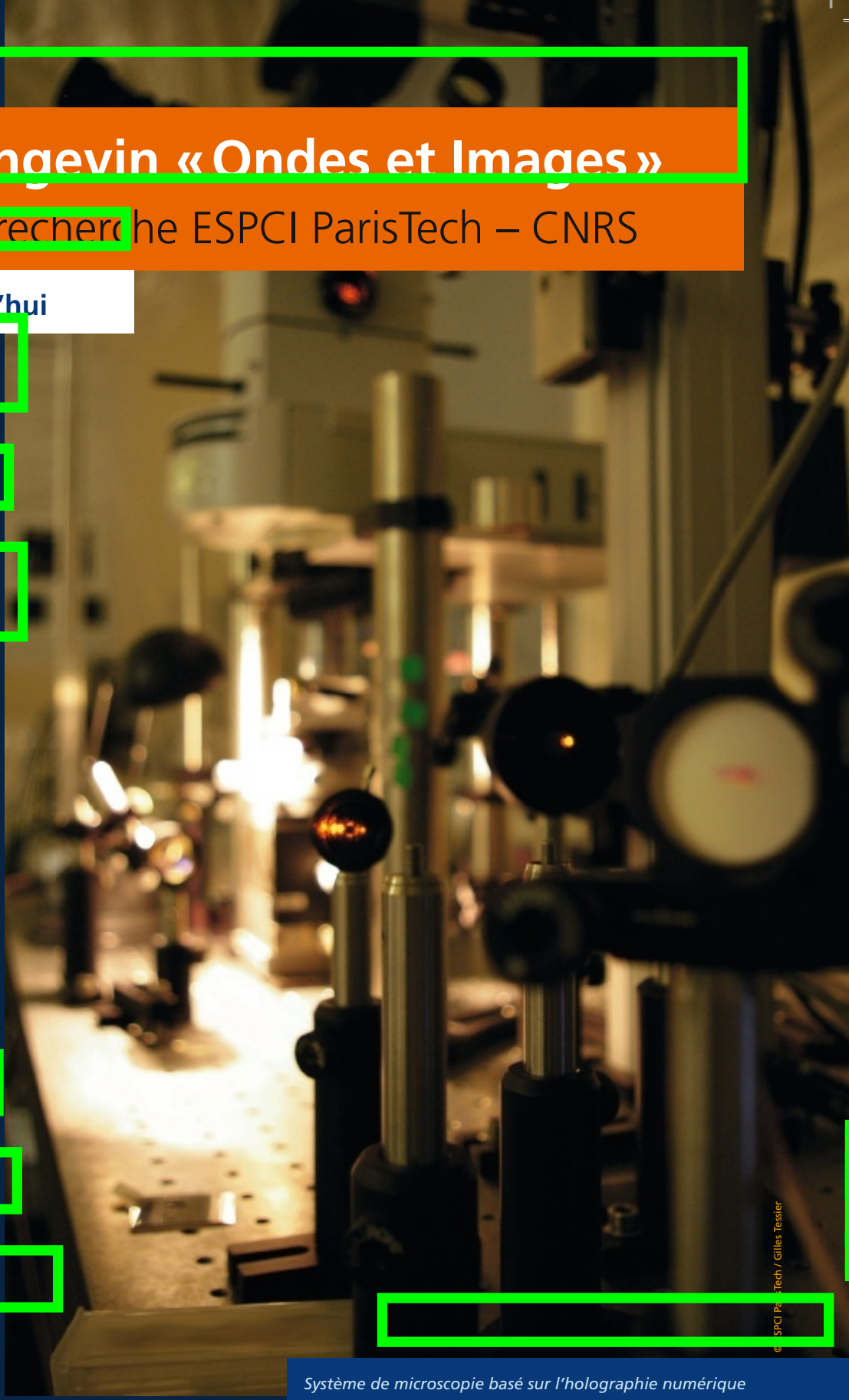


© Didier Goupy

Mathias Fink, directeur
Professeur ESPCI

Médaille de l'Innovation 2011 du CNRS

Prix Yves Rocard 2011 de la Société française de physique



© ESPCI ParisTech / Gilles Tessier

Système de microscopie basé sur l'holographie numérique mis au point par Gilles Tessier, enseignant-chercheur

ESPCI ParisTech

ÉCOLE SUPÉRIEURE DE PHYSIQUE ET DE CHIMIE INDUSTRIELLES
DE LA VILLE DE PARIS
10, rue Vauquelin | 75005 Paris | www.espci-paristech.fr

ESPCI ParisTech – Codit

Des cellules souches pour réparer et régénérer les tissus ?

Laure Coulombel

Les cellules souches, qui ont la capacité de donner naissance à plusieurs types de cellules, portent de nombreux espoirs thérapeutiques. Certains semblent réalistes, d'autres hors de portée… du moins pour l'instant.

Quand on sectionne les tentacules de l'hydre, ils repoussent. Quand on coupe ce petit animal en deux, il se transforme en deux hydres. La queue du lézard ou les pinces des homards réapparaissent. On pourrait aussi citer la salamandre ou encore la plupart des végétaux capables de régénérer un organe, voire un individu entier, à partir de seulement quelques cellules différenciées. Malheureusement, l'homme adulte n'a pas ce talent, et se contente de réparer, souvent mal, ses tissus lésés ou vieillissants. Les « cellula madre » – les cellules mères ou souches – suscitent aujourd'hui beaucoup de fascination, mais aussi de confusion et de débats. C'est qu'on leur prête sinon ce pouvoir de régénération, du moins un potentiel de réparation (dont la réalité n'est pas toujours démontrée), mais aussi que sous ce terme unique de cellule souche, se cache une multitude de cellules distinctes et dont les capacités sont variées.

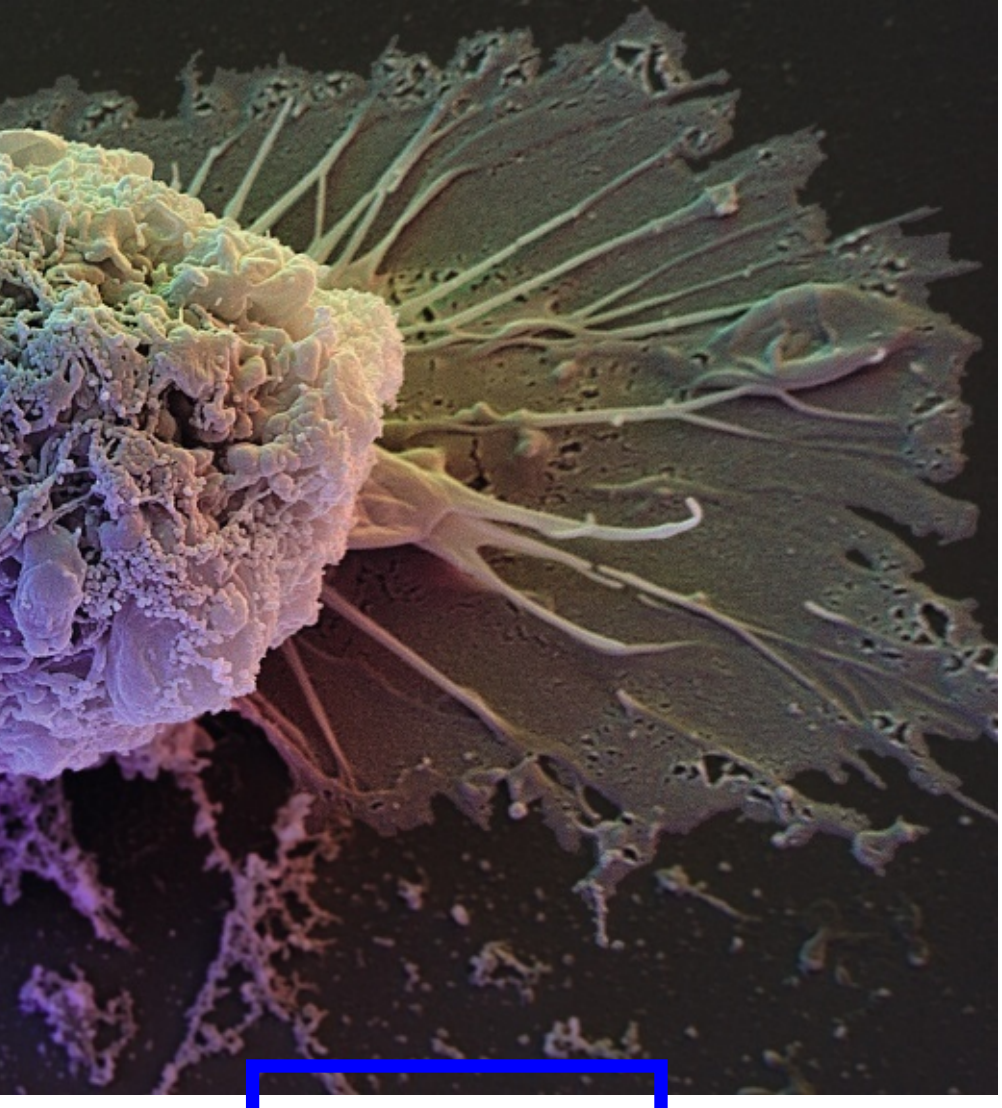
Pourquoi tant de cellules souches, comment aborder les problèmes éthiques liés à l'obtention de certaines d'entre elles, pourquoi cet objectif de médecine régénérative tarde-t-il à se concrétiser, sommes-nous prêts à assumer les risques – médicaux et économiques – de ces approches médicales inédites ? Avant d'aborder ces questions, nous allons rappeler ici les propriétés des différents types de cellules souches, leur potentiel thérapeutique, les difficultés éthiques que pose leur utilisation.

Qu'est-ce qu'une cellule souche ? C'est une cellule qui donne naissance, après de très nombreuses divisions, à un ou plusieurs types de cellules différenciées. Quand elles engendrent plusieurs types cellulaires, on les qualifie de multipotentes ou de pluripotentes, selon l'étendue de leur potentiel. Souvent, elles s'autorenouvellent, c'est-à-dire qu'elles donnent elles-mêmes naissance à de nouvelles cellules souches, constituant un réservoir cellulaire sans fin. Mais cette définition s'applique à des entités aussi différentes que des cellules souches embryonnaires, des cellules souches hématopoïétiques (qui donnent naissance aux cellules sanguines) adultes, des cellules souches mésenchymateuses (des cellules présentes dans tous les tissus) ou encore des cellules souches reprogrammées à partir de cellules différenciées.

Une cellule toute puissante

Soulignons que toutes ces cellules souches ont leurs caractéristiques propres, et que cette diversité est le meilleur garant des progrès des recherches fondamentales d'aujourd'hui, et du succès des approches de la médecine régénératrice de demain. Chez l'adulte, les cellules différenciées composent l'essentiel des tissus et en assurent le fonctionnement (globules rouges, cellules du foie ou du cœur, neurones, etc.). Mais elles sont généralement incapables de se diviser, de sorte qu'on constate une perte cellulaire soit physiologique – quand l'individu vieillit –, soit accidentelle – à la suite d'une lésion. La restauration du réservoir fonctionnel de chaque type cellulaire devrait être assurée par les cellules souches et leurs descendantes directes, les cellules progénitrices. C'est le cas des cellules souches hématopoïétiques, présentes dans la moelle osseuse, qui [illegible]

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012



tituent en permanence les cellules sanguines dont la durée de vie est brève ; c'est pourquoi elles sont utilisées depuis plus de 30 ans pour lutter contre certaines maladies du sang et du système immunitaire. Mais les cellules souches hématopoïétiques sont uniques : elles sont facilement accessibles chez le donneur, et après avoir été greffées (injectées par voie intraveineuse), elles se réimplantent spontanément dans la moelle osseuse du receveur. Ensuite, elles se différencient correctement, redonnant tous les types de cellules sanguines. Toutefois, si ce scénario est effectivement à l'œuvre avec les cellules souches hématopoïétiques et les cellules souches de certains tissus (peau, intestins), c'est loin d'être la règle.

Ce n'est malheureusement pas le cas dans le cerveau, le cœur, la rétine, tissus et organes vitaux dont on ne sait pas toujours compenser les dysfonctionnements par des médicaments. Pourquoi lors d'un accident vasculaire cérébral, d'un infarctus du myocarde ou d'une dégénérescence maculaire de la rétine, les neurones, les cellules musculaires cardiaques ou les photorécepteurs qui meurent ne sont-ils pas remplacés par de nouvelles cellules qui seraient produites *in situ* ? Avant tout parce que, chez l'homme adulte, ces organes ne contiennent plus de cellules souches fonctionnelles. Si les cellules souches de ces tissus sont actives chez le fœtus et le nouveau-né, périodes durant lesquelles la taille des organes s'accroît notablement, ce n'est plus le cas dans les tissus adultes : la capacité régénératrice des cellules souches décroît avec l'âge.

On pouvait donc penser que des cellules souches ou progénitrices fœtales auraient un pouvoir de réparation supérieur à celui des cellules souches adultes. Quelques équipes ont tenté de greffer des cellules issues de cerveau fœtal à des patients atteints de la maladie de Parkinson, dont les neurones ne produisent plus de dopamine, un neurotransmetteur essentiel, entre autres, à la coordination motrice, ou de la maladie de Huntington, une maladie héréditaire grave. Dans ces deux maladies, le déficit, localisé dans une région précise du cerveau, est bien défini, ce qui est un prérequis pour le succès d'une telle démarche.

Les cellules greffées étaient issues de fœtus provenant d'interruptions volontaires de grossesse, ce qui, d'une part, soulève des questions éthiques, et, d'autre part, ne représente qu'une source limitée de cellules. La seule source de cellules souches fœtales abondante, facilement accessible et qui pose peu de questions éthiques, est le sang de cordon ombilical. Toutefois, le sang de cordon contient avant tout des cellules souches hématopoïétiques, et n'est utilisé en transplantation de routine que dans des indications hématologiques ou immunologiques. En France, pour ces indications, le sang issu de ces cordons est conservé dans des établissements autorisés. Il contient également des cellules souches mésenchymateuses dont l'intérêt thérapeutique est en cours d'évaluation (nous y reviendrons).

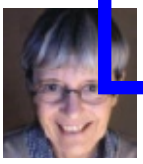
Les cellules souches fœtales sont, comme les cellules souches adultes, présentes dans les tissus et déjà engagées dans une voie de différenciation cellulaire : elles sont multipotentes, mais ont perdu la pluripotence. Seuls deux types de cellules sont pluripotentes : les cellules souches embryonnaires et les cellules reprogrammées. Les premières, CSEh (pour cellule souche embryonnaire humaine), sont issues de l'embryon ; les secondes, iPS pour *induced*

L'ESSENTIEL

- Il existe de nombreux types de cellules souches. Certaines sont capables de donner naissance à tous les types de cellules.
- Chez l'adulte, les cellules souches ne sont pas toujours disponibles pour réparer un tissu.
- Des méthodes de reprogrammation permettent de créer de nouvelles cellules souches qui pourraient améliorer les capacités de régénération ou de régénération des tissus endommagés.

Dave Scharf/Science Faction/Corbis

■ L'AUTEUR



Laure COULOMBEL, directrice de recherche INSERM, est rédactrice en chef adjointe de la revue *médecine/sciences*.

pluripotent stem cells (cellules souches pluripotentes induites), sont obtenues par reprogrammation de cellules différenciées adultes ou fœtales.

Examinons d'abord les cellules souches embryonnaires humaines. L'embryogenèse façonne, à partir de l'œuf fécondé ou zygote, l'ensemble des tissus fonctionnels constituant un individu viable. L'œuf fécondé est une cellule souche totipotente : le terme de totipotence désignant la capacité de former un individu entier. Les cellules issues des toutes premières divisions du zygote n'ont pas encore acquis d'identité tissulaire, et sont encore capables de se différencier en presque tous les tissus de l'organisme : elles sont pluripotentes. Période fugace, car les cellules de cet embryon vont très rapidement (avant le 10e jour) perdre cette pluripotence. Sous l'influence de signaux inducteurs, leur potentiel va se restreindre progressivement à un « feuillet » à l'origine d'un groupe de tissus, puis ensuite, dans ce groupe, à un seul tissu (foie, cœur, pancréas, etc.). Rappelons qu'il existe trois feuillets, nommés ectoderme, endoderme et mésoderme.

Or on sait depuis les années 1980 chez la souris, et 1998 chez l'homme, dériver des lignées de cellules souches embryonnaires pluripotentes à partir des quelques cellules (20 à 50) qui composent le bouton embryonnaire (ou masse interne) d'un embryon au stade blastocyste avant son implantation dans la paroi utérine au 5e jour de développement chez l'homme. Lorsqu'elles sont prélevées et placées dans des conditions de culture aujourd'hui bien définies, ces cellules acquièrent la capacité de se diviser indéfiniment (ce qui assure une production illimitée de cellules) tout en gardant leur potentiel pluripotent.

Mais l'expérimentateur peut aussi exploiter cette pluripotence et déclencher dans ces cellules un processus de différenciation en l'un des multiples tissus. On y parvient en modifiant les ingrédients du milieu de culture. Comme nous l'avons évoqué chez le fœtus et *a fortiori* chez l'enfant et l'adulte, il n'y a plus de cellules souches pluripotentes, mais il reste dans chaque tissu un petit contingent de cellules souches spécialisées multipotentes. Chez l'homme, l'obtention de lignées de cellules souches embryonnaires n'a pu se faire qu'après le développement des procédures de fécondation *in vitro*, FIV, puis-

Une multitude de cellules souches

Les cellules souches ont de nombreuses origines. Pour cette raison, elles ont des propriétés biologiques différentes et, par conséquent, des potentiels thérapeutiques divers. Elles sont plus ou moins faciles à obtenir et certaines soulèvent des difficultés éthiques.

Type de cellules	Source	Propriétés	Potentiel thérapeutique
• Cellules souches embryonnaires	• Embryons surnuméraires issus d'une fécondation *in vitro*	• Capables de donner naissance à tous les types de cellules • Capables de proliférer de façon illimitée	• Essais cliniques en cours : traumatisme de la moelle épinière, maladies dégénératives
• Cellules souches fœtales	• Fœtus issus d'une interruption volontaire de grossesse	• Cellules multipotentes déjà en partie différenciées • Ne donnent que certains types de cellules	• Cellules souches neurales : essais cliniques en cours dans certaines maladies neurologiques
• Cellules de sang de cordon	• Sang de cordons ombilicaux prélevés à la naissance	• Les cellules de cordon sont surtout des cellules souches hématopoïétiques et des cellules souches mésenchymateuses	• Utilisées pour traiter des maladies du sang • Essais cliniques avec les cellules souches mésenchymateuses
• Cellules souches adultes	• Cellules extraites des tissus adultes, par exemple la moelle osseuse, la peau, le tissu adipeux, les intestins	• Cellules multipotentes déjà en partie différenciées	• Cellules souches mésenchymateuses : essais cliniques en cours pour tester l'effet immunomodulateur • Cellules souches hématopoïétiques : indications hématologiques, immunologiques • Cellules souches épidermiques : brûlures graves
• Cellules souches pluripotentes induites	• Cellules issues de la reprogrammation de cellules adultes différenciées	• Cellules souches pluripotentes • Capables de proliférer de façon illimitée	• Pas d'utilisations thérapeutiques aujourd'hui

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012

que les cellules souches embryonnaires humaines ne peuvent être prélevées que sur des embryons à un stade très précoce, pendant une fenêtre de temps très étroite.

Les embryons utilisés pour ces recherches sont des embryons surnuméraires congelés après une procédure de fécondation *in vitro* réalisée dans le cadre d'un projet parental. Ceux qui ne font plus l'objet d'un tel projet peuvent être donnés à la recherche après consentement du couple dans les termes définis par les lois de bioéthique. La dissection et la culture des cellules du bouton embryonnaire entraînent la destruction de cet embryon, destruction qui est la source du débat éthique suscité par les recherches sur les cellules souches embryonnaires humaines. Rappelons qu'en France, la recherche sur l'embryon et les cellules souches embryonnaires est régie par les lois de bioéthique de 2004, qui ont été révisées en 2011. La recherche sur l'embryon et les cellules souches embryonnaires humaines est interdite, mais des dérogations peuvent être accordées par l'Agence de la biomédecine, si le dossier qui lui est soumis est conforme aux exigences scientifiques et réglementaires prévues par la loi.

Les cellules souches embryonnaires offrent donc deux avantages considérables par rapport aux cellules souches adultes ou fœtales : une prolifération illimitée et la pluripotence. Or une difficulté importante rencontrée avec les cellules souches adultes est qu'elles ont un pouvoir de prolifération limité *in vitro*. Et, précisément parce qu'elles sont peu nombreuses, il serait nécessaire de pouvoir les faire se multiplier en dehors de leur environnement naturel (le tissu) avant de les réintroduire dans l'organisme, ce qui est très difficile.

Le rôle essentiel de l'environnement

Or nous sommes incapables de reproduire en culture l'environnement tissulaire complexe qui, *in vivo*, est indispensable à la pérennisation des propriétés des cellules souches du tissu, ce qui explique que beaucoup de cellules souches adultes ou fœtales ne survivent pas ou se comportent de façon aberrante dans les conditions artificielles du laboratoire. Par exemple, les cellules « satellites » responsables de la production *in vivo* de nouvelles fibres musculaires [illegible]

Les cellules souches attirent les prix Nobel

2012

John Gurdon et Shinya Yamanaka, pour avoir découvert que des cellules matures peuvent être reprogrammées pour devenir pluripotentes.

2007

Mario Capecchi, Martin Evans et Oliver Smithies, pour avoir découvert comment modifier spécifiquement certains gènes de souris en utilisant des cellules souches embryonnaires.

1990

E. Donnall Thomas, pour ses travaux sur les greffes de cellules souches hématopoïétiques de moelle osseuse.

in vitro, à un grand nombre de myoblastes (précurseurs des cellules musculaires). Mais quand ces myoblastes sont transplantés dans des modèles animaux de maladies musculaires généralisées, ils survivent mal ou sont incapables de migrer efficacement dans le muscle pour le coloniser et le réparer.

La découverte du rôle capital du microenvironnement local – la « niche » – dans le comportement des cellules souches a été un progrès notable. Toute approche thérapeutique utilisant des cellules souches devra prendre en compte non plus les cellules isolées, mais les interactions de la cellule et de son milieu, c'est-à-dire du couple cellule souche-niche. Il ne servira à rien de disposer de cellules souches performantes si la niche tissulaire qui les accueille est défaillante. Or le vieillissement de cet environnement contribue probablement au dysfonctionnement des cellules souches âgées, paramètre que la médecine régénératrice devra intégrer.

C'est pour préserver ces interactions que certains ont testé la possibilité de stimuler les cellules souches ou les cellules progénitrices *in situ*, du moins dans les tissus dont on sait qu'ils sont capables d'un certain degré de réparation et dont les cellules souches ne peuvent pas facilement être isolées et cultivées. On cherche à les stimuler dans leur niche par des facteurs de croissance délivrés par voie générale ou par des cellules migrant jusqu'au tissu pour y délivrer les molécules stimulatrices. Ces approches pourraient être intéressantes dans certaines pathologies touchant des organes complexes, tel le cerveau.

Par exemple, les cellules souches mésenchymateuses pourraient jouer ce rôle de vecteur de molécules trophiques et de facteurs de croissance favorisant la réparation par des cellules souches. Ces cellules sont essentiellement isolées de la moelle osseuse et du tissu adipeux, deux tissus très faciles d'accès, et elles s'amplifient facilement *in vitro*, sans toutefois être immortelles. Le rôle physiologique de ces cellules souches reste mal connu. Certaines se différencient en cellules osseuses ou vasculaires. Mais leur intérêt principal en thérapie cellulaire est de minimiser les réactions inflammatoires et immunologiques, préserver la survie des cellules souches fonctionnelles, stimuler la construction de nouveaux [illegible] paramètres contribuant à la réparation des

tissus lésés. Beaucoup d'essais cliniques sont en cours qui détermineront de façon rigoureuse dans quelles maladies les cellules mésenchymateuses favorisent la réparation tissulaire.

Comment créer des cellules souches

Si Shinya Yamanaka et ses collègues de l'Université de Kyoto ont provoqué un « séisme scientifique » en 2006, qui leur a valu le prix Nobel six ans seulement après leur découverte, c'est parce qu'ils ont réussi à « créer » des cellules souches pluripotentes à partir de n'importe quelle cellule différenciée de l'organisme. Chez certains animaux, la reprogrammation se produit spontanément, et chez d'autres, on savait déjà reprogrammer des cellules différenciées, notamment par transfert de noyau dans l'ovocyte. Mais ces stratégies sont difficilement applicables chez l'homme, de sorte que les travaux de l'équipe japonaise ouvrent une ère tout à fait nouvelle, essentiellement parce qu'ils offrent une technique simple et qui ne pose pas de problèmes éthiques majeurs, de reprogrammation de cellules adultes humaines en cellules souches pluripotentes au moyen de facteurs de transcription.

Que signifie « reprogrammer » ? Il s'agit de substituer au programme d'une cellule donnée le programme d'une autre cellule ; dans le cas de la découverte de S. Yamanaka, cette autre cellule est une cellule souche pluripotente. Comme nous l'avons rapidement évoqué, un programme est l'ensemble des informations qui confèrent à une cellule son identité et donc sa fonction. Ces informations sont stockées dans le noyau, dans l'ADN des gènes. Pour que ces informations spécifiques soient décodées et que le programme soit réalisé, il faut que les gènes qui les portent soient activés (c'est-à-dire que l'ADN soit transcrit en ARN, eux-mêmes traduits en protéines), et seulement eux, alors que les autres sont réprimés et silencieux. L'ensemble des gènes activés et la combinaison de protéines qui en résulte sont spécifiques d'un type cellulaire donné.

On peut ainsi identifier la « signature » spécifique de n'importe quelle cellule, et on connaît notamment les gènes qui s'expriment spécifiquement dans une cellule souche pluripotente embryonnaire. Citons les plus emblématiques, *Oct4*, *Sox2*, *Nanog*, *Lin28*. Ils y sont fortement exprimés, alors qu'ils sont éteints dans une cellule souche hématopoïétique ou toute autre cellule souche adulte ou cellule différenciée.

Comment peut-on changer ce programme ? Cela revient à modifier l'organisation du noyau, de façon à rendre accessible à la machinerie transcriptionnelle (qui transcrit l'ADN en ARN) des gènes jusqu'alors silencieux, et, au contraire, d'« éteindre » d'autres régions géniques en en empêchant l'accès. Cette modification du noyau se fait notamment (mais pas seulement) par modification des groupes chimiques portés par des protéines particulières du noyau, les histones, autour desquelles s'enroule l'ADN ; ces modifications qui ne touchent pas la séquence de l'ADN sont nommées modifications « épigénétiques ».

Comment peut-on éteindre, par exemple dans un lymphocyte ou une cellule de peau, les gènes actifs qui imposent l'identité lymphocytaire ou épidermique, et y activer *Oct4*, *Sox2*, *Nanog* ? Cette question de la réversibilité de l'état différencié intrigue les chercheurs depuis des décennies. Or, chez l'animal, la reprogrammation est connue depuis 50 ans, et les recherches de S. Yamanaka sur la reprogrammation des cellules adultes humaines en cellules souches pluripotentes sont le prolongement des travaux de John Gurdon, notamment.

Dès les années 1960 (S. Yamanaka n'était pas encore né !), J. Gordon avait montré que le noyau d'une cellule épithéliale intestinale de grenouille, injecté dans un ovocyte d'une autre grenouille dont on avait retiré le noyau, est « reprogrammé » et peut diriger un programme aboutissant à la naissance de grenouilles vivantes. Confirmation éclatante que le génome (la séquence d'ADN) d'une cellule différenciée est équivalent à celui du zygote et que le cytoplasme de l'ovocyte présente ce pouvoir de reprogrammation.

Il faudra 40 ans pour montrer que ce type de reprogrammation par transfert de noyau est aussi possible chez les mammifères : la brebis Dolly, née en 1997, issue de la reprogrammation d'un noyau d'une cellule mammaire transféré dans l'ovocyte énucléé d'une autre brebis en fut la preuve, tout comme la vache Marguerite obtenue par transfert nucléaire dans l'équipe de Jean-Paul Renard, à l'INRA, en 1998. Ainsi, la découverte de S. Yamanaka ne tient pas tant au concept de reprogrammation qu'à la mise au point d'une technique beaucoup plus simple que le transfert d'un noyau entier dans un ovocyte. En effet, il suffit, pour reprogrammer une cellule aussi banale qu'un fibroblaste de peau en une cellule souche pluripotente, d'y éteindre le programme qui lui confère son identité de fibroblaste, et de la forcer à exprimer quatre ou cinq gènes qui composent la « signature » des cellules souches embryonnaires pluripotentes.

Les cellules souches pluripotentes induites

Ces cellules souches dites pluripotentes induites présentent les deux caractéristiques des cellules souches embryonnaires humaines : elles prolifèrent à l'infini (on parle de lignées immortelles) et peuvent théoriquement se différencier en tous les tissus de l'organisme. Toutefois, une question reste ouverte : une cellule souche embryonnaire humaine et une cellule souche pluripotente induite sont-elles strictement identiques ? Les opposants à la recherche sur l'embryon le prétendent,

Pour reprogrammer une cellule, on peut introduire le noyau d'une cellule adulte dans un ovocyte dont on a retiré le noyau. Deux autres méthodes sont évoquées ici : la reprogrammation en cellules souches pluripotentes décrite par Shinya Yamanaka et la reprogrammation par transdifférenciation.

La première « réinitialise » une cellule adulte en lui conférant par le biais de quelques facteurs de transcription le potentiel d'une cellule souche pluripotente. Pour ce faire, on introduit dans des cellules différenciées prélevées sur un adulte et mises en culture les facteurs de transcription caractéristiques des cellules souches pluripotentes. Ils éteignent le programme associé à l'identité de la cellule différenciée et remodèlent la chromatine de sorte que les gènes imposant l'état pluripotent peuvent s'exprimer *(a)*.

Dans le cas de la transdifférenciation, on force une cellule différenciée à adopter directement l'identité d'une autre cellule différenciée, sans passer par un stade de cellule souche. Par exemple, on peut ajouter à une culture de cellules du pancréas des facteurs de transcription qui vont faire en sorte que les cellules [illegible] de Langerhans. Après transdifférenciation, on constate que de l'insuline est produite par les cellules qui ont adopté l'identité bêta *(b)*.

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012

mais en l'état actuel des connaissances, c'est inexact car certains aspects de leurs « signatures » moléculaires les distinguent, même si, fonctionnellement, elles sont proches. Rappelons d'abord que les cellules souches embryonnaires humaines et les cellules souches pluripotentes induites sont deux types distincts de cellules souches : l'une est embryonnaire, l'autre issue de cellules adultes ou fœtales ; l'une est une cellule « normale », l'autre est « artificielle » et n'existe pas « naturellement » ; ces cellules se distinguent également par leur statut épigénétique et d'autres caractéristiques moléculaires, qui permettent de les distinguer facilement, sans que l'on sache encore si ces différences traduisent certaines limitations des cellules souches pluripotentes induites par rapport aux cellules souches embryonnaires humaines.

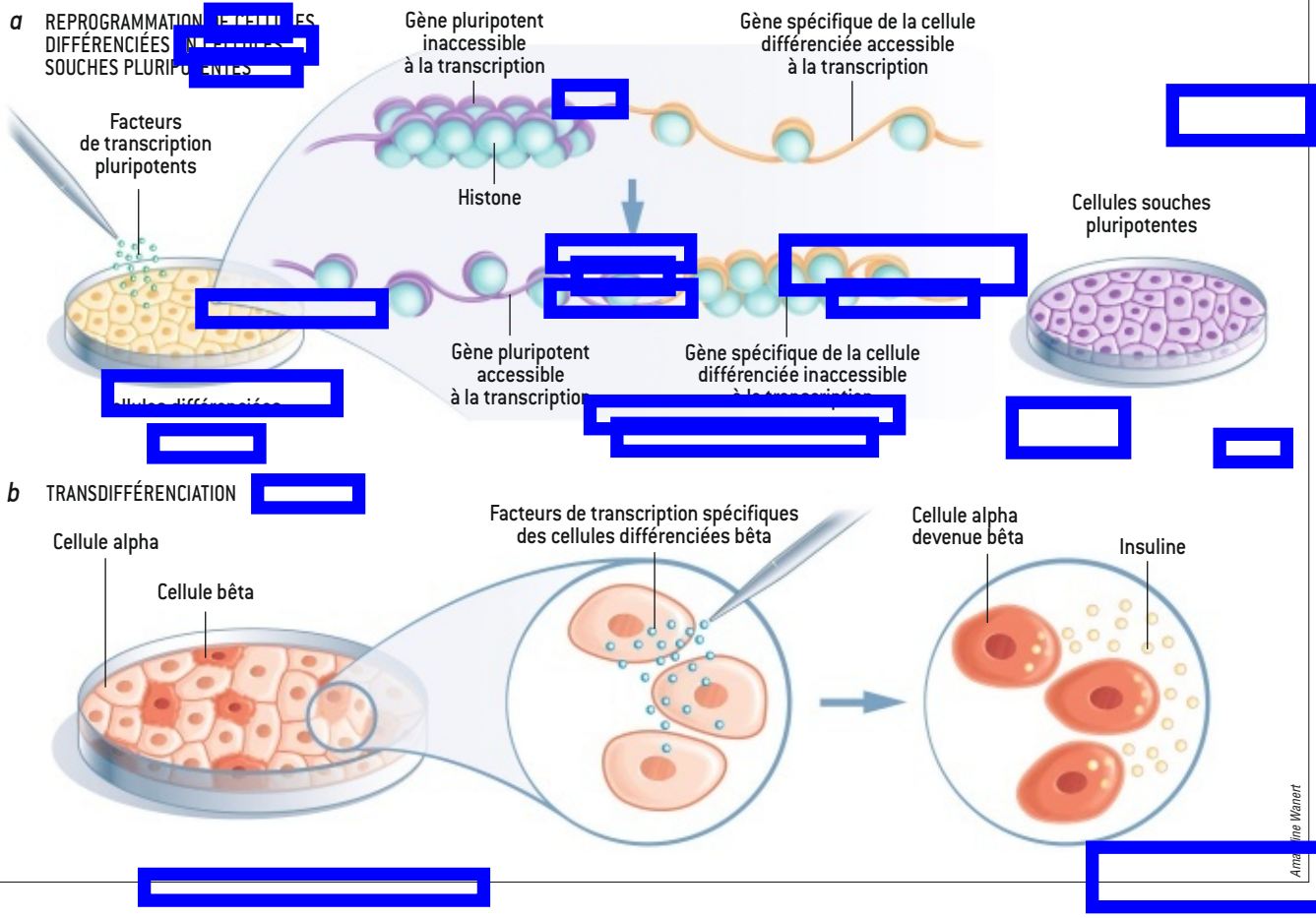
On dispose donc d'une stratégie simple de production de lignées de cellules souches pluripotentes humaines, applicable à grande échelle et, depuis 2007, des centaines de cellules souches pluripotentes induites ont été obtenues, à partir de presque toutes les cellules de l'organisme, à tout âge – même si la méthode est d'autant moins efficace que le sujet chez qui l'on prélève les cellules à reprogrammer est âgé –, chez des individus normaux ou atteints de divers types de maladies (plus d'une centaine) avec l'espoir de mieux en comprendre les mécanismes physiopathologiques. Ce sera sans doute l'un des principaux apports de ces cellules.

Les premiers essais cliniques

Quelles que soient leurs différences, les cellules souches embryonnaires humaines et les cellules souches pluripotentes induites partagent deux avantages décisifs par rapport aux autres cellules souches adultes ou fœtales : elles prolifèrent à l'infini et sont donc disponibles en nombre illimité et on peut – en théorie – déclencher leur différenciation à la demande dans n'importe quel tissu. On doit cependant nuancer ce dernier point : il aura fallu plus de dix ans pour définir les protocoles guidant la différenciation de cellules souches embryonnaires humaines en cardiomyocytes, en différents types de neurones, en hépatocytes (cellules du foie), ou encore en cellules rétiniennes, et, aujourd'hui encore, les cellules différenciées obtenues fonctionnent souvent moins bien que leurs contreparties dans les tissus adultes : par exemple, les cellules bêta du pancréas, issues de cellules souches pluripotentes, ne synthétisent pas suffisamment d'insuline et ne sont pas assez sensibles au glucose dont elles doivent pourtant réguler la concentration sanguine ; les hépatocytes n'expriment pas toute la panoplie des enzymes que le foie sécrète normalement.

Néanmoins, trois essais cliniques viennent de commencer aux États-Unis et au Royaume-Uni avec des cellules dérivées de cellules souches embryonnaires humaines dans deux pathologies de la rétine (la dégénérescence maculaire liée à l'âge et la dystrophie maculaire de Stagardt) et dans les lésions traumatiques de la moelle épinière. D'autres essais pourraient

LA REPROGRAMMATION



■ BIBLIOGRAPHIE

D. Robinton et G. Daley, **The promise of induced pluripotent stem cells in research and therapy**, *Nature*, vol. 481, pp. 295-305, 2012.

A. Wagers, **The stem cell niche in regenerative medicine**, *Cell Stem Cell*, vol.10(4), pp. 362-369, 2012.

G. Daley, **The promise and perils of stem cell therapeutics**, *Cell Stem Cell*, vol.10(6), pp. 740-749, 2012.

P. Charbord et L. Casteilla, **La biologie des cellules souches mésenchymateuses d'origine humaine**, *Med. Sci.*, vol. 27(3), pp. 261-267, 2011.

S. Yamanaka et H. Blau, **Nuclear reprogramming to a pluripotent state by three approaches**, *Nature*, vol. 465, pp. 704-712, 2010.

L. Coulombel, **Pluripotence : une définition à géométrie variable**, *Med. Sci.*, vol. 25(10), pp. 798-801, 2009.

commencer bientôt en France. Même si ces essais évaluent avant tout la faisabilité de la technique et l'innocuité des cellules, on pourrait avoir quelques indications sur leur efficacité, en particulier sur la vision, dans les deux essais s'adressant aux pathologies rétiniennes.

Nous sommes très loin d'essais thérapeutiques avec les cellules souches pluripotentes induites – même si l'équipe de S. Yamanaka envisage un essai en 2013 dans une maladie rétinienne –, mais les « recettes » de différenciation étant probablement transposables entre cellules souches embryonnaires et cellules souches pluripotentes induites, on devrait savoir assez rapidement si ces cellules représentent une source possible de cellules progénitrices tissulaires. Plusieurs années de travail et d'essais chez l'animal seront nécessaires pour évaluer l'efficacité réparatrice de cellules dérivées des cellules souches embryonnaires humaines et, éventuellement, des cellules souches pluripotentes induites.

Parmi toutes les questions qui se posent, évoquons celle du type de cellule à choisir dans le cadre d'une application de thérapie cellulaire. Il n'est pas envisageable d'utiliser les cellules souches pluripotentes elles-mêmes, car, en raison de leur pouvoir de multiplication, elles forment des tumeurs : probablement pas non plus des cellules complètement différenciées, car la réparation ne durerait pas longtemps en raison de la courte durée de vie de ces cellules et de leur fragilité. En revanche, on peut supposer que des précurseurs déjà engagés dans un processus de différenciation, correspondant approximativement aux cellules souches adultes, seraient préférables : non seulement ces cellules seraient susceptibles de fonctionner pendant un certain temps chez le receveur, mais elles pourraient aussi s'y différencier plus efficacement qu'en culture.

LES CELLULES THÉRAPEUTIQUES devront être introduites au bon endroit, s'intégrer dans le tissu à réparer et établir d'étroites connexions avec les cellules de l'hôte.

De surcroît, on oublie trop souvent qu'il ne servira à rien de savoir produire des millions de précurseurs de cellules thérapeutiques si l'on ignore où et comment les injecter : s'ils ne sont pas introduits au bon endroit, ils ne survivront que quelques heures, ne s'intégreront pas dans le tissu et n'établiront pas les indispensables connexions avec les cellules de l'hôte.

Les bonnes cellules au bon endroit

Cette étape clé fait l'objet de nombreuses recherches. Une des approches consiste à insérer les cellules du greffon dans une petite niche reconstituée, faite de cellules nourricières et protectrices (par exemple des cellules souches mésenchymateuses), intégrées dans des supports résorbables imprégnés de facteurs de croissance.

Ce montage protège les progéniteurs greffés dans le milieu hostile que représente un tissu malade : mal vascularisé, donc mal « nourri », siège d'une inflammation ou d'une cicatrice fibreuse, toutes conditions défavorables à la survie et à l'installation de cellules réparatrices. On pourra peut-être un jour fabriquer de vrais organes ou fragments d'organes *ex vivo* qui seraient ensuite greffés : ainsi, on a récemment reconstruit, à partir de cellules souches embryonnaires murines, l'organisation tridimensionnelle de cupules rétiniennes, et de glandes hypophysaires ou thyroïdes.

Les cellules souches embryonnaires, parce qu'elles ont la capacité de se multiplier sans fin, présentent, nous l'avons évoqué, le risque de provoquer une tumeur. Ce serait le cas si le greffon était contaminé par quelques cellules souches immortelles et pluripotentes résiduelles ayant échappé à la différenciation. Pour cette raison, on exige une purification draconienne des précurseurs déjà engagés dans la voie de la différenciation et qui constituent le greffon. Il est difficile aujourd'hui d'évaluer si ce risque serait plus important si les précurseurs étaient issus de la différenciation de cellules souches pluripotentes induites. Le caractère « brutal » de la reprogrammation peut entraîner une instabilité génétique et, peut-être, des modifications épigénétiques ou une expression anormale de certains gènes dont on mesure encore mal l'impact à long terme. Ainsi, on sait d'ores et déjà que la stratégie de reprogrammation utilisant des rétrovirus comme vecteurs des facteurs de transcription ne serait pas utilisable en pratique.

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012

Le risque de rejet immunologique, si les cellules greffées sont génétiquement différentes de celles du receveur, peut être maîtrisé par des immunosuppresseurs, mais ceux-ci présentent des inconvénients. Les cellules issues de cellules souches pluripotentes induites présentent un avantage important par rapport à celles qui dérivent de cellules souches embryonnaires humaines, puisqu'on peut les obtenir à partir des propres cellules de chaque patient, ce qui, en théorie, élimine tout risque de rejet immunologique, le donneur et le receveur étant une seule et même personne.

Toutefois, d'une part, la reprogrammation pourrait déclencher l'expression de nouveaux antigènes, susceptibles de provoquer une réaction immunologique, et, d'autre part, le coût de cette dérivation « personnalisée et individuelle » soulève des difficultés logistiques et économiques qui seront difficiles à surmonter. Et il est probable que si les cellules issues de la différenciation des cellules souches pluripotentes(embryonnaires ou reprogrammées) constituent un jour des produits thérapeutiques largement diffusés, elles seront préparées et validées par le biais de biobanques nationales ou internationales. Ces structures semblent seules capables de produire et de stocker des cellules thérapeutiques représentatives de la diversité des différents groupes immunologiques de tissus selon des protocoles standardisés et sécurisés. Cela nécessitera l'élaboration de nouveaux modèles médico-économiques, et soulèvera la question de l'accès pour tous à ces thérapies.

Quel avenir pour les cellules souches ?

D'importants progrès ont été accomplis en un demi-siècle dans nos connaissances en matière de cellules souches. Quelles sont les limites des reprogrammations cellulaires ? La reprogrammation peut conférer l'immortalité à une cellule, mais pas à un individu. Est-il même nécessaire de reprogrammer une cellule différenciée en une cellule souche pluripotente, qui devra ensuite se différencier à nouveau, de façon parfois périlleuse ? Le chemin pourrait-il être raccourci et simplifié ? C'est ce que montrent des travaux récents, qui reprogramment « directement » un fibroblaste en un cardiomyocyte, ou en un hépatocyte, voire un neurone… sans passer par la case « cellule souche ». Peut-être pourra-t-on un jour appliquer cette « transdifférenciation » *in situ*, comme vient de le faire une équipe américaine en reprogrammant des cellules du pancréas de rat en cellules bêta qui sécrètent l'insuline, et ce directement dans le tissu *in vivo (voir l'encadré pages 86-87)*.

Dans 10 ans, nous ne serons toujours pas immortels, mais quoi qu'il arrive les recherches actuelles sur les cellules souches seront source de progrès décisifs pour la médecine, tant pour « réparer » des tissus, que pour concevoir des modèles de maladies humaines ou cribler de nouveaux médicaments, ce que permettent déjà les cellules souches pluripotentes. Dans ce cadre, la diversité des cellules souches dont nous disposons, et la complémentarité des talents travaillant dans ce domaine seront des atouts déterminants pour le succès de ces approches qui ne semblent plus aujourd'hui hors de portée. ■



Des prothèses pilotées par la pensée

Miguel Nicolelis

Le premier exosquelette commandé par la pensée et permettant à une personne paralysée de se déplacer pourrait bientôt être opérationnel...

En 2014, lors de la coupe du monde de football, des milliards de téléspectateurs assisteront peut-être à un événement inédit : le coup d'envoi du match d'ouverture donné par un adolescent paralysé, revêtu d'un « costume » robotique. Ce costume – ou exosquelette – enveloppera ses jambes et sera commandé par des signaux électriques provenant de son cerveau *(voir l'encadré page 93)*. Ils seront transmis sans fil à un petit ordinateur (placé dans un sac à dos), qui les traduira en commandes motrices.

À l'entrée sur le terrain, l'exosquelette stabilisera le corps du tireur, puis coordonnera les mouvements des jambes robotiques. Lorsqu'il sera correctement placé, le tireur devra penser à son pied tapant le ballon. Trois cents millisecondes plus tard, ces signaux cérébraux donneront au pied robotique de l'exosquelette l'ordre de frapper la sphère de cuir.

Les défis à surmonter sont encore considérables, mais nous y travaillons activement, avec mon équipe de l'Université Duke, aux États-Unis, ainsi qu'avec des partenaires européens et brésiliens. Un tel événement marquerait une étape importante dans la lutte contre la paralysie. Il montrerait à plusieurs milliards d'individus que la commande de machines par le cerveau a quitté le stade des démonstrations de laboratoire et de la science-fiction pour entrer dans une ère nouvelle, où elle rendra une certaine mobilité à des personnes handicapées. Celles-ci sont des victimes d'accident ou de guerre, et des patients souffrant de maladies qui perturbent les comportements moteurs. Ces maladies gênent la préhension, la locomotion et la parole. Il s'agit par exemple de la sclérose latérale amyotrophique, ou maladie de Charcot (aux États-Unis, elle est aussi nommée maladie de Lou Gehrig), ou encore de la maladie de Parkinson.

Les dispositifs neuroprothétiques – ou interfaces cerveau-machine – ne se limiteront pas à l'aide aux personnes handicapées : ils permettront d'explorer le monde de façon nouvelle, en accroissant les capacités

L'ESSENTIEL

- On sait diriger divers dispositifs (curseurs d'ordinateurs, bras robotiques...) « par la pensée ». Pour ce faire, on enregistre au préalable des signaux cérébraux correspondant à des commandes motrices.
- On espère construire un exosquelette commandé par le cerveau, qui permettrait à un paraplégique de marcher.
- Cet exosquelette pourrait être présenté à la Coupe du monde de football de 2014, au Brésil.

Kemp Remillard

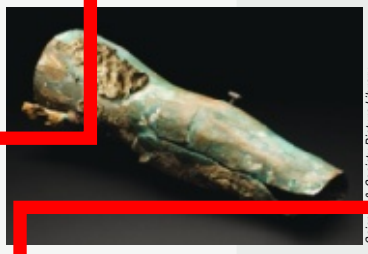
© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012



LA LONGUE HISTOIRE DES PROTHÈSES

1500-100 avant notre ère
Première référence à une prothèse
Un livre sacré hindou rédigé à cette période mentionne Vishpala, une femme amputée de la jambe après avoir été blessée lors d'une bataille. Elle est dotée d'une jambe de fer, qui lui permet de marcher.

IVe siècle avant notre ère
Les plus anciennes prothèses
L'un des plus anciens membres artificiels découverts *(voir une copie ci-contre)* a été mis au jour dans le Sud de l'Italie en 1858. Fabriqué en cuivre et en bois vers 300 avant notre ère, il semble avoir été destiné à un individu amputé sous le genou.


Science & Society Picture Library


Corbis

XIVe siècle
Armes à feu et amputations
L'apparition de la poudre à canon sur les champs de bataille européens accroît notablement le nombre de blessures. Au XVIe siècle, le chirurgien Ambroise Paré développe alors de nouvelles techniques pour attacher aux moignons des prothèses [illegible] supérieurs.

1861-186
La guerre de Sécession
Aux États-Unis, la guerre entre les États du Nord et les États confédérés du Sud entraîne de nombreuses amputations *(ci-contre, le général de brigade Stephen Joseph McGroarty)*. À cette époque, les techniques prothétiques s'améliorent, notamment grâce à un apport de fonds du gouvernement et à la découverte de l'anesthésie, autorisant des opérations plus longues.


Corbis

1963
Une interface cérébrale rudimentaire
Le neurophysiologiste José Manuel Rodriguez Delgado implante une électrode télécommandée dans le noyau caudé (une aire cérébrale profonde) d'un taureau. Il parvient à stopper net, à distance, la course de l'animal, quand il fait passer un courant dans cette électrode.

1969
Une expérience pionnière
Eberhard Fetz, de l'Université de Washington, entraîne des singes à activer un neurone particulier de leur cerveau, dont l'activité est enregistrée par une microélectrode métallique.

sensoriels et motrices. Dans ce scénario futuriste, les ondes électriques cérébrales qui sous-tendent la pensée manœuvreront des robots à distance, commanderont des avions, et permettront peut-être même le partage de pensées et de sensations dans un réseau où les cerveaux seraient directement connectés.

L'exosquelette prévu pour notre jeune footballeur, qui n'a pas encore été désigné, est en cours de développement. Un prototype est en construction au laboratoire de Gordon Cheng, de l'Université technique de Munich – l'un des membres fondateurs du projet *Walk Again* (littéralement « marcher à nouveau »), une collaboration internationale qui vise à rendre leur mobilité aux personnes handicapées grâce à des prothèses commandées par la pensée. Cette collaboration réunit le Centre de neuro-ingénierie de l'Université Duke, l'Université technique de Munich, l'École polytechnique fédérale de Lausanne, et l'Institut de neurosciences Edmond et Lily Safra à Natal, au Brésil. Quelques nouveaux membres la rejoindront dans les prochains mois.

Le projet *Walk Again* repose sur presque deux décennies de travaux novateurs sur les interfaces cerveau-machine à l'Université Duke. Ces travaux font suite à des études sur des animaux remontant aux années 1960. Depuis 1990, nous avons développé une méthode pour implanter des centaines de capteurs nommés microélectrodes, flexibles et fins comme des cheveux, dans des cerveaux de rats et de singes. Ces capteurs détectent les minuscules signaux électriques, ou potentiels d'action, circulant dans les neurones. Les capteurs sont répartis dans le cortex frontal et le cortex pariétal des animaux, qui appartiennent à un réseau d'aires cérébrales à l'origine des mouvements volontaires.

Une rétroaction tactile artificielle

Grâce à cette interface, nous avons utilisé des signaux provenant du cerveau pour commander des membres robotiques. En 2011, nous avons mis au point un dispositif où un bras virtuel touchait des objets, eux aussi virtuels, sur un écran d'ordinateur : la nouveauté était que le dispositif fournissait également un signal artificiel de rétroaction tactile, transmis directement au cerveau. Le signal était envoyé au cortex

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012

somatosensoriel, une aire cérébrale dédiée au traitement des stimulations tactiles. Deux singes ont appris à utiliser ce dispositif. Ils ont ainsi été entraînés à avoir l'impression de toucher un objet en se servant de doigts virtuels commandés par leur cerveau.

Assistés par une équipe internationale de neuroscientifiques, de roboticiens, d'informaticiens, de neurochirurgiens et de professionnels de la rééducation, le consortium *Walk Again* a commencé à tirer parti de ces découvertes sur l'animal, en apprenant à des patients paralysés à utiliser des interfaces cerveau-machine. Notre futur tireur de la cérémonie d'ouverture débutera son entraînement dans une « chambre de réalité virtuelle », une pièce où des images sont projetées sur chaque paroi, y compris le plancher et le plafond. Il sera équipé de lunettes spéciales et d'une sorte de casque qui détectera ses ondes cérébrales de façon non invasive, par électroencéphalographie (EEG) et magnétoencéphalographie (MEG). Il sera alors immergé dans un environnement virtuel. Là, il apprendra à commander un avatar informatique par la pensée. Les déplacements de cet avatar gagneront peu à peu en complexité : il devra être capable de marcher sur un sol accidenté ou d'ouvrir un robinet.

Les électrodes dans le cerveau

Les mouvements d'un exosquelette ne peuvent pas être commandés aussi facilement que ceux d'un avatar informatique, et la technologie et l'entraînement seront donc plus compliqués. Nous devrons implanter les électrodes directement dans

■ L'AUTEUR

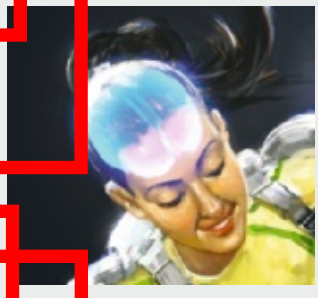


Miguel NICOLELIS est professeur de neurosciences et codirecteur du Centre de neuro-ingénierie de l'Université Duke, aux États-Unis.

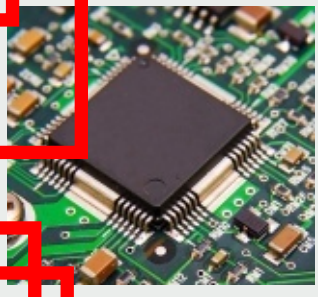
DES SIGNAUX MOTEURS À LA RÉTROACTION TACTILE

L'exosquelette exploitera des signaux allant du cerveau à la machine, puis de la machine au cerveau. Lorsque le sujet pensera au mouvement à effectuer, l'interface extraira les signaux moteurs de son cerveau, imprimera le mouvement à la prothèse, puis créera une rétroaction tactile qui lui permettra de rendre le mouvement plus précis.

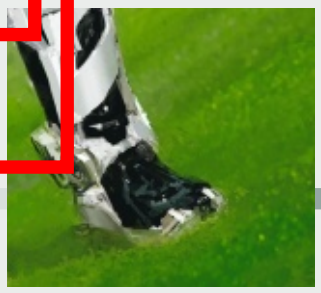
1 Les signaux moteurs issus de plusieurs dizaines de milliers de neurones sont enregistrés par des capteurs implantés dans le cerveau. Ils sont accompagnés de micropuces qui analysent l'activité électrique détectée pour extraire les signaux moteurs.



2 Les signaux moteurs sont transmis par les ondes à un ordinateur installé dans un sac à dos. L'ordinateur détermine à quels mouvements ces signaux correspondent et élabore les commandes mécaniques adéquates, qu'il envoie à l'exosquelette.



3 Les différentes articulations sont actionnées pour effectuer le mouvement souhaité. L'exosquelette est doté de capteurs qui mesurent divers paramètres de position et de force associés au mouvement. Ces mesures sont envoyées à l'ordinateur.

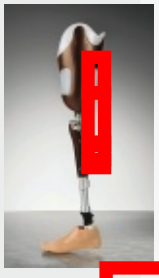


4 L'ordinateur analyse les mesures émises par les capteurs de l'exosquelette. Il gère certains ajustements grossiers et envoie des signaux de rétroaction au cerveau (via des électrodes stimulant une aire cérébrale appropriée). Une nouvelle boucle s'enclenche alors pour que le mouvement soit de plus en plus précis et efficace.

Kemp Richillard, © Shutterstock/Skobrik

Années 1980
Les ondes cérébrales sur écoute
Apostolos Georgopoulos, de l'Université Johns Hopkins, découvre que lorsque des macaques rhésus bougent un bras, les modalités d'activation électrique de leurs neurones moteurs dépendent de la direction du mouvement.

Début des années 1990
Des électrodes permanentes
John Chapin, de l'Université SUNY, dans l'État de New York, et Miguel Nicolelis enregistrent l'activité simultanée de plusieurs dizaines de neurones dispersés. Pour ce faire, ils utilisent des électrodes implantées de façon permanente, ouvrant la voie aux interfaces cerveau-machine.


Otto Bock Healthcare

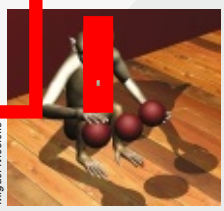
1997
Une prothèse intelligente
Mise en vente d'une prothèse de jambe commandée par un microprocesseur. Elle est dotée de capteurs et ses mouvements s'ajustent en temps réel. Dans sa version actuelle, elle permet des activités telles que faire du vélo.

1999-2000
Première interface cerveau-machine
Les équipes de J. Chapin et M. Nicolelis publient la première description d'une interface cerveau-machine implantée sur des rats ; le signal de rétroaction y est visuel. L'année suivante, l'équipe de M. Nicolelis publie les résultats d'une étude réalisée sur un singe, qui commandait les mouvements d'un bras robotique en utilisant uniquement son activité cérébrale.


Andrew Medichini AP Photo

2008-2012
Blade runner
Oscar Pistorius, surnommé Blade runner (le coureur sur lame), remporte plusieurs épreuves lors des jeux Paralympiques de 2008. En 2012, il participe aux jeux Olympiques de Londres – dans la catégorie des valides –, où il atteint notamment la demi-finale sur 400 mètres.

2011
Le singe y pense, l'avatar le fait
L'équipe de M. Nicolelis montre qu'un singe peut faire bouger un avatar informatique par la pensée. Un signal de rétroaction « tactile » est même fourni au cerveau de l'animal.


Miguel Nicolelis

le cerveau. Il faudra aussi accroître le nombre de neurones enregistrés simultanément. Pour cela, de multiples capteurs seront implantés dans le cortex moteur, la région du lobe frontal qui commande les mouvements (cette région transmet des signaux à la moelle épinière, dont les neurones déclenchent et coordonnent le travail des muscles).

Gary Lehew, de mon équipe à l'Université Duke, a conçu un nouveau type de capteur : un cube enregistreur qui, lorsqu'il est implanté dans le cortex, capte des signaux issus de tout son environnement immédiat. Tandis que les dispositifs antérieurs étaient constitués de plaques hérissées de microélectrodes – dont les pointes captaient les signaux électriques des neurones –, le cube de G. Lehew présente des microélectrodes capables d'enregistrer l'activité sur toute leur longueur et dans toutes les directions.

Plusieurs dizaines de milliers de neurones suivis simultanément

La version actuelle de ce cube contient jusqu'à 1 000 microélectrodes. L'activité de quatre à six neurones au moins pouvant être enregistrée par chaque microélectrode, un cube peut « lire » 4 000 à 6 000 neurones. Si nous réussissons à implanter plusieurs de ces cubes dans le cortex fronto-pariétal, nous pourrons mesurer simultanément l'activité de dizaines de milliers de neurones. Selon nos simulations informatiques, cela devrait suffire pour commander un exosquelette à deux jambes assez précisément pour assurer une locomotion autonome à nos patients.

Un autre défi est le traitement de l'avalanche de données provenant des capteurs, afin d'en extraire les signaux moteurs. Pour pallier cette difficulté, nous développons une nouvelle génération de neuropuces. Implantées dans le cerveau du patient avec les capteurs, elles fourniront les informations nécessaires pour manipuler un exosquelette recouvrant le corps entier.

Les signaux cérébraux détectés devront ensuite être transmis aux membres prothétiques. Tim Hanson, dans notre équipe, a construit un système sans fil équipé de capteurs et de puces. Ce dispositif peut être inséré dans le cerveau et transmettre les signaux cérébraux à un récepteur éloigné. Il est actuellement testé avec succès chez

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012

des singes. De fait, lors d'une expérience récente, un singe a pour la première fois fait fonctionner une interface cerveau-machine dotée d'un système de transmission sans fil. En juillet 2012, nous avons déposé une demande auprès du gouvernement brésilien pour qu'il nous autorise à utiliser cette technique chez l'homme.

Pour notre futur jeune footballeur, les données issues des systèmes d'enregistrement seront transmises sans fil à une petite unité de traitement informatique contenue dans un sac à dos. Divers logiciels traduiront les signaux moteurs en commandes numériques adressées aux articulations de l'exosquelette, les éléments qui ajustent le positionnement des membres artificiels.

Ainsi, le patient pourra faire un pas, puis un autre, ralentir ou accélérer, se pencher, gravir un escalier, etc. L'exosquelette, qui ressemblera à une combinaison d'astronaute, devra rester souple, mais aussi procurer un bon maintien au sujet. Certains ajustements grossiers seront gérés directement par les circuits électromécaniques, sans interaction avec le cerveau. En combinant ces « réflexes électroniques » aux signaux cérébraux, nous espérons que le tireur de la Coupe du monde pourra faire bouger son exosquelette par la seule force de sa volonté.

Ce tireur devra non seulement se déplacer, mais aussi sentir le sol sous lui.

LORS D'UNE EXPÉRIENCE RÉCENTE, un singe a pour la première fois fait fonctionner une interface cerveau-machine dotée d'un système de transmission sans fil.

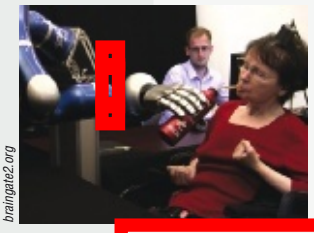
L'exosquelette lui procurera une sensation de toucher et d'équilibre, grâce à des capteurs microscopiques qui mesureront les forces associées aux mouvements et transmettront ces informations au cerveau. Ainsi, le tireur devrait sentir qu'un orteil a touché le ballon.

Nous pensons que dès que le tireur interagira avec l'exosquelette, son cerveau commencera à l'intégrer comme une extension de sa propre image corporelle. L'entraînement rendra les pas plus fluides, en permettant au tireur d'assimiler les sensations associées au contact avec le sol et à la position des jambes robotiques.

Toutes les phases de ce projet nécessiteront des tests rigoureux sur des animaux de laboratoire, avant que nous puissions commencer nos travaux chez l'homme. Ensuite, les procédures doivent être acceptables d'un point de vue scientifique, mais aussi éthique pour les organismes de contrôle au Brésil, aux États-Unis et en Europe. Même si de nombreuses incertitudes demeurent et s'il nous reste pour le temps, la simple idée de ce projet a galvanisé l'intérêt de la société brésilienne pour la science à un point rarement observé.

Le coup d'envoi de la Coupe du monde de football en 2014 – ou un événement similaire, tels les jeux Olympiques et Paralympiques de Rio de Janeiro en 2016, si nous manquons la première échéance – sera plus qu'un simple tour de force sans





2012
Du cerveau au bras robotique
John Donoghue, de l'Université Brown, et ses collègues implantent une interface neuronale à des patients, ce qui leur permet de saisir une boisson au moyen d'un bras robotique.

2014
Le coup d'envoi donné par un cyborg ?
L'équipe de M. Nicolelis élabore un exosquelette, qui permettrait à un adolescent handicapé de donner le coup d'envoi de la prochaine Coupe du monde de football au Brésil.

lendemain. Une expérience réalisée avec des singes donne une idée des applications potentielles de cette technique. En 2007, notre équipe a entraîné des singes rhésus à marcher sur un tapis roulant, tandis que l'activité électrique de plus de 200 neurones corticaux était enregistrée. Les données étaient envoyées à G. Cheng, qui travaillait alors au Laboratoire IRC (*Intelligent robotics and communication*, ou Communication et robotique intelligentes) de l'Institut ATR, à Kyoto, au Japon ; nous utilisions un protocole Internet que G. Cheng avait développé et qui permettait des échanges extrêmement rapides. Les données étaient destinées aux contrôleurs électroniques de CB1, un robot humanoïde.

Des algorithmes polyvalents

Ces contrôleurs utilisaient des algorithmes élaborés précédemment pour traduire des pensées en commandes de bras robotiques. Dans la première partie de l'expérience, nous avons montré que ces algorithmes fonctionnaient également pour la locomotion bipède : ils transformaient les données neuronales recueillies en commandes qui actionnaient deux jambes mécaniques.

Lors de la seconde partie de cette expérience, Idoya, un singe femelle, marchait sur le tapis roulant de notre laboratoire, et l'interface cerveau-machine transmettait le flux d'activité électrique de son cerveau à Kyoto. Là, CB1 commençait à marcher dès qu'il détectait ces commandes motrices. Au début, il avait besoin d'être maintenu à la taille, mais dans les expériences ultérieures, il se déplaçait de façon autonome, en réponse aux commandes engendrées par le singe à l'autre bout du monde.

Quand le tapis roulant s'arrêtait et qu'Idoya essayait de marcher, elle pouvait encore commander les mouvements de CB1 à Kyoto : pour ce faire, elle observait en direct sur une vidéo les jambes du robot qui se déplaçait et elle imaginait chaque pas qu'il devait faire. Idoya continuait donc à produire les schémas cérébraux requis pour faire marcher CB1, même si son propre corps n'était plus engagé dans cette tâche motrice. Cette expérience transcontinentale a révélé qu'un humain ou un singe peut transmettre des commandes cérébrales hors de son corps biologique, jusqu'à un dispositif artificiel éloigné.

Grâce aux interfaces cerveau-machine, nous pourrions ainsi manipuler des robots envoyés dans des environnements inaccessibles à l'homme : nos pensées manœuvreraient par exemple un outil microchirurgical à l'intérieur du corps, ou dirigeraient un ouvrier humanoïde réparant une fuite dans une centrale nucléaire.

Ces interfaces pourraient également commander des outils exerçant des forces bien plus importantes, ou bien plus faibles, que celles applicables par le corps humain. En reliant le cerveau d'un singe à un robot humanoïde, nous nous sommes déjà affranchis des contraintes temporelles : le voyage mental d'Idoya autour du globe a pris 20 millisecondes – moins de temps qu'il n'en faut pour déplacer sa propre jambe.

En plus d'être une source d'inspiration pour le futur, nos travaux sur des singes nous donnent confiance sur la faisabilité de notre projet. Au moment où nous écrivons ces lignes, nous attendons la réponse de la Fédération internationale de football association (FIFA) à notre proposition de faire participer un jeune paraplégique au lancement de la prochaine Coupe du monde. Le gouvernement brésilien a soutenu le projet. Les difficultés administratives et les incertitudes scientifiques sont encore nombreuses. Cependant, je ne peux m'empêcher d'imaginer ce que ressentiront les trois milliards de spectateurs en contemplant cette brève, mais historique, promenade sur le gazon d'un terrain de football... ■

■ SUR LE WEB

Prototype d'exosquelette :
ScientificAmerican.com/sep2012/exoskeleton.

Singe contrôlant la marche d'un robot :
ScientificAmerican.com/feb2011/mind-control

■ BIBLIOGRAPHIE

M. Nicolelis, **Beyond Boundaries : The New Neuroscience of Connecting Brains with Machines - and How It Will Change Our Lives,** St. Martin's Griffin, 2012.

M. Velliste et al., **Cortical control of a prosthetic arm for self feeding,** *Nature*, vol. 453, pp. 1098-1101, 2008.

M. Nicolelis et J. Chapin, **Des robots commandés par la pensée,** *Pour la Science*, n°304, 2003.

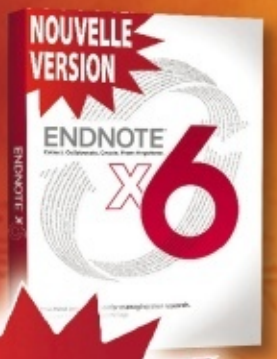
© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012

UN COMPLÉMENT INTELLIGENT POUR VOTRE ÉQUIPE DE RECHERCHE

ENDNOTE®

Collect. Collaborate. Create. From anywhere.

X6



À PARTIR DE **216 €HT** ÉDUCATION

Disponible pour Windows & Macintosh.

ENDNOTE X6® EST LE MEILLEUR GESTIONNAIRE POUR VOUS ACCOMPAGNER DANS VOTRE TRAVAIL AU QUOTIDIEN.

Endnote simplifie la gestion de votre bibliographie en vous donnant accès aux meilleurs sources d'informations disponibles. Il facilite la collaboration entre collègues et vous permet en quelques clics de rendre des documents textes d'une qualité exceptionnelle.

Avec la nouvelle version Endnote X6, vous pouvez dorénavant accéder à votre bibliothèque partout dans le monde et avoir accès à tous vos pdfs grâce à la synchronisation automatique de vos bibliothèques Endnote et Endnote Web. De nombreuses autres fonctionnalités ont été ajoutées à Endnote X6 pour vous permettre d'atteindre l'excellence.

Laisser vous tenter par ENDNOTE X6.
Vos documents de recherche seront tout simplement exceptionnels. Et vous aussi.

www.ritme.com/fr/product/endnote

RITME - Distributeur Officiel • 34, bd Haussmann • 75009 Paris • France
Tél. : +33 (0)1 42 46 00 42 • Fax : +33 (0)1 42 46 00 33
info@ritme.com • www.ritme.com

Sauf indication contraire : logiciel et documentation en anglais, et livraison par téléchargement ou par CD-Rom.
© Copyright 2012 RITME. EndNote est une marque déposée de Thomson Reuters.
Toutes les marques déposées sont la propriété de leurs sociétés respectives.

RITME
NOTRE MÉTIER : FACILITER LE VÔTRE
Distributeur officiel en France

Augmenter les performances de son cerveau

Caféine, nicotine et autres psychostimulants : quel est leur effet sur le cerveau ? Aujourd'hui, la stimulation des fonctions cognitives ressemble plus à un mythe qu'à une réalité.



Comment pourrais-je améliorer ma mémoire ? Avoir moins besoin de dormir à l'approche des examens ? Stimuler mon intelligence ? Autant de demandes auxquelles les médecins sont régulièrement confrontés. On ignore si les Grecs, les Indiens, les Égyptiens des temps anciens formulaient les mêmes demandes à leurs guérisseurs ou autres thérapeutes, mais les preuves que les Anciens consommaient des drogues diverses abondent. Ulysse au cours de son Odyssée trouve dans la fleur de lotus le remède allégeant le désespoir de sa patrie perdue. La morphine est décrite dans les plus anciens codex de l'Égypte pharaonique, il y a plus de 4 000 ans. La médecine indienne traditionnelle connaît la racine de *Rauwolfia* : au début des années 1950, on en a extrait la réserpine. Utilisée contre l'hypertension, elle fut surtout l'un des premiers médicaments modernes des maladies mentales (antipsychotique contre la schizophrénie). Et que dire de l'alcool ? Son usage est commun à toutes les civilisations. Jusqu'aux grands singes, qui ont été observés faisant macérer durant plusieurs jours des fruits dans des coques évidées avant de venir y cueillir l'ivresse.

En un mot, le désir d'agir sur les fonctions cognitives n'est pas récent. Mais si ces différents psychotropes changent l'état du cerveau, cesser d'éprouver une douleur, entre dans un état d'ivresse ou atteindre un paradis artificiel, rien de tout cela ne correspond à une amélioration de la performance cognitive : apprendre, résoudre un problème, etc.

En fait, le concept d'augmentation de la performance appliquée aux tâches effectuées par le cerveau est complexe à analyser. Il soulève de multiples questions et nécessite de préciser ce que l'on souhaite améliorer, pourquoi on le voudrait et qui

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012

leurre ?

Hervé Chneiweiss

L'ESSENTIEL

- On dispose de substances qui stimulent le cerveau : la caféine ou la nicotine (licites), et les amphétamines ou le modafinil (illicites).
- Mais quand on évalue leurs effets sur les performances cognitives en contexte qu'ils ne sont pas avérés.
- Si l'on dispose un jour de renforçateurs cognitifs efficaces et sans danger, ils seront issus des recherches sur les maladies du cerveau.
- Ce sera peut-être le cas de molécules améliorant la mémoire issues des recherches sur la maladie d'Alzheimer, mais des molécules efficaces chez des malades n'auront peut-être aucun effet chez les sujets sains.

© agsandrew/shutterstock.com

■ L'AUTEUR



Hervé CHNEIWEISS, directeur de recherche au CNRS, dirige le Département Neurosciences de l'Institut de biologie Paris Seine- CNRS/Inserm/Université Pierre et Marie Curie.
Il participe aux réflexions éthiques liées aux avancées des neurosciences.

le demande. Pour tenter de clarifier cette question, nous examinerons les psychostimulants disponibles aujourd'hui (licites ou non) et ceux que l'on peut espérer mettre au point. Nous nous demanderons si d'autres voies d'amélioration de notre bien-être ne seraient pas plus enviables.

Concentrons-nous d'abord sur les molécules pour lesquelles on dispose d'études scientifiques évaluant la performance. Elles représentent essentiellement cinq groupes de molécules : la caféine, la nicotine, les amphétamines, le modafinil et le méthylphénidate. Ajoutons les acides gras oméga-3, et nous aurons terminé ce qu'il est possible d'essayer aujourd'hui ! Ces substances améliorent-elles effectivement la performance cognitive, c'est-à-dire les capacités du cerveau, les capacités de concentration et de mémoire, la rapidité, l'endurance à manipuler des images mentales et à développer la pensée, l'imagination, l'aptitude à résoudre des problèmes ?

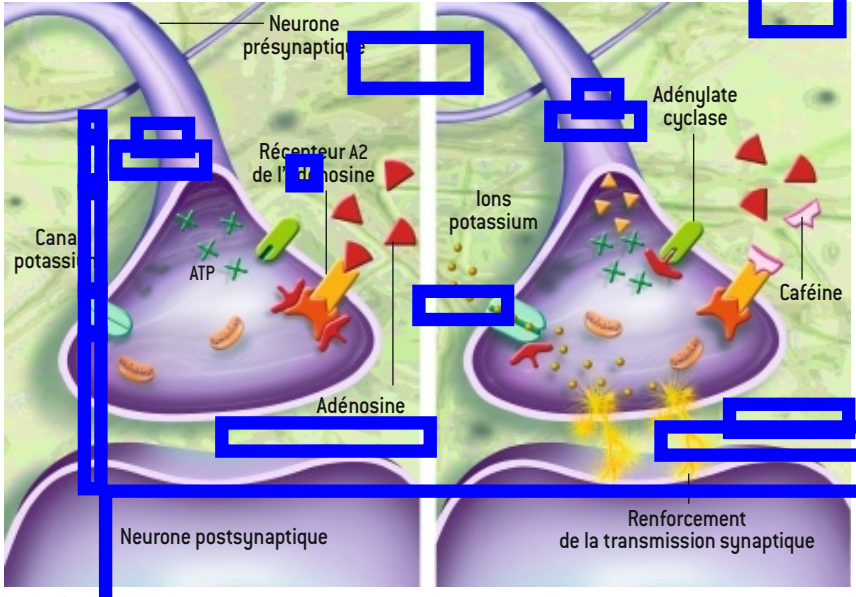
Ces substances ont des statuts légaux et sociaux différents. La caféine est la drogue d'éveil légale la plus utilisée au monde. La nicotine a un usage beaucoup plus encadré, puisqu'elle est disponible sous forme de tabac, mais aussi de médicaments, tels les patchs ou les gommes. Le modafinil, une substance stimulant l'éveil, est un médicament prescrit dans des indications précises : la narcolepsie avec cataplexie, une maladie génétique rare qui se manifeste par des accès de sommeil irrépressibles avec chute du tonus musculaire.

Les amphétamines, qui ont des effets coupe-faim et stimulent le système nerveux central, sont interdites et inscrites au tableau des drogues. Deux sont toutefois très utilisées aux États-Unis, la dexamphétamine et le deanol. Comme le méthylphénidate, ces deux amphétamines sont prescrites chez l'enfant en cas de trouble de déficit de l'attention avec hyperactivité, mais l'administration de ces substances à des enfants est controversée. La commercialisation sur Internet d'amphétamines ou de méthylphénidate est illégale.

Caféine et nicotine : des stimulateurs cognitifs ?

Commençons par ce qui constitue notre principal « améliorateur », celui qui permet de s'éveiller le matin, de se tenir éveillé après un déjeuner ou un dîner trop copieux, de travailler tard sur un dossier à terminer, celui qui se décline en multiples crus sélectionnés pour autant de subtilités du goût : le café. Aucun doute sur les effets du café sur l'éveil et le temps de réaction. Le principe actif, la caféine, est un inhibiteur non sélectif des récepteurs de l'adénosine, c'est-à-dire qu'elle se fixe sur tous les types de ces récepteurs. L'adénosine a plusieurs fonctions dans l'organisme. Elle participe par exemple au métabolisme des cellules sous forme d'adénosine triphosphate, ATP, la source d'énergie des cellules. Mais c'est aussi un neurotransmetteur et elle intervient dans la transmission des signaux entre neurones.

Quand l'adénosine se fixe sur ses récepteurs, elle inhibe l'activité neuronale et l'on ressent une sensation de fatigue. La caféine exerce ses effets neurostimulants en se fixant notamment sur les récepteurs A2 de l'adénosine, empêchant l'adénosine d'agir : c'est un antagoniste de ces récepteurs *(voir la figure 1)*. Elle agit aussi sur les neurones à histamine et potentialise les effets de ce neurotransmetteur qui maintient l'éveil. En revanche, c'est en agissant sur les récepteurs A1 de l'adénosine que la caféine exerce ses effets cardio-vasculaires (accélération



Sauf mention contraire, toutes les illustrations sont de Pere Lluis Leon

1. LA CAFÉINE stimule l'éveil. En l'absence de caféine, l'adénosine s'accumule au cours de la journée, saturant progressivement ses récepteurs *(à gauche)*. Quand on boit du café, la caféine se fixe sur les récepteurs A2 de l'adénosine *(à droite)*. Cette fixation entraîne la libération des sous-unités qui étaient fixées au récepteur de l'adénosine. L'une d'elles vient s'accoler à l'adénylate cyclase, ce qui stimule l'activité métabolique. Simultanément, une autre sous-unité déclenche l'entrée d'ions potassium dans le neurone : l'efficacité de la transmission synaptique est renforcée.

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012

du rythme cardiaque, augmentation de la pression artérielle, notamment).

Chez les gros consommateurs de café, les récepteurs de l'adénosine étant régulièrement bloqués par la caféine, le cerveau réagit en en produisant davantage. De surcroît, les récepteurs finissent par devenir plus sensibles à l'adénosine. Dès lors, l'efficacité de la caféine diminue, ce qui explique les symptômes de sevrage que l'on observe parfois : maux de tête, fatigue, troubles de l'humeur, sensation de malaise.

L'effet du café sur la capacité d'éveil et d'attention est avéré, mais qu'en est-il de fonctions cognitives plus complexes, la mémoire par exemple ? Des résultats récents obtenus par imagerie cérébrale fonctionnelle ont confirmé qu'une prise de 100 milligrammes de caféine – soit une tasse de café – active directement les circuits neuronaux correspondant à la mémoire de travail (la mémoire active temporairement pendant une tâche cognitive), mais qu'elle a également des effets indirects qui pourraient être négatifs.

Cela dépendrait de la façon dont la mémoire de travail est sollicitée : l'effet serait plutôt positif quand la tâche cognitive est facile (par exemple, un calcul mental simple), mais il serait négatif dans une tâche intense, par exemple la résolution d'un problème de mathématiques. Les accros du café à la limite de l'épuisement mental et qui ont à terminer une tâche exigeant d'importantes ressources cognitives ne trouveront sans doute pas un allié dans le café, si ce n'est pour ne pas s'endormir !

L'autre stimulateur cognitif parmi les plus répandus est la nicotine du tabac. Elle se fixe sur les récepteurs dits nicotiniques du neurotransmetteur acétylcholine, dans une aire particulière du cerveau (l'aire tegmentale ventrale). L'acétylcholine est un neurotransmetteur impliqué dans la mémoire et l'apprentissage, mais aussi, par son rôle sur le système nerveux périphérique, dans l'activité musculaire et les fonctions autonomes (respiration, rythme cardiaque, par exemple). Le récepteur de l'acétylcholine est une protéine qui traverse la membrane cellulaire et forme un canal *(voir la figure 2)*. Quand la nicotine s'y fixe, le canal s'ouvre, laissant entrer des ions dans le neurone postsynaptique, lequel est activé et libère de la dopamine, souvent qualifiée de molécule du plaisir (elle est aussi partiellement responsable de la dépendance à la nicotine). Par ailleurs, les études réalisées chez les fumeurs semblent indiquer de façon assez concordante que la nicotine améliore les capacités d'attention, sans doute par son action sur les récepteurs nicotiniques du cortex préfrontal, essentiel dans les tâches d'attention, de raisonnement et de planification. Les travaux réalisés sur l'animal suggèrent également que la nicotine favorise la mémorisation.

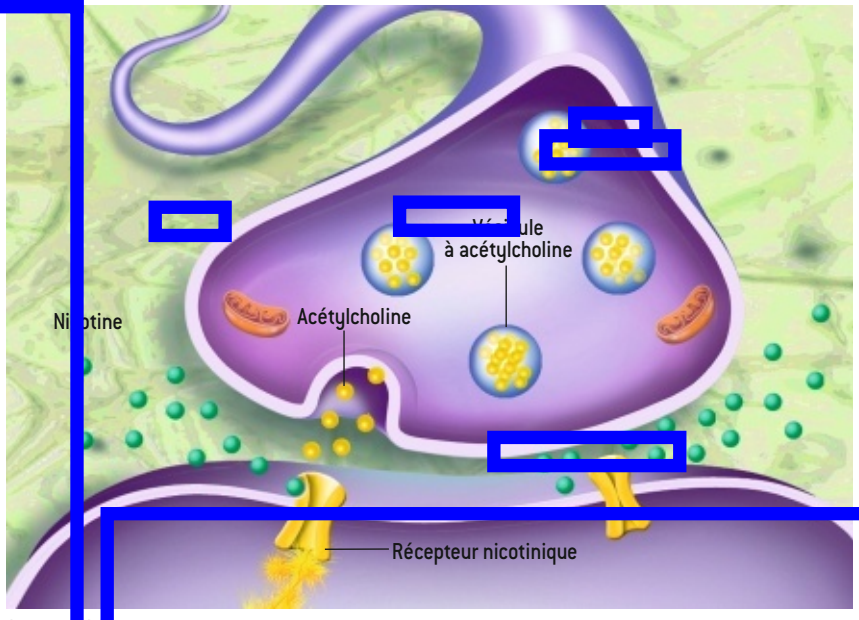
Les résultats manquent chez l'homme, mais il a été rapporté que l'administration de nicotine (sous forme de gomme à mâcher) à des non-fumeurs, une heure après une tâche d'apprentissage, en consolide le souvenir. C'est sur la base de ces différents indices qu'une stratégie de traitement des personnes atteintes de la maladie d'Alzheimer a été proposée : il s'agit de la mémantine, une molécule qui inhibe la dégradation de l'acétylcholine. Toutefois, des travaux récents remettent en doute l'intérêt d'un tel traitement chez les malades et montrent qu'il n'a aucun effet chez le sujet sain.

Les psychostimulants

Abordons maintenant les molécules administrées sur prescription médicale. Les Anglo-Saxons les nomment *smart pills*, les pilules de l'intelligence ou... les molécules élégantes. Soulignons que, quelles que soient ces molécules, les risques – pour la personne et pour la société – que représente leur consommation doivent être évalués. Notons également que si l'usage de ces molécules demeure restreint, il est loin d'être anecdotique et la tendance est à l'augmentation… des performances de vente.

Les études dont nous disposons viennent essentiellement des États-Unis, et portent surtout sur les populations étudiantes. De 5 à 35 pour cent des personnes interrogées avaient pris des amphétamines ou du méthylphénidate, en dehors de toute prescription médicale, au cours de l'année qui avait précédé l'étude. Qui plus est, les services d'urgences des hôpitaux situés à proximité des universités enregistrent des pics d'abus de ces molécules un peu avant les examens. Dans une autre étude, on demandait aux étudiants : « Avez-vous déjà pris du méthylphénidate pour le plaisir ? » L'enquête a révélé que 16,6 pour cent des étudiants interrogés avaient répondu positivement. Le phénomène mérite que l'on y prête une réelle attention.

Au-delà des chiffres de leur consommation, il convient de s'interroger sur la réalité de l'effet du méthylphénidate et du modafinil. Les études réelles contre placebo chez les volontaires sains sont rares. Deux études essayant de passer en revue la littérature scientifique ont été réalisées par Isabella Heuser et ses collègues de



2. LA NICOTINE se fixe sur les récepteurs nicotiniques de l'acétylcholine. Ce faisant, le récepteur s'ouvre, laissant passer des ions qui activent le neurone postsynaptique. Puis le canal se referme, et ne peut plus être réactivé immédiatement. Cet état se prolonge quand le système est régulièrement exposé à la nicotine, ce qui explique l'accoutumance et le besoin de fumer plus pour ressentir le même plaisir.

l'Hôpital universitaire de la Charité à Berlin, en 2010, et par Elizabeth Smith, du Département de psychologie, et Martha Farah, du Centre de neurosciences et société, tous deux à Philadelphie, en 2011. Les deux études concluent... que les résultats actuels ne permettent pas de conclure.

Certaines études rapportent des effets positifs, mais d'autres n'observent rien, voire des effets négatifs. Le méthylphénidate par exemple pourrait faciliter la consolidation de la mémoire à long terme, mais seulement s'il s'écoule une durée importante entre la phase d'apprentissage et la phase de remémoration. Inutile pour les révisions de dernière minute ! Ce même méthylphénidate n'a aucun effet sur les capacités d'attention, ni sur l'humeur, ni sur les tâches dites exécutives (rapidité de lecture ou d'écriture, par exemple), ni surtout sur la concentration, alors que c'est précisément la raison pour laquelle les étudiants interrogés déclarent en prendre.

Une étude réalisée sur 60 volontaires sains rapporte des effets positifs du modafinil sur la capacité de retenir des chiffres ou des schémas. Les résultats sont contradictoires sur les effets à long terme. Ainsi, certaines données semblent indiquer que le taux d'erreur est réduit quand les sujets doivent se remémorer des données enregistrées sous modafinil, mais des études plus récentes non seulement ne le confirment pas, mais indiquent même que la capacité de corriger ses erreurs lors d'une remémoration à long terme diminue.

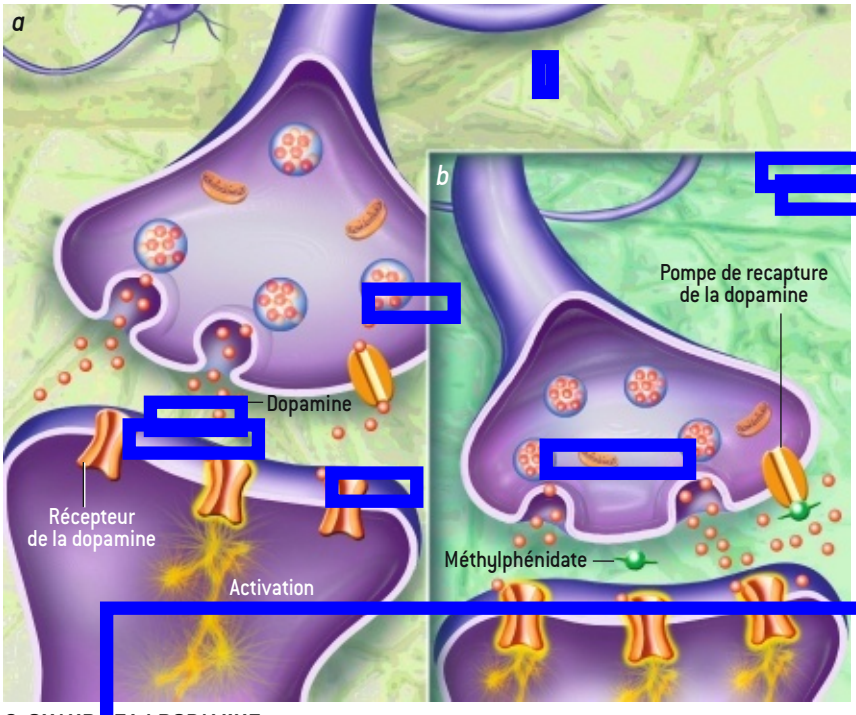
Ces contradictions soulignent les difficultés méthodologiques de ces études : le nombre des personnes participant aux études est faible, ce qui interdit une analyse statistique fiable, on ne dispose pas de tests validés et standards, qui seraient utilisés dans toutes les études, et les effets observés dépendent beaucoup du niveau d'études et du comportement des individus. Ainsi il n'existe pas d'amélioration objective à long terme.

Cela n'empêche pas les utilisateurs de percevoir que le méthylphénidate et le modafinil leur permettent de rester plus concentrés sur leurs cours et éveillés plus longtemps, et pour certains des étudiants testés prendre ces molécules est aussi important que boire ou se nourrir. Ces substances servent donc d'abord à améliorer l'image de soi. Les résultats ont été confirmés par le groupe de M. Farah qui a étudié l'usage d'amphétamines par des volontaires sains. Ces psychologues ont montré que les sujets prenant des amphétamines ne résolvaient pas mieux les problèmes proposés, mais qu'en revanche ils évaluaient de façon beaucoup plus positive leurs capacités à résoudre ces tâches cognitives que ceux qui prenaient un placebo.

Nous devons également comparer le bénéfice et le risque que représentent ces molécules. Le méthylphénidate a été prescrit à plus de trois millions d'enfants américains âgés de moins de 13 ans, alors qu'il a fait l'objet de mises en garde régulières en raison de ses effets cardio-vasculaires, notamment parce qu'il favorise l'hypertension. En 2010, l'Agence européenne du médicament a publié un rapport concluant qu'en raison des risques liés à l'usage du modafinil et compte tenu de ses bénéfices, l'usage devait être restreint aux seuls sujets atteints de narcolepsie et de cataplexie, pathologies qui peuvent entraîner la mort, notamment en raison des risques d'accidents corporels qu'un brusque endormissement peut causer. Le modafinil a été un temps utilisé pour recaler son rythme circadien en cas de décalage horaire ou d'horaires de travail décalés, mais cet usage a été récemment proscrit, et une liste importante de contre-indications a été publiée.

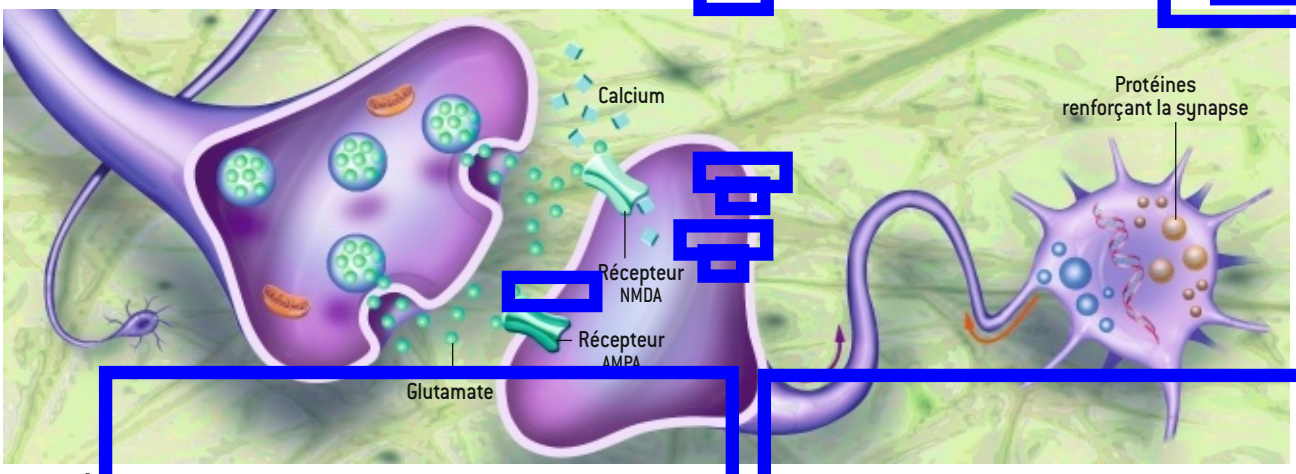
Le danger ne tient pas seulement à la toxicité potentielle des « améliorateurs » cognitifs, mais il est également lié aux comportements qu'engendre leur consommation. Pour s'en procurer, certains n'hésitent pas à simuler les symptômes de la narcolepsie ou du trouble de déficit de l'attention avec hyperactivité, TADAH, et des officines médicales spécialisées ont fleuri aux États-Unis où de faux diagnostics de ces maladies sont établis. Enfin, sans verser dans l'anecdote, rappelons que les auteurs du massacre du Collège de Columbine étaient des enfants traités par le méthylphénidate en raison d'une hyperactivité avec trouble de l'attention.

Tous ces résultats sont donc loin de montrer que les supposés améliorateurs cognitifs dont on dispose aujourd'hui ont un quelconque effet sur l'amélioration des capacités cognitives. Cette aspiration a-t-elle donc fait long feu ? Ce n'est apparemment pas l'avis du groupe de juristes et de spécialistes de l'éthique qui, en 2008, ont publié un article dans l'hebdomadaire scientifique *Nature* et qui revendiquent un usage libre, raisonné et responsable de tout ce qui peut améliorer la cognition à partir du moment où les produits sont non toxiques



3. QUAND LE LA DOPAMINE est libérée par un neurone présynaptique, elle se fixe sur son récepteur postsynaptique, ce qui active le neurone qui le porte *(a)*. Un psychostimulant, tel le méthylphénidate *(b, en vert)*, bloque la pompe de recapture de la dopamine, de sorte que la concentration de neurotransmetteur augmente dans la synapse : l'activation du neurone postsynaptique augmente notablement.

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012



4. LA MÉMOIRE repose sur le renforcement de certaines synapses. Quand du glutamate est libéré dans la synapse, il se fixe sur ses récepteurs AMPA et NMDA. L'ouverture de ce dernier permet à un flux d'ions calcium d'entrer dans le neurone postsynaptique. Une cascade de signalisation aboutit à la synthèse de diverses protéines qui retournent vers la synapse, ce qui la renforce. Pour améliorer cette consolidation chez certains malades, les neurobiologistes étudient la possibilité de moduler l'ouverture du canal NMDA.

et efficaces. Qui résistera à une telle perspective, le jour où ces produits seront effectivement sûrs et efficaces ? Mais il reste une difficulté notable : ces deux critères sont loin d'être remplis ! Tous les produits qui pourraient être utilisés demain pour améliorer les performances cognitives de sujets normaux sont en cours de développement pour des maladies : améliorateurs de la mémoire pour des personnes atteintes de la maladie d'Alzheimer, amélioration des capacités d'attention avec des produits issus de la recherche sur la maladie de Parkinson, la schizophrénie ou la dépression.

Renforcer la mémoire

Ces médicaments ciblent par exemple certaines sous-unités du récepteur nicotinique, afin d'obtenir des effets plus spécifiques et de plus longue durée que ceux de la nicotine, qui, nous l'avons évoqué, renforce la mémoire. On espère ainsi stimuler l'activité cérébrale facilitant l'apprentissage et les capacités de concentration. D'autres substances ciblent la transmission synaptique contrôlée par le principal neurotransmetteur excitateur du cerveau, le glutamate. Ce dernier a plusieurs types de récepteurs, notamment NMDA et AMPA.

On sait que le récepteur NMDA est nécessaire au renforcement de l'efficacité des synapses, et que ce mécanisme de renforcement est le support neurobiologiques des mécanismes de mémorisation et d'apprentissage. Par conséquent, faciliter l'efficacité de la transmission synaptique par le biais du récepteur NMDA devrait renforcer la mémoire et l'apprentissage (*voir la figure 4*). Mais les récepteurs NMDA ont un effet toxique quand ils sont hyperactivés, parce qu'ils laissent passer un excès d'ions calcium, qui déclenchent un mécanisme de suicide cellulaire, ou apoptose. Quand le glutamate est en excès dans les synapses, non seulement il ne renforce plus l'apprentissage, mais les neurones récepteurs sont endommagés. Par conséquent, il s'agit de moduler un peu, mais ni trop ni trop peu.

C'est pourquoi les neurobiologistes cherchent non pas à surstimuler le récepteur NMDA, mais plutôt à en moduler l'activité, en agissant sur lui directement ou indirectement. Il existe une dizaine de façons d'y parvenir, et elles sont en cours de développement, voire d'essais cliniques chez l'homme (essentiellement dans le cadre de la maladie d'Alzheimer ou des déficits cognitifs apparaissant vers l'âge de 50 ans, c'est-à-dire chez des sujets relativement jeunes).

Sont également testés des antagonistes des neurotransmetteurs adénosine (bloquant le récepteur A2), histamine (bloquant le récepteur H3 inhibiteur de la libération d'histamine) ou sérotonine (bloquant le récepteur 5-HT6). Encore faudra-t-il, si l'efficacité de ces molécules est avérée chez les malades (ce que l'on ne saura pas avant 2015), qu'elles démontrent leur efficacité chez les sujets sains. Car c'est une erreur de considérer qu'une molécule qui compense un déficit pourrait augmenter la fonction correspondante si elle n'est pas altérée. Et il est tout aussi hasardeux d'extrapoler des effets observés à court terme à la suite d'une administration unique, à des effets à long terme avec des administrations répétées. L'une des principales difficultés tient à ce que tous les circuits neuronaux visés par les améliorateurs cognitifs sont des modulateurs de l'activité cérébrale répartis dans tout le cerveau et dont l'effet peut dépendre de l'endroit où ils agissent.

Le même récepteur peut avoir un effet très différent s'il est localisé sur un neurone du cortex cérébral préfrontal (impliqué dans le raisonnement) ou sur un neurone de l'hippocampe (une aire essentielle à la mémorisation) ou dans le thalamus (qui gère les entrées sensorielles). Une pathologie neurodégénérative détruit plus particulièrement une région, l'hippocampe par exemple dans le cas de la maladie d'Alzheimer, mais aucune des molécules actuellement disponibles ou en développement ne sait cibler une région plus qu'une autre. Or des effets positifs sur un circuit peuvent se révéler négatifs sur un autre. La cognition naît de l'intégration de l'ensemble des fonctions cérébrales.

Quand on aborde la pensée et l'intelligence, la question de la mesure est cruciale. Quelle est la grandeur mesurée ? En laboratoire, le temps de réponse mesure la réactivité. La bonne réponse à un questionnaire à choix multiple (QCM), par exemple, reflète la quantité de connaissances mémorisées et traitées. Mais comment mesure-t-on une réponse adaptée dans un environnement complexe, tel celui de la vie quotidienne ? Illustrons l'importance de cette question avec le débat autour des acides gras polyinsaturés et

Les pièges des corrélations

La revue médicale *New England Journal of Medicine* a récemment publié un article montrant une corrélation entre le nombre de prix Nobel par habitant dans un pays donné et la consommation annuelle de chocolat de ces habitants ! L'étude est rigoureuse et le résultat statistique incontestable. La conséquence éventuelle sur notre mode de vie ne serait pas désagréable, et encouragerait la tendance naturelle pour beaucoup. Le chocolat contient de nombreuses substances, telles que les flavanoïdes, dont les effets physiologiques sont avérés. Cette logique suffit-elle à ce que tous les Français se dopent au chocolat pour augmenter le nombre de nos prix Nobel ? Non, comme le reconnaissent eux-mêmes les auteurs de cet article, les causes de la corrélation observée étant à rechercher à un autre niveau : ce sont les mêmes facteurs économiques et sociaux qui conduisent à consommer du chocolat et à atteindre un niveau d'études permettant un éventuel accès à la nobélisation.

■ **BIBLIOGRAPHIE**

H. Chneiweiss, **Does cognitive enhancement fit with the physiology of our cognition ?** in J. Illes et B. Sahakian (eds.), Oxford Handbook of Neuroethics, pp. 295-305, Oxford Univ. Press, 2011.

B. Sahakian et S. Morein-Zamir, **Neuroethical issues in cognitive enhancement**, *J. Psychopharmacol.*, vol. 25(2), pp. 197-204, 2011.

M. Smith et M. Farah, **Are prescription stimulants « smart pills » ? The epidemiology and cognitive neuroscience of prescription stimulant use by normal healthy individuals**, *Psychol Bull.*, vol. 137(5), pp. 717-741, 2011.

D. Repantis *et al.*, **Modafinil and methylphenidate for neuroenhancement in healthy individuals : A systematic review**, *Pharmacol. Res.*, vol. 62(3), pp. 187-206, 2010.

en particulier des oméga-3 et oméga-6. Ce sont des composants essentiels des membranes des cellules du système nerveux et ils participent à la communication entre neurones. Les travaux réalisés chez le rongeur ont montré de façon reproductible que l'apport alimentaire enrichi en acides gras polyinsaturés ralentit le déclin cognitif.

Qu'en est-il chez l'homme ? La comparaison des alimentations de différentes populations n'a rien montré. L'apport éventuel des acides gras polyinsaturés est probablement masqué par une myriade d'autres facteurs. Alors les biologistes se sont tournés vers des patients atteints de maladie d'Alzheimer et ont enrichi leur alimentation. Toujours rien. Probablement les patients ont-ils reçu ces compléments alimentaires trop tard. En un mot, la quête continue. D'autres apports alimentaires ont été testés : la citruline, active chez le rat vieillissant, diverses formes de choline, l'acétyl-L-tyrosine, des précurseurs de l'ATP, ou encore les extraits de ginkgo biloba ou de ginseng. Quel que soit la racine ou l'extrait porté au rang de fontaine de jouvence depuis des lustres, rien n'a fait la preuve – scientifique – de son efficacité. Les faux sont têtus.

Pour développer des stratégies d'amélioration cognitive, il faudra des molécules non toxiques et efficaces, favorisant l'épanouissement de la personne concernée. Notre activité cérébrale n'est pas seulement la synthèse de l'activité et de la coordination de nos réseaux de neurones. Nous existons avec et par les autres ; nous existons en tant qu'individu social, à l'intersection du déterminisme du cerveau-organe et du probabilisme du cerveau social. L'individu ne peut pas s'isoler des autres en absorbant des molécules qui l'amélioreraient et l'assujettiraient à une norme sociale ou économique. Un des risques liés à l'amélioration cognitive serait de voir des individus de plus en plus performants au service de l'économie dominante, mais de plus en plus isolés socialement.

Comment nos arrière-arrière petits-enfants nous considéreront-ils ? Comme des dinosaures qui croyaient encore à un cerveau mécanique, qu'il suffit de stimuler au moyen de quelques molécules pour qu'il « fonctionne mieux » ? Quand nos descendants observeront la ruche que nous construisons, ils nous verront en train de stimuler notre vigilance avec de la caféine et souriront au fait que des génies de l'organisation d'entreprise n'aient pas vu que la machine à café et l'effet de sociabilisation autour de la consommation d'un café étaient beaucoup plus importants que le café lui-même. Ils auront compris que stimuler les capacités cérébrales d'une personne isolée ne présente guère d'intérêt, mais que stimuler les capacités d'interaction apporte beaucoup. Par ailleurs, l'amélioration cognitive ne passera sans doute pas par des pilules : qui accepterait d'échanger un expresso contre une pilule contenant la même quantité de caféine ?

L'environnement : le meilleur des psychostimulants

Nos arrière-arrière petits-enfants auront délaissé la mesure du temps de réaction et du nombre de chiffres retenus dans une liste, mais ils auront développé des mesures permettant d'évaluer la capacité de coopération, le partage des tâches et des savoirs, la mise en réseau, la collégialité. Ils auront compris que l'amélioration de la performance qu'il faut espérer ne réside ni dans une vitesse augmentée, ni dans une capacité renforcée de mémoire, ni dans une aptitude à échapper au sommeil, mais dans une capacité d'éveil à l'autre, de confiance pour collaborer à un projet commun.

Notre époque leur paraîtra comme un des sommets de la guerre des ego, alors que la solution pourrait résider dans le développement des égaux. Un phénomène aussi complexe que la pensée ne peut se résumer à l'activité plus ou moins stimulée d'un récepteur de l'adénosine et la capacité cognitive d'un individu ne peut être isolée de son environnement.

Ainsi les substances licites ou non consommées pour améliorer ses capacités cognitives sont au mieux des leurres, au pire dangereuses pour la santé quand elles sont consommées sur le long cours. S'il est essentiel de continuer les recherches pour soulager les malades et ralentir les pathologies neurodégénératives, entre autres, il n'est pas certain que des molécules actives chez ces malades auraient le moindre effet chez des personnes saines. En revanche, même chez les malades, le rôle positif d'un environnement stimulant est de plus en plus pris en compte. Et si un tel environnement, était, tant chez les personnes saines que chez les malades, le meilleur stimulant cérébral ?

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012

Abonnez-vous à POUR LA SCIENCE

Et restez au cœur de l'actualité scientifique internationale !





EXCEPTIONNEL
2 numéros spéciaux de *Pour la Science* Offerts !
À choisir parmi la sélection ci-dessous

Pour la Science (12 numéros)
+ *Dossier Pour la Science* (4 numéros)

1 an • 76 € seulement
au lieu de ~~102,70 €~~

OFFRE EXCEPTIONNELLE « NUMÉRO SPÉCIAL » SCIENCE

Bulletin à découper ou à photocopier et à retourner accompagné de votre règlement dans une enveloppe non affranchie à : Service abonnements • Pour la Science • Libre réponse 90 382 • 75281 Paris Cedex 06

❑ **Oui, je m'abonne 1 an et reçois 12 n°s de *Pour la Science* + 4 n°s de *Dossier Pour la Science* au prix de 76 €** (au lieu de ~~102,70 €~~, prix de vente au numéro). Je bénéficie également des versions numériques sur www.pourlascience.fr

* Offre valable en France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter au prix de l'abonnement : Europe 16 € – autres pays 35 €.

+ En cadeau, à l'occasion de la sortie du nouveau numéro spécial de *Pour la Science*, je choisis 2 précédents numéros parmi les titres suivants :



❑ N° 326 - 077326			❑ N° 364 - 077364	❑ N° 373 - 077373	❑ N° 385 - 077385	❑ N° 397 - 077397	❑ N° 409 - 077409
Déc. 2004	Déc. 2005	Déc. 2006	Nov. 2007	Nov. 2008	Nov. 2009	Nov. 2010	Nov. 2011

Retrouvez tous les numéros parus sur www.pourlascience.fr

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

_____@_____

J'indique mes coordonnées :

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

CP : _____ Ville : _____

Pays : _____ Tél. (facultatif) : _____

Je choisis mon mode de règlement :

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

❑ Par carte bancaire

Numéro _____

Date d'expiration _____ Signature obligatoire

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

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 ❑.**

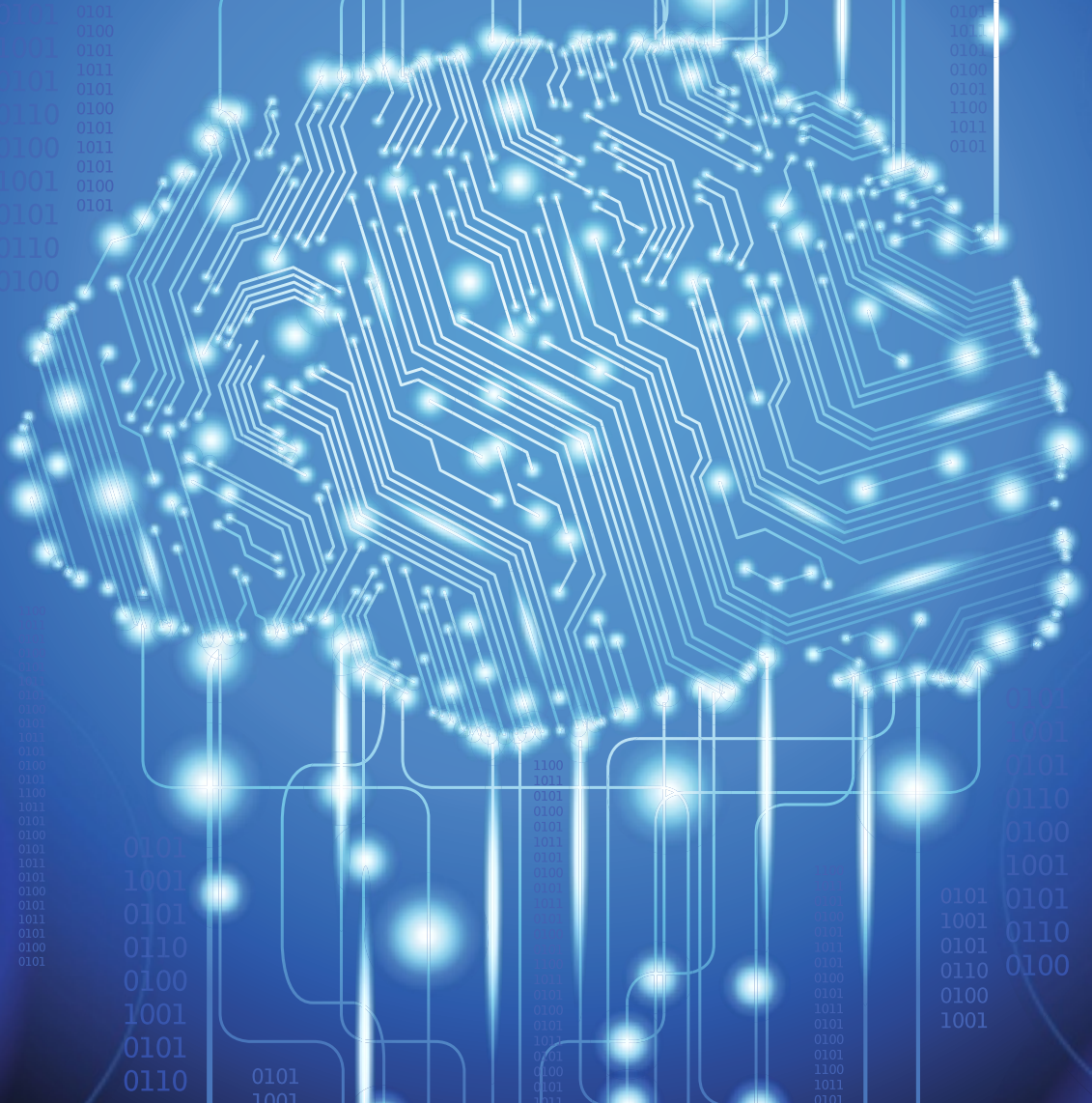
PLS422 Offre réservée aux nouveaux abonnés valable jusqu'au 31.01.2013

La conscience

Comment la déceler ?

Olivia Gosseries et Steven Laureys

Grâce à des techniques d'imagerie cérébrale mieux adaptées, on détecte des signes de conscience chez des personnes qui ne communiquent pas. Peut-être saura-t-on bientôt repérer le moment où émerge la conscience.



Qu'est-ce que la conscience ? Répondre à cette question apparemment anodine reste un défi notamment pour les neuroscientifiques. Chacun a une intuition de ce que signifie ce terme, mais le définir reste d'une autre envergure. La réponse de saint Augustin à qui l'on demandait de définir le temps pourrait s'appliquer à la conscience : « Si personne ne m'interroge, je le sais ; si je veux répondre à la demande, je l'ignore. » Outre sa définition, la conscience soulève d'innombrables questions : quand naît-elle chez l'enfant ? Comment la déceler chez le sujet qui a sombré dans le coma ?

S'il faut tenter une définition, disons que la conscience correspond à ce que nous perdons lorsque nous nous endormons profondément et ce que nous récupérons quand nous nous réveillons. Toutefois, on s'accorde à dire que la conscience présente deux composantes indispensables : l'éveil et la perception consciente. L'éveil se caractérise par une ouverture prolongée des yeux et est sous-tendu par l'activation du tronc cérébral ainsi que de ses projections vers le thalamus et le cortex. La perception consciente correspond à l'ensemble des expériences subjectives présentes, passées et futures. Elle est définie au plan clinique par des comportements volontaires tels qu'une réponse à la commande ; elle dépend de l'activité du cortex frontal et pariétal, encore nommé réseau fronto-pariétal, et de ses connexions avec le thalamus, une aire cérébrale profonde, relais central des informations distribuées aux différentes aires cérébrales. La conscience résulte donc de l'interaction des activités du cortex cérébral, du tronc cérébral et du thalamus.

L'éveil et la perception consciente vont généralement de pair. Par exemple, quand nous nous endormons, ces deux composantes diminuent progressivement. Pourtant, ce n'est pas le cas durant le sommeil paradoxal (c'est-à-dire la principale période des rêves) où nous sommes relativement conscients, mais pas éveillés, ou encore dans certains états pathologiques, tels que les crises d'épilepsie, le somnambulisme ou encore le syndrome d'éveil non répondant (état végétatif), sur lequel nous reviendrons, et où nous sommes plus éveillés que conscients.

La perception consciente comporte deux versants : le niveau et le contenu. Le premier se rapporte à la question : « Cette personne est-elle consciente ? », alors que le second porte sur la question : « Cette personne est consciente, mais de quoi ? » Le niveau de conscience se caractérise par la conscience d'un flux toujours changeant d'états mentaux spécifiques, alors que les contenus de la conscience sont des états transitoires dont nous sommes conscients à chaque instant. Le contenu de la conscience peut être interne ou externe. La conscience externe, c'est-à-dire celle de l'environnement, est associée à une expérience vécue au travers des différentes modalités sensorielles (vision, audition, odorat, etc.). La conscience interne se réfère aux processus mentaux qui ne requièrent pas la médiation de stimulus sensoriels externes, et inclut par exemple les pensées spontanées, le discours intérieur, la rêverie et l'imagerie mentale.

Les états de conscience altérée

Il existe plusieurs états de conscience altérée : le coma, l'état végétatif, l'état de conscience minimale. Nous allons les décrire rapidement avant d'examiner comment les résultats récents issus de l'étude de ces états, mais aussi d'une activité cérébrale négligée jusqu'à présent, l'état de repos, permettent de préciser la définition de la conscience.

Commençons par le coma. Après une lésion cérébrale aiguë qui peut être d'origine traumatique (un accident) ou non traumatique (un arrêt cardiaque), le patient perd connaissance et sombre dans le coma. Si les lésions cérébrales sont trop importantes, le patient décède dans les jours qui suivent (mort cérébrale).

Depuis le développement des techniques de ventilation mécanique dans les années 1950, la définition de la mort est passée d'une mort cardiaque, définie par une cessation des fonctions respiratoires et cardiaques, à une mort cérébrale. La mort cérébrale, ou le coma dépassé, implique la perte irréversible de toutes les fonctions cérébrales. On observe parfois chez ces patients des mouvements ralentis provoqués par une activité cérébrale réflexe résiduelle.

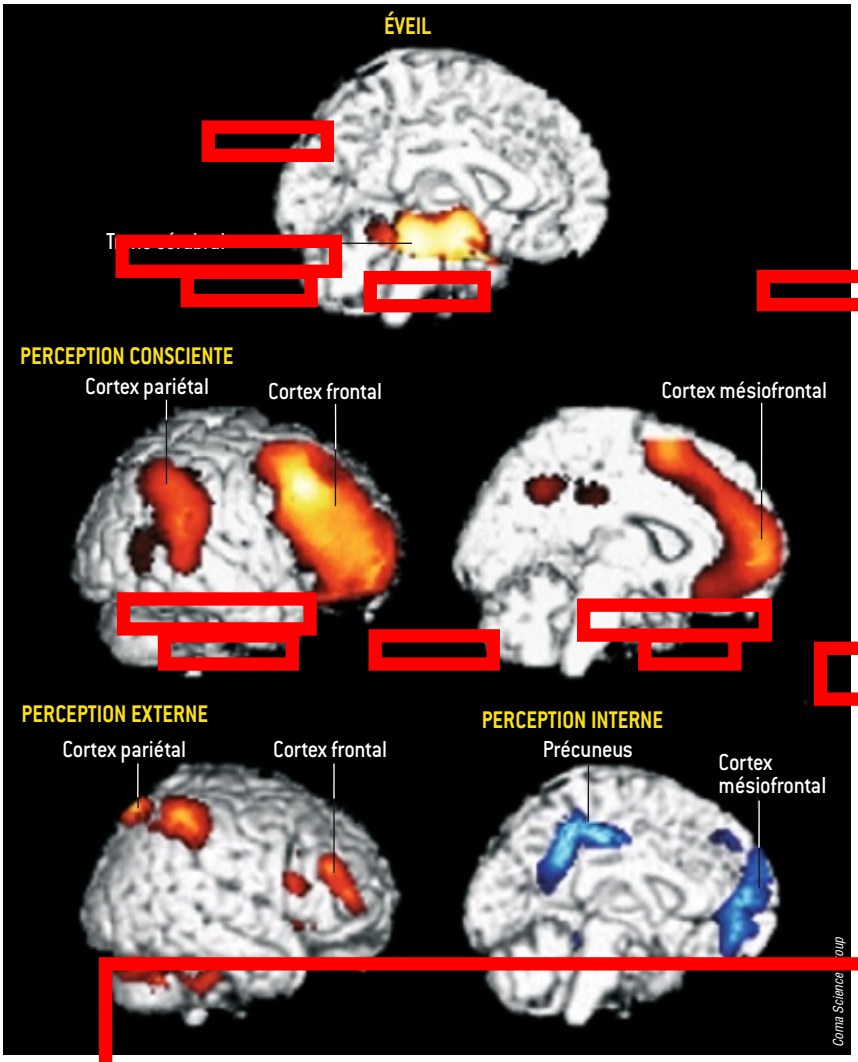
Le coma se caractérise par une absence totale d'ouverture des yeux et une absence de conscience de soi et de l'environnement. Cette pathologie résulte d'une atteinte

L'ESSENTIEL

- Il existe plusieurs niveaux de conscience possibles après un accident cérébral.
- On distingue des états de conscience où le sujet n'est ni éveillé ni conscient (coma), où il est éveillé, mais non conscient (éveil non répondant), et où il est éveillé et soit partiellement conscient (état de conscience minimale), soit totalement conscient (syndrome locked-in).
- Mais les nouvelles techniques d'exploration du cerveau révèlent que des sujets apparemment non conscients perçoivent dans certains cas les stimulus venant de l'extérieur.
- En outre, la stimulation profonde du thalamus semble efficace chez certains patients pour restaurer une conscience normale.

importante du tronc cérébral et du cortex cérébral. Le coma qui présente les mêmes caractéristiques cliniques que la syncope s'en distingue par sa durée : on parle de coma si l'état se prolonge au-delà d'une heure. Les fonctions autonomes (respiration, thermorégulation, etc.) sont diminuées, ce qui nécessite généralement une aide respiratoire. Le sujet dans le coma ne présente aucune réaction volontaire, même s'il peut parfois réagir à des stimulations douloureuses, et si des mouvements réflexes persistent. En général, le patient qui survit reprend graduellement une activité consciente (état de conscience minimale) qui se poursuit souvent par une période d'amnésie post-traumatique transitoire au cours de laquelle il reste confus. Dans la majorité des cas, le patient récupère en quelques semaines et peut ensuite suivre une rééducation. Mais dans certains cas, il reste dans un état d'éveil non répondant ou de conscience minimale pendant plusieurs mois, voire plusieurs années ou décennies.

En quoi consiste le syndrome d'éveil non répondant ? Cet état a également été nommé état végétatif, syndrome apallique ou encore coma vigile : la pluralité de ses qualificatifs tient sans doute en partie à la difficulté de le définir. Il se caractérise par une ouverture des yeux en absence de toute conscience de soi ou de l'environnement. Les fonctions autonomes sont préservées et la respiration s'effectue généralement sans assistance technique. Ces patients ne parlent pas de façon intelligible, et ne répondent pas quand on les interroge, mais ils peuvent manifester une variété de mouvements réflexes tels que grincer des dents, bouger les yeux, avaler, bâiller, pleurer et sourire. Quand cet état dure plus d'un mois après l'accident, on parle d'état végétatif persistant. Après 12 mois, si la cause du coma est un traumatisme crânien, ou après trois mois pour les causes non traumatiques, on parle d'état végétatif permanent.



1. LA CONSCIENCE qui implique éveil et perception consciente nécessite l'activation de plusieurs aires cérébrales. Le tronc cérébral est nécessairement activé durant l'éveil. Quant à la perception consciente, elle est associée à l'activation du réseau fronto-pariétal *(au milieu à gauche, activation en surface et, à droite, activation au cœur du cerveau)*. Elle présente deux composantes, la perception externe et la perception interne. Le réseau neuronal impliqué dans la perception externe, ou conscience de l'environnement, comprend notamment le cortex frontal et le cortex pariétal, essentiellement dans les parties latérales. Le réseau neuronal impliqué dans la perception interne, ou conscience de soi, correspond au réseau du mode par défaut, c'est-à-dire à l'activité enregistrée au repos, en l'absence de toute tâche cognitive volontaire. Cette activité concerne notamment le précuneus et le cortex mésiofrontal.

Éveillés, mais non conscients

Toutefois, on évite d'utiliser ces deux termes qui sont péjoratifs, et c'est pourquoi nous avons récemment proposé le terme de syndrome d'éveil non répondant. Cette dénomination, d'une part, évite la connotation négative associée au terme végétatif (qui tend à assimiler les patients à des légumes), et, d'autre part, rappelle qu'il ne faut pas sous-estimer les fonctions cognitives résiduelles de ces sujets (nous verrons que, dans certains cas, ils sont potentiellement conscients sans être en mesure de communiquer). Ce nouveau terme illustre le fait que ces patients sont éveillés, mais ne présentent que des comportements réflexes aucunement liés à des réponses volontaires.

Examinons maintenant l'état de conscience minimale. C'est une entité clinique qui se manifeste par des signes de conscience élémentaires et fluctuants. Ces

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012

patients sont par exemple capables de répondre à un ordre verbal ou écrit, d'émettre des verbalisations intelligibles, de suivre visuellement du regard et de localiser des stimulations douloureuses (dites nociceptives). Ils présentent également des comportements émotionnels adaptés : ils sourient ou pleurent. Toutefois, ces réactions doivent être reproductibles pour que l'on puisse en conclure que l'action est volontaire. Les patients sont donc éveillés et leur conscience fluctue, mais ils restent incapables de communiquer pour exprimer leurs pensées.

Le pronostic de ces patients est meilleur que celui des patients en état d'éveil non répondant. Récemment, nous avons défini un état de conscience minimale « moins » et un autre état de conscience minimale « plus ». Le premier se caractérise par des signes primaires de conscience qui ne relèvent pas du langage (le sujet est, par exemple, capable de suivre des yeux un objet qu'on lui montre), alors que le second se définit par la présence d'une compréhension verbale, c'est-à-dire qu'il peut, par exemple, bouger un doigt si on le lui demande. Tout comme le syndrome d'éveil non répondant, l'état de conscience minimale peut être transitoire, chronique ou permanent.

Enfin, le syndrome locked-in, ou syndrome de verrouillage, d'enfermement ou pseudocoma, n'est pas à proprement parler un état de conscience altérée, mais peut facilement être confondu avec les entités mentionnées précédemment. Dans le coma, le sujet n'est pas éveillé et n'est pas conscient. Dans l'état non répondant, le sujet est éveillé, mais non conscient. Dans l'état de conscience minimale, il est éveillé et semble présenter une ébauche de conscience. Dans le syndrome locked-in, le sujet est éveillé et conscient. Ce syndrome se caractérise par une tétraplégie (paralysie des quatre membres) et une anarthrie (impossibilité d'articuler des sons) provoquées par une lésion au niveau du tronc cérébral : les connexions entre les voies neuronales motrices qui relient le cortex à la moelle épinière sont interrompues. Bien que ces patients ne puissent pas bouger, leurs sensations restent intactes et ils sont tout à fait conscients.

Le livre de Jean-Dominique Bauby *Le scaphandre et le papillon* et son adaptation cinématographique illustrent ce syndrome. Les mouvements des yeux représentent le principal moyen de communication,

voire le seul. Parfois, l'extrémité d'un doigt peut également servir à communiquer. Mais, contrairement à ce que l'on croit généralement, la qualité de vie de ces personnes ne semble pas inférieure à celle de la population générale lorsqu'elle est évaluée d'après des questionnaires standards.

Dès lors, on mesure la difficulté d'évaluer le niveau de conscience de sujets présentant de graves lésions cérébrales, alors même que cette évaluation revêt une importance essentielle en raison des implications en termes de pronostic et de décisions thérapeutiques, mais également de décisions médico-légales et d'approches éthiques.

Comment évaluer le niveau de conscience ?

Même si l'évaluation comportementale reste la méthode de choix pour réaliser un diagnostic clinique, nous avons montré qu'elle n'est pas toujours facile à appliquer : nous avons mis en évidence la difficulté à laquelle le personnel soignant est

Qu'est-ce que la conscience ?

Plusieurs théories de la conscience humaine postulent que la conscience émerge dans le cerveau grâce à un échange d'information caractérisé par une diffusion globale, à tout le réseau neuronal impliqué dans la conscience, et une intégration de cette information par ce réseau. Selon Stanislas Dehaene, qui dirige l'Unité de neuro-imagerie cognitive INSERM-CEA, et Lionel Naccache, à l'Hôpital de la Pitié-Salpêtrière, qui ont proposé une théorie de l'espace de travail neuronal global *(Global neuronal workspace)*, l'information diffuse dans un espace neuronal global [illegible] les cortex fronto-pariétaux, ce qui permettait l'émergence de l'état conscient.

Pour Giulio Tononi, de l'Université de Wisconsin, à la fois difficile à [illegible] Madison, et sa théorie de l'intégration de l'information, chaque expérience consciente doit être, d'une part, différenciée, c'est-à-dire reconnaissable parmi une multitude d'autres expériences possibles, et, d'autre part, intégrée et unifiée, ce qui implique l'existence d'interactions causales au sein du cerveau. Cette théorie propose également une évaluation mathématique du niveau de conscience, qui devra être validée empiriquement. Si la connectivité au sein du cerveau est perturbée, on observe une perte de conscience, comme dans le sommeil profond, l'anesthésie, l'épilepsie et l'état d'éveil non répondant (aussi nommé état végétatif). Ces différents états présentent tous *in fine* un syndrome de déconnexion cérébrale.

D'un point de vue comportemental, la conscience reste difficile à [illegible] chez les patients en état de conscience altérée, car, pour avoir accès à la conscience, il faut pouvoir communiquer. Cette situation est similaire pour les nouveau-nés, les personnes âgées démentes et les animaux. Durant ces 20 dernières années, de nombreuses études ont cependant montré que la plupart des animaux sont dotés d'une conscience.

Par exemple, il a été montré que les chimpanzés apprennent à leur progéniture à fabriquer des outils pour casser des noix, tout comme les grands singes, les dauphins, les cochons, les éléphants et les pies se reconnaissent dans un miroir. [illegible] de soi que les enfants réussissent vers l'âge de 18 mois.

Il semble donc, comme Darwin l'affirmait déjà, qu'entre la conscience chez l'homme [illegible] tres espèces animales, il y ait plus une différence de degré qu'une différence de nature.

LES AUTEURS




Olivia GOSSERIES, chargée de recherche FNRS, est neuropsychologue dans le *Coma Science Group* au Centre du cyclotron et Département de neurologie, à l'Université de Liège, en Belgique.

Steven LAUREYS, directeur de recherche FNRS, dirige le *Coma Science Group*.

confronté lorsqu'il lui faut distinguer un comportement réflexe d'un comportement volontaire. On aboutit à des erreurs diagnostiques dans environ 40 pour cent des cas, quand le diagnostic est réalisé sans l'appui d'échelles standardisées fiables.

Une récente méta-analyse préconise l'utilisation de l'échelle de récupération du coma nommée *Coma Recovery Scale-Revised* mise au point par Joseph Giacino, aux États-Unis, en 2004, pour évaluer le niveau de conscience de ces patients. Cette échelle permet de rechercher systématiquement la présence de comportements non réflexes, par exemple des réponses volontaires faisant suite à une commande verbale. On peut aussi demander aux sujets de suivre du regard un objet qu'on leur présente. Toutefois, il est préférable de demander aux patients de suivre du regard un miroir dans lequel ils se voient que de suivre un objet quelconque. Ainsi, nous avons montré, dans une étude, que 29 pour cent des sujets auraient été diagnostiqués en état d'éveil non répondant sans l'utilisation du miroir (ils ne suivent pas un objet quelconque, mais suivent un miroir). Il est vraisemblable qu'ils sont plus attentifs, car ils se voient dans le miroir.

Ainsi, de très nombreuses expériences confirment que des sujets non répondants ou dans un état de conscience minimale présentent, quand on utilise des méthodes appropriées, plus de signes de conscience que ne le laissent penser les tests classiques d'évaluation de la conscience. Par ailleurs, divers facteurs compliquent encore le diagnostic, mais doivent être pris en compte lors de l'évaluation clinique de la conscience : l'effet sédatif de certains médicaments, la présence d'infections et les complications médicales. Malgré des examens cliniques réalisés dans les meilleures conditions possibles, on peut sous-estimer l'état de conscience de certaines personnes parce que nous devons nous contenter d'observer les comportements moteurs en réaction à des stimulus extérieurs et qu'il est impossible d'avoir accès à la conscience interne des patients qui ne communiquent pas.

C'est pourquoi les techniques de neuro-imagerie sont de plus en plus utilisées, car non seulement elles permettent d'évaluer l'étendue des lésions structurelles cérébrales, mais aussi de mesurer l'activité cérébrale au repos, lors de stimulations sensorielles et pendant des tâches d'imagerie mentale. Nous allons voir pourquoi l'imagerie cérébrale pourrait aider les cliniciens et les chercheurs à préciser l'état de conscience des personnes qui sortent du coma.

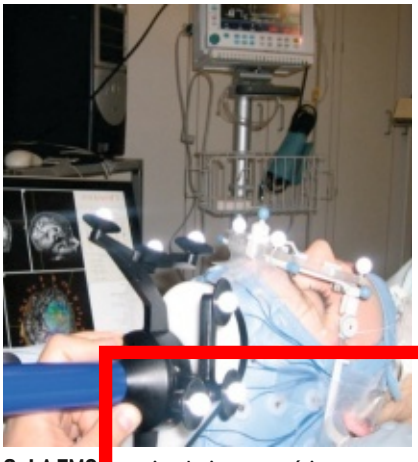
L'apport de la neuro-imagerie

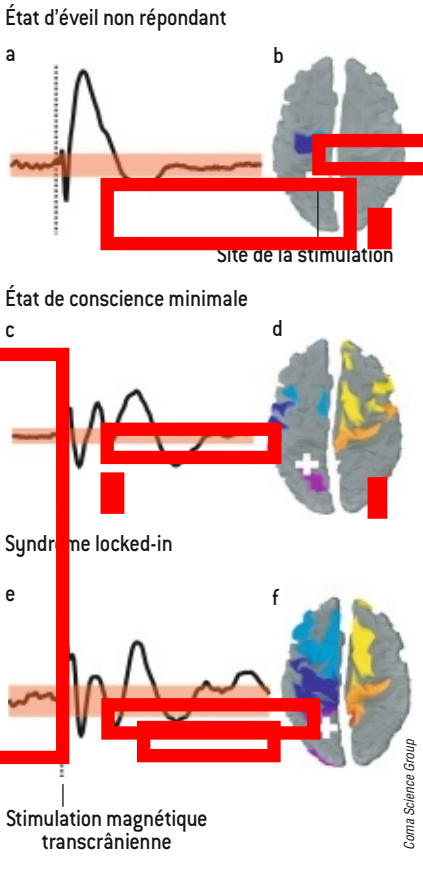
Pour évaluer les lésions structurelles, on utilise diverses méthodes d'imagerie. L'imagerie par résonance magnétique par tenseur de diffusion a révélé des altérations étendues de la substance blanche dans le cerveau des patients en état de conscience altérée. On a également observé des lésions sous-corticales et thalamiques de la substance blanche plus importantes chez les sujets en état d'éveil non répondant que chez les patients en état de conscience minimale.

Par ailleurs, l'équipe de Nicholas Schiff, de la Faculté de médecine Weill Cornell, à New York, a constaté chez un patient ayant émergé de l'état de conscience minimale après 19 ans une repousse des axones (qui constituent la substance blanche) au niveau du précuneus (dans le cortex pariétal). Le précuneus est une aire cérébrale impliquée notamment dans les processus cognitifs de haut niveau, qui semble en outre jouer un rôle important dans la conscience.

Pour préciser le rôle du précuneus, les neuroscientifiques utilisent la tomographie par émissions de positons, TEP, et l'IRM fonctionnelle. Les premières études réalisées au moyen de la TEP ont montré que le métabolisme cérébral diminue notablement chez les patients en état de conscience altérée (rappelons que la TEP utilise un marqueur radioactif qui permet de mesurer la consommation du glucose, ce qui reflète l'activité du cerveau). Il a ensuite été montré que ces patients présentent plus particulièrement un déficit métabolique dans le réseau fronto-pariétal et le thalamus alors que les structures sous-corticales et le tronc cérébral restent relativement préservés.

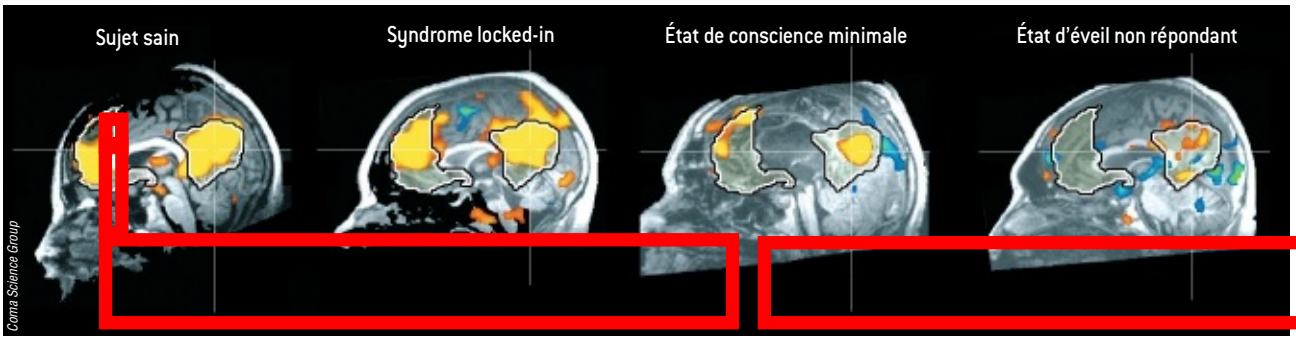
Des études chez des sujets sains éveillés, durant le sommeil et au cours d'une anesthésie générale, ont également confirmé le rôle du réseau fronto-pariétal dans la genèse de la conscience. Au sein de ce réseau, le précuneus semble jouer un rôle primordial, notamment car c'est la région la plus endommagée chez les patients en état de conscience altérée. De





2. LA TMS, ou stimulation magnétique transcrânienne, donne des profils d'activation différents selon l'état de conscience. Chez un sujet en état d'éveil non répondant, on observe une brève activation juste après la stimulation *(a)*, mais elle disparaît rapidement et reste très localisée *(b, en bleu)*. Dans l'état de conscience minimale, l'activité électrique se prolonge dans le temps *(c)*, et se propage plus loin *(d)*. Dans le syndrome locked-in, l'activité se prolonge encore plus *(e)* et se propage dans tout le cerveau *(f)*. Ce dernier schéma d'activation cérébrale par la TMS est identique à celui d'un sujet sain.

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012



3. LE RÉSEAU DU MODE PAR DÉFAUT reflète l'activité cérébrale spontanée *(en jaune)*, sans stimulus externes. Chez les sujets sains, ce réseau est généralement entièrement activé. Chez les sujets présentant un syndrome locked-in, l'activation est identique à celle d'un sujet sain. Le réseau est moins activé chez les sujets en état de conscience minimale, et l'activité est quasi nulle chez les personnes en état d'éveil non répondant.

surcroît, nous avons pu suivre un patient en état d'éveil non répondant chez qui il n'y avait plus de connexions entre le réseau fronto-pariétal et le thalamus. Quand il a recouvré la conscience, nous avons observé ces connexions réapparaître.

La stimulation profonde du thalamus

Ainsi, les connexions entre le cortex, le thalamus et le tronc cérébral seraient indispensables à la conscience. Une étude réalisée par N. Schiff et ses collègues, l'a confirmé : chez un patient en état de conscience minimale, ils ont implanté une électrode profonde dans le thalamus de chaque hémisphère, et y ont fait passer un courant électrique.

Cette stimulation cérébrale profonde a stimulé la reconnexion du thalamus et du cortex cérébral, et a permis au sujet de prononcer des phrases plus intelligibles. La méthode est certes invasive, puisqu'elle nécessite l'implantation d'électrodes profondes, mais ce type de stimulation donne de bons résultats dans le traitement de certaines pathologies (la maladie de Parkinson, par exemple) et semble efficace chez certains patients en état de conscience modifiée.

Plus récemment, les neuroscientifiques se sont intéressés au réseau du mode par défaut : il représente l'activité de notre cerveau quand nous sommes éveillés, mais au repos, et est inhibé au moment où nous réalisons des tâches précises. Ce réseau semble impliqué dans les processus internes tels que les pensées spontanées, le discours intérieur, la mémoire épisodique et les représentations de soi. Il comprend notamment le précuneus, les jonctions temporo-pariétales et le cortex préfrontal.

Avec nos collègues, nous avons montré que ce réseau du mode par défaut est inactif chez les personnes en état de mort cérébrale et peu actif chez les sujets en état d'éveil non répondant. Les patients en état de conscience minimale montrent quant à eux une activité cérébrale similaire à celle observée chez les sujets contrôles, mais une connectivité fonctionnelle plus importante du précuneus avec les autres aires cérébrales que les sujets en état d'éveil non répondant. Ces données ont été confirmées récemment par une étude en tomographie par émission de positons réalisée dans notre équipe : le niveau de conscience augmente avec l'activité de ce réseau.

La stimulation magnétique transcrânienne combinée à l'électroencéphalographie est une autre technique qui permet de stimuler le cerveau et d'enregistrer directement l'activité électrique qui en découle. Cette nouvelle méthode nous a permis très récemment, en collaboration avec l'équipe de Marcello Massimini et de Mario Rosanova, de l'Université de Milan, de distinguer des patients en état d'éveil non répondant et d'autres en état de conscience minimale. Chez les premiers, l'activité cérébrale déclenchée par la stimulation était toujours la même (identique aux ondes lentes enregistrées durant le sommeil), disparaissait rapidement et restait localisée au site de stimulation.

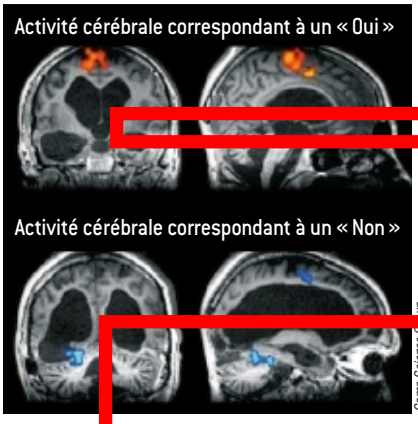
Ce résultat suggère que ces patients présentent un syndrome de déconnexion cérébrale. En revanche, chez les patients en état de conscience minimale, l'activation initiale enregistrée sur le site de stimulation est suivie d'une séquence complexe d'ondes cérébrales qui se propagent aux aires corticales adjacentes, comme on l'observe chez les patients présentant un syndrome locked-in *(voir la figure 2)*. Chez tous les patients qui récupèrent progressivement une conscience normale, on observe un rétablissement d'interactions cérébrales rapides et à longue distance.

Les études réalisées en tomographie par émission de positons et en IRMf ont montré qu'en réponse à des stimulus externes (auditif, visuel ou tactile), les personnes en état d'éveil non répondant présentent une activité cérébrale uniquement dans les cortex sensoriels primaires. Ces îlots d'activation sont déconnectés de l'ensemble du réseau fronto-pariétal. Toutefois, d'autres études ont révélé que certains patients en état d'éveil non répondant présentent une activation cérébrale étendue jusqu'aux cortex associatifs multimodaux. Ce schéma d'activation laisse présager une évolution favorable pour le patient, et s'observe souvent chez les patients en état de conscience minimale.

Le rôle essentiel des connexions à longue distance

Au moyen de l'électroencéphalographie, qui présente une meilleure résolution temporelle, nous avons constaté des anomalies des connexions cérébrales rétrogrades (allant du cortex frontal au cortex temporal), chez les patients en état d'éveil non répondant à qui l'on fait entendre des sons simples. En revanche, les réponses cérébrales des patients en état de conscience minimale sont similaires à celles mesurées chez les sujets contrôles.

Les patients en état de conscience minimale semblent donc percevoir les stimulations auditives, visuelles et tactiles, alors que l'activation cérébrale observée



4. POUR COMMUNIQUER avec un patient en état de conscience minimale, on commence par lui demander d'imaginer qu'il joue au tennis *(en haut, l'aire motrice supplémentaire s'active)* ou qu'il se promène chez lui *(en bas, l'hippocampe s'active)* et l'on enregistre l'activité cérébrale correspondante. Ensuite, on lui dit que, pour répondre « Oui » à une question, il doit s'imaginer jouer au tennis ; et pour répondre « Non », il doit imaginer qu'il se déplace chez lui. En suivant son activité cérébrale par IRM, on peut savoir quelles sont ses réponses aux questions qu'on lui pose.

chez la majorité des patients en état d'éveil non répondant ne semble pas suffisante pour déclencher une conscience des stimuli externes. Comment mettre en évidence une telle perception des stimulus extérieurs chez les sujets en état de conscience minimale ? Pour ce faire, nous avons utilisé l'IRM fonctionnelle et des tâches simples d'imagerie mentale.

En collaboration avec l'équipe de Adrian Owen de l'Université de Cambridge, nous avons demandé à 54 patients en état de conscience altérée, d'une part, de s'imaginer en train de jouer au tennis et, d'autre part, de s'imaginer parcourir les pièces de leur maison alors que leur activité cérébrale était enregistrée par IRM. Cinq d'entre eux ont montré une activité cérébrale cohérente avec les tâches demandées (activation du cortex prémoteur lors de l'imagerie motrice et du cortex parahippocampique lors des déplacements mentaux dans l'espace). Pourtant deux de ces cinq personnes n'avaient jamais montré aucun signe comportemental de conscience.

Répondre sans geste ni parole

Ce modèle a ensuite été adapté : après avoir enregistré l'activité cérébrale correspondant à ces deux tâches mentales *(voir la figure 4)*, on demandait au sujet de s'imaginer jouer au tennis pour répondre « Oui » à une question et de s'imaginer parcourir sa maison pour répondre « Non ». Le patient étudié qui était en état de conscience minimale a ainsi pu répondre correctement à des questions en modulant son activité cérébrale.

Une autre récente étude utilisant l'électroencéphalographie a également permis de montrer que trois patients diagnostiqués en état d'éveil non répondant présentaient une activité cérébrale particulière quand on leur demandait de s'imaginer en train de serrer le poing ou de bouger les orteils. Ainsi, on a détecté une activité cérébrale spécifique en réponse à une commande particulière. Le niveau de conscience de ces patients diagnostiqués en état d'éveil non répondant a été revu. Comme les dispositifs permettant ces examens par électroencéphalographie sont transportables, on peut imaginer les utiliser pour déterminer l'état de conscience d'un patient accidenté.

Ces données permettront de prendre des décisions plus pertinentes en matière d'évaluation de l'état du sujet, de traitement, voire d'arrêt des soins. Les résultats obtenus en neuro-imagerie suscitent quelques considérations concernant la pratique clinique. D'une part, nous devons être prudents lorsque nous nous adressons aux patients ou à l'entourage, puisqu'ils sont potentiellement conscients. D'autre part, nous devons envisager d'administrer un traitement analgésique à ces patients, s'ils présentent un comportement traduisant un inconfort. Nous avons récemment proposé une échelle de nociception (*Nociception Coma Scale-Revised*) pour évaluer les signes de douleur chez ces sujets incapables de communiquer après un coma.

De plus, les nouvelles technologies nous conduisent à remettre en question le diagnostic reposant uniquement sur des comportements observés, car certains patients sont capables de montrer qu'ils sont conscients et même de communiquer par l'intermédiaire des techniques d'imagerie cérébrale fonctionnelle. C'est pourquoi notre groupe propose des bilans diagnostiques, pronostiques et thérapeutiques d'une semaine au Centre hospitalo-universitaire de Liège, en Belgique, pour les patients en état de conscience altérée. Nous essayons d'identifier le niveau de conscience de ces patients, et, s'ils présentent des signes de conscience, nous cherchons un moyen de communication fiable avec eux pour qu'ils puissent exprimer leurs émotions et leurs souhaits, mais aussi pour déterminer leur qualité de vie. L'étape suivante consistera à définir leurs compétences en termes de décisions concernant leur avenir.

Par ailleurs, l'étude de ces patients présente également un intérêt scientifique dans l'élucidation des corrélats neuronaux de la conscience humaine. La conscience ne semble pas être binaire, c'est-à-dire un phénomène de tout ou rien, mais présenterait plutôt une continuité non linéaire avec des transitions, comme observé chez les patients en état de conscience altérée. Qui plus est, aujourd'hui, grâce à la neuro-imagerie on perçoit des signes d'une conscience que les évaluations précédentes ne mettaient pas au jour. Ces évolutions nous obligeront sans doute à redéfinir les états de conscience. Comme à cela s'ajoute la possibilité de stimuler le thalamus pour réveiller la conscience, le champ de la conscience présente des frontières sans cesse repoussées.

■ SUR LE WEB

www.comascience.org
www.cyclotron.ulg.ac.be

■ BIBLIOGRAPHIE

M. Rosanova *et al.*, **Recovery of cortical effective connectivity and recovery of consciousness in vegetative patients**, *Brain*, vol. 135(Pt 4), pp. 1308-1320, 2012.

M. Boly *et al.*, **Preserved feedforward but impaired top-down processes in the vegetative state**, *Science*, vol. 332(6031), pp. 858-862, 2011.

S. Laureys *et al.*, **Unresponsive wakefulness syndrome: a new name for the vegetative state or apallic syndrome**, *BMC Medicine*, vol. 8, p. 68, 2010.

M. Monti *et al.*, **Willful modulation of brain activity in disorders of consciousness**, *New England Journal of Medicine*, vol. 362(7), pp. 579-89, 2010.

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012

ACTUELLEMENT EN KIOSQUE

et sur www.pourlascience.fr/editionsnumeriques



Dossier Pour la Science n° 77

Kant déplorait l'absence d'un « Newton du brin d'herbe », mais ce serait supposer que des lois simples suffiraient à rendre compte de la fantaisie du monde végétal ! Imaginez des plantes qui ont besoin du feu pour fleurir, des plantes presque carnivores, des plantes à « sang chaud »... Le monde végétal fait preuve d'une inventivité sans limite que ce dossier vous invite à découvrir.

Parution de octobre / décembre 2012 – Prix : 6,95 €



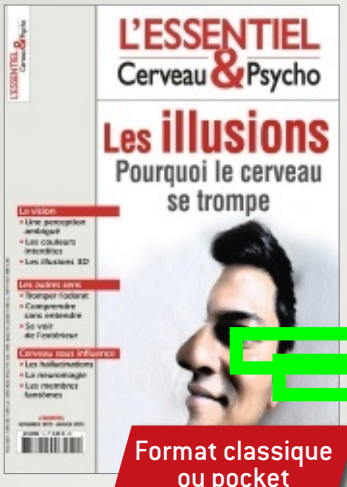
Cerveau & Psycho n° 54

Le développement du langage chez l'enfant est un perpétuel sujet d'étonnement. Chez beaucoup, c'est une progression « normale ». Chez d'autres, un des maillons de cette chaîne complexe se grippe. Alors, l'orthophoniste intervient, mettant en œuvre un apprentissage adapté en fonction de l'âge et du handicap du patient.

À lire également dans ce numéro, le décryptage psychologique de *The Dark Knight Rises* ; L'âge de raison existe-t-il ? ; Les gorilles parlent « bébé », etc.

Parution de novembre / décembre 2012 – Prix : 6,95 €

Format classique ou pocket



L'Essentiel Cerveau & Psycho n° 12

Vision, audition, odorat, toucher... Tous nos sens sont les jouets d'illusions ! Découvrez notamment dans ce numéro les mécanismes des trompe-l'œil ; les couleurs interdites ; pourquoi le temps s'étire ou file selon notre humeur ; comment la magie trompe le cerveau, etc. Si ces anomalies de perception font notre plaisir, elles inspirent également les neuroscientifiques qui étudient le fonctionnement du cerveau lésé.

Parution de novembre 2012 / janvier 2013 – Prix : 6,95 €

Format classique ou pocket

POUR LA SCIENCE

Toujours jeunes ?



Miroslav Radman

L'oxydation des protéines, qui assurent de multiples fonctions vitales, causerait le vieillissement, puis la mort. Protéger ces molécules permettrait peut-être de vieillir moins vite et de rester plus longtemps en bonne santé.

Au cours des 150 dernières années, l'espérance de vie à la naissance a doublé en Europe, passant de 40 à 80 ans environ pour les femmes. Doublera-t-elle à nouveau ? En d'autres termes, vivre deux fois plus longtemps qu'aujourd'hui, et surtout vivre en bonne santé, est-ce un projet scientifique réaliste ? Ce serait un changement important pour l'humanité. Comme souvent, l'idée d'un tel changement suscite la méfiance, voire la peur, et beaucoup l'estiment impossible.

Le vieillissement est une dégradation accélérée des fonctions cellulaires, qui conduit à diverses maladies et se termine par la mort. Il touche presque toutes les espèces : des bactéries à l'homme, le risque de mourir (le taux de mortalité) augmente exponentiellement avec l'âge. Seules quelques rares espèces ne montrent aucun signe de vieillissement : pour des raisons encore mal connues, leur taux de mortalité reste constant avec l'âge (cas de l'hydre *Hydra vulgaris* et de la méduse *Turritopsis nutricula*), voire diminue (cas de la tortue *Gopherus agassizii*) !

Certains prétendent que le vieillissement est complexe, une façon de dire qu'il leur manque les principes de son fonctionnement, le concept clef pour le comprendre. Un tel concept permettrait d'interpréter les données existantes et d'effectuer des prévisions. Il doit être simple et clair – donc facile à invalider s'il est faux.

C'est un tel concept que nous proposons ici. Il concerne les bases moléculaires du vieillissement et des maladies liées à l'âge, qui résulteraient de la détérioration progressive des protéines. En théorie, on peut empêcher cette détérioration, et c'est une piste pour lutter contre le vieillissement et les maladies. Une telle « médecine biologique » aurait un effet préventif sur les maladies chroniques comparable à celui de la vaccination sur les maladies infectieuses, et peut-être plus généralement à celui de l'immunothérapie (une stratégie consistant à stimuler le système immunitaire ou à lui apprendre à reconnaître ce qu'il doit combattre). Nous examinerons l'intérêt de cette voie de recherche et ce que l'on

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012



© George Shelley/Corbis

L'ESSENTIEL

- De multiples théories du vieillissement existent, mais elles en décrivent plus les effets que les causes.
- La principale cause serait l'oxydation des protéines, qui entraînerait leur dysfonctionnement, puis la mort de cellules, des organes et de l'organisme.
- On pourrait lutter contre le vieillissement et les maladies liées à l'âge en protégeant les protéines contre l'oxydation.
- Pour y parvenir, on cherche à produire de nouveaux antioxydants, inspirés de ceux d'organismes résistants.

peut en espérer, avant de nous demander si nous devrions avoir peur de la longévité.

Plusieurs dizaines de « théories » du vieillissement ont été proposées. L'une d'elles le doit aux télomères (du grec *telos*, fin, et *meros*, partie), des séquences d'ADN non codantes situées aux extrémités des chromosomes. Les télomères protègent les chromosomes, mais ils se raccourcissent à chaque division cellulaire, car l'enzyme télomérase, chargée de restaurer leur longueur, n'est pas assez efficace (elle est synthétisée en quantité insuffisante). Ils constitueraient ainsi une horloge biologique. Lorsqu'ils sont trop courts, la cellule cesse de se diviser et dégénère peu à peu. Les études sur les télomères et la télomérase ont valu le prix Nobel de médecine et de physiologie aux biologistes Elizabeth Blackburn, Carol Greider et Jack Szostak en 2009.

D'autres théories associent le vieillissement à l'expression de certains gènes : en les faisant muter chez des vers, des mouches et des souris, on a augmenté la durée de vie de ces animaux parfois d'un facteur deux. L'alimentation aurait également une influence : la restriction calorique semble ralentir le vieillissement.

Cependant, ces théories décrivent chacune un aspect particulier ou une conséquence du vieillissement plutôt que sa cause. Nous verrons que le concept que nous proposons (la détérioration des protéines) pourrait jouer un rôle explicatif et unificateur. L'idée que les altérations des molécules biologiques sont en cause a été énoncée par le biologiste américain Denham Harman en 1956, mais les chercheurs se sont longtemps focalisés sur l'ADN ; ce n'est que dans les années 1980 que l'Américain Earl Stadtman (1919-2008) commence à incriminer les protéines.

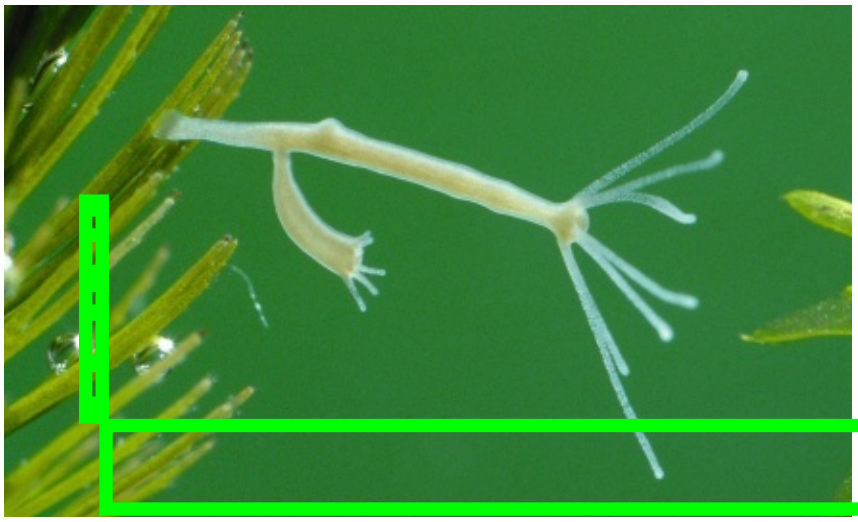
Le vieillissement est accompagné de multiples maladies dégénératives : cancers, ainsi que maladies cardio-vasculaires, neurodégénératives et immunitaires (telles les maladies auto-immunes, où le patient est attaqué par son propre système immunitaire). Leur fréquence augmente avec l'âge de façon exponentielle, quasiment à la même vitesse pour toutes les maladies, comme si elles avaient une cause commune. L'accumulation de certains éléments, tel le goudron des cigarettes dans le cas des cancers du poumon, ne suffit pas à les expliquer toutes (bien qu'elle soit bien sûr un facteur aggravant) : si les non-fumeurs sont globalement moins victimes de ces cancers que les fumeurs, ils sont touchés par la même augmentation de leur fréquence à mesure qu'ils vieillissent.

Mieux vaut prévenir que guérir

Aujourd'hui, si la recherche biomédicale garde l'espoir de mettre au point des médicaments contre ces maladies liées à l'âge, l'enjeu est plus de trouver des molécules qui ralentissent les dégradations que de guérir les malades. La recherche de stratégies de prévention n'est pas assez encouragée et on se contente souvent de méthodes passives : on décourage de consommer tel ou tel produit (cigarette, aliments riches en cholestérol, etc.). De surcroît, les biologistes tentent de comprendre les mécanismes moléculaires responsables des dysfonctionnements. Mais c'est une stratégie qui n'est pas applicable à un stade tardif, le nombre d'altérations moléculaires devenant trop important et leurs interactions trop complexes.

La démarche se situe en amont et consiste à explorer la ou les causes du vieillissement, qui, selon moi, sont simples, similaires d'une espèce à l'autre et susceptibles d'être modulées. Toute vie étant cellulaire, nous devons analyser les mécanismes à l'œuvre à l'échelle de la cellule. Chacune est une usine biochimique autonome, qui produit son énergie et synthétise les molécules nécessaires à différentes fonctions. On sait aujourd'hui que les maladies dégénératives commencent au niveau cellulaire, parfois plusieurs dizaines d'années avant l'apparition des symptômes provoqués par le dysfonctionnement d'un organe. Pour la maladie d'Alzheimer, par exemple, les symptômes surviennent le plus souvent vers 80 ans (50 ans chez les personnes présentant une prédisposition). Or la dégénérescence cellulaire commence bien plus tôt : on a observé ses prémices lors d'autopsies de personnes jeunes (décédées accidentellement et présentant une prédisposition à cette maladie en raison d'antécédents familiaux).

On appelle vieillissement intrinsèque les dégâts cellulaires liés à l'âge, par opposition au vieillissement extrinseque, causé par des facteurs externes (telle l'exposition



© Konrad Wothe/Minden Pictures/Corbis

L'HYDRE *HYDRA VULGARIS* ne montre aucun signe de vieillissement : pour des raisons mal connues, son taux de mortalité ne varie pas avec l'âge. Il n'est pas nul en raison de prédateurs, de maladies… sauf en laboratoire, si ces facteurs sont éliminés).

au Soleil pour la peau). Ses conséquences délétères augmentent exponentiellement avec l'âge au sein des cellules, dont un nombre croissant subit des dysfonctionnements ; l'organe contenant ces cellules, puis l'organisme entier finissent par être perturbés. La complexité de cette avalanche de défauts fonctionnels croît avec l'âge. À l'apparition des symptômes, elle est telle qu'elle interdit d'identifier les mécanismes à l'œuvre et de ralentir (ou encore moins de guérir) les maladies dégénératives. Notons que plus l'organisme est complexe, plus les conséquences du vieillissement le sont aussi, d'où l'intérêt de commencer par des études sur des organismes simples, telles les bactéries.

Les protéines, essentielles à la vie

Si nous ignorons encore de nombreux détails, nous pensons que les molécules en cause dans le vieillissement appartiennent à la grande famille des protéines. La biologie moléculaire est certes dominée par la notion d'information, codée par les séquences de nucléotides dans l'ADN et l'ARN, mais cette information n'est essentielle à la vie que dans la mesure où elle est traduite en protéines (constituées d'acides aminés, dont les séquences correspondent aux séquences de nucléotides). Celles-ci assurent, directement ou indirectement, toutes les fonctions vitales : catalyse des réactions métaboliques (enzymes), défense de l'organisme (anticorps), transport de substances spécifiques (telle l'hémoglobine, qui véhicule l'oxygène)… L'intégrité du génome reste nécessaire, car la vie requiert le renouvellement des protéines et l'adaptation à un contexte changeant : pour répondre à une situation particulière (digestion, stress…), les gènes codant les protéines adaptées s'expriment. Mais cette intégrité dépend elle aussi de protéines, qui réparent en permanence le génome et corrigent les mutations. De façon générale, tout le fonctionnement de la cellule, y compris l'expression des gènes, est assuré par des protéines.

Or la cellule est le siège d'une chimie corrosive omniprésente, nécessaire à son métabolisme, mais qui « attaque » les protéines, perturbe leurs interactions et réduit leurs activités catalytiques *(voir l'encadré page ci-contre)*. Les protéines finissent par se dégrader et assurer de moins en moins efficacement leurs fonctions, ce qui entraîne le vieillissement des cellules et, finalement, leur mort. Les gènes seraient aussi souvent touchés car la machinerie enzymatique qui les réplique et les répare (notamment en corrigeant les mutations) se dégrade, mais l'effet ne serait pas notable : pour que cela influe sur le fonctionnement d'un organe, il faudrait que les deux copies d'un gène portent de altérations délétères, et ce dans la majorité des cellules de cet organe ; on n'a jamais observé une telle quantité de mutations dans le cadre du vieillissement.

Ces dégâts oxydatifs irréversibles sur les protéines seraient la cause chimique fondamentale du vieillissement et de la mort cellulaire. En effet, d'une part, en 1985, E. Stadtman a mis en évidence une corrélation entre l'oxydation des protéines et l'âge. D'autre part, lors des deux dernières années, avec Anita Krisko, de l'INSERM, nous avons montré sur des bactéries et des invertébrés que les dégâts oxydatifs finissent par entraîner la mort cellulaire.

En particulier, la carbonylation des protéines serait une raison majeure du vieillissement : cette forme particulière d'oxydation transforme les groupes C-H de certains acides aminés en groupes C=O. Les acides aminés hydrophiles deviennent alors hydrophobes (sans affinité pour l'eau), ce qui entraîne un mauvais fonctionnement des protéines.

Les dégâts oxydatifs s'accumulent exponentiellement avec l'âge, et ce pour différentes espèces, quelle que soit leur espérance de vie *(voir l'encadré page ci-contre)*. Pourtant, la cellule remplace constamment ses protéines, qui ont pour la plupart une durée de vie très courte (une journée en moyenne, certaines ne durant que quelques minutes par rapport à celle des cellules (de deux à trois semaines en moyenne), et, *a fortiori*, de l'organisme entier ; la variabilité est grande : certaines protéines et cellules durant aussi longtemps que l'organisme.

Des dégâts qui empirent

La cellule décompose les protéines usées et « brûlées » par l'oxydation et en synthétise de nouvelles à partir de l'information contenue dans son ADN. Ces tâches sont elles-mêmes assurées par des protéines vulnérables à l'oxydation. Quand ces dernières sont endommagées ou débordées par des stress oxydatifs successifs ou chroniques, les protéines oxydées s'agrègent et s'accumulent dans les cellules, formant des « décharges biochimiques » visibles au microscope. C'est ce qu'on observe notamment dans les neurones des patients souffrant de la maladie d'Alzheimer et de la maladie de Parkinson. Dès lors, le vieillissement s'accélère.

Plus généralement, de nombreuses maladies dégénératives sont associées à une carbonylation élevée des protéines : la maladie d'Alzheimer, la maladie de Parkinson, la sclérose latérale amyotrophique (aussi nommée maladie de Charcot, elle entraîne une dégénérescence progressive des neurones moteurs et, finalement, la paralysie), le psoriasis (une maladie auto-immune de la peau), le diabète. Ainsi, les

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012

maladies dégénératives auraient pour origine un dysfonctionnement des protéines dû aux dégâts oxydatifs accumulés au fil des ans. Certaines protéines peuvent aussi être dysfonctionnelles en raison de mutations génétiques héritées et, dans ce cas, la maladie survient dès la naissance.

Est-il possible que les dégâts oxydatifs soient la conséquence des maladies, et non leur cause ? Pour conforter notre hypothèse, nous devrons identifier les protéines associées aux différentes maladies et décrire la façon dont leur oxydation explique tout ou partie les symptômes. Une maladie cardio-vasculaire, par exemple, résulte d'une obstruction des artères, causée par une mauvaise évacuation des lipides. C'est un problème métabolique, et comme le métabolisme est orchestré par les protéines, il n'est pas surprenant qu'il soit perturbé par leur dysfonctionnement, mais les mécanismes précis restent mal connus.

Des prédispositions variées

Comment expliquer les différences individuelles de prédisposition aux maladies liées à l'âge ? Le protéome – l'ensemble des protéines d'une cellule – est dit polymorphique, c'est-à-dire qu'il est soumis à de petites variations entre les individus. Or les protéines des uns et des autres ont de grandes différences de sensibilité à l'oxydation. Avec A. Krisko, nous pensons que ces différences résultent du polymorphisme du protéome, lui-même issu des variations du code génétique, et qu'elles expliquent les différences de prédisposition.

En résumé, le vieillissement et les maladies survenant à un âge avancé refléteraient les dégâts oxydatifs subis par le protéome. Les phénotypes deviennent plus complexes et plus délétères avec l'accumulation des dégâts au cours de la vie. Ce concept pourrait expliquer toutes les manifestations du vieillissement, unifiant en quelque sorte les théories proposées. Par exemple, la baisse d'activité des enzymes télomérases (qui explique le raccourcissement des télomères à mesure des divisions cellulaires) serait due à l'oxydation de ces protéines ou de celles nécessaires à leur synthèse. En outre, les oxydants sont produits en grande quantité par diverses activités métaboliques (digestion, respiration…). La restriction calorique et les gènes qu'on fait muter pour allonger la vie de divers animaux influent sur ce métabolisme, et pourraient freiner l'oxydation. Même si les mécanismes n'en sont pas toujours bien compris, plusieurs pistes existent : synthèse d'enzymes fabriquant des composés antioxydants, ralentissement du métabolisme et donc de la production de composés oxydants qu'il entraîne.

La lutte contre le vieillissement et les maladies liées à l'âge passera par plusieurs étapes : développer des mesures quantitatives pour diagnostiquer le dégât oxydatif des protéines de chaque individu ; identifier des protéines particulièrement sensibles à l'oxydation (autrement dit, développer des techniques de « profilage » biomédical pour déterminer la prédisposition de chacun aux maladies, en analysant la sensibilité à l'oxydation de ses protéines) ; isoler des molécules protectrices contre les dégâts oxydatifs chez les organismes qui résistent le mieux ; évaluer par des essais cliniques l'effet de ces molécules sur la régénération moléculaire des cellules, des organes et de l'organisme humain. Examinons ces deux derniers points plus en détail.

LA LUTTE CONTRE L'OXYDATION des protéines nécessitera plusieurs étapes.

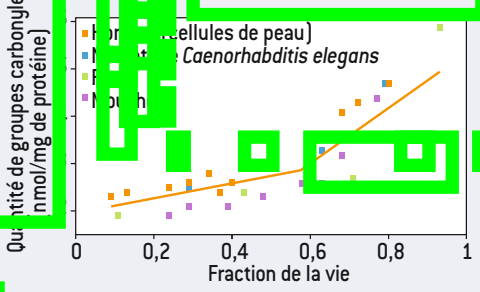
Dans un organisme malade, les « réparations » peuvent être effectuées à trois niveaux : l'organe, la cellule ou les protéines. Parfois, on transplante à un malade un organe sain issu d'un donneur. L'organe du malade était défectueux à cause de la présence de cellules dysfonctionnelles. Une alternative à la transplantation consiste à introduire des cellules saines dans cet organe ; on parle de thérapie cellulaire. Dans certains cas, les tissus se régénèrent seuls : les épithéliums (des tissus tels que la peau) contiennent des cellules souches qui se divisent et se différencient ; mais avec l'âge, ces cellules souches meurent ou ne se divisent plus.

Au lieu de greffer des cellules saines, il serait encore plus intéressant de laisser les cellules en place et d'agir au niveau moléculaire, le plus fondamental. Ainsi, on

L'oxydation des protéines : cause du vieillissement ?

L'organisme humain contient plus de 10 000 milliards de milliards (10^{22}) de protéines, distribuées dans 10^{14} cellules. Les protéines assurent de multiples fonctions vitales : lecture de l'ADN, catalyse des réactions métaboliques, transport de l'oxygène… Elles sont victimes de nombreuses agressions chimiques, notamment par des composés oxydants nommés radicaux libres. Ces derniers portent un ou plusieurs électrons célibataires, qui les rend très réactifs. Ils peuvent [illegible] interaction avec le milieu extérieur (les rayonnements ultraviolets et les polluants par exemple, transforment ces molécules en radicaux libres) ou intérieur : les réactions métaboliques créent de nombreux radicaux libres, notamment lors de la synthèse des molécules d'ATP qui véhiculent l'énergie cellulaire. Dans la cellule, les principaux radicaux libres sont les espèces [illegible] gène, tel l'hydroxyle $OH^{\bullet}$ (le point en exposant désigne l'électron célibataire).

Pendant la jeunesse, les radicaux libres en excès sont neutralisés par des composés antioxydants : enzymes, métabolites (des produits intermédiaires du métabolisme), vitamines… Ainsi, les protéines sont protégées et restent fonctionnelles. Malgré tout, les dégâts oxydatifs s'accumulent peu à peu. Le système de renouvellement des protéines en synthétise de nouvelles à partir des informations contenues dans l'ADN et détruit les molécules abîmées. Mais il est lui-même constitué de protéines et subit des dysfonctionnements, de sorte que l'accumulation devient exponentielle. Les cellules, qui contiennent de plus en plus de protéines oxydées, vieillissent, et meurent. Des organes entiers sont touchés. Et, à la fin, l'organisme meurt…



La carbonylation (une forme d'oxydation des protéines) augmente exponentiellement avec l'âge, tant chez des espèces variées. La mortalité augmentant de la même façon, l'oxydation des protéines serait en cause dans le vieillissement. Lorsqu'elles sont trop carbonylées, les protéines n'assurent plus leur fonction.

D'après [illegible] et al., 1987/Adachi et al., 1987/Starke-Reed et al., 1989/Sohal et al., 1993

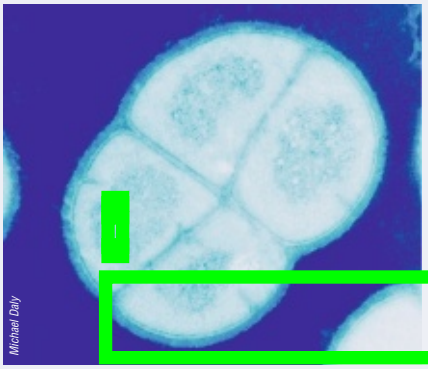
Une fontaine de jouvence dans les organismes robustes ?

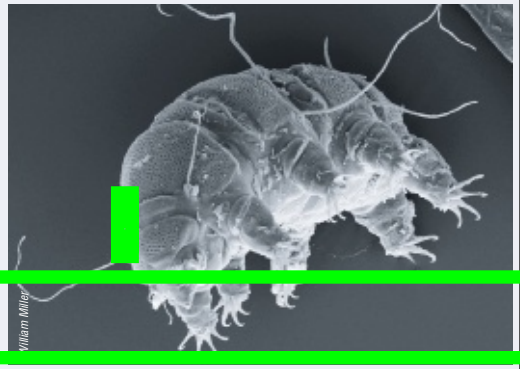
La bactérie *Deinococcus radiodurans* résiste à des rayonnements plusieurs milliers de fois plus intenses que la dose mortelle pour les humains. Des tardigrades, de petits animaux aquatiques) ont subi l'espace, où ils étaient exposés au vide, aux rayonnements (cosmiques, ultraviolets) et à des températures extrêmement basses. Les rotifères bdelloïdes, d'autres animaux aquatiques microscopiques, sont aussi très robustes.

Ces organismes ont attiré l'attention des biologistes qui étudient le vieillissement. Les effets [illegible] quelles ils résistent se traduisent par des attaques sur leurs protéines, notamment *via* la production de composés oxydants. Or c'est également l'oxydation des protéines qui causerait le vieillissement. On cherche alors à identifier les composés chimiques à l'origine de la résistance de ces organismes, dont l'[illegible] dants qui protégeraient les protéines.

On commence seulement à comprendre les mécanismes à l'œuvre et les composés impliqués. En outre, ils semblent varier entre les organismes. Ainsi, les ions manganèse joueraient un rôle dans la résistance de *Deinococcus radiodurans*, en empêchant la formation de certains radicaux libres. Mais les tardigrades et les cellules souches embryonnaires, notamment humaines (où l'oxydation des protéines est si faible qu'elle est quasi indétectable), ne contiennent presque pas de manganèse. Leur résistance à l'oxydation a donc une autre origine.

Ainsi, il nous faudra encore beaucoup de temps pour disposer de cocktails antioxydants efficaces dans l'environnement chimique des cellules humaines. En outre, il faudra prouver que la protection des protéines contre l'oxydation est efficace pour lutter contre le vieillissement d'[illegible] cellules, puis sur des modèles animaux, et peut-être un jour par des études cliniques sur l'homme.





La bactérie *Deinococcus radiodurans (à gauche)* a été surnommée Conan la bactérie, en référence au film *Conan le barbare*, tant elle est résistante. Elle mesure un à deux micromètres. Les tardigrades *(à droite)* des animaux aquatiques d'environ un demi-millimètre, sont aussi particulièrement robustes.

cherche à renouveler les protéines usées, ou plus exactement à stimuler leur renouvellement naturel par les cellules. Pour y parvenir, il faudrait protéger contre les dégâts chimiques le système qui assure ce renouvellement (l'ensemble des protéines qui dégradent les protéines usées et qui « lisent » le génome pour en synthétiser de nouvelles). Ainsi, les cellules fonctionneraient mieux [illegible]

Empêcher l'oxydation

La protection du protéome contre les dégâts oxydatifs pourrait s'effectuer par la consommation d'antioxydants (des composés chimiques qui empêchent la formation des espèces réactives de l'oxygène ou les neutralisent). Il ne faudra pas supprimer totalement les composés oxydants, dont l'activité est parfois nécessaire au métabolisme, mais maintenir le degré d'oxydation des protéines au même niveau que pendant la jeunesse.

Une nouvelle génération d'antioxydants pourrait être inspirée de ceux des organismes robustes, tels la bactérie *Deinococcus radiodurans* et de minuscules animaux nommés tardigrades *(voir l'encadré ci-dessus)*. Ces organismes résistent à des conditions extrêmes (froid, rayonnements...). Ils ne remplacent pas leurs cellules, comme les épithéliums évoqués, mais ils les régénèrent en réparant leurs protéines et leur ADN. Leur robustesse biologique est notamment assurée par un cocktail de métabolites – de petites molécules antioxydantes produites par le métabolisme et qui protègent les protéines contre la corrosion moléculaire. Les cellules robustes ont des molécules protectrices plus nombreuses et plus variées que les cellules humaines. Leur stratégie est donc assez commune dans le monde vivant, mais elle est poussée à l'extrême, ce qui entraîne un coût énergétique élevé. En conséquence, les organismes robustes sont de petite taille (un à deux micromètres pour *Deinococcus radiodurans*, un demi-millimètre pour les tardigrades).

Même après avoir été soumises à d'intenses rayonnements, les protéines de ces organismes restent actives : ces rayonnements transforment certaines molécules en espèces réactives de l'oxygène, mais les protéines des organismes résistants sont protégées. Elles réparent alors l'ADN et recyclent toutes les autres molécules endommagées. Les molécules vitales sont ainsi renouvelées, de sorte que la cellule se régénère, parfois même ressuscite d'un état de « mort clinique » où son métabolisme s'est totalement arrêté pendant un certain temps.

Diverses expériences ont montré que ces métabolites antioxydants pouvaient être utilisés pour protéger les protéines d'autres espèces, y compris l'espèce humaine : de l'extrait de *Deinococcus radiodurans*, ajouté dans le milieu de culture de bactéries *Escherichia coli* de cellules humaines, a diminué leur taux de mortalité après irradiation. D'où notre intérêt particulier pour ces molécules !

Un seul type de molécule protectrice ne suffirait pas. Le métabolisme produisant une grande variété d'agents oxydants nocifs, il existe une panoplie de molécules protectrices pour les neutraliser, particulièrement chez les organismes robustes. On cherche à les isoler, afin de fabriquer des cocktails antioxydants, qui pourraient être administrés comme un complément alimentaire. Ingérés assez tôt, ils pourraient prévenir les maladies et prolonger la jeunesse. Pris plus tard dans la vie, ils enclencheraient même peut-être un certain rajeunissement de l'organisme, par la régénération moléculaire des cellules. Si l'on diminue la mortalité des cellules due au vieillissement, il faudra toutefois contrôler leur prolifération, afin qu'elles ne deviennent pas cancéreuses. Cela passera par une régulation des mécanismes

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012

d'apoptose (une autodestruction cellulaire), qui reste un défi.

Nos études récentes sur les bactéries *Deinococcus radiodurans* et *Escherichia coli* montrent que tant que la membrane cellulaire reste intacte, la cellule est récupérable, même si l'ADN est brisé en une centaine de morceaux – sa réparation peut durer plusieurs jours. Ainsi, quelle que soit la gravité des dégâts moléculaires associés à une maladie dégénérative, on pourra peut-être les réparer et ainsi arrêter (ou au moins ralentir) sa progression à n'importe quelle étape.

Quand les molécules protectrices des organismes robustes seront isolées, nous devrons encore évaluer par des essais cliniques leurs effets sur la régénération moléculaire des cellules et des organes chez l'homme. Des antioxydants sont déjà consommés comme compléments alimentaires, mais les diverses études effectuées pour évaluer leur impact, notamment sur la prévention des maladies dégénératives, ont eu des résultats contradictoires. Toutefois, leurs effets sur le vieillissement n'ont pas été analysés. En outre, aucune n'a suivi en détail les effets sur les oxydants cellulaires et sur le degré d'oxydation des protéines. Enfin, les composés antioxydants des organismes robustes sont beaucoup plus efficaces.

Les conséquences d'une vie plus longue

Nous espérons donc que ces composés permettront de ralentir le vieillissement et auront un effet préventif sur les maladies liées à l'âge, à l'instar de l'effet des vaccins contre les infections. Si nous y parvenons, l'humanité atteindra santé et longévité par un renouvellement moléculaire naturel : le vieillissement, la maladie et la mort ne seraient plus inéluctables ! En théorie, nous pourrions accéder à une forme d'immortalité, comme la méduse *Turritopsis nutricula*. Bien sûr, le système ne sera sans doute pas parfaitement efficace, de sorte que si nous n'atteignons pas l'immortalité, du moins l'espérance de vie serait notablement augmentée.

Un tel projet suscite inquiétudes et objections. La récupération des innovations du monde vivant que nous espérons effectuer est-elle un égoïsme biologique de notre espèce ? Oui, mais pas plus que la vaccination et les médicaments d'origine végétale, fungique ou bactérienne, tels les antibiotiques.

Plus généralement, comme à chaque innovation, on anticipe les questions qu'elle soulèvera. Tout le monde pourra-t-il accéder aux traitements contre le vieillissement, ou seront-ils réservés aux plus riches ? Les plus jeunes pourront-ils trouver un emploi, si leurs aînés n'en libèrent plus en partant à la retraite ? L'augmentation de la durée de vie entraînera-t-elle une surpopulation qui épuisera les ressources de la Terre ? Impossible de répondre aujourd'hui à ces questions. En matière d'emploi, rappelons seulement que jusqu'à présent, chaque innovation scientifique ou technique marquante (automobile, Internet...) a créé plus d'emplois qu'elle n'a détruit de métiers obsolètes.

Personnellement, je laisserai les générations qui profiteront d'une longue vie en bonne santé s'y adapter elles-mêmes. Peu de gens se plaignent de l'augmentation de la durée de vie survenue au cours des 150 dernières années. Nous avons fait chuter la mortalité due aux maladies infectieuses, essentiellement par la prévention. Nous utilisons sans états d'âme les prothèses mécaniques, électroniques et chimiques (les médicaments) pour pallier nos déficiences biologiques. Pourquoi aurions-nous peur de les résoudre par des méthodes biologiques ?

Vivre longtemps et en bonne santé profiterait non seulement à l'individu, mais aussi à la société : la sécurité sociale comblerait ses déficits, la vie active durerait plus longtemps, etc. Il s'agirait d'une révolution sanitaire et culturelle, portée par de « jeunes vieillards » ayant derrière eux de nombreuses décennies d'apprentissage et d'expérience de la vie. Aujourd'hui, c'est la dégradation biologique qui empêche les vieillards de rester physiologiquement jeunes et productifs. Il nous semble donc souhaitable de chercher à freiner cette dégradation. Mais n'oublions pas qu'il reste de multiples difficultés scientifiques et éthiques, et que sur les milliers de molécules à visée thérapeutique élaborées chaque année, seule une infime proportion devient un des médicaments homologués. Les antioxydants sur lesquels nous travaillons seront-ils un jour disponibles en pharmacie ? Nous en sommes convaincus, mais si ce n'était pas le cas, nos travaux auront au moins eu un intérêt scientifique notable : proposer les fondements d'une théorie biologique du vieillissement. ■

TANT QUE LA MEMBRANE CELLULAIRE reste intacte, la cellule est récupérable, même si l'ADN est brisé en une centaine de morceaux.

L'AUTEUR



Miroslav RADMAN dirige l'équipe Biologie de la robustesse à l'Université Paris Descartes, et est membre de l'Académie des sciences.

BIBLIOGRAPHIE

C. Oliver et al., Age-related changes in oxidized proteins, *Journal of biological chemistry*, vol. 262, pp. 5488-5491, 1987.

E. Sahin *et al.*, Telomere dysfunction and mitochondrial compromise, *Nature*, vol. 470, pp. 359-365, 2011.

M. Radman, Au-delà de nos limites biologiques, Plon, 2011.

J. Plotkin, The lives of proteins, *Science*, vol. 331, pp. 683-684, 2011.

A. Krisko *et al.*, Protein damage and death by radiation in *Escherichia coli* and *Deinococcus radiodurans*, *PNAS*, vol. 109, n° 32, pp. 14373-14378, 2012.

T. Kirkwood, Understanding the odd science of aging, *Cell*, vol.120, pp. 437-447, 2005.

H. Aguilaniu *et al.*, Asymmetric inheritance of oxidatively damaged proteins during cytokinesis, *Science*, vol. 299, pp. 1751-1753, 2003.

La sélection de livres POUR LA SCIENCE

Faites (ou faites-vous !) plaisir avec « la sélection spécial Noël » présentée par *Pour la Science*. Des beaux livres pour explorer les ponts et les routes, admirer les minéraux ou encore jouer avec la logique et la physique.

Minéraux remarquables de la collection de la Sorbonne à Jussieu

Jean-Claude Boulliard et Orso Martinelli



Réf. 090451*

La collection reproduite ici avait été créée à l'instigation de Napoléon à la Sorbonne. Aujourd'hui, elle est devenue l'une des plus belles au monde. Recueil de photographies exceptionnelles, légendées de façon scientifique, ou anecdotique, cet ouvrage retrace aussi l'histoire des collections de minéraux. Il se termine par une analyse de l'art de les collectionner.

Éditions Le Pommier 2009
254 pages – 69 euros – ISBN 978-2-7465-0451-6

Les ponts mythiques

Elisabeth Dumont-Le Cornec



Réf. 005988

Chaque pont est présenté par une fiche d'identité, des photographies, quelques faits marquants, une anecdote, une donnée statistique, ainsi qu'une carte qui illustre le propos. Cet ouvrage documentaire tout public, qui allie l'histoire, la géographie, la nature et le tourisme, permet au lecteur de partir à la découverte des ponts mythiques du monde entier !

Éditions Belin 2011
120 pages – 26,50 euros – ISBN 978-2-7011-5988-1

Maux d'artistes

Sebastian Dieguez



Réf. 075161

Existe-t-il des liens cachés entre une œuvre d'art – une peinture, une sculpture, une composition musicale ou une œuvre littéraire – et une maladie de l'esprit que présentait son auteur ? Examinant divers chefs-d'œuvre avec un regard de neurologue, Sebastian Dieguez analyse plus d'une vingtaine d'œuvres de Dostoïevski, Monet, De Chiricho, Proust, Van Gogh, etc.

Éditions Belin/Pour la Science 2010
176 pages – 25,40 euros – ISBN 978-2-8424-5101-1

Bâtir en terre

Laetitia Fontaine et Romain Anger



Réf. 005204

Entre science et architecture, ce livre part à la découverte de l'exceptionnel patrimoine en terre, de la mythique Shibam au Yémen, la « Manhattan » du désert jusqu'aux étranges habitations collectives des Hakkas en Chine. Les auteurs analysent également les propriétés physico-chimiques de la terre, un « béton naturel », grâce à des expériences simples et ludiques.

Éditions Belin 2009
224 pages – 30,45 euros – ISBN 978-2-7011-5204-2

Les routes mythiques

Elisabeth Dumont-Le Cornec



Réf. 005357

De la route de la soie à la route 66 aux États-Unis en passant par la nationale 7 en France, ce beau livre documentaire propose 50 routes mythiques tracées au fil de l'histoire. Conquêtes militaires, conflit religieux, commerce, transport, autant de motifs de créer de nouvelles voies de communication. Une invitation au voyage sur les routes de légende !

Éditions Belin 2009
120 pages – 24,50 euros – ISBN 978-2-7011-5357-5

En partenariat avec les éditeurs

Belin ÉDITEUR INDÉPENDANT DEPUIS 177 — Le Pommier

Tous ces livres sont également disponibles en librairie.



Arachna

Christine Rollard et Vincent Tardieu

Réf. 005556

Un récit poétique, des photos et des dessins étonnants… Embarquez pour un tour de France inédit sur les traces des araignées. Et tombez sous le charme d'animaux captivants qui ne méritent pas leur mauvaise réputation. Un magnifique carnet naturaliste pour porter un autre regard sur des animaux fascinants.

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

50 expériences pour épater vos amis à table

Jack Guichard et Guy Simonin, Photos de Josselin Guichard avec la collaboration de Kamil Fadel



Réf. 090544

Vous allez surprendre vos amis avec ces expériences étonnantes : 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 2011
168 pages – 19,90 euros – ISBN 978-2-7465-0544-5

Le trésor des paradoxes

Philippe Boulanger et Alain Cohen



Réf. 004675

La définition du paradoxe ne doit jamais être paradoxale : en disant « Je mens », je dis la vérité, donc je ne mens pas… Cette constatation du « contraire vrai » a donné naissance à des théorèmes mathématiques indémontrables, une des grandes découvertes logiques du XXe siècle. Le paradoxe est le ferment de vérités ; en prime, il est drôle, car nous aimons prendre en défaut des pseudocertitudes qui se révèlent absurdes.

Éditions Belin / Pour la Science 2007
544 pages - 31,45 euros – ISBN 978-2-7011-4675-1

Mathématiques pour le plaisir

Jean-Paul Delahaye



Réf. 075104

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

Éditions Belin/Pour la Science 2010
208 pages – 25,40 euros – ISBN 978-2-8424-5104-2

LA SÉLECTION POUR LA SCIENCE

Sportifs high tech

Nunzio La Rotte et Sophie Lem

Éditions Belin / Pour la Science 2012
160 pages – 22,00 euros
ISBN 978-2-7011-5966-9
Réf. 005966

Petits meurtres entre mathématiciens

Tefcros Michaelides

Éditions Le Pommier / Pour la Science 2012
288 pages – 25,00 euros
ISBN 978-2-7465-0641-1
Réf. 090641

La cuisine note à note

Hervé This

Éditions Belin / Pour la Science 2010
208 pages – 19,90 euros
ISBN 978-2-7011-6419-9
Réf. 006419

La physique buissonnière

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

Éditions Belin / Pour la Science 2010
160 pages – 22,35 euros
ISBN 978-2-8424-5105-9
Réf. 075105

Pour commander ces ouvrages renvoyez le bon de commande

ou connectez-vous sur **www.pourlascience.fr/librairie**
(sauf références signalées par un * sur www.editions-belin.fr)

BON DE COMMANDE

POUR LA SCIENCE

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

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

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

Je 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

DPL422 Offre valable jusqu'au 31.01.2013, dans la limite des stocks disponibles.

Belin éditeur indépendant depuis 1777 – Le Pommier

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

HISTOIRE DES SCIENCES

Wegener, le Darwin de la géologie

Contrairement à la théorie de l'évolution, l'idée d'une dérive des continents, proposée par Alfred Wegener il y a 100 ans, a mis plus de 40 ans à être acceptée. Mais l'approche du jeune météorologue présente plusieurs points communs avec celle de Charles Darwin.

Eric BUFFETAUT

Le généticien Theodosius Dobzhansku remarquait en 1973 qu'« en biologie rien n'a de sens, sauf à la lumière de l'évolution ». De même, on pourrait dire qu'« en géologie rien n'a de sens, sauf à la lumière de la dérive des continents ». D'aucuns objecteront qu'il vaudrait mieux préciser « à la lumière de la tectonique des plaques », mais à la source de la théorie générale de l'évolution de notre planète se trouvent bel et bien les conceptions sur les déplacements continentaux, qui furent exposées pour la première fois par écrit en 1912 par un jeune météorologue allemand nommé Alfred Wegener (1880-1930).

Cette année-là en effet, Wegener publie deux articles dans des revues allemandes, l'une de géologie, l'autre de géographie, où il expose les points fondamentaux de son hypothèse : les continents n'occupent pas des positions fixes à la surface du globe, mais se déplacent comme des radeaux à la dérive. L'idée nous est devenue familière, mais pas depuis si longtemps : au début des années 1970, elle n'avait pas encore vraiment droit de cité dans les universités françaises, à de rares exceptions près. En 1912, cette conception était révolutionnaire, car si l'on admettait des mouvements verticaux de l'écorce terrestre – il fallait bien expliquer le soulèvement des montagnes –, des mouvements horizontaux capables de promener des continents sur des milliers de kilomètres étaient inconcevables pour la grande majorité des géologues.

Wegener, bien qu'étant météorologue, après des études axées sur la physique, il s'était tourné vers la météorologie et la climatologie. Doté d'un tempérament d'explorateur, il fut rapidement attiré par les régions arctiques. Dès 1906, il prit part à une expédition danoise au Groenland et, en 1913, il parvint à traverser l'inlandsis groenlandais, la calotte glaciaire qui couvre 80 pour cent de l'île, d'Est en Ouest. Il trouva la mort lors de sa quatrième expédition en 1930. Outre ces explorations aventureuses, ce qui frappe dans la carrière scientifique de Wegener, c'est la diversité des sujets auxquels il s'intéressa. Ainsi, en 1921, il publia un article sur les cratères lunaires : à partir d'études expérimentales (une reconstitution de cratères par impact de cailloux dans du ciment en poudre), il défendait l'idée suivant laquelle ils avaient été formés par des impacts météoritiques, et n'étaient donc pas d'origine volcanique. L'exploration de la Lune par des vols habités lui a donné raison.

Explorateur en quête d'indices

Comment l'idée de la dérive des continents vint-elle à Wegener ? Un des facteurs déclenchants semble avoir été une observation toute simple : les côtes Est et Ouest de l'Atlantique Sud s'emboîtent de façon surprenante si l'on fait disparaître cet océan, le Brésil venant s'insérer dans le golfe de Guinée. D'autres avant lui l'avaient noté, et avaient même parfois envisagé des mouvements des continents *(voir la figure 1)*. À la différence de ses prédécesseurs, Wegener chercha à aller au-delà de cette simple constatation, car sa curiosité a aussi été stimulée par la lecture d'articles sur les ressemblances paléontologiques entre l'Afrique et l'Amérique du Sud. Il commence à accumuler des données de tous ordres pouvant indiquer une ancienne continuité entre les continents situés de part et d'autre de l'Atlantique. Cette quête d'indices occupera le chercheur allemand jusqu'à la fin de sa vie.

Il est difficile de ne pas voir là un parallèle avec la démarche d'un autre grand nom de la science, Charles Darwin (qui lui aussi avait eu des précurseurs). Les similitudes entre Darwin et Wegener ne manquent d'ailleurs pas. Le naturaliste britannique Alfred Wallace parvint au concept de sélection naturelle indépendamment de Darwin, ce qui conduisit en 1858 à une mémorable publication commune. De même, en 1910, le géologue américain Frank Bursley Taylor supposa que l'Afrique et l'Amérique du Sud, autrefois jointes, s'étaient écartées l'une de l'autre, ce qui fait que l'on a parfois parlé de la théorie de Taylor-Wegener. Mais tout comme Wallace a été éclipsé par Darwin, qui avait davantage développé son idée, Taylor, qui s'intéressait surtout à la formation des jeunes chaînes de montagnes plissées, l'a été par Wegener.

De même que Darwin passa sa vie à rechercher tous les arguments possibles en faveur de sa théorie de l'évolution par sélection naturelle, comme en témoignent ses carnets, Wegener amassa les arguments pouvant soutenir l'idée des déplacements continentaux. Après la publication de son œuvre maîtresse *Die Entstehung der Kontinente und Ozeane (La genèse des continents et des océans)*, en 1915, il fit paraître un [illegible]

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012

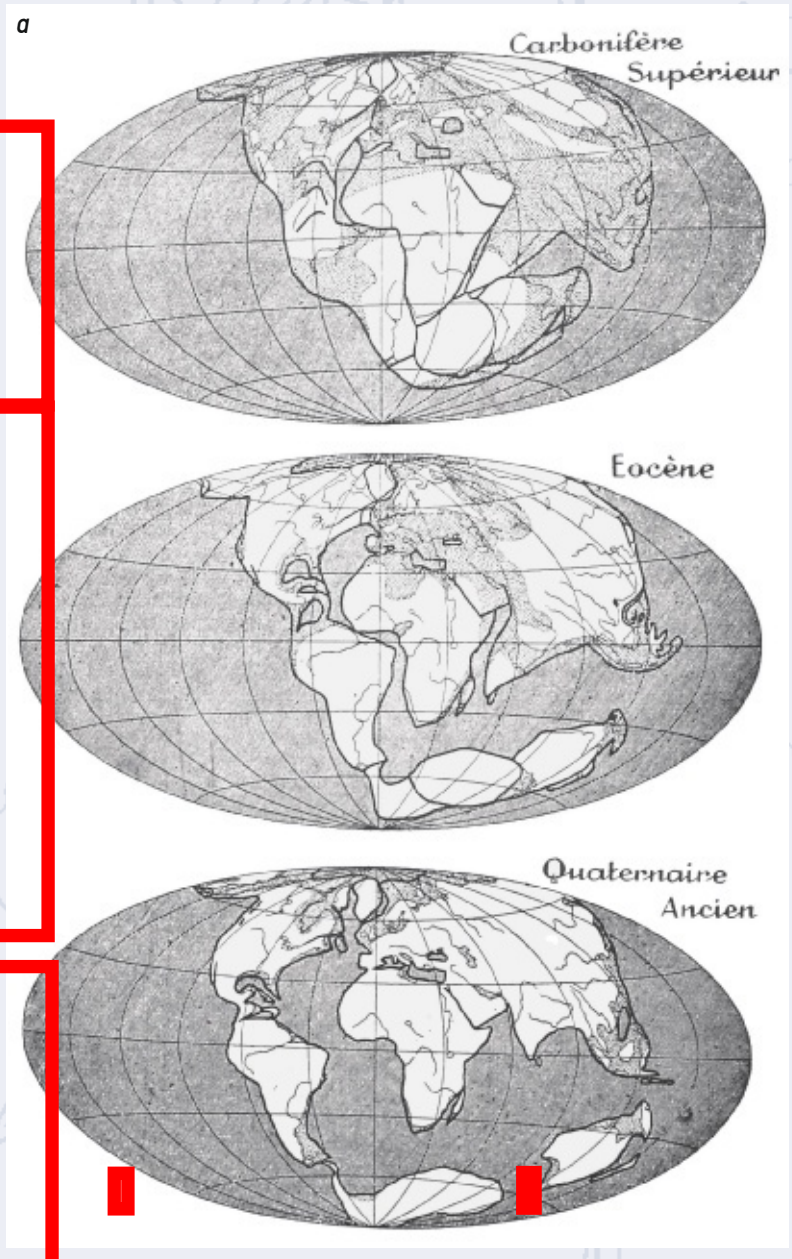
plaire spécial où des feuilles blanches étaient intercalées entre les pages imprimées, pour y porter des compléments manuscrits à mesure qu'il découvrait des arguments nouveaux. Du fait de cette quête continuelle, tout comme *L'Origine des espèces* de Darwin, le livre de Wegener connut plusieurs éditions, la dernière paraissant en 1929, un an avant la disparition tragique de son auteur.

Wegener mourut en 1930 lors d'une expédition au Groenland, alors qu'il se rendait à skis d'une station scientifique située au centre de la calotte glaciaire vers la côte, victime apparemment d'une crise cardiaque (son corps ne fut retrouvé que plusieurs mois plus tard). Cette fin prématurée expliquerait en partie pourquoi l'hypothèse de la dérive des continents mit si longtemps à s'imposer – contrairement à celle de l'évolution darwinienne, qui fut assez rapidement acceptée par la communauté scientifique, en dépit des vives controverses qu'elle suscita. Si Wegener avait pu continuer à affiner sa théorie et à accumuler des éléments en sa faveur, peut-être ses idées auraient-elles plus vite gagné du terrain.

Quelle force meut les continents ?

Du vivant de leur auteur, elles suscitèrent des débats au sein de la communauté scientifique, notamment en Grande-Bretagne, en France et aux États-Unis (il est notable d'ailleurs que Wegener n'y participa pas en personne, tout comme Darwin se tint à l'écart des débats publics autour de sa théorie). Quelques géologues de renom, tels que Emile Argand en Suisse et Alexander Du Toit en Afrique du Sud, se firent les avocats des conceptions de Wegener, mais dans l'ensemble elles furent rejetées par la majorité des spécialistes – sans pour autant tomber dans l'oubli.

Pour des raisons qui restent à établir, en Allemagne, l'hypothèse de la dérive des continents reçut l'assentiment du régime nazi (ce qui n'était pas de nature à la rendre populaire ailleurs), mais il fallut attendre les années 1920 pour que l'ensemble des géologues et des géophysiciens admettent que les continents se déplacent bel et bien à la surface du globe. Cette conversion eut



1. SUR UNE SÉRIE DE CARTES *(a)*, Wegener *(c)* illustra, dans la réédition de 1929 de son ouvrage, comment les continents avaient dérivé au fil du temps *(ici, les cartes sont tirées de la traduction française)*. S'il s'est trompé sur les dates et certains détails, son modèle reste très bien vu. En 1859, un certain Antonio Snider avait publié des cartes similaires (b), mais dans un contexte créationniste : il avait attribué le déplacement des continents au Déluge biblique.

lieu lorsque la tectonique des plaques proposa un modèle global expliquant aussi bien la dérive des continents que l'expansion des fonds océaniques et les mouvements apparents des pôles magnétiques *(voir l'encadré ci-dessous)*.

Le point faible de la théorie de Wegener était en effet l'absence d'un mécanisme convaincant pour expliquer les déplacements des continents. Nombre d'arguments géologiques, paléontologiques et paléoclimatiques suggéraient que les masses continentales aujourd'hui disjointes avaient autrefois été réunies. Cela permettait par exemple de comprendre pourquoi certaines structures géologiques observées en Europe et en Amérique du Nord se retrouvaient en continuité lorsque l'on « refermait » l'océan Atlantique, ou pourquoi des animaux et des végétaux très similaires étaient aujourd'hui séparés par des espaces océaniques immenses *(voir la figure 2)*. Mais quelles forces déplaçaient les continents à la surface du globe ? Wegener imaginait que, formés de roches majoritairement granitiques relativement légères, ils « flottaient » sur une couche basaltique plus dense. Toutefois, comment dérivaient-ils sur ce substrat rigide ? Les forces invoquées à l'origine par Wegener, liées à la rotation de la Terre, étaient tout à fait insuffisantes pour provoquer les déplacements supposés.

Il n'était pas géologue

Sans chercher à la pousser trop loin, reprenons la comparaison avec Darwin : tout comme il manquait à Wegener les mécanismes susceptibles de déplacer les continents, il manquait au naturaliste anglais une théorie crédible de l'hérédité (malgré les découvertes du moine botaniste morave Gregor Mendel, publiées pourtant dès les années 1860, mais auxquelles Darwin ne prêta pas attention). Il fallut d'ailleurs attendre les premières décennies du XXe siècle pour que soit mise au point, grâce au développement de la génétique, la théorie « synthétique » ou néodarwinienne de l'évolution – aujourd'hui fondamentalement acceptée.

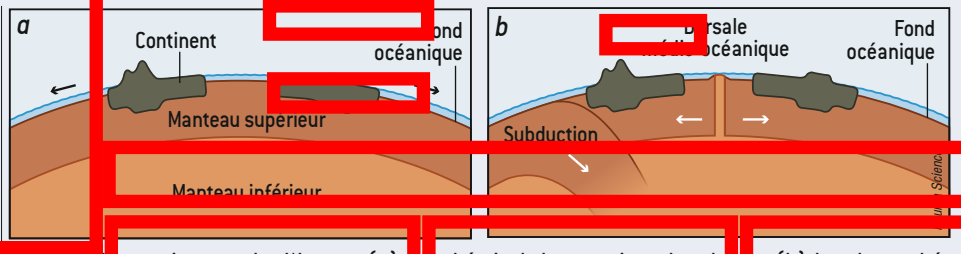
Malgré ces difficultés, la théorie de l'évolution s'était imposée à l'immense majorité des biologistes en l'espace de quelques décennies. On ne peut pas en dire autant de l'hypothèse de la dérive des continents, longtemps considérée comme une vue de l'esprit dénuée de fondements sérieux. Pourquoi cet échec ? Une des raisons tient sans doute au fait que la première édition de son livre, où sa théorie est exposée plus en détail et plus argumentée que dans les articles de 1912, parut en 1915, en pleine Première Guerre mondiale, alors que son auteur servait dans l'armée de son pays, et ne toucha donc qu'un public restreint. Facteur sans doute plus décisif, le météorologue Wegener ne faisait pas partie du sérail des géologues, qui échafaudaient depuis des décennies des théories tentant d'expliquer l'histoire de la Terre dans un cadre fixiste, où les continents occupaient des positions immuables. Il était facile d'attribuer le caractère révolutionnaire des idées de Wegener à un certain amateurisme de leur auteur.

Il reste que l'absence d'un moteur crédible pour les déplacements continentaux était le grand point faible de la théorie de Wegener. Il en était probablement conscient, car au fil des éditions de son livre il s'efforce de trouver une solution à ce problème crucial. Sans doute s'est-il approché d'une solution, notamment lorsqu'il évoque les courants

De la dérive des continents à la tectonique des plaques

Selon Wegener, les continents flottaient sur une couche basaltique et dérivaient peu à peu en glissant sur cette couche sous l'effet des forces d'inertie liées à la rotation de la Terre *(a)*. Dans la théorie de la tectonique des plaques élaborée dans les années 1970 (et toujours d'actualité aujourd'hui), les continents dérivent aussi, mais c'est le seul point commun avec la dérive des continents proposée par Wegener.

Selon la théorie de la tectonique des plaques, des unités bien plus vastes de la croûte terrestre se déplacent – les « plaques », comprenant non seulement les continents, mais aussi les espaces océaniques. Des courants de convection du manteau supérieur forment des sortes de tapis roulants sur lesquels glissent les plaques *(b)*.



La dérive des continents selon Wegener *(a)* et la théorie de la tectonique des plaques *(b)*. Les deux schémas représentent une coupe transversale de la séparation des continents américain et africano-européen.

Pour Wegener, la ligne le long de laquelle deux continents s'étaient séparés, que l'on nomme aujourd'hui la dorsale médio-océanique, ne jouait aucun rôle particulier. Dans la théorie de la tectonique des plaques, cette zone est au contraire très active : le magma des profondeurs remonte, formant, à mesure que les continents s'éloignent, de nouveaux fonds océaniques en refroidissant. En s'éloignant deux plaques l'une de l'autre, elles se rapprochent d'autres plaques voisines. L'une des deux plaques s'enfonce alors sous l'autre (subduction).

La théorie de la tectonique des plaques a vu le jour grâce à l'essor, après la Seconde Guerre mondiale, de la géophysique et de leurs fondations au moyen de forages profonds, ainsi que du développement des méthodes paléomagnétiques. Ces méthodes visent à reconstituer notamment l'histoire du champ magnétique de la Terre en étudiant la direction du pôle magnétique terrestre « enregistrée » dans des échantillons de roche refroidie. En effectuant ces mesures sur tous les continents et scientifiques se sont aperçus que les directions enregistrées variaient et indiquaient un déplacement des continents.

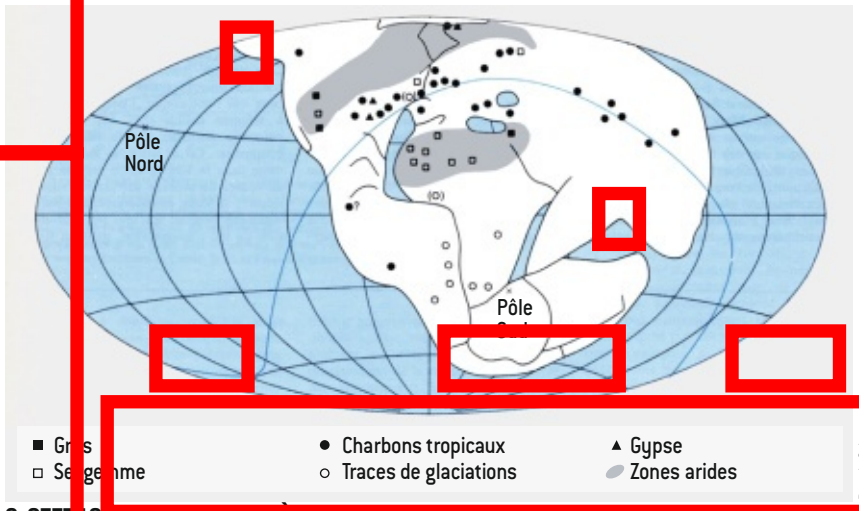
© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012

de convection à l'intérieur du manteau terrestre, liés aux différences de température entre zones profondes et zones plus superficielles, dont le géologue autrichien Otto Ampferer avait souligné l'importance potentielle pour la dérive des continents dès 1925 (idée évoquée également par le géologue britannique Arthur Holmes).

Quoi qu'il en soit, l'hypothèse de la dérive des continents demeura pendant une quarantaine d'années une idée marginale des sciences de la Terre, jamais complètement oubliée, et même régulièrement mentionnée dans les manuels, la plupart du temps pour expliquer aussitôt qu'elle se heurtait à des objections insurmontables. Jusque dans les années 1960 fleurirent les reconstitutions paléogéographiques établies dans un contexte fixiste, où des « ponts continentaux » imaginaires étaient lancés à travers les océans pour expliquer des ressemblances paléontologiques entre des continents immobiles – alors même que l'exploration des fonds océaniques montrait de plus en plus clairement l'improbabilité de telles connexions.

Rien n'est immuable

Comment interpréter la conversion rapide, dans les années 1970, de la communauté scientifique aux conceptions ébauchées par Wegener dès 1912 sur la mobilité des continents ? Une lecture à la lumière des idées de l'historien des sciences Thomas Kuhn sur les « révolutions scientifiques » est assez aisée. Le « paradigme » de la fixité des continents, qui avait dominé les sciences de la Terre depuis presque leurs origines, au début du XIXe siècle, se révélait de plus en plus incapable d'expliquer un nombre croissant de faits révélés par la géologie, la géophysique et la paléontologie – qu'il s'agisse des déplacements apparents des pôles magnétiques, de la distribution géographique des organismes vivants et fossiles ou du mode de formation des chaînes de montagnes. Le temps était venu d'une révolution scientifique, d'un « changement de paradigme » remplaçant le dogme de la fixité des continents par l'hypothèse de leur mobilité qui, seule, pouvait donner un sens à ces observations. Cette, la tectonique des plaques,



2. CETTE CARTE DU CARBONIFÈRE due à Wegener et son beau-père Wladimir Köppen montre la distribution de traces de glaciations, de sables désertiques (grès) et de charbons tropicaux. Elle illustre la méthode de Wegener : sur une carte du monde actuel, la localisation de ces marqueurs climatiques n'a aucun sens, mais tout s'explique sur la carte reconstituée avant la dérive des continents.

telle qu'elle finit par s'imposer vers la fin des années 1960, n'est pas, à bien des égards, la dérive des continents envisagée par Wegener en 1912 – ne serait-ce que parce qu'elle doit beaucoup à la découverte postérieure de l'expansion des fonds océaniques et au développement des recherches sur le paléomagnétisme. Mais elle doit à Wegener le concept fondamental sur lequel elle repose : le déplacement des continents.

Pourquoi des idées qui nous semblent aujourd'hui aussi évidentes que celles de l'évolution des espèces et de la dérive des continents ne se sont-elles pas imposées plus facilement ? Peut-être faut-il y voir une résistance instinctive à tout ce qui tend à remplacer le stable et l'immuable par le changeant et le mobile. Tout comme il était difficile pour beaucoup (et hélas cela le demeure pour certains) d'admettre que les espèces vivantes ne sont pas fixes mais se modifient indéfiniment au cours du temps, il n'était pas facile d'accepter que les continents, la « terre ferme », ne sont pas animés dans les positions que nous leur connaissons aujourd'hui, mais se déplacent à la surface du globe dans un ballet incessant. Chacun à leur manière et dans des contextes différents, Darwin et Wegener nous ont aidés à reconnaître que rien n'est immuable dans la nature. ■

■ L'AUTEUR



Eric BUFFETAUT est paléontologue au Laboratoire de géologie de l'École normale supérieure (CNRS, UMR 8538).

■ À ÉCOUTER

Jeudi 29 novembre, **Eric Buffetaut** reviendra sur l'histoire de la découverte de la dérive des continents dans la partie « Actualités » de l'émission **La marche des sciences**, sur *France Culture* de 14h à 15h.
www.franceculture.com

■ BIBLIOGRAPHIE

Alfred Wegener, **Die Entstehung der Kontinente und Ozeane**, Borntraeger, 2005.

E. Buffetaut, **Continental drift under the Third Reich**, *Endeavour*, vol. 24, pp. 171-174, 2003.

M. Schwarzbach, **Wegener. Le père de la dérive des continents**, Belin, 1985.

LOGIQUE & CALCUL

Être normal ? Pas si facile !

En 1909, Émile Borel se demande s'il est possible que toutes les séquences de chiffres soient représentées de façon égale dans le développement décimal d'un nombre réel. Il prouve que c'est le cas le plus fréquent… mais ne propose pas d'exemples.

Jean-Paul DELAHAYE

En 1908, le mathématicien français Émile Borel (1871-1956) s'interroge sur les propriétés particulières que pourraient posséder les décimales des nombres usuels, comme $\sqrt{2}$, e ou π. Il introduit la notion de « nombre normal » dont nous verrons plus loin la définition. Aujourd'hui, tout un domaine de l'arithmétique s'occupe de ces questions qui ont pris de l'importance et qui progressent régulièrement, malgré l'extrême difficulté du sujet.

Une multitude d'articles et un livre récent de Yann Bugeaud exposent ces progrès. Un texte non publié d'Alan Turing (1912-1954) dont nous fêtons cette année le centième anniversaire de la naissance résolvait la question de l'existence de nombres « absolument normaux calculables ». Sa redécouverte montre une fois encore qu'informatique et mathématiques sont intimement liées, et illustre le génie de Turing.

Le nombre 13/50 s'écrit 0,26. C'est un nombre dont le développement décimal est fini. Un autre exemple est 721/250 = 2,884. Tout quotient de deux entiers n/m avec m de la forme $2^i \times 5^j$ est de la même façon un nombre à l'écriture décimale finie. Inversement, tout nombre qui possède un développement décimal fini est de ce type. Il faut le savoir, mais, bien sûr, ce ne sont pas des nombres décimaux qui nous inquiéteront !

Les nombres 8/15 = 0,533333333… (la suite de 3 est illimitée) et 149/7 = 21,285714285714… (la séquence 285714 se répète indéfiniment) sont dits ultimement périodiques : à partir d'un certain endroit, leur développement décimal se répète périodiquement, et cela jusqu'à l'infini. On montre que tout nombre rationnel, c'est-à-dire quotient de deux entiers, possède un développement décimal fini ou ultimement périodique et qu'à l'inverse, aucun nombre irrationnel ne possède un tel développement : il est quotient de deux entiers ; c'est le cas de $\sqrt{2}$, e ou π) ne possède un développement décimal fini ou ultimement périodique.

Les décimales des nombres $\sqrt{2}$, e ou π semblent par ailleurs indiscernables de ce que donneraient des tirages au hasard de chiffres entre 0 et 9. Borel, pour exprimer cette idée, a introduit le concept de nombre simplement normal en base 10. Par définition, c'est un nombre tel que la proportion des 0 parmi les n premières décimales tend vers 1/10 quand n tend vers l'infini, de même pour les 1, les 2, …, les 9. Un nombre normal en base 10 est un nombre dont toute séquence fixée de k chiffres apparaît avec la fréquence limite $1/10^k$: ainsi, 1789 y apparaît avec une fréquence limite 1/10 000 ; 12345 apparaît avec une fréquence limite 1/100 000. Ces définitions s'étendent aux bases de numération autres que 10.

Dans les décimales d'un nombre normal en base 10, on rencontre bien sûr toutes les séquences finies de chiffres, donc en particulier la séquence donnant votre numéro de sécurité sociale, ou celle, plus longue, codant point par point les 10 niveaux de gris votre portrait sous la forme d'une image carrée d'un million (= 1 000 × 1 000) de pixels, ou encore l'histoire de votre vie sans utiliser la lettre *e*.

Est-il possible d'être absolument normal ?

Un nombre normal en toute base de numération supérieure ou égale à 2 est dit absolument normal. Cette propriété est une propriété forte de bon mélange des chiffres : pour un nombre réel x donné, elle signifie que, quelle que soit la base de numération b que vous choisirez pour l'écrire, en recherchant une séquence de k chiffres très loin dans ce développement, vous aurez autant de chances de la trouver que n'importe laquelle des séquences de même longueur : 341 sera aussi fréquente que 777 ou 982 dans le développement en base 10 d'un nombre absolument normal. En base 2, la séquence 01010101 sera aussi fréquente que 00001111.

Ce n'est pas tout de définir une notion, encore faut-il être certain que la définition désigne quelque chose : existe-il des nombres (1) simplement normaux en base b, (2) normaux en base b, (3) absolument normaux ? La réponse est facile pour « simplement normal en base 10 », car le nombre 123456789/9999999999 = 0,012345789012345678 9… convient, et il y a des nombres du même type dans toute base.

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012

Pour les deux autres notions, c'est moins simple, mais Borel a démontré que l'ensemble des nombres qui ne sont pas absolument normaux s'enferme dans une famille I_1, ...,I_n,... d'intervalles dont la longueur totale est aussi petite que l'on veut. Dit autrement, il a démontré que l'ensemble des nombres qui ne sont pas absolument normaux constitue un sous-ensemble de mesure nulle (ou ensemble « négligeable » de l'ensemble des nombres réels).

L'une des conséquences de ce formidable et surprenant théorème est qu'il existe des nombres normaux en base *b* quel que soit *b* supérieur ou égal à 2 et qu'ils sont en quantité infinie non dénombrable (il y en a plus que des nombres entiers). Il en va de même pour les nombres absolument normaux. Non seulement il en a, mais ils sont majoritaires : en pointant au hasard un nombre réel entre 0 et 1, on tombe, sauf cas infiniment rares, sur un nombre absolument normal.

C'est ici que les ennuis commencent !

Omniprésents, mais introuvables

La démonstration de Borel qu'il existe des nombres absolument normaux n'indique pas comment en obtenir explicitement. En théorie, ces nombres sont partout présents (ceux qui ne le sont pas forment un ensemble négligeable), mais la recherche d'un seul nombre dont on puisse prouver qu'il est normal en base *b*, ou mieux absolument normal, est un défi difficile.

Le nombre de Champernowne est obtenu en mettant bout à bout l'écriture décimale de tous les entiers : 0,12345678910111213141516171819 20... C'est un nombre simple – nous l'avons défini en deux lignes – et pourtant il est normal en base 10. Bien sûr, il existe des nombres équivalents dans toutes les bases de numération. David Champernowne, qui fut professeur de statistique et d'économie à l'Université d'Oxford, était un ami d'Alan Turing. En 1933, il démontra que son nombre était normal en base 10 et l'on peut penser que cette trouvaille incita Turing à s'intéresser lui aussi aux nombres « mélangés » introduits par Borel.

Si l'on met bout à bout l'écriture décimale des nombres premiers, ce qui donne 0,2357111317192 3..., on obtient à nouveau un nombre normal en base 10. Ce résultat, obtenu en 1946, est dû conjointement à Arthur Copeland et à Paul Erdős, le mathématicien prolixe qui a publié 1 525 articles mathématiques durant sa longue carrière.

D'autres familles de nombres normaux (dans une base fixée) ont été proposées depuis, dont le nombre de Stoneham $\alpha_{2,3}$ introduit en 1973 qui est normal en base 2 :

$$\alpha_{2,3} = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{3^k 2^{3^k}}$$

Nous y reviendrons. Les constructions du nombre de Champernowne et de ses variantes, et les quelques autres nombres normaux dans une base fixée connue ne résolvent, cependant, que le problème

des nombres normaux en base *b*, pour un *b* unique dans chaque cas. Rien ne dit que le nombre de Champernowne, normal en base 10, soit normal en base 11, 9 ou 2. Les calculs par ordinateur nous conduisent à penser que c'est le cas, mais rien n'a été démontré jusqu'ici. Comment trouver un nombre absolument normal ?

Algorithmiquement complexe, donc normal

La théorie algorithmique de l'information semble proposer une solution élégante à cette énigme.

La taille du plus petit programme qui engendre les *n* premiers chiffres d'un nombre réel est la complexité de Kolmogorov de ces *n* chiffres. Si elle vaut toujours à peu près *n* quand *n* tend vers l'infini, on dit que l'on a affaire à un nombre aléatoire au sens de Martin-Löf (*voir l'article du mois de mars 2012 de cette rubrique*). Or un nombre aléatoire dans ce sens est absolument normal, comme l'ont démontré Cristian Calude et Helmut Jürgensen en 2002.

Un tel résultat ne donnerait rien de plus que l'affirmation de Borel que les nombres absolument normaux sont partout, si on ne pouvait pas trouver de nombres réels aléatoires bien identifiés. C'est là que le nombre Ω (oméga) de Gregory Chaitin intervient. Ce nombre est la probabilité qu'une machine universelle de Turing s'arrête quand on lui donne un programme écrit en binaire dont les bits sont tirés au

1. L'existence de nombres absolument normaux, sans exemples



Émile Borel introduit en 1908 la notion de nombre absolument normal (la fréquence d'apparition d'une séquence de *k* chiffres dans le développement en base *b* est $1/b^k$). Il prouve l'existence de tels nombres, et même qu'ils sont majoritaires. Il est cependant lucide sur le malaise créé par ces nombres partout présents, mais introuvables :

« La probabilité pour qu'un nombre soit absolument normal est [...] égale à l'unité. Dans l'état actuel de la science, la détermination effective d'un nombre absolument normal paraît un problème des plus difficiles : il serait intéressant, soit de le résoudre en construisant un nombre absolument normal, ou en montrant qu'un nombre irrationnel connu est absolument normal, soit de démontrer que, parmi les nombres pouvant être réellement définis, [illegible] ment normal ; si paradoxal que paraisse cet énoncé, il n'est nullement incompatible avec le fait que la probabilité pour qu'un nombre soit absolument normal est égale à l'unité. »

Aujourd'hui, malgré des avancées significatives, bien des mystères subsistent sur les nombres quasi paradoxaux. Sa femme, Camille Marbo, relate dans son livre de souvenirs que, découragé de ne pas avoir trouvé un seul exemple de nombre normal dans [illegible] abandonna les « hautes mathématiques » pour [illegible] bilités et à la théorie des jeux.

hasard. On sait construire de telles machines universelles (susceptibles de mener tout calcul) et donc, dès que l'une est choisie, le nombre Ω associé est fixé. C'est une probabilité, c'est-à-dire un nombre réel compris entre 0 et 1. On connaît ainsi des nombres absolument normaux et la méthode des machines universelles en définit même une infinité. Devons-nous être satisfaits ?

Malheureusement non : les nombres Ω de Chaitin sont non calculables. Ils sont parfaitement définis, mais à la question, devenue mathématique grâce aux travaux de Turing de 1936, « sont-ils calculables ? », la théorie répond non de manière formelle et définitive : aucun programme ne peut égrainer les chiffres d'un nombre Ω de Chaitin (alors que c'est possible pour $\sqrt{2}$, e ou π).

Un objet mathématique peut être parfaitement bien défini et unique (il existe un unique nombre Ω associé à chaque machine universelle de Turing), sans pour autant qu'on puisse en connaître le détail (par exemple les chiffres décimaux). Cela semble paradoxal, mais c'est l'une des conséquences de l'indécidabilité logique mise en avant par Kurt Gödel en 1931 et complétée par les résultats de non-calculabilité de Turing de 1936 : « être bien défini » ne veut pas pour conséquence « être calculable » et, par manque de chance, les nombres absolument normaux donnés par la théorie de la complexité sont justement dans la catégorie étrange des nombres « bien définis et non calculables ».

Peut-on définir un nombre réel dont on prouvera qu'il est absolument normal, et dont on pourra calculer à volonté les chiffres un à un ?

La question est alors reposée : peut-on définir un nombre réel dont on prouvera qu'il est absolument normal, et dont on calculera véritablement les chiffres un à un aussi loin qu'on le souhaite (par exemple en base 10) ?

Absolument normal et calculable ?

La réponse aurait pu être non, car les nombres calculables, qui sont en quantité infinie dénombrable, constituent un sous-ensemble négligeable de l'ensemble des nombres réels, et parce que leur intersection avec le sous-ensemble des nombres normaux pouvait donc être vide.

La réponse est positive, mais son histoire, un peu sinueuse, montre que même à propos de questions purement arithmétiques sans liens apparents avec la logique, le mathématicien contemporain est obligé d'affiner ses concepts à l'aide des outils de cette logique qu'il a parfois regardée avec méfiance, comme le firent Henri Poincaré et Nicolas Bourbaki.

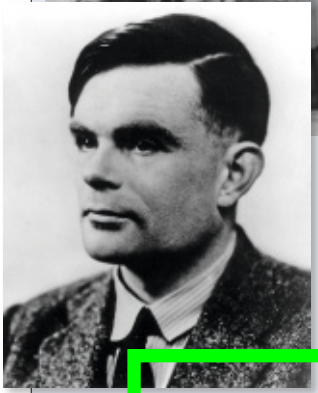
Tout d'abord, dès 1917, deux mathématiciens, Henri Lebesgue (1875-1941) et Waclaw Sierpinski (1882-1969), comprenant qu'il était souhaitable de rendre concrète la définition de Borel d'un nombre absolument normal, reprennent la preuve d'existence de Borel et l'expriment sous une forme constructive. Dans des articles écrits indépendamment, mais se recoupant sur certains points, chacun donne une formulation de la preuve d'existence de Borel d'une telle façon qu'à la fin, elle produise vraiment la définition d'un nombre précis absolument normal. Hélas, si leur démonstration caractérise un nombre par une propriété parfaitement identifiée et

2. Turing et la calculabilité

Alan Turing est mort en 1954. De nombreuses manifestations ont été organisées cette année à l'occasion de sa naissance. C'est l'un des premiers mathématiciens-logiciens-informaticiens (le premier ment le philosophe allemand Leibniz, qui a étudié le système de numération binaire et construit une magnifique machine à calculer) ; ses travaux ont créé de nombreux liens entre les trois domaines : théorie mathématique de la calculabilité, indécidabilité algorithmique, corps des nombres réels calculables.

La question des nombres normaux a préoccupé Turing et, dans un texte publié écrit autour de 1934 (www.turingarchive.org/viewer/?id=131&title=01a.1), il a donné les bases d'un algorithme permettant de calculer des nombres absolument normaux. La mise en forme définitive de son texte, redécouvert tardivement, [illegible] Verónica Becher et Santiago Figueira, informaticiens à l'Université de Buenos Aires.





Alan Turing était un athlète : ici, en 1947, il prend le bus avec les membres du *Walton Athletic Club*. Durant la Seconde Guerre mondiale, Turing participa au décodage du code allemand, ce qui fut décisif dans la victoire des Alliés.

© Pour la Science - n°422 - Décembre 2012

formulée, elle n'en donne pas un moyen de calcul explicite. Bien que plus techniques et moins élégantes que la preuve par le biais de la théorie de la complexité (plus tardive), les preuves de Lebesgue et Sierpinski semblent être de la même nature : elles désignent de façon théorique des nombres dont il est prouvé qu'ils sont absolument normaux, mais dont le calcul des décimales n'est pas effectué et n'est peut-être pas possible. Nous allons voir cependant que ces démonstrations techniques possèdent un avantage sur celle de la théorie de la complexité.

Dans les motivations que Lebesgue donne au début de son travail, apparaît la question de l'axiome du choix, qui préoccupait les mathématiciens du début du XXe siècle. L'axiome du choix affirme qu'à toute famille $(A_i)_i$ d'ensembles non vides est associé au moins un ensemble C ayant exactement un élément commun avec chaque A_i. Lebesgue exprime sa conviction que pour les définitions « qui ne sont pas illusoires, il est possible d'apporter les précisions qui conduisent à la définition d'un des ensembles [ou nombres] dont on démontre l'existence ». Or on sait aujourd'hui que certaines démonstrations d'existence ne peuvent pas être rendues constructives et seraient donc considérées illusoires par Lebesgue.

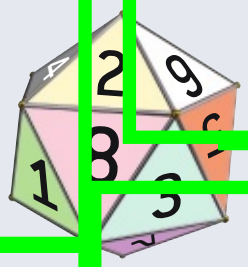
Paradoxalement, tel est justement le cas pour les ensembles non mesurables « au sens de Lebesgue » ! Les ensembles mesurables sont ceux constitués de nombres réels auxquels on peut attribuer une longueur, et dans le cas du plan, ceux auxquels on peut attribuer une aire. L'axiome du choix permet de prouver qu'il existe des ensembles non mesurables (n'ayant donc pas de longueur, ou d'aire), mais ne permet d'en définir aucun. Or en 1970, Robert Solovay a démontré qu'on pouvait, sans introduire de contradiction, ajouter à la théorie des ensembles habituelle l'axiome « tout ensemble est mesurable au sens de Lebesgue ». Cela signifie qu'aucune définition précise d'un ensemble non mesurable n'est possible dans le cadre de la théorie des ensembles sans l'axiome du choix. La démonstration classique de l'existence d'ensembles non mesurables est irrémédiablement non constructive : elle s'appuie sur l'axiome du choix, mais pire, sans lui, elle est impossible !

Les nombres normaux sont majoritaires

Borel a démontré que les nombres qui ne sont pas normaux en base 10 sont en quantité négligeable : en prenant un nombre réel au hasard entre 0 et 1, on tombe, sauf exception, sur un nombre normal en base 10 (et même normal en toute base de numération).

Assez choquant, car on n'arrive même pas à démontrer que les nombres usuels comme π, e, $\log(2)$, $\sqrt{2}$, etc., sont normaux en base 10. Voici une façon de présenter la preuve (qui n'est pas une preuve rigoureuse, mais qui aidera à saisir l'étonnante affirmation de Borel).

Tirer au hasard un nombre réel entre 0 et 1 revient à tirer au hasard une suite infinie de chiffres 0, 1, 2, ..., 9 avec un dé équitable, par exemple un icosaèdre où chaque chiffre apparaît sur deux faces. Or quand on mène une telle suite de tirages équitables, chaque séquence de longueur k, par exemple la séquence 1789 de longueur 4, a la probabilité $1/10^k$ d'être obtenue à chaque instant (1789 apparaît en moyenne une fois sur 10 000).



C'est une conséquence de la loi des grands nombres, car les chaque chiffre se présente avec une probabilité 1/10. Pour une séquence fixée de longueur k, la probabilité pour que la fréquence limite soit $1/10^k$ est donc de 100 %. Comme une réunion dénombrable d'ensembles négligeables est aussi négligeable, la probabilité qu'une suite infinie de tirages ne donne pas la fréquence limite $1/10^k$ pour une séquence de longueur k est nulle. Autrement dit, un nombre réel pris au hasard entre 0 et 1 a toutes les chances d'être normal en base 10. La conclusion s'étend à la propriété d'être absolument normal (normal dans toute base, car il y a une infinité dénombrable de bases de numération possibles (l'ensemble NN(b) des nombres non normaux en base b est négligeable, donc si ; son complémentaire est l'ensemble des nombres absolument normaux).

En quête d'un algorithme

Arrivés à ce point et conscients, grâce à la logique mathématique, de l'inconfort de la situation concernant les nombres absolument normaux, notre problème se résume alors ainsi :

– La preuve d'existence de Borel est non constructive, mais ne l'est pas aussi gravement que celle des ensembles non mesurables, car les reformulations de Lebesgue et de Sierpinski ainsi que les approches par la théorie de la complexité donnent des définitions précises de nombres absolument normaux.

– Cependant, la logique nous a aussi appris qu'être bien défini n'implique pas être calculable. Reste donc la question, passée sous silence par Lebesgue et Sierpinski faute d'idées assez claires sur le sujet, et devenue parfaitement mathématique grâce à Turing qui introduisit le concept de fonction calculable et de nombre réel calculable : existe-t-il des nombres absolument normaux et calculables ?

Celui grâce à qui la question de l'existence a pris une forme algorithmique claire et mathématique est aussi celui qui la résout positivement pour les nombres absolument normaux dans son article non publié de 1934. Turing refait en quelque sorte le travail de Sierpinski et Lebesgue, mais il cherche à aller plus loin et veille à définir un nombre absolument normal accompagné d'un algorithme de calcul. Malheureusement, ce qu'on a retrouvé de l'article de Turing ne va pas tout à fait au bout et reste incomplet sur un point qui ne sera définitivement éclairci qu'en 2002 par Verónica Becher et Santiago Figueira. Enfin rendue parfaitement constructive et calculable, la démonstration d'existence des nombres absolument normaux de Borel est-elle pour autant définitive ?

Non, la satisfaction éprouvée par ce succès récent est atténuée par deux remarques qui suggèrent qu'il reste encore du travail à faire et que les mathématiciens, les logiciens

1. La complexité des irrationnels algébriques

Le magnifique et puissant théorème de Adamczewski et Bugeaud permet de démontrer la conjecture de Loxton et van den Porten que tout nombre dont les chiffres en base b sont produits par un automate fini est soit rationnel, soit transcendant (non solution d'une équation polynomiale à coefficients entiers). Cette conjecture signifie que les nombres algébriques (solutions d'équations polynomiales à coefficients entiers) sont ou bien rationnels (et leurs chiffres sont ultimement très simples), ou bien complexes (leurs chiffres ne peuvent être écrits par un automate fini).

Le théorème donne des informations sur la complexité des chiffres d'un nombre, mesurée par la fonction $p_b(m)$. Si x est un nombre réel écrit en base b, on note $p_b(m)$ (et on dé[illegible] fonction complexité algébrique irrationnelle [illegible] grande [illegible], et ainsi de suite).

[illegible]té de x) le [illegible]mbre de séquences différentes d[illegible]ongueur m rencontrées dans son d[illegible]veloppement en base b.

Par exemple, 1/5 s'écrit, en base 2, 0,0011001[illegible]0110011... Le nombre de mots de longueur 3 rencontrés dans ce développement est 4, puisque les seules séquences de longueur 3 qu'on trouve sont 001, 011, 110 et 100. Il s'ensuit que p_2 [illegible] = 4 pour le nombre 1/5. Notons que $p_2(m)$ est inférieur ou égal à 2^m, et que $p_b(m)$ est inférieur à b^m.

THÉORÈME DE ADAMCZEWSKI ET BUGEAUD. Soit un nombre irrationnel algébrique écrit en base b, alors $p_b(m)/m$ [illegible] assez grand $p_b(m)/m$ dépasse 10, et ne revient jamais en dessous, plus loin il dépasse 100, etc.).

[illegible] séquences de longueur m qu'on trouve dans le développement d'un nombre elle augmente plus vite que n'importe quelle fonction linéaire. Ce théorème ne permet pas encore de prouver que les nombres irrationnels algébriques sont normaux, ce que l'on pense vraie[illegible] firmation [illegible]te sur les décimales des nombres algébriques irrationnels qui nous appr[illegible]he un peu du but.

Le théorème est aussi un outil puissant pour démontrer que des nombres [illegible]nt transcendants et il permet de retrouver le résultat que le nombre de Prouhet-Thue-Morse 0,01101001[illegible]10010110..., souvent étudié en arithmétique, est transcendant (ce nombre est obtenu en écrivant, après la virgule, 0 puis le complément 1, ce qui donne 01 ; on ajoute encore le complément 1001, ce qui donne 0110 ; on ajoute encore le complément 1001, ce qui donne


Yann Bugeaud


Boris Adamczewski

et les informaticiens n'en ont pas fini avec les nombres absolument normaux.

Quatre niveaux d'existence mathématique

D'une part, l'algorithme explicité est affreusement inefficace : il est « doublement exponentiel », ce qui signifie que pour connaître n décimales du nombre absolument normal qu'il calcule, il faut le faire fonctionner durant un temps en gros proportionnel à $\exp(\exp(n))$ (ou 2 à la puissance 2^n), qui est une fonction de la variable n à croissance extrêmement rapide. À ma connaissance, personne n'a essayé de produire des décimales du nombre calculable que l'algorithme de Turing-Becher-Figueira égraine indéfiniment... en théorie. Cette double exponentielle illustre un quatrième niveau dans les degrés de l'existence mathématique : après l'existence pure (preuve de Borel), l'existence avec caractérisation (théorie de la complexité ou preuves de Lebesgue et Sierpinski), l'existence avec algorithme de calcul (Turing, Becher, Figueira), on aimerait bien atteindre l'existence avec un algorithme de calcul praticable et donnant donc « pour de vrai » les décimales d'un nombre absolument normal qu'on pourrait enfin voir écrit sur une page imprimée !

La deuxième raison d'insatisfaction est que la question posée à propos des nombres absolument normaux n'est pas tant celle d'en définir un et de le calculer, mais plus simplement : $\sqrt{2}$, e ou π, ou les nombres irrationnels que l'on connaît, et dont l'étude des chiffres suggère qu'ils sont absolument normaux, le sont-ils vraiment ?

Sur ces dernières questions, des progrès ont été faits assez récemment. Bien sûr le calcul des chiffres de π, qui a maintenant été mené jusqu'à la décimale en position $10^{13} = 10\,000\,000\,000\,000$, permet d'étudier empiriquement la question. Un travail portant sur les quatre premiers milliards de ces chiffres et utilisant une modélisation à l'aide d'un processus de Poisson a conduit David Bailey, Jonathan Borwein, C. Calude, Michael Dinneen, Monica Dimiteescu et Alex Yee à la conclusion suivante : « Il est extraordinairement improbable que π ne soit pas normal en base 16, étant donné la normalité de son segment initial. » Malheureusement, le nombre décimal qui aurait le même développement pendant quatre milliards de décimales et qui se poursuivrait par des 0 aboutirait à la même conclusion, qui n'est donc en rien l'esquisse d'une preuve.

Vers la normalité de log(2) ou de π

D. Bailey et Richard Crandal ont proposé une condition simple assurant la normalité du nombre log(2) (qui, comme $\sqrt{2}$, e ou π, intéresse particulièrement les mathématiciens). Si la suite définie par $x_0 = 0$ et $x_n = (2x_{n-1} + 1/n) \bmod 1$ est équidistribuée (x_n se retrouve dans l'intervalle $[a, b]$ à la fréquence $b - a$, quels que soient les nombres réels a et b tels que $0 < a \leq b < 1$), alors log(2) est normal en base 10. Même si la condition semble plus simple à établir que

© Pour la Science - n°422 - Décembre 2012

la normalité de log (2), elle résiste pour l'instant, et l'on ne peut donc pas affirmer que log (2) est normal. Une condition du même type existe pour π. Bien qu'un peu plus complexe, elle donne l'espoir qu'on s'approche d'une preuve que π est normal en base 2.

Et les nombres absolument non normaux ? Puisqu'on n'arrive pas à expliciter un nombre absolument normal, peut-on au moins en expliciter un qui soit absolument non normal (c'est-à-dire qui ne soit normal dans aucune base *b*, pour *b* supérieur ou égal à 2) ? Cette fois, la réponse est oui : Greg Martin, à l'Université de Toronto, a réussi en 2001 à mener une telle construction pour un nombre irrationnel et calculable de manière effective. Le nombre noté ici α possède une définition courte :

$$d_2 = 2^2, \quad d_i = i^{d_{i-1}/(i-1)},$$

$$\alpha = \prod_{j=2}^{\infty} \left(1 - \frac{1}{d_j}\right)$$

Son développement décimal est :
0,6562499999995699999...999999985284
04201690728... (avec 23 747 291 559 fois le 9 après 9956...

Normalité mixte...

Des progrès viennent aussi d'être réalisés concernant les nombres normaux dans certaines bases et pas dans d'autres.

Deux entiers *a* et *b* sont dits multiplicativement dépendants s'il existe des puissances de *a* et de *b* égales ($a^m = b^n$). Quand c'est le cas, on montre qu'un nombre normal en base *a* l'est aussi en base *b*. En particulier, « être normal en base 1 000 » est donc équivalent à « être normal en base 10, 100, ou 100 000 ». On ne sait écrire explicitement les décimales d'aucun nombre qui soit normal en deux bases de numération indépendantes. Bien sûr, si l'algorithme pour calculer le nombre de Turing-Becher-Figueira est perfectionné et mis en œuvre, il donnera un tel nombre.

Depuis 1959, on sait cependant, grâce aux travaux du mathématicien anglais John Cassel, que si *a* et *b* sont indépendants, alors il existe des nombres normaux en base *a* qui ne le sont pas en base *b*. Un résultat bien plus général de Wolfgang Schmidt (1962) indique même que si A et B sont deux ensembles d'entiers supérieurs ou égaux à 2, tels que les nombres dépendants ne soient jamais séparés (quand *a* et *b* sont dépendants, ils sont tous deux dans A, ou tous deux dans B), alors il existe un nombre *x* qui est normal dans toute base *a* de A, et non normal dans toute base *b* de B. Ces nombres *x* sont cependant du même type que ceux de Borel : on sait qu'ils existent sans qu'on puisse les définir simplement, ni bien sûr les calculer.

En 2002, on a toutefois réussi à exhiber des nombres calculables dont on a montré qu'ils étaient normaux en base 2 et non normaux en base 6 (2 et 6 sont indépendants). Bien que minuscule en apparence, il s'agit là d'un progrès remarquable, d'autant que cette fois les nombres en question se calculent pour de vrai ! Le nombre de Stoneham dont nous redonnons la définition :

$$\alpha_{2,3} = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{3^k 2^{3^k}}$$

est normal en base 2 et non normal en base 6. Un autre progrès récent (2002) est le théorème de Boris Adamczewski, de l'Université Lyon 1, et Yann Bugeaud, de l'Université de Strasbourg *(voir l'encadré 4)*.

Ainsi, le monde mathématique est étrange : on peut y formuler des questions très simples et très naturelles (toutes celles concernant les nombres normaux le sont) et buter dessus longuement : c'est par exemple le cas pour la question « π est-il normal en base 10 ? » On peut démontrer que des objets existent sans que l'on puisse en exhiber un seul. C'est le cas des ensembles non mesurables au sens de Lebesgue. On peut aussi définir parfaitement un objet et être incapable d'en connaître le détail, soit parce qu'il est incalculable (comme les nombres absolument normaux du type Ω), soit parce que l'algorithme qui le construit est si inefficace qu'on n'obtient concrètement rien (comme le nombre absolument normal de Turing-Becher-Figueira). Pourtant, dans ce labyrinthe de quasi-paradoxes, les chercheurs réussissent à se frayer un chemin et avancent à petits pas... sans jamais renoncer. ■

L'AUTEUR



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

BIBLIOGRAPHIE

Y. Bugeaud, **Modulo One and Diophantine Approximation**, Cambridge University Press, 2012.

D. H. Bailey, **and the digits of pi**, *Experimental Mathematics*, à paraître, 2012.

B. Adamczewski et Y. Bugeaud, **On the complexity of algebraic numbers. Expansions in integer bases**, *Annals of Mathematics*, vol. 165(2), pp. 547-565, 2007.

D. H. Bailey *et al.*, **On the binary expansion numbers**, *Journal de théorie des nombres de Bordeaux*, vol. 16(3), pp. 487-518, 2004.

V. Becher et S. Figueira, **An example of a computable absolutely normal number**, *Theoretical Computer Science*, vol. 270, pp. 947-958, 2002.

SCIENCE & FICTION

L'homme du futur dans la science-fiction

Les diverses évolutions de l'humanité envisagées par les cinéastes sont-elles vraisemblables ?

Jean-Sébastien STEYER et Roland LEHOUCQ

Toute espèce vivante évolue et se transforme. *Homo sapiens* n'échappe pas à la règle ; il s'est modifié depuis que ses premiers représentants sont apparus en Afrique il y a environ 200 000 ans. Les paléoanthropologues sont capables de raconter son histoire. Mais la question de l'évolution future de l'espèce humaine est plus embarrassante.

Mutations génétiques ou altérations brutales de l'environnement font partie des nombreux facteurs aléatoires qui contraignent l'évolution et la rendent difficilement modélisable. Disserter sur l'évolution future des espèces relève donc d'une extrapolation qui n'est plus tout à fait scientifique. À défaut de savoir à quoi ressembleront les humains dans 500 000 ans, contentons-nous d'observer comment les auteurs de science-fiction les ont envisagés.

Cinq espèces d'*Homo futuralis*

De H. G. Wells à René Barjavel, d'Aldous Huxley à William Gibson en passant par Philip K. Dick, ils sont nombreux à avoir imaginé l'humanité de demain. Cinq grandes tendances émergent de leurs réflexions. Que ces tendances cachent d'intéressantes critiques sociétales ou nos désirs de conquête, [illegible] pour mieux les évaluer à la lumière de nos connaissances : examinons donc *Homo socialis*, humain hyperspécialisé au sein d'une société souvent totalitaire ; *Homo artificialis*, cyborg résultant de l'intégration de la machine dans le vivant ; *Homo troglodytus*, vivant sous terre ; *Homo aquaticus* qui retourne habiter les océans ; et enfin *Homo sideralensis* adapté à la conquête de l'espace.

Tout d'abord, *Homo socialis* correspond souvent à un humain physiquement « régressé », voire amorphe : son corps est très spécialisé dans la réalisation d'une tâche bien déterminée, par exemple le travail, l'alimentation ou encore la reproduction, tâche qui s'effectue uniquement au profit du groupe. Chaque individu est alors noyé dans la masse, totalement dépendant des autres et souvent lobotomisé.

Ce scénario fait le parallèle entre deux types de sociétés très hiérarchisées : celles qui relèvent essentiellement de la culture – la nôtre – et celles qui relèvent de la nature, telles les multiples colonies animales – fourmis, termites, abeilles, cnidaires – où chaque individu est souvent en coévolution. D'ailleurs, *Homo socialis* a parfois une morphologie d'insectoïde et se multiplie par parthénogenèse (la femelle se reproduit sans le mâle et donne une multitude de rejetons souvent identiques). En termes d'évolution biologique, ce scénario n'est guère crédible, car il faudrait une pression culturelle bien trop importante pour engendrer spontanément de telles spécialisations morphologiques. Certains auteurs, tel Huxley dans son *Meilleur des mondes*, proposent d'utiliser des manipulations génétiques pour aboutir à ce résultat.

Des hypothèses pour la survie de l'humanité

Restons « en société » avec *Homo artificialis* qui n'est autre qu'un cyborg, c'est-à-dire un humain où sont intégrés des prothèses, puces électroniques, appareils auditifs et sensoriels, etc. Le policier « technologiquement modifié » du film *Robocop* est sans doute l'un des cyborgs les plus célèbres du cinéma. Dans les années 1990, le mathématicien et auteur de science-fiction Vernor Vinge contribua à populariser le concept de singularité selon lequel la convergence entre nanotechnologie, biologie et informatique conduira à une croissance technologique d'un ordre supérieur. V. Vinge postule que l'humanité aura bientôt les moyens de créer une intelligence artificielle mettant un terme à l'hégémonie humaine. C'est ce qui se passe dans le film *Terminator*, où le réseau planétaire *Skynet* devient conscient et décide d'exterminer

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012



© Marc Boulay, marcboulay.fr

DEUX HOMMES DU FUTUR IMAGINÉS par les cinéastes : *Homo aquaticus (à gauche)*, vivant dans les profondeurs de l'océan, et *Homo sideralensis (à droite)*, qui, pour survivre à une catastrophe terrestre, colonise l'espace. Sa longévité lui permet d'effectuer sans difficultés de longs voyages intersidéraux.

l'humanité. *Homo artificialis* apparaît souvent dans un contexte sombre, où l'humanité est rattrapée par sa technologie.

Que dire d'*Homo troglodicus*, à la conquête d'environnements improbables ? Sous terre, l'archétype en est le Morlock, l'un des deux descendants de l'espèce humaine que Wells dépeint dans son roman *La machine à explorer le temps* (1895). Ce monstre fuit la lumière solaire, ce qui donne à sa peau un aspect laiteux, et il a des yeux rouges adaptés à l'obscurité. Avec ses dents proéminentes et des grosses mains, il évoque le rat-taupe. Le cadre de vie d'*Homo troglodicus* varie de la simple caverne à la mégapole souterraine, parfois empreinte d'un rétrofuturisme qui évoque la société industrielle du XIXe siècle. L'homme troglodyte, souvent sauvage et méchant, symbolise le retour à la bestialité, l'échec de la modernité et du progrès technique. Dans de nombreux scénarios, l'humanité devient troglodyte à la suite d'un cataclysme global, une guerre nucléaire par exemple.

Dans les mers, *Homo aquaticus* offre une vision plus optimiste, voire idyllique, d'un futur où les humains deviennent capables d'habiter les profondeurs des océans. Étroitement lié au mythe de l'Atlantide et des cités englouties, cette idée puiserait également sa source dans l'hypothèse paléontologique du « singe aquatique », très en vogue dans les années 1960 et selon laquelle nos ancêtres auraient séjourné un temps dans l'eau, en milieu marin ou côtier. Morphologiquement parlant, *Homo aquaticus* ressemble souvent à un hybride homme-poisson muni de branchies, de nageoires ou de palmures selon les auteurs. Notons toutefois que l'évolution est irréversible, et que nous ne redeviendrons jamais « poissons ».

Sous les eaux ou dans l'espace ?

Enfin, *Homo sideralensis* ouvre d'autres horizons. Il correspond sans doute au scénario qui comporte le plus d'espoirs, révélant notre prise de conscience d'une Terre dont les jours sont comptés. Notre planète est, par exemple, sous la menace permanente d'une chute d'astéroïde, tel celui qui précipita la fin des dinosaures non aviens, il y a 65 millions d'années. Si cela devait se reproduire, une solution de repli serait bienvenue. Comme le cyborg, *Homo sideralensis* est résolument tourné vers la technologie, pour quitter la Terre et augmenter les chances de survie de l'espèce humaine. Plutôt pacifique et très intelligent, au crâne imposant, il est souvent mince et revêtu d'une combinaison brillante. Sa morphologie évoque celle des « petits gris », aliens filiformes à grosses têtes qui, dans de nombreux scénarios de science-fiction, se seraient déjà installés sur Terre. En outre, *Homo sideralensis*, lorsqu'il n'est pas en état d'hibernation artificielle, jouit souvent d'une longévité de plusieurs centaines d'années lui permettant de voyager dans l'espace intersidéral.

Dès lors, peut-on s'aventurer à dire à quoi ressemblera l'humain du futur ? Concernant l'évolution de l'humanité à long terme, la prévision la plus probable est l'extinction, car nous savons que les espèces, comme les civilisations, sont mortelles : elles ont des durées de vie limitées, et, même si les estimations sont variables, tous les scientifiques s'accordent à dire qu'une espèce de mammifère dure moins longtemps qu'une espèce d'« invertébré ».

Mais les humains inventent des outils qui modifient la façon dont ils se reproduisent ou dont ils se soignent, surtout sous nos latitudes. Avec la thérapie génique, l'humanité pourra-t-elle modifier son patrimoine génétique pour s'adapter aux modifications de son milieu naturel ? Et si, grâce à son pouvoir sur la matière inerte – par la technique – et vivante – par la médecine et la génétique –, l'humanité modifiait les conditions mêmes de son évolution ? ■

J.-S. STEYER est paléontologue au CNRS-MNHN, à Paris. R. L[illegible] est [illegible] au CEA, à Saclay.

ART & SCIENCE

L'art abstrait, une question de bon sens

Un tableau abstrait serait a priori *dépourvu d'orientation privilégiée. Pourtant, des non-initiés réussissent à déterminer celle que lui a attribuée l'artiste.*

Loïc MANGIN

En 1958, les architectes de la tour Seagram, à New York, sollicitent le peintre américain Mark Rothko pour décorer le restaurant *Four Seasons*, au rez-de-chaussée. L'artiste commence à peindre puis, sans que l'on sache pourquoi, annule la commande et conserve les tableaux déjà faits. Les commanditaires l'ont sans doute maudit pour ce geste… à en juger par l'acharnement du sort sur lui et ses œuvres. En effet, il a fait don de deux œuvres de cette série à la *Tate Modern* à Londres, où elles arrivent le 25 février 1970 ; or c'est ce jour qu'a choisi le peintre pour se suicider. Autre signe, l'une des toiles a été vandalisée le 7 octobre 2012 avec de la peinture noire. Enfin, à plusieurs reprises, au gré des expositions et des déplacements, les toiles auraient été accrochées dans le mauvais sens ! Les bandes larges ont été placées verticalement alors que, à en croire la signature figurant au dos du tableau, elles doivent être horizontales. Un débat s'en est suivi parmi les historiens d'art sur les mérites respectifs des deux orientations.

De telles controverses ont également été rapportées à propos d'œuvres de Matisse, de Rauschenberg, de Van Gogh… Elles posent la question de savoir si, en art abstrait, l'orientation d'une œuvre compte dans sa perception et dans les émotions qu'elle déclenche. George Matter, psychologue à l'Université du Sussex, en Grande-Bretagne, s'y est intéressé. Pour ce faire, il a soumis, lors de deux expériences, une quarantaine d'œuvres d'art du XXe siècle à l'abstraction plus ou moins prononcée, parmi lesquelles le *Nu descendant un escalier* de Marcel Duchamp (*voir page ci-contre*), mais aussi des œuvres de Fernand Léger, de Georges Braque, de Jackson Pollock, de Kasimir Malevitch, de Joan Miró…

L'art moderne s'est affranchi des représentations figuratives et met rarement en scène des éléments du monde réel ; quand c'est le cas, les distorsions les rendent souvent difficilement reconnaissables. De la sorte, l'artiste se concentre surtout sur la composition de son œuvre à laquelle il attribue néanmoins une orientation privilégiée. Est-elle évidente pour tous ? C'est le sens de la première expérience. Les volontaires (des étudiants en histoire de l'art et les arts) à qui l'on a présenté les tableaux sous quatre orientations différentes (l'originale et celles tournées de 90, 180 et 270 degrés) devaient choisir celle qui leur apparaissait la plus esthétique ou la plus riche de sens. Ils ont choisi la bonne orientation dans quasiment 50 pour cent des cas, soit plus que s'ils avaient répondu au hasard. Les trois autres orientations ont été choisies de façon à peu près équivalente, de 16 à 18 pour cent. Pour certains tableaux, tel *Maisons à l'Estaque*, de Braque (81 pour cent de bonne orientation), des éléments ont pu aider à la décision. En revanche, pour d'autres complètement abstraits, notamment *La Naissance du monde*, de Miró, on ignore ce qui a guidé les réponses, bonnes dans 56 pour cent des cas.

À plusieurs reprises, au gré des expositions, des toiles de Rothko ont été accrochées dans le mauvais sens !

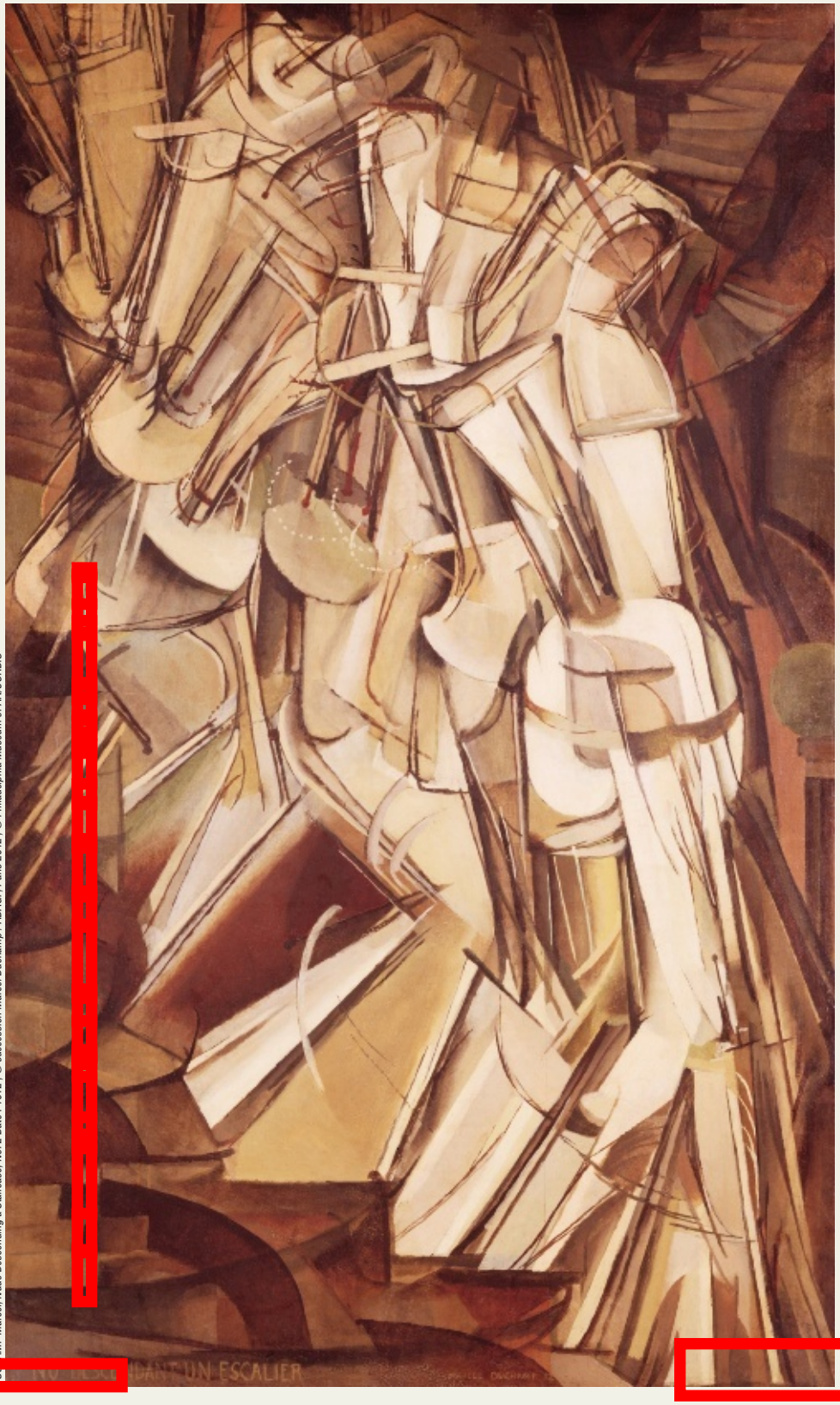
Dans la seconde expérience, d'autres volontaires, confrontés aux mêmes œuvres, devaient répondre à la question suivante : « Le tableau contient-il des éléments reconnaissables ? » Parmi les 40 toiles, sept ont suscité chez tous les sujets la réponse *non*, par exemple pour la *Composition suprématiste, Avion volant* de Malevitch ; cinq œuvres, notamment *Les deux femmes et la nature morte* de Léger, ont recueilli un *oui* unanime.

Les résultats pour certains tableaux sont intéressants. Ainsi, pour la *Composition suprématiste* de Malevitch, 72 pour cent des volontaires ont choisi l'orientation correspondant à une rotation de 90 degrés dans le sens contraire des aiguilles d'une montre (et aucun n'a choisi la bonne), sans doute parce que, dans ce sens, on voit un empilement de formes décroissantes (du bas vers le haut) conforme à une réalité physique. Ce n'était pas dans les intentions de l'artiste ! Autre cas étonnant, un seul participant a repéré quelque chose de significatif dans *La Naissance du monde*, de Miró, mais plus de la moitié des participants à la première expérience ont choisi le bon sens.

G. Matter conclut que les réponses des participants s'accordent, dans une proportion supérieure à celle due au seul hasard, avec le choix des artistes. Et il appelle à des études supplémentaires pour comprendre cette concordance. Elles sont d'autant plus nécessaires que, pour certaines œuvres, elle relève du mystère. En effet, l'orientation décidée par Pollock pour sa composition *One*, peinte en 1950, a été reconnue dans 56 pour cent des cas. Pourtant, il l'a réalisée en lâchant des filets de peinture en tournant autour de la toile posée à même le sol. ■

G. Matter, **Aesthetic judgement of orientation in modern art**, *i-Perception*, vol. 3, pp. 18-24, 2012.

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012



DUCHAMP Marcel, Nude Descending a Staircase, No. 2 Date : 1912 ; © succession Marcel Duchamp / ADAGP, Paris 2012 ; © Philadelphia Museum of Art/CORBIS

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012

IDÉES DE PHYSIQUE

Les brouillards de mélange

Le mélange de deux masses d'air de températures différentes peut, en fonction de leurs hygrométries, créer un brouillard. C'est le procédé employé dans les salles de spectacles.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Certains matins d'hiver, nous produisons de la brume blanche en soufflant dans l'air froid *(voir la figure 1)*. D'autres matins pourtant tout aussi froids, il ne se passe rien. Pourquoi ? Le refroidissement de l'air humide que nous expirons n'est-il pas à l'origine de la brume ? L'explication est à rechercher dans le fait qu'en se mélangeant à l'air ambiant, l'air expiré voit non seulement sa température diminuer, mais aussi sa teneur en eau. Le mécanisme de formation du « brouillard de mélange » qui peut en résulter est semblable à celui des traînées d'avion ou des générateurs de fumée utilisés dans certains spectacles.

Le brouillard, un air sursaturé en eau

À température ambiante (20 °C), un mètre cube d'air contient au maximum 18 grammes de vapeur d'eau. C'est par exemple l'humidité présente dans l'air occupant le haut d'une bouteille d'eau bouchée. Tant que la teneur en eau est inférieure à ce seuil, l'eau reste sous forme de vapeur et forme avec les autres molécules de l'air un mélange gazeux transparent. Quand le seuil est atteint, on dit que l'air est saturé et que l'hygrométrie est de 100 pour cent.

Lorsque la teneur en eau dépasse le seuil de 18 grammes par mètre cube à 20 °C, l'eau en excès se condense, formant de minuscules et innombrables gouttelettes liquides qui diffusent la lumière et donnent aux brouillards et aux nuages leur apparence laiteuse. Or le seuil de saturation de l'air augmente fortement avec la température : aux températures ordinaires (entre 0 et 30 °C), il double à peu près tous les dix degrés. En refroidissant suffisamment une masse d'air non saturée, on peut donc lui faire franchir le seuil de saturation. Par exemple, de l'air à 60 pour cent d'humidité à 30 °C (environ 18 grammes d'eau par mètre cube d'air) devient, à 10 °C, sursaturé à 200 pour cent : la moitié de l'eau contenue dans l'air va se condenser.

Doit-on alors attribuer au seul refroidissement la formation de brouillard lorsqu'on souffle dans un air hivernal ? Il ne faut pas oublier que dans cette situation, on a un fort brassage entre l'air expiré et l'air ambiant. Le mélange obtenu juste après l'expiration est évidemment plus froid que l'air expiré, mais son hygrométrie est aussi modifiée. Or il n'est pas évident de savoir si cette dernière sera supérieure ou inférieure au seuil de saturation.

Pour déterminer ce qui peut se passer, il est indispensable de se reporter à la courbe qui représente la teneur en eau à saturation en fonction de la température *(voir la figure 2)*.

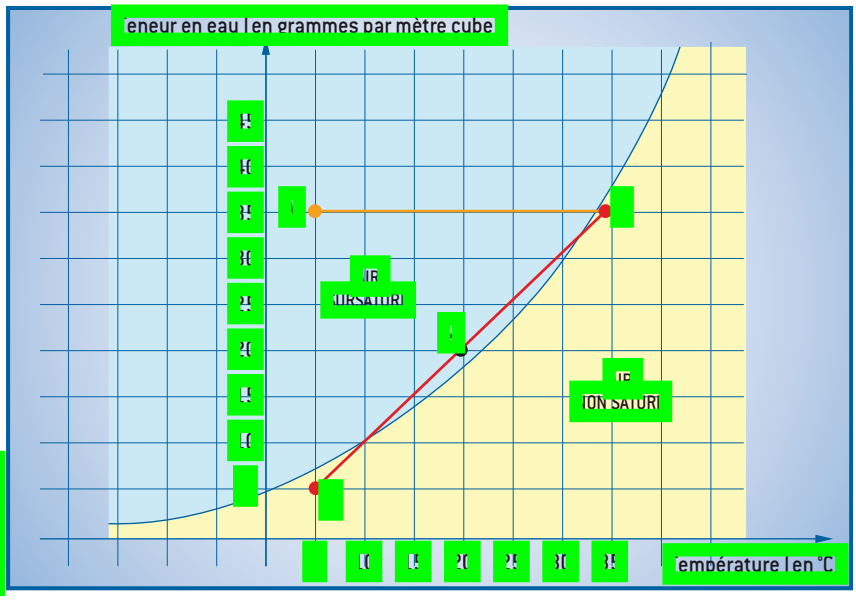
L'air que nous expirons est à une température d'environ 33-34 °C, et il est pratiquement saturé d'humidité avec près de 36 grammes de vapeur d'eau par mètre cube. Son point représentatif est sur la courbe : si l'on se contente de refroidir cet air, la vapeur d'eau se condensera immédiatement.

Qu'en est-il si on le mélange ? Pour simplifier, supposons que les deux airs soient en proportions égales. La teneur en vapeur d'eau du mélange sera alors égale à la moyenne des teneurs en eau de l'air expiré et de l'air ambiant, et sa température à la moyenne des deux températures. Par exemple, si l'air ambiant est complètement sec, la teneur en vapeur d'eau du mélange sera de 18 grammes par mètre cube ; la condensation ne sera possible qu'avec une température



1. L'AIR EXPIRÉ dans de l'air ambiant froid produit parfois un « brouillard de mélange », en fonction de l'hygrométrie de l'air ambiant et de sa température. Le même phénomène est à l'origine des traînées de condensation créées par les réacteurs des avions de ligne à haute altitude.

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012



2. LA COURBE DE SATURATION en vapeur d'eau sépare la phase gazeuse *(en jaune)* de la phase sursaturée *(en bleu)* où la vapeur d'eau se condense. Une masse d'air à 34 °C et contenant 35 grammes d'eau par mètre cube n'est pas saturée *(point A)*. Si par exemple on la refroidit jusqu'à 5 °C *(segment AA')*, elle franchit le seuil de saturation et la vapeur d'eau se condense. Si on mélange l'air à 34 °C avec une même masse d'air non saturé à 5 °C et contenant 5 grammes d'eau par mètre cube *(point B)*, le point représentatif du mélange sera au milieu M du segment AB, c'est-à-dire dans la phase sursaturée : un brouillard aura été créé par le mélange de deux masses d'air non saturé.

inale de 21 °C et moins, c'est-à-dire une empérature de l'air ambiant de 8 °C et moins. Une température supérieure néces-site d'élever son hygrométrie : pour un air ambiant à 14 °C, il faut une teneur en eau d'au moins 8 grammes par mètre cube, soit environ 65 pour cent d'humidité, pour que l'expiration produise un brouillard.

En pratique, les estimations précédentes se révèlent fausses, car la proportion du mélange, sans doute très inférieure à 50 pour cent d'air expiré, est difficilement contrôlable. Toujours est-il que le point représentatif d'un tel mélange est forcément sur le segment reliant, sur le diagramme, les points correspondant à l'air expiré et à l'air ambiant.

En jouant sur la puissance de son souffle, on peut se déplacer sur ce segment : un souffle léger (peu d'air expiré dans le mélange) ne donnera lieu à aucune condensation, tandis qu'un souffle plus puissant (plus d'air expiré dans le mélange) provoquera la formation de brouillard. La forme convexe de la courbe de saturation autorise d'ailleurs une situation étonnante : en mélangeant deux airs non saturés et de températures distinctes, il est possible d'obtenir un air dont l'hygrométrie est supérieure à 100 pour cent, donc où se forme un brouillard.

On peut retrouver ces brouillards de mélange à proximité de surfaces d'eau plus chaude que l'air ambiant. Ces surfaces réchauffent et humidifient l'air qui les surmonte ; ce dernier, devenu moins dense, s'élève et peut former un brouillard. C'est souvent le cas en hiver au-dessus de sources thermales chaudes ou de piscines chauffées, ou chez soi au-dessus d'une soupe ou d'un café bien chauds !

Des avions aux machines à brouillard

Le même mécanisme permet aussi de comprendre pourquoi les avions laissent parfois des traînées blanches dans le ciel. La combustion du carburant dans les réacteurs produit, entre autres, de la vapeur d'eau. Le gaz chaud éjecté par les tuyères se mélange avec l'air ambiant et se refroidit. Dans les conditions atmosphériques usuelles, ce mélange sera à l'origine d'un brouillard entre 8 et 19 kilomètres d'altitude pour de l'air ambiant saturé, et entre 10 et 14 kilomètres d'altitude pour de l'air sec : ne sont donc concernés que les avions de ligne en vol de croisière.

En dehors de ces domaines, même si l'air ambient est saturé, la quantité d'eau ajoutée par le réacteur n'est pas

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.idphus.f

BIBLIOGRAPHIE

E. Vitz, **Fog machines, vapors, and phase diagrams**, *J. of Chem. Educ.*, vol. 85(10), pp. 1385-1388, 2008.

J.-P. Chalon, **Combien pèse un nuage**, EDP Sciences, 2002.

Les nuages d'intérieur de l'artiste Berndnaut Smilde : http://www.berndnaut.nl/works.htm

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

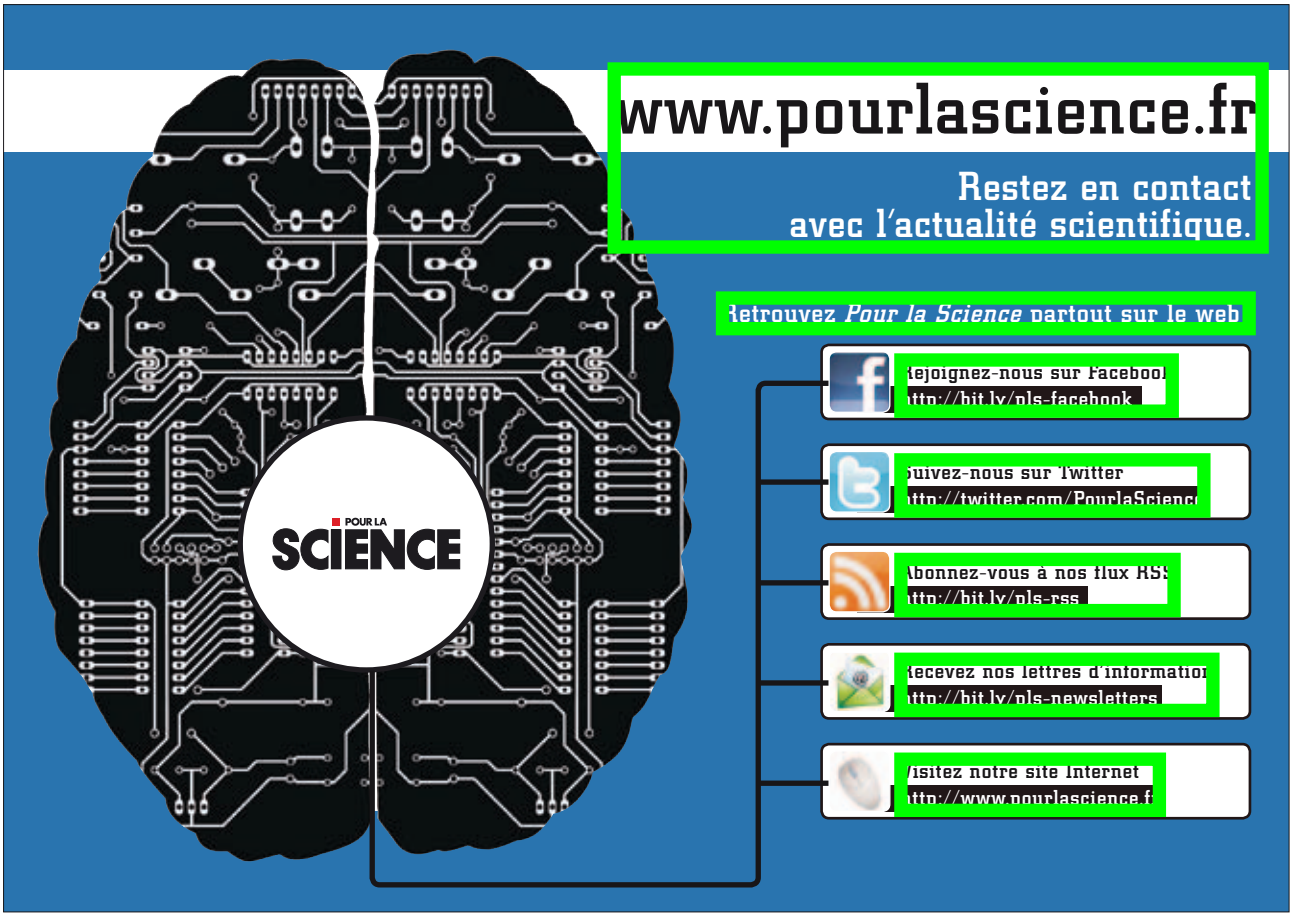


3. LES BROUILLARDS de mélange créés dans les spectacles contiennent non seulement de l'eau, mais aussi de la glycérine ou du propylène glycol, deux composés non toxiques qui permettent de ralentir l'évaporation des gouttelettes et ainsi d'obtenir un brouillard plus persistant

suffisante pour compenser son refroidissement avec l'air ambiant. Pour ces traînées dites de condensation, les turbulences atmosphériques continuent de brasser les masses d'air après le passage de l'avion. Si l'air ambiant est peu humide, les traînées disparaissent rapidement à cause de l'évaporation des gouttelettes. En revanche, lorsque l'air ambiant est légèrement sursaturé, les traînées peuvent persister assez longtemps.

Revenons sur terre pour retrouver les brouillards de mélange dans les « machines à brouillard » utilisées pour faire de la brume dans certains spectacles *(voir la figure 3)*. Dans ces machines, un « jus à brouillard » est vaporisé et éjecté sous pression. Sa température est de l'ordre de 120 °C, soit autant que dans une cocotte-minute, donc avec le même résultat que lorsqu'on retire la soupape de ladite cocotte : le mélange avec l'air ambiant produit de la fumée.

Mais comment éviter la disparition rapide de ce brouillard lorsqu'il s'éloigne de son point d'éjection ? On utilise pour cela un mélange d'eau et de glycérine ou de propylène glycol, deux composés moins volatils que l'eau (et non toxiques, comme en témoigne leur emploi dans l'industrie alimentaire). L'évaporation des gouttelettes en est fortement ralentie et le brouillard est beaucoup plus persistant. Il permet de rendre visibles les faisceaux des projecteurs dans les spectacles, de créer des ambiances au cinéma… Plus original, l'artiste néerlandais Berndnaut Smilde se sert de ces machines pour faire apparaître (après une méticuleuse préparation) un nuage plus vrai que nature au sein d'une pièce fermée, faisant ainsi du tableau *Le Poison* (1939) de René Magritte une réalité. ■

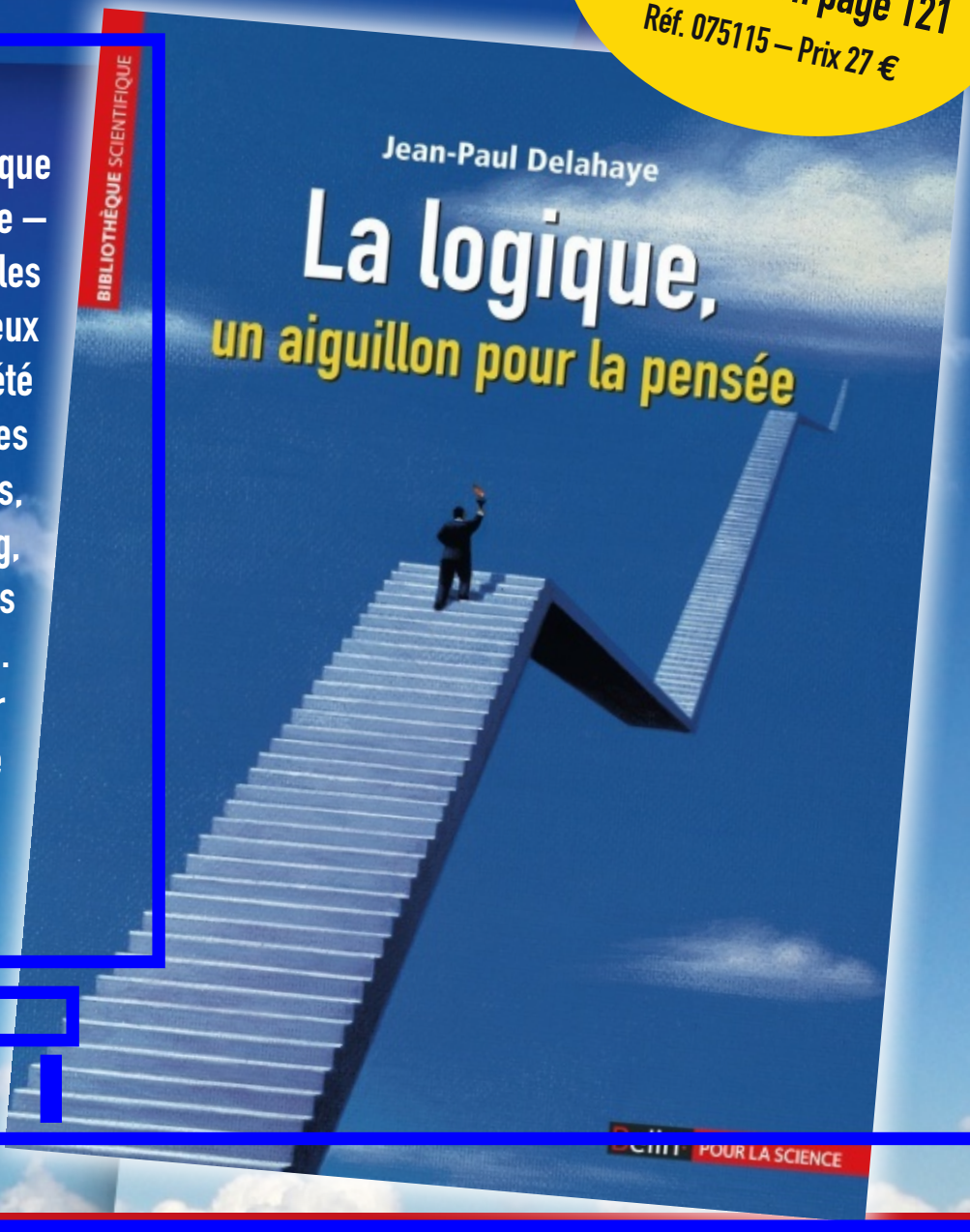


© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012

La logique,
un aiguillon pour la pensée

Jean-Paul Delahaye

Commandez ce livre dès maintenant grâce au bulletin en page 121
Réf. 075115 – Prix 27 €



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

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

Disponible en librairie et sur www.pourlascience.fr/librairie

SCIENCE & GASTRONOMIE

Inventons de nouveaux gels

L'analyse de la structure des gels, où un liquide est dispersé dans un solide, conduit à des mets de consistance originale.

Hervé THIS



Au royaume de l'alimentation, tout ou presque est gel, puisque la définition classique du terme est « un liquide dispersé dans un solide ». En étudiant ces gels, nous inventerons des plats délicieux comme celui décrit en fin d'article.

Des exemples de gels ? Une confiture : le jus du fruit est piégé dans le réseau solide, continu (il s'étend d'un bord à l'autre du pot), formé par les molécules de pectines. Ou encore les aspics, préparés à partir de gélatines (composés de nature protéique obtenus par traitement du tissu collagénique d'animaux) où le liquide (un fond de volaille, par exemple) est piégé dans le réseau continu formé par l'assemblage des polymères, qui s'associent par leurs extrémités.

Ces gels sont « connectés » : le liquide et ses solutés peuvent diffuser. Si l'on met un colorant (ou un composé sapide, odorant, etc.) à un bord du gel, ses molécules diffuseront, à la faveur de l'agitation moléculaire d'origine thermique, jusqu'à l'autre bord du gel. Différents sont les gels non connectés, tels les tissus végétaux ou animaux. Par exemple, un fragment de tissu végétal est un gel puisque les cellules vivantes sont majoritairement faites d'eau, où sont dissous les divers composés nécessaires à la vie ; au total, cette eau est dispersée dans le « solide » qu'est le tissu végétal. Idem pour de la viande... ce qui nous fait conclure que nous-mêmes sommes des gels : nous sommes faits de beaucoup d'eau, mais nous ne la laissons pas fuir.

On comprend que les gels connectés ou non connectés précédents diffèrent, mais... en existe-t-il d'autres ? La considération de la dimensionnalité des structures que l'on assemble pour construire un système dispersé, aussi nommé système colloïdal, conduit à imaginer des systèmes nouveaux. Par exemple, les cellules animales que sont les fibres musculaires sont de dimension un. En revanche, les cellules « parenchymateuses » des végétaux, très petites par rapport au tissu qui les contient, sont de dimension nulle (leurs trois dimensions sont plus petites que la taille du tissu de plus d'un ordre de grandeur). Avec ces deux types d'objets on obtient les gels non connectés connus jusqu'alors, pourquoi ne pas envisager aussi des empilements de feuillets, à deux dimensions ?

Plus généralement, on doit considérer deux phases (liquide, solide), quatre dimensionnalités possibles (0, 1, 2, 3) pour les objets liquides que l'on mêle au réseau solide tridimensionnel, et quelques opérations de mise en relation des deux phases : la dispersion aléatoire dans le solide final, l'inclusion, l'interpénétration de deux réseaux continus.

Mieux encore, on peut imaginer la dispersion (sous l'opération de mise en relation du liquide et du solide est la dispersion aléatoire) de structures de dimensionnalités différentes... comme c'est le cas pour une carotte où les cellules parenchymateuses coexistent avec des structures unidimensionnelles liquides – les canaux nommés xylème et phloème qui, respectivement, montent la sève brute vers les parties aériennes de la plante et redescendent la sève « élaborée », résultat de la photosynthèse, vers les racines et tubercules.

Bref, les possibilités sont nombreuses, et le mot gel est bien trop général pour décrire ces diverses structures. Évitons une longue énumération et contentons-nous d'évoquer une recette particulière, facile à réaliser, donnant une consistance amusante : commençons par broyer de la fraise, sucrons le jus et dissolvons-y de la gélatine ; coulons le liquide obtenu dans une plaque à fond plat, en couche d'environ un demi-centimètre, puis attendons la prise.

À l'aide d'un simple couteau, il n'est alors pas difficile de découper des « spaghettis » de cette préparation, que nous pouvons entasser dans un bol, avec de l'œuf battu. Mettons le bol au four à micro-ondes : alors que l'œuf battu coagulera en formant un gel compact, les spaghettis fondront et resteront liquides tant que la préparation sera à une température supérieure à 36 °C. On obtiendra ainsi un gel enfermant des structures unidimensionnelles liquides. On aurait obtenu une préparation analogue, mais à deux dimensions, si l'on avait empilé dans l'œuf battu des feuillets de liquide gélatiné.

Il y a là la clé, des mets dont la consistance n'a jamais été ni envisagée ni réalisée ! ■



Hervé THIS est chimiste dans le Groupe INRA de gastronomie moléculaire, professeur à AgroParisTech et directeur scientifique de la Fondation Science (Académie des sciences)

Retrouvez les articles de H. This sur www.pourlascience.fr

© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012

Rendez-vous sur

POUR LA SCIENCE .fr

Le site de référence de l'actualité scientifique internationale

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



http://www.pourlascience.fr/rss

http://twitter.com/pourlascience

http://www.pourlascience.fr/pls-facebook + de 8000 fans

À très bientôt sur www.pourlascience.fr !

→ HISTOIRE DES SCIENCES

L'Observatoire de Paris

L. Bobis et J. Lequeux (dir.)

Gallimard/Observatoire de Paris, 2012
(174 pages, 26 euros).

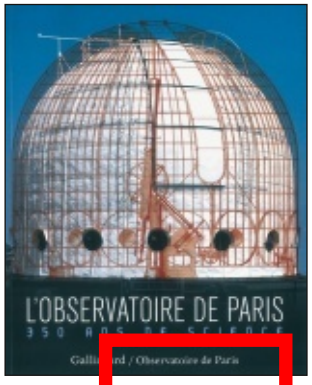
Cet ouvrage collectif raconte l'histoire du plus ancien observatoire astronomique du monde et devrait figurer dans toutes les bonnes bibliothèques. En effet, il montre comment, 350 ans durant, ses directeurs successifs sont parvenus à faire de l'Observatoire de Paris une puissance scientifique qui, aujourd'hui, s'étend sur trois sites : Paris, Meudon et la Station de radioastronomie de Nançay.

Fondé en 1667, l'« Observatoire royal » est dirigé pendant ses 150 premières années par la dynastie des Cassini. Les problèmes à résoudre sont alors la cartographie, la géodésie, la détermination des longitudes en mer, l'établissement de tables et de catalogues astronomiques. Créé en 1795, le Bureau des longitudes se voit confier la tutelle de l'Observatoire. Après quelques années marquées par les astronomes Lalande et Delambre, les polytechniciens règnent. François Arago développe notamment des études de physique sur la lumière, accompagne les débuts de la photographie, développe l'astronomie populaire, mais aussi le… népotisme (intellectuel), puisque la majorité des astronomes sont à la fois polytechniciens, gendre d'Arago ou beau-frère d'un autre astronome de l'Observatoire…

La situation change en 1854 avec un décret de Napoléon III qui sépare le Bureau des longitudes de l'Observatoire, dirigé désormais par Urbain Le Verrier, découvreur de la planète Neptune. « L'homme au trident » est un terrible tyran qui pousse ses employés dans leurs derniers retranchements, voire à la démission collective ! Son dur règne s'achève en 1877, après la guerre franco-prussienne de 1870-1871, à la faveur d'une renaissance du Bureau des longitudes et de la création de l'Observatoire de Meudon, tourné vers l'astrophysique naissante.

En 1878, l'officier de marine Ernest Mouchez devient le directeur de l'Observatoire, et a même le statut de « directeur des observatoires d'État ». Mouchez développe la photographie astronomique autour d'un vaste projet de Carte du ciel. En cette fin de XIXe siècle, les astronomes de l'Observatoire accompagnent aussi l'établissement d'une heure légale en France et d'un Bureau international de l'heure, puis d'une horloge parlante.

Jusqu'au milieu du XXe siècle, et malgré des directeurs et des astronomes volontaires, l'Observatoire suit mal les développements de l'astrophysique, qui, excepté en radioastronomie, se produisent ailleurs. Depuis les années 1970, ses activités sont planifiées en fonction des politiques scientifiques nationales et internationales. Un ouvrage majeur pour comprendre une institution majeure.



→ Guy Boistel

Centre François Viète, Univ. de Nantes

→ ARCHÉOLOGIE

Les trois codex mayas

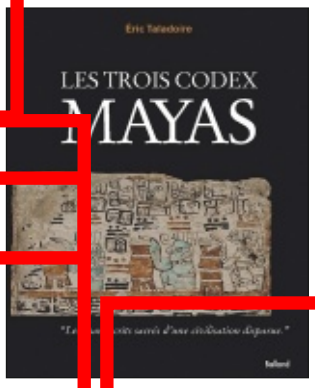
Éric Taladoire

Ballard, 2012
(240 pages, 42 euros).

L'année 2012 a-t-elle été fatidique pour le monde ? Heureusement… non, mais 2012 verra une première internationale attendue depuis 49 ans par tous les passionnés de civilisation maya : la publication en couleurs de l'intégralité des trois seuls manuscrits mayas échappés aux destructions. Enfin !

Superbement photographiées, les 112, 78 et 22 pages des codex de Madrid, Dresde et Paris font jaillir sous nos yeux l'incroyable richesse artistique de centaines de scènes et de figures peintes par les Mayas pour illustrer les textes choisis d'une tradition littéraire et numérologique née au Classique et brisée par la Conquête espagnole. Une tradition servie par l'art de la calligraphie qui s'étendait à la décoration des vases, des monuments, du mobilier. La beauté picturographique des codex et la qualité typographique de l'ouvrage en font un objet d'art comparable aux plus beaux catalogues des expositions internationales consacrées au monde maya.

Après le plaisir des yeux, ceux de l'esprit. Les quatre chapitres d'un spécialiste français des civilisations et religions précolombiennes régaleront le lecteur. En avant-propos, Éric Taladoire tord le cou aux clichés et aux idées fausses, dénonce l'escroquerie intellectuelle des « illuminés » de la fin du monde, et chante la résilience des peuples mayas qui toujours se relèvent des catastrophes naturelles ou des mauvais coups de l'histoire. Le premier chapitre est une synthèse des savoirs les plus à jour sur cette civilisation brillante. Le lecteur se laisse porter par la simplicité du style et retient presque son souffle jusqu'au dernier rebondissement du Postclassique et l'ultime résistance à l'envahisseur espagnol.



Le chapitre suivant situe les manuscrits mayas dans une dialectique du développement des pouvoirs, de l'invention de l'écriture, des contraintes démographiques, agricoles, et des usages du calendrier et de la divination. Vient ensuite une synthèse du contenu iconographique de chacun des trois codex, mettant l'accent sur les divinités, les rituels, les scènes de vie et les corps célestes qui illustrent le texte en écriture logo-syllabographique, émaillé de computs. Enfin, l'auteur fait un grand-angle sur la littérature mésoaméricaine qu'il invite à ne pas oublier : les codex aztèques et mixtèques, les textes en alphabet latin…

Pendant déjà à la seconde édition, le lecteur fait le souhait d'y voir une synthèse du travail des épigraphistes et des traducteurs du texte maya, et d'éliminer un défaut de jeunesse : le numéro des pages des codex citées ne correspond pas aux pages de l'ouvrage mais au numéro attribué par les mayanistes aux pages des codex. Compliqué !

→ André Cauty

CELIA, CNRS Villejuif

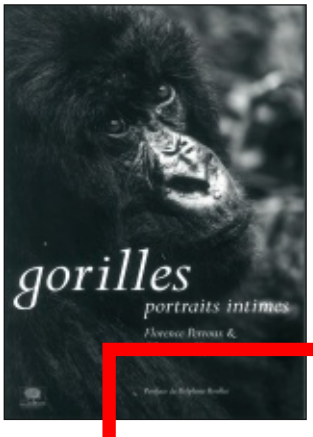
© Pour la Science - n° 422 - Décembre 2012

→ ZOOLOGIE

Gorilles

F. Perrodx et S. Meys
Le Pommier, 2012
(144 pages, 29 euros).

Fruit de la collaboration d'un photographe animalier et d'une spécialiste des gorilles, ce livre est d'abord un magnifique album d'images et de rêveries, comme on se plaît à en offrir à ses amis pour les fêtes. Il constitue une promenade poétique dans l'univers de notre sympathique cousin, « cet animal impressionnant, aussi timide que sensible ». Il nous fait découvrir l'intimité d'une famille de gorilles captifs, ainsi que des images de gorilles photographiés en liberté « sur les pentes d'un volcan rwandais ».



On assiste à la structuration du groupe aux séances de toilettage social, à la naissance des bébés, à « la force du lien maternel », aux jeux et aux découvertes des jeunes années, aux stratégies des jeunes mâles à l'adolescence pour constituer leur propre groupe. On analyse le mode alimentaire de gorilles qui, « malgré les impressionnantes canines des mâles, sont végétariens ». La promenade se termine sur la tombe de la pionnière Dian Fossey, qui a tant fait pour les gorilles, avant d'être assassinée, comme beaucoup d'entre eux, et enterrée au Rwanda, parmi eux.

Ce fait tragique nous amène à la postface qui résume, en quelques pages, la situation actuelle de nos proches cousins. Les deux espèces de gorilles sont menacées par les activités humaines : chasse commerciale visant à alimenter la « viande de brousse » pour la consommation, dégâts collatéraux des conflits armés, maladies transmises par la proximité des hommes, pièges destinés à d'autres animaux, captures de petits pour les collections privées après massacre des mères, destruction des habitats…

La création de réserves gardées et la sensibilisation sont des éléments fondamentaux des programmes de conservation en cours. Seul l'écotourisme, combiné à l'aide de vétérinaires capables de soigner les animaux « malades ou blessés par les collets des braconniers », donne encore l'espoir d'éviter la disparition de ces animaux si attachants. D'autant que « protéger les gorilles, c'est… protéger les forêts dans lesquelles ils vivent et qui constituent les poumons de notre planète… Un livre très beau, mais aussi très utile.

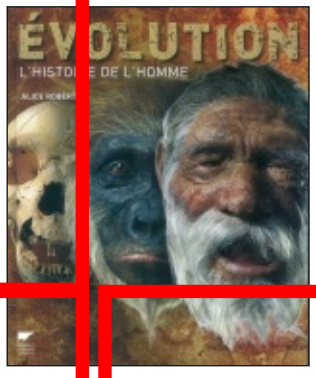
→ Georges Chapouthier
CNRS

→ PALÉONTOLOGIE

Évolution

Alice Roberts
Delachaux et Niestlé, 2012
(255 pages, 29,90 euros).

Alice Roberts, médecin anatomiste anglaise, ostéo-archéologue et anthropologue, nous offre une belle synthèse illustrée sur la question des origines de l'homme. Comment s'est déroulée l'évolution d'un animal qui marche à quatre pattes à un animal bipède ? Certes, tous les primates sont bipèdes, mais la bipédie permanente de l'homme est unique (colonne vertébrale



en forme de « S », fémur au corps oblique et allongé, bassin court et large, pied à voûte plantaire marqué et gros orteil parallèle et collé aux autres)…

Des branches de notre arbre généalogique, en Afrique, source exceptionnelle de matériels fossiles, jusqu'aux migrations planétaires, l'ouvrage nous emmène à la rencontre de nos ancêtres, à qui les troublantes reconstitutions des frères Kennis, des « paléo-artistes » hollandais, nous confrontent :

– *Toumaï (Sahelanthropus tchadensis)*, vieux de six à sept millions d'années, a été découvert en 2001 au Nord du Tchad, 2 500 kilomètres à l'Ouest de la vallée du Rift, donc bien loin de la zone où les recherches sur les premiers hominidés s'étaient concentrées jusque-là. À partir du crâne retrouvé, la face occipitale très inclinée vers l'arrière montre aux paléontologues que cet hominidé est bien lié à l'espèce humaine et pas à celles des chimpanzés et des gorilles.

– *Orrorin tugenensis*, découvert en 2000 au Kenya, prétendant lui aussi au titre de premier hom-

Brèves

LE BEAU LIVRE DE LA PHYSIQUE



Clifford A. Pickover
Dunod, 2012
(528 pages, 29 euros).

Mouvement brownien, hologrammes ou quasi-cristaux sont parmi les notions abordées au fil des pages. Le livre aborde près de 250 inventions ou théories physiques, des incontournables, mais aussi des sujets étonnants et des phénomènes rares. À quelques clichés près, l'auteur parvient à communiquer à travers textes et images sa fascination pour maints aspects intéressants de la physique et de l'histoire de l'univers.

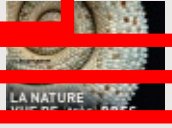
L'ÂGE D'OR DES CARTES MARINES



C. Hoffmann, H. Richard (sous la dir. de)
Seuil/BNF, 2012
(352 pages, 39 euros).

Cet ouvrage donne à voir la plus grande collection au monde de cartes anciennes, conservées à la Bibliothèque nationale de France, à Paris. Les incomparables pièces qui la composent nous semblent aujourd'hui des œuvres polychromes d'art hautement enrichies. C'est qu'elles avaient été produites aussi pour les rois, afin de découvrir non seulement les contours continentaux, mais aussi une vision du monde et de ses ressources, qui d'un siècle à l'autre a changé.

LA NATURE VUE DE PRÈS (t…

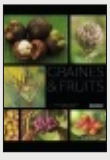


Giles Sparrow
Dunod, 2012
(320 pages, 39 euros).

Trois cents photographies, autant de commentaires avisés… Voilà de quoi voir de près sous les racines, sur les feuilles, sur le nez de la taupe, parmi les entrailles d'un phasme, dans l'intimité des insectes et dans l'intimité des roches ou des plantes carnivores. Un délice pour le regard curieux.

GRAINES & FRUITS

E. Grundm… (photos), Muriel Haz… (photos)
Éditions du Bourgue…, 2012
(252 pages, … euros).



Les images de cet ouvrage exhibent les formes magnifiques des graines qui racontent les stratégies multiples de la reproduction végétale. Quant aux textes, ils racontent une « histoire botanique, poétique et… notre culture et notre imagination, et fait apparaître la biodiversité dans ce qu'elle a de plus beau.

LES ÂGES DE LA VIE



Axel Kahn et Yvan Brochard
La Martinière, 2012
(240 pages, … euros).

Les réflexions d'un généticien sur les changements physiques associés à l'âge et le regard portés sur eux par notre psychisme se croisent avec celles d'un histo… Des illustrations riches et diversifiées sur les âges de la vie s'ajoute une splendide iconograph…

ÎLES PIONNIÈRES

Ph. Vallette et Chr. Causse
Actes Sud, 2012
(254 pages, … euros).



Îles-États, îles menacées, îles sentinelles, îles témoins du changement climatique, îles citoyennes du monde… Parce qu'elles résument le monde et subissent de plein fouet ses évolutions, les îles sont depuis toujours des lieux où s'élaborent des modes de vie durables. Elles jouent en ce sens un rôle d'avant-garde aujourd'hui, comme le montrent bien les auteurs de ce livre riche, éclectique et gorgé d'images de beautés insulaires.

me bipède. On pense confirmer cette hypothèse grâce à son fémur : sa partie supérieure est plus fine que la partie inférieure, caractéristique qui se retrouve chez *Homo sapiens*. Sa première phalange longue et incurvée montre aussi que cet hominidé vieux de six millions d'années avait l'habitude de grimper aux arbres.

– Lucy (*Australopithecus afarensis*), découverte dans les années 1970 au Kenya, a longtemps eu le statut de plus vieux squelette hominoïde jamais trouvé, jusqu'à l'arrivée de Toumaï et d'Orrorin. Elle peut être considérée comme un ancêtre arboricole parce qu'elle vivait dans la forêt et dans un milieu humide.

Pas de doute : ce livre documente magnifiquement l'évolution des hominidés pendant plusieurs millions d'années dans la nature, avant que l'évolution culturelle ne prenne le dessus.

→ Fanélie Wanert
Centre de primatologie de l'Université de Strasbourg

→ ÉCOLOGIE

Des hommes et des oiseaux

Valérie Chansigaud
Delachaux & Niestlé, 2012
(224 pages, 29,90 euros).

La Ligue française pour la protection des oiseaux, créée le 26 janvier 1912, est devenue la LPO, forte de 43 000 membres et intégrée au réseau mondial de *BirdLife*. À l'occasion de ce centenaire, le livre de V. Chansigaud, historienne de l'environnement, a une double ambition : rendre hommage aux acteurs de la protection des oiseaux et faire comprendre l'importance de protéger les oiseaux sauvages.

On est frappé par la diversité de ceux qui jalonnent cette « histoire collective et collective » : ce sont des citoyens ordinaires comme des figures illustres. Tous sont animés par la quête d'une coexistence pacifique avec le vivant non humain.

Ce beau livre donne aussi à voir, grâce à une remarquable iconographie intégrée au récit. Son abondante documentation fait comprendre d'une autre façon une histoire jonchée de cadavres, jusque sur la tête des élégantes chapeautées de la fin du XIXe siècle. « Âmes sensibles, s'abstenir ! », écrit son préfacier Allain Bougrain-Dubourg, président de la LPO.

L'exposé scientifique est servi par un style qui suscite l'émotion, l'effroi, mais aussi l'espoir. V. Chansigaud conquiert le lecteur qui veut reconnaître les rebondissements et dénouements d'épisodes marquants : la lutte des « réformistes moraux » ; la mobilisation des classes moyennes urbaines ; la promotion de la chasse photographique, cette « sportivité du futur » ; l'essor du mouvement associatif ; « l'incroyable jeu de lois » à la recherche d'une législation cohérente et applicable ; le mouvement pour les réserves naturelles ; l'environnementalisme des années 1960. L'auteur relève fortement le relatif désintérêt des naturalistes du XIXe siècle pour la protection d'espèces qu'ils collectent en abondance. Elle dénonce cette « armée d'amateurs sans véritable but scientifique ».

Les sept chapitres s'ouvrent sur des constats : « Les oiseaux disparaissent » ; « Une science bouleversée » ; « L'impossible entente internationale » ; « Le prix de la modernité ». Les actions – « À la recherche des coupables », « Les citoyens passent à l'action » –, sont abordées puis on revient à la question : « Pourquoi protéger les oiseaux ? » V. Chansigaud rappelle, après Maurice Agulhon (*Le sang des bêtes*, 1981), qu'au XIXe siècle est née une sensibilité à la nature aux multiples enjeux : moraux, éducatifs, éthiques, philosophiques, économiques, politiques, scientifiques.



On lit avec intérêt les liens opérés entre l'ornithologie et l'éthologie, la biologie de la conservation ou encore l'écologie abordée du point de vue de l'historien américain Donald Worster (*Les pionniers de l'écologie*, 1992).

Les apports historiques et les débats actuels sur la biodiversité, mus par la sentimentalité ou la rationalité, par le désir de protéger la nature pour sa valeur intrinsèque (vision biocentrée) ou la valeur des biens et services rendus à l'humanité (vision anthropocentrée), sont éclairés d'un jour nouveau par V. Chansigaud.

→ Patrick Matagne
Université de Poitiers

.fr Retrouvez l'intégralité de votre magazine et plus d'informations sur : www.pourlascience.fr

Imprimé en France – Maury Imprimeur S.A. Malesherbes – Dépôt légal 5636 – DÉCEMBRE 2012 – N° d'édition 077422-01 – Commission paritaire n° 0912K82079 – Distribution : NMPP – ISSN 0 153-4092 – N° d'imprimeur 101/177 491 – Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé.