Un gros cerveau grâce à la monogamie ?

L'origine du bond technologique d'il y a 50 000 ans

Un rameau humain taillé par les aléas du climat

POUR LA SCIENCE

Numéro spécial

Novembre 2014

n° 445

www.pourlascience.fr

128 pages

Édition française de Scientific American

L'odyssée humaine

Les moteurs cachés de notre évolution

Reconstitution de *Homo georgicus* (1,8 million d'années) par la sculptrice Elisabeth Daynes.

M 02687 - 445S - F: 6,80 € - RD

Allemagne : 10,20 € - Belgique : 7,8 € - Canada /S : 11,95 CAD - 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

Permettre à votre épargne de faire des petits c'est aussi ça GMF.

Une épargne performante et sûre pour préparer les projets de demain. Avec les contrats d'assurance vie et les supports en euros GMF, vous vous constituez petit à petit une épargne performante qui vous permettra de financer tous vos projets d'avenir, en toute sécurité.

Trophée d'or •2014• des Contrats d'Assurance Vie
Le Revenu
MULTÉO
Catégorie *contrats et fonds en euros*

Rendez-vous sur www.gmf.fr
ou appelez le
N° Vert 0 800 88 11 62
APPEL GRATUIT DEPUIS UN POSTE FIXE

GMF
ASSURÉMENT *humain*

*3,05 %, taux servi en 2013 : frais de gestion déduits et avant prélèvements sociaux pour tous les contrats d'assurance vie en euros GMF et les supports réguliers de Multéo et de Certigo. Les performances passées ne préjugent pas des performances futures.

GMF VIE - Société anonyme au capital de 186 966 736 euros entièrement versé - Entreprise régie par le Code des assurances - 315 814 806 R.C.S. Pontoise
Siège social : 1, rue Raoul Dautry - CS 40003 - 95122 Ermont Cedex.

POUR LA SCIENCE

www.pourlascience.fr

8 rue Férou - 75278 Paris Cedex 06

Groupe POUR LA SCIENCE
Directrice des rédactions : Cécile Lestienne

Pour la Science
Rédacteur en chef : Maurice Mashaal
Rédactrice en chef adjointe : Marie-Neige Cordonnier
Rédacteurs : François Savatier, Philippe Ribeau-Gésippe, Guillaume Jacquemont, Sean Bailly

Dossier Pour la Science
Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin

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

Développement numérique : Philippe Ribeau-Gésippe
Directrice artistique : Céline Lapert
Secrétariat de rédaction/Maquette : Sylvie Sobelman, Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy, Caroline Vanhoove
Marketing : Élise Abib et Ophélie Maillet
Direction financière et direction du personnel : Marc Laumet
Fabrication : Marianne Sigogne et Olivier Lacam
Presse et communication : Susan Mackie
Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé
Anciens directeurs de la rédaction : Françoise Pétry et Philippe Boulanger
Conseiller scientifique : Hervé This
Ont également participé à ce numéro : Olimane Bekki, Emmanuel Desclaux, Sophie Gallé, Eva-Maria Geigl , Eitan Haddok, Évelyne Host-Platret, Anne Masé, Christophe Pichon, Alain Riazuelo, Daniel Tacquenet, Bernard Thierry, Jean-Luc Voisin

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

SERVICE ABONNEMENTS
Ginette Bouffaré. Tél. : 01 55 42 84 04
Espace abonnements :
http://tinyurl.com/abonnements-pourlascience
Adresse e-mail : abonnements@pourlascience.fr
Service des abonnements - 8 rue Férou - 75278 Paris Cedex 06

Commande de livres ou de magazines :
Pour la Science - 628 Avenue du Grain d'Or 41350 Vineuil

DIFFUSION DE POUR LA SCIENCE
Contact kiosques : À Juste Titres ; Benjamin Boutonnet
Tel : 04 88 15 12 41
Information/modification de service/réassort :
www.direct-editeurs.fr
Canada : Edipresse : 945 avenue Beaumont, Montréal, Québec, H3N 1W3 Canada.
Suisse : Servidis : Chemin des châlets, 1979 Chavannes - 2 - Bogis
Belgique : La Caravelle : 303 rue du Pré-aux-oies - 1130 Bruxelles.
Autres pays : Éditions Belin : 8 rue Férou - 75278 Paris Cedex 06

SCIENTIFIC AMERICAN Editor in chief : Mariette DiChristina. Editors : Fred Guterl, Ricky Rusting, Philip Yam, Mark Fischetti, Christine Gorman, Anna Kuchment, Michael Moyer, Gary Stix, Kate Wong. President : Steven Inchcoombe. Executive Vice President : Michael Florek.

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

© Pour la Science S.A.R.L. Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial « Scientific American » sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à « Pour la Science S.A.R.L. ».

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie (20, rue des Grands-Augustins - 75006 Paris).

OJD PRESSE PAYANTE Diffusion Certifiée 2013

Maurice Mashaal
rédacteur en chef

Moteurs d'évolution

Les questions portant sur les origines nous fascinent. L'origine de l'Univers, l'origine de la Terre, l'origine de la vie, l'origine de l'humanité… Les mythologies et les religions ont leurs réponses. La science a les siennes, sans prétendre qu'elles soient complètes ou définitives. De fait, ces réponses évoluent et se précisent au fil des découvertes réalisées par les chercheurs, sur le terrain et dans les laboratoires.

L'origine de l'humanité ? On sait depuis longtemps, sauf à nier l'évidence paléontologique, archéologique et biologique, que l'homme anatomiquement moderne, *Homo sapiens*, est le fruit de l'évolution d'une des branches de l'arbre de la vie, qu'il a des liens de parenté avec les grands singes et que le rameau humain porte plusieurs espèces aujourd'hui disparues, telles que l'homme de Néandertal ou les australopithèques.

Reconstituer le passé, mais aussi le comprendre

Or depuis une quinzaine d'années, la paléontologie humaine s'est enrichie de découvertes nombreuses qui ont fortement modifié la vision de notre lointaine histoire. Le tableau de l'évolution de nos ancêtres et de leurs proches parents apparaît ainsi de plus en plus détaillé.

Cependant, reconstituer l'odyssée évolutive des humains ne suffit pas. Il est bien plus intéressant de comprendre aussi pourquoi l'évolution a pris telle ou telle direction. Quels ont été les rôles du climat, des outils, de la culture, de l'organisation sociale ? Sur ces questions relatives aux moteurs de l'évolution humaine, les scientifiques ont aujourd'hui suffisamment d'éléments pour étayer de passionnantes, et parfois surprenantes, hypothèses. C'est cette science renouvelée des origines de l'homme que *Pour la Science* a voulu présenter dans ce numéro spécial. ■

sommaire

Numéro spécial

1 Edito

Actualités

4 Une soupe primordiale numérique

5 Des anxiolytiques corrélés à Alzheimer

6 Coup de vieux pour la mousson asiatique

9 Un petit ver montre la voie... antibactérienne

Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

Réflexions & débats

12 Point de vue
L'Europe et les vols habités dans l'espace
Thierry Courvoisier

14 Entretien
Médecine personnalisée et cancer : quel avenir ?
Fabrice André

18 Homo sapiens informaticus
Détecter un informaticien dans un dîner en ville
Gilles Dowek

20 Cabinet de curiosités sociologiques
Une justice sous influence
Gérald Bronner

22 Lu sur SciLogs.fr
Pourquoi une médaille d'or du CNRS à un informaticien ?
Thierry Viéville

En couverture : Reconstitution de *Homo georgicus* (1,8 million d'années) par la sculptrice Élisabeth Daynès, Paris. © S. Entressangle, É. Daynes/LookatSciences

Ce numéro comporte trois encarts d'abonnement *Pour la Science*, deux encarts brochés sur la diffusion abonné et un encart jeté sur les pages intérieures de la totalité du tirage.

L'odyssée humaine

Les moteurs cachés de notre évolution

24 **La saga humaine réécrite**
Kate Wong
Les 15 dernières années ont été riches en découvertes. À leur lumière, les scientifiques ont dû revoir presque tous les chapitres de l'histoire de l'humanité.

28 **Le buissonnant rameau humain**
Bernard Wood
Les découvertes ont compliqué la vision que l'on se faisait de l'évolution de l'homme.

38 **Quand l'homme est devenu prédateur**
Kate Wong
Quand et comment nos ancêtres sont-ils devenus de redoutables chasseurs ? Des découvertes récentes éclairent cette question débattue depuis des décennies.

44 **Le climat, moteur d'évolution**
Peter deMenocal
Avec les changements climatiques, la végétation s'est modifiée et, dans la lignée humaine, seules ont survécu les espèces ayant une certaine capacité d'adaptation.

52 **L'émergence de la coopération**
Frans de Waal
Notre capacité à coopérer au sein de grands groupes sociaux a des racines évolutives anciennes.

56 **Aux origines de la division du travail**
Sophie A. de Beaune
Les tâches au sein des premières sociétés humaines se sont d'abord réparties entre hommes et femmes. Une division du travail liée à l'apparition des outils ?

64 **La monogamie un atout pour notre espèce**
Blake Edgar
Le mode de vie en couple durable a peut-être facilité le développement d'un gros cerveau.

72 **Quand est apparue la richesse ?**
Valerie Lecrivain et Geoffroy de Saulieu
Pour l'anthropologue Alain Testart, la richesse n'a pas toujours existé. Elle serait apparue afin d'éviter de payer de sa personne, et non pour échanger des biens

78 **La richesse, question de définition**
Francesco d'Errico et Marian Vanhaeren
Si l'on conçoit la richesse comme tout objet ou moyen dotant un individu d'un avantage social, alors elle existait au Paléolithique supérieur, voire avant.

80 **L'outil a-t-il forgé l'homme ?**
Ian Tattersall
Le passage de nos ancêtres arboricoles à *Homo sapiens* a été rapide grâce à la combinaison d'innovations culturelles et d'aléas climatiques.

86 **Le bond technologique décisif de nos ancêtres**
Maxime Derex
Il y a 50 000 ans, les moyens techniques dont les humains disposaient pour vivre se sont soudain complexifiés. Pourquoi ? Des scénarios se dessinent...

94 **L'homme : une évolution en marche**
John Hawks
Au cours des 30 000 dernières années, les sociétés humaines ont connu de profonds changements, qui ont accéléré l'évolution génétique de l'homme

Rendez-vous

102 Histoire des sciences
La genèse de la police scientifique
Nicolas Quinche
L'analyse des traces laissées par les criminels s'est développée à la fin du XIXe siècle. Mais elle s'ancre dans des pratiques remontant au Moyen Âge.

108 Logique & calcul
Les graphes-allumettes
Jean-Paul Delahaye
Les graphes d'un seul tenant et dont toutes les arêtes sont de même longueur sont loin d'avoir livré tous leurs secrets.

114 Science & fiction
Visions d'un autre monde
Roland Lehoucq et J. Sébastien Steyer

116 Art & science
Le réveil de la matière fatiguée
Loïc Mangin

118 Idées de physique
Mettez un turbo dans votre moteur
Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

121 Question aux experts
À quelles profondeurs trouve-t-on du pétrole ?
Jacques Pironon et Raymond Michels

122 Science & gastronomie
Épinards, salade et aubergine
Hervé This

124 À lire

128 Bloc-notes
Les chroniques de Didier Nordon

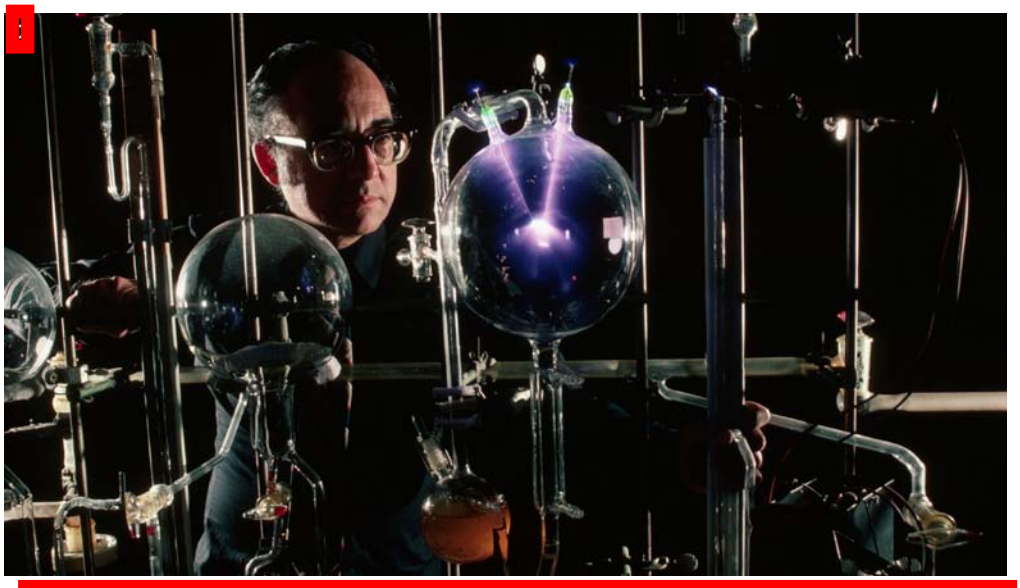
Aussi en numérique !

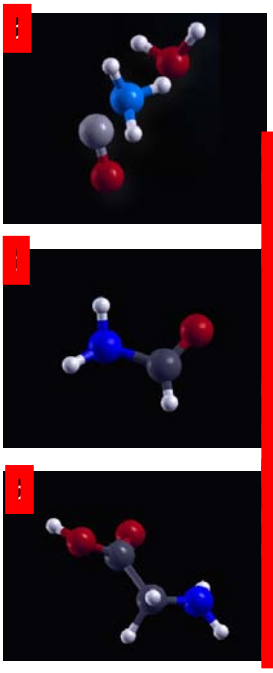
Actualités

Physico-chimie

Une soupe primordiale numérique

Deux physiciens ont simulé, à l'échelle atomique, les célèbres expériences de Miller où les composants simples de l'atmosphère terrestre primitive réagissent et produisent des acides aminés – des ingrédients du vivant.





Pour identifier les réactions chimiques dans l'expérience de Stanley Miller *(a)*, A. Marco Saitta et Franz Saija ont modélisé le processus. Ils montrent que les molécules d'eau, d'ammoniac et de monoxyde de carbone *(b)* interagissent et forment du formamide *(c)* puis de la glycine *(d)*, l'acide aminé le plus simple.

En 1953, le biologiste américain Stanley Miller montrait qu'il était possible d'obtenir des molécules complexes, tels des acides aminés, en soumettant des molécules simples à un champ électrique intense. C'était le début de la chimie prébiotique et de la recherche de l'origine du vivant.

Cependant, il est difficile de suivre toutes les étapes des réactions chimiques qui conduisent à la formation de molécules complexes dans de telles expériences. A. Marco Saitta, de l'Institut de minéralogie, de physique des matériaux et de cosmochimie du CNRS et de l'Université Pierre et Marie Curie à Paris, et Franz Saija, de l'Institut pour les processus physico-chimiques, à Messine en Italie, ont simulé à l'échelle atomique les réactions de l'expérience de Miller.

Pour son expérience, Miller avait rassemblé dans une enceinte ce qu'on pensait à l'époque être les composants de l'atmosphère de la Terre primitive, un mélange gazeux de méthane, d'ammoniac, d'eau et de dihydrogène. Les diverses réactions en chaîne entre ces composants ont conduit à la formation, entre autres, de glycine.

Ce type de réactions nécessite un apport d'énergie : une décharge électrique simulant un éclair atmosphérique dans l'expérience de Miller, un rayonnement ultraviolet sur Terre ou dans l'espace, une source hydrothermale comme on en trouve au fond des océans ou encore des collisions de météorites...

Dans tous les cas, retracer précisément les réactions qui ont lieu est une tâche complexe. Les conditions sont difficiles à contrôler et de nombreuses molécules sont produites, sans qu'on ait toujours le temps d'observer les intermédiaires de réaction. A. M. Saitta et F. Saija ont modélisé l'ensemble du processus en simulant les réactions à l'échelle atomique pour suivre en détail les différentes étapes et évaluer le rôle du champ électrique.

Ces simulations numériques reposent sur la résolution des équations de la physique quantique qui régissent la structure électronique des atomes du système. En modélisant aussi le mouvement des atomes, on détermine alors les forces s'exerçant entre eux, les liaisons formées, celles qui sont rompues et les nouveaux composés produits. Pour optimiser le temps de calcul, les deux physiciens se sont intéressés à un petit nombre de molécules en solution. Ils ont aussi découpé le processus en étapes élémentaires, ce qui leur permet de suivre la formation d'intermédiaires réactionnels. Enfin, ils ont augmenté progressivement la valeur du champ électrique afin de déterminer les conditions nécessaires pour former des acides aminés.

Ils ont ainsi mis en évidence qu'il faut un champ de 50 mégavolts par centimètre pour que les réactions s'amorcent. Si cette valeur est importante à l'échelle macroscopique, de tels champs existent à l'échelle microscopique, en particulier à la surface de minéraux.

Grâce à leur méthode, F. Saija et A. M. Saitta ont confirmé qu'il est possible de produire de la glycine à partir de composés simples tels que l'oxygène, l'ammoniac et le monoxyde de carbone. En revanche, ils montrent que le processus est plus complexe que celui reposant sur la synthèse dite de Strecker, invoquée jusqu'à présent par les chimistes. Dans cette dernière, les molécules de l'atmosphère produisent, dans un premier temps, du formaldéhyde et du cyanure d'hydrogène. Puis ces deux molécules interagissent avec l'ammoniac pour donner un aminonitrile qui va se transformer en glycine.

Dans le modèle numérique de A. M. Saitta et F. Saija, les premiers intermédiaires de réaction sont le formamide et l'acide formique. En partant d'un mélange d'eau, d'ammoniac, de méthane, de monoxyde de carbone et de diazote, ce sont ces molécules qui sont synthétisées en présence d'un champ électrique externe. Ensuite, le formamide et l'acide formique interagissent et forment de l'hydroxyglycine qui, après plusieurs transformations, devient une molécule de glycine.

Le champ électrique externe joue plusieurs rôles : il augmente la probabilité de collision des molécules et diminue certaines barrières d'énergie d'activation des réactions.

D'autres expériences de synthèse de molécules complexes, par impacts de projectiles par exemple, présentent des traces de formamide et d'acide formique. Le scénario chimique décrit par A. M. Saitta et F. Saija pourrait ainsi concerner différents contextes astrophysiques, tel le bombardement de planètes glacées par des météorites. Enfin, l'approche de ces physiciens ouvre des perspectives intéressantes pour l'étude de processus électrochimiques par des simulations numériques.

Sean Bailly

A. M. Saitta et F. Saija, PNAS, vol. 11(38), pp. 13768-13773, 2014

Épidémiologie

Des anxiolytiques corrélés à Alzheimer

Une équipe franco-canadienne a détecté une corrélation importante entre la survenue de la maladie d'Alzheimer et la prise de benzodiazépines – des somnifères et anxiolytiques régulièrement consommés par une personne âgée sur trois en France. Que signifie cette corrélation ? Le point avec Bernard Bégaud, qui a dirigé l'étude.

Que sont les benzodiazépines et comment agissent-elles ?

Bernard Bégaud : C'est une famille de molécules prescrites surtout contre l'anxiété et les troubles du sommeil. Elle compte une trentaine de composés, tel le diazépam (présent dans le Valium). Ces molécules se fixent sur des récepteurs à la surface des neurones, ce qui provoque l'ouverture de canaux ioniques et rend ces cellules plus difficiles à exciter. Il en résulte un effet de sédation, qui calme le patient et facilite son sommeil.

Quelle est l'importance de leur consommation ?

B. B. : En France, près d'une personne âgée (plus de 65 ans) sur trois en consomme, souvent de façon prolongée – pendant plus d'une année consécutive.

Que conclut votre étude ?

B. B. : Nous avons étudié 1 796 patients victimes de la maladie d'Alzheimer et 7 184 personnes non touchées, grâce aux données de la Régie d'assurance maladie du Québec (RAMQ). Nous avons trouvé que les patients atteints avaient consommé bien plus de benzodiazépines que les autres. La prise de ce médicament pendant trois mois en durée cumulée augmenterait d'environ 40 % le risque de développer la maladie. L'accroissement serait de plus de 80 % pour une consommation supérieure à six mois.

Peut-on en déduire que ces médicaments entraînent la maladie ?

B. B. : La difficulté est que la maladie d'Alzheimer est associée à des symptômes, tels que l'anxiété et l'insomnie, contre lesquels on prescrit souvent des benzodiazépines. La prise de ces médicaments pourrait alors être une conséquence et non une cause de la maladie. Pour trancher, nous n'avons pris en compte que les consommations de benzodiazépine remontant à plus de cinq ans avant le diagnostic de la maladie d'Alzheimer – ces consommations ayant alors peu de chance d'être la conséquence des premiers symptômes. Il y a sans doute un faible biais, mais nos résultats suggèrent que la prise de benzodiazépines favorise ou accélère la survenue de la maladie.

B. Bégaud est directeur de recherche à l'Inserm.

A-t-on des hypothèses sur les mécanismes en jeu ?

B. B. : Quelques-unes. Les benzodiazépines pourraient perturber la mobilisation de la « réserve neuronale » lors du vieillissement : il y aurait une capacité cérébrale de réserve (à travers des neurones peu exploités ou la possibilité de nouvelles connexions), dont les benzodiazépines perturberaient l'exploitation *via* leur effet sédatif. Pour vérifier les hypothèses, des tests sur des modèles animaux seraient nécessaires.

Faut-il arrêter de prescrire des benzodiazépines ?

B. B. : Non, mais il faut mieux prendre en compte le rapport bénéfice sur risque. Ces médicaments sont prescrits de façon trop systématique, souvent sans vérifier le rôle de facteurs tels que la consommation de café dans l'insomnie. Les organismes de santé conseillent déjà de limiter leur utilisation à deux semaines consécutives, afin d'éviter une accoutumance (susceptible de provoquer de graves crises de sevrage en cas d'arrêt) et une perte d'efficacité. Nous avons montré que si ces recommandations sont respectées, le risque d'Alzheimer n'augmente pas.

Guillaume Jacquemont

S. Billioti de Gage et al., B. M. J., en ligne le 10 septembre 2014

Climatologie

Coup de vieux pour la mousson asiatique

On pensait que la mousson asiatique était apparue avec la formation du massif himalayen, il y a 25 millions d'années. De nouveaux travaux montrent qu'elle se manifestait déjà il y a 40 millions d'années.

Les coquilles de gastéropodes fossilisés *(a)* du Sud de l'Himalaya *(b)* et les sédiments du plateau de Lœss en Chine *(c)* contiennent des traces d'une mousson ancienne.

En Asie, la chaîne de l'Himalaya et le plateau tibétain favorisent le système de mousson en forçant les vents à s'élever et à se vider de leur humidité, provoquant ainsi de fortes précipitations durant l'été. L'émergence de ces reliefs, il y a entre 22 et 25 millions d'années, aurait marqué le début de l'activité de la mousson asiatique. Cependant, Alexis Licht, à l'Université de Poitiers, et ses collègues ont rassemblé diverses observations qui suggèrent que la mousson était déjà active il y a 40 millions d'années.

La période géologique de l'Éocène – il y a entre 55 et 34 millions d'années – a été marquée par une atmosphère riche en dioxyde de carbone, avec des concentrations quatre fois supérieures à celles de l'époque pré-industrielle. Selon certains climatologues, la forte concentration de dioxyde de carbone aurait favorisé un système de mousson : l'effet de serre, plus important, a augmenté la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère, ce qui a conduit à un cycle hydrologique intense.

Pour vérifier cette hypothèse, A. Licht et ses collègues ont mesuré, dans un bassin indien, le rapport isotopique d'oxygène 18 et 16 dans les coquilles fossilisées de gastéropodes et l'émail des dents fossiles de mammifères. En effet, en se formant, ces tissus incorporent l'oxygène de l'eau et enregistrent les variations du rapport isotopique – la concentration d'oxygène 18 dans l'eau douce diminue pendant la saison des pluies et augmente en saison sèche. C'est ainsi que les chercheurs ont déduit l'existence d'une alternance de saisons de type mousson il y a 40 millions d'années.

D'autres études mettent au jour les traces d'une mousson ancienne. Le plateau sédimentaire de Lœss, en Chine, présente une alternance de couches de lœss et de gypse qui suivent des cycles de 41 000 ans compatibles avec la variation périodique de l'obliquité de la Terre. L'éclairement solaire de la région varie durant ce cycle et conduit à des périodes de mousson d'été plus marquées (bancs de gypse, formés par l'eau) ou moins intenses (bancs de lœss, déposés par le vent).

Enfin, les chercheurs du Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement, à Gif-sur-Yvette, ont étudié des modèles de circulation atmosphérique en reconstruisant le relief qui était celui de la région il y a 40 millions d'années. Ils confirment que la concentration de dioxyde de carbone a été un facteur important dans la dynamique de la mousson, comparable à l'influence actuelle de la chaîne himalayenne. En outre, la baisse de la concentration de dioxyde de carbone il y a 34 millions d'années s'est accompagnée d'une diminution de l'intensité de la mousson. Cela expliquerait d'ailleurs la disparition, à partir de 34 millions d'années, des couches sédimentaires du plateau de Lœss correspondant aux saisons humides.

Ce résultat renvoie au débat actuel sur l'évolution du climat. En effet, dans son dernier rapport, le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) a souligné que l'augmentation du dioxyde de carbone dans l'atmosphère pourrait intensifier la mousson en Asie, scénario qui s'accorde avec les observations d'A. Licht et de ses collègues.

S. B.

A. Licht et al., Nature, en ligne, 14 septembre 2014

16 %

C'est la hausse prévue des précipitations annuelles dans les zones de mousson d'ici 100 ans, selon les modèles les plus pessimistes du GIEC.*

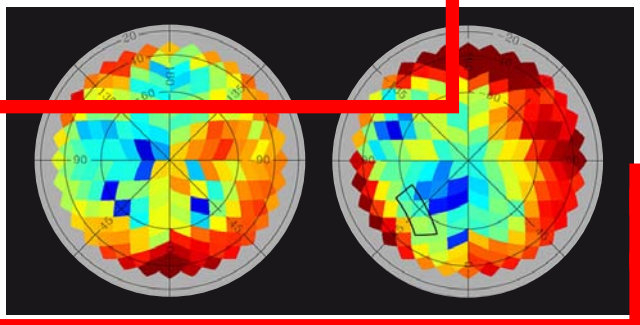
Cosmologie

Ondes gravitationnelles primordiales : BICEP2 mord la poussière

En mars 2014, les chercheurs de BICEP2, un télescope situé en Antarctique, ont annoncé avoir observé un mode de polarisation particulier dans le rayonnement du fond diffus cosmologique : le mode *B* d'origine primordiale. Ce résultat était très attendu, car il constituerait un indice observationnel fort à l'appui d'un élément clé du modèle du Big Bang, l'inflation. Or l'équipe de *Planck*, satellite mesurant aussi le rayonnement du fond diffus cosmologique, livre des résultats qui refroidissent l'enthousiasme.

Le mode *B* primordial est supposé avoir été engendré par des ondes gravitationnelles qui se sont propagées dans l'Univers alors qu'il n'était âgé que d'une fraction de seconde. Ces ondes apparaissent naturellement dans des scénarios d'inflation, où l'Univers connaît une brève période de croissance exponentielle.

Le résultat de BICEP2 avait rapidement soulevé un débat autour d'une source d'erreur possible : les poussières interstellaires émettent un rayonnement polarisé aux caractéristiques similaires à celles du fond diffus cosmologique marqué par des ondes gravitationnelles primordiales. En bref, le signal de BICEP2 était peut-être contaminé par celui de la poussière galactique. L'équipe de *Planck* vient de renforcer cette crainte : les poussières pourraient expliquer l'intégralité du signal de BICEP2!



Le signal de la poussière dans les hémisphères nord et sud, mesuré par *Planck* (intensité croissante du bleu au rouge). Le cadre noir *(à droite)* indique la zone observée par BICEP2.

Les incertitudes concernant la contribution des poussières restent néanmoins élevées dans l'estimation de *Planck*. À présent, les deux équipes comptent s'associer et profiter des atouts de chaque instrument pour améliorer la mesure du mode *B* dans la zone étudiée par BICEP2. Des résultats sont attendus pour la fin de l'année. Affaire à suivre...

S. B.

Collaboration Planck, http://arxiv.org/abs/arXiv:1409.5738

Taillés pour l'obscurité

Les poissons cavernicoles *Astyanax mexicanus* sont bien adaptés à la vie dans l'obscurité, car ils ont par exemple une olfaction performante. Damian Morian, de l'Université de Lund, en Suède, et ses collègues ont mis en évidence une nouvelle adaptation : l'absence de rythme circadien (variation d'activité métabolique selon des cycles jour-nuit). Leur métabolisme moins fluctuant leur permettrait d'économiser de l'énergie, dans un milieu où la nourriture est rare.

Un dino de 60 tonnes!

Les restes relativement complets d'un dinosaure géant ont été mis au jour dès 2005 en Argentine, dans le Sud de la Patagonie. Herbivore du groupe des titanosaures, cet animal vient d'être décrit par l'équipe américano-argentine de Kenneth Lacovara, de l'Université Drexel. Nommé *Dreadnoughtus schrani*, il mesurait plus de 26 mètres et pesait plus de 59 tonnes. L'analyse des tissus osseux montre qu'il grandissait encore au moment où il est mort...

Neurobiologie

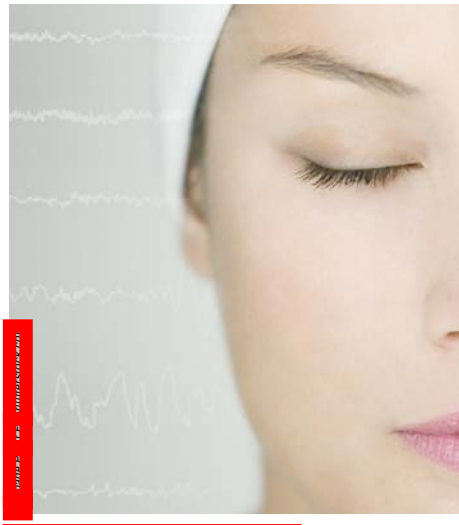
Les prouesses du cerveau endormi

On savait que le cerveau ne se déconnecte pas complètement de son environnement pendant le sommeil. Il reste même capable d'un certain traitement sémantique : on se réveille ainsi plus facilement en entendant son nom, les cris de son bébé ou une alarme à incendie qu'avec des sons quelconques d'intensité comparable. Mais les réponses cérébrales mises en évidence jusqu'à présent, telle la reconnaissance automatique d'un stimulus, étaient stéréotypées. Sid Kouider, du Laboratoire de sciences cognitives et psycholinguistiques (CNRS/ENS/EHESS), à Paris, et ses collègues sont allés plus loin : ils ont montré que durant le sommeil, le cerveau peut traiter l'information de façon flexible et préparer une réaction adéquate.

Les chercheurs ont entraîné des sujets à catégoriser des mots. Les participants écoutaient des mots et devaient choisir à chaque fois s'ils désignaient un animal ou un objet. Ils indiquaient leur choix en pressant un bouton avec une main déterminée à l'avance, par exemple la droite pour un animal et la gauche pour un objet. Parallèlement, les chercheurs mesuraient l'activité cérébrale des sujets par électroencéphalographie, c'est-à-dire à l'aide d'électrodes posées sur leur crâne. Ils ont constaté que lorsque le sujet choisit s'il doit utiliser sa main droite ou sa main gauche, un pic caractéristique se produit dans le tracé électroencéphalographique au niveau du cortex moteur. En présentant des mots nouveaux aux participants pendant leur sommeil, ils ont montré que le pic associé au mouvement correct était toujours présent. C'est le signe que le cerveau continuait à catégoriser les mots et à s'apprêter à déclencher la réponse motrice appropriée.

G. J.

S. Kouider et al., Current Biology, en ligne le 11 septembre 2014



Avec un entraînement adéquat, le cerveau peut catégoriser des mots au cours du sommeil.

Actualités

Lire en inhibant son cerveau

Un tigre vu par le côté droit ou par le côté gauche reste un tigre, et nous le comprenons grâce à un mécanisme cérébral automatique dit de généralisation en miroir. En revanche, si l'on renverse symétriquement la lettre « b », elle se transforme en « d ». Pourquoi la généralisation en miroir ne nous fait-elle pas confondre ces deux lettres ? Parce que nous l'inhibons de façon dynamique lors de la lecture, selon une étude menée par Grégoire Borst, de l'Université Paris Descartes, et ses collègues.

Une longue tombe d'archer

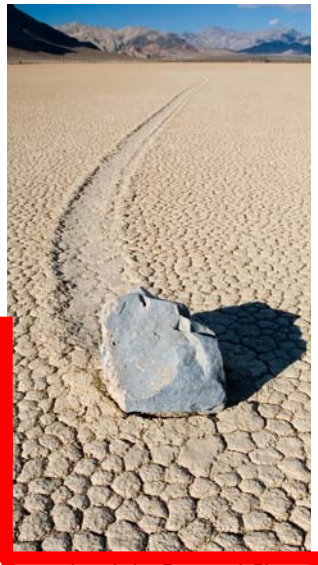
Il y a 6 500 ans, à Fleury-sur-Orne dans le Calvados, un archer s'est fait enterrer dans une tombe de 372 mètres de long. Ce tertre, le plus long monument funéraire d'Europe, est l'un des marqueurs de la culture de Passy. Dans cette culture néolithique de la région parisienne, une élite, dont les membres masculins étaient des archers, était donc capable de faire travailler la communauté à l'érection de grands monuments destinés uniquement à mettre en scène leur mort.

Les débuts du sida

La pandémie de sida aurait commencé dans les années 1920 à Kinshasa, aujourd'hui capitale de la République démocratique du Congo. C'est ce qu'ont montré Nuno Faria, de l'Université d'Oxford, et ses collègues en reconstituant la dynamique d'évolution et d'expansion du virus à partir de l'analyse phylogénétique de séquences virales répertoriées en Afrique centrale. Jusque dans les années 1950, l'épidémie se serait répandue dans le centre-ouest de l'Afrique au même rythme qu'une autre forme du virus non pandémique, le long des voies commerciales. Puis elle aurait explosé, favorisée par le développement du commerce sexuel et des injections médicales non stériles.

Géosciences

Pierres mouvantes : le mystère élucidé



Les roches du lac Racetrack Playa se déplacent parfois, poussées par des plaques de glace.

Racetrack Playa est un lac asséché une grande partie de l'année et situé dans le nord-ouest américain de la Vallée de la Mort, en Californie. Des pierres pesant parfois plus de dix kilogrammes s'y déplacent en laissant derrière elles une trace dans la boue. Quel processus explique ce mouvement ? Richard Norris, de l'Institut d'océanographie Scripps, et ses collègues ont suivi ces pierres avec divers instruments de localisation. Ils ont ainsi identifié le rôle combiné du vent et de la glace.

En décembre 2013, les chercheurs ont fait une observation cruciale. Un mois plus tôt, des précipitations, rares dans cette région, ont rempli le lac asséché de quelques centimètres d'eau. Avec la basse température ambiante, l'eau a gelé. Cependant, à plusieurs reprises, en fin de matinée, les chercheurs ont constaté que la glace en surface se brisait en plaques de trois à six millimètres d'épaisseur flottant sur l'eau liquide. Un vent léger poussait les plaques, longues de plusieurs dizaines de mètres, qui poussaient à leur tour les rochers et les mettaient en mouvement.

Le déplacement peut atteindre deux à cinq mètres par minute. Le vent dominant détermine sa direction, ce qui explique pourquoi de nombreuses traces sont parallèles. Le phénomène des pierres mouvantes semble enfin éclairci !

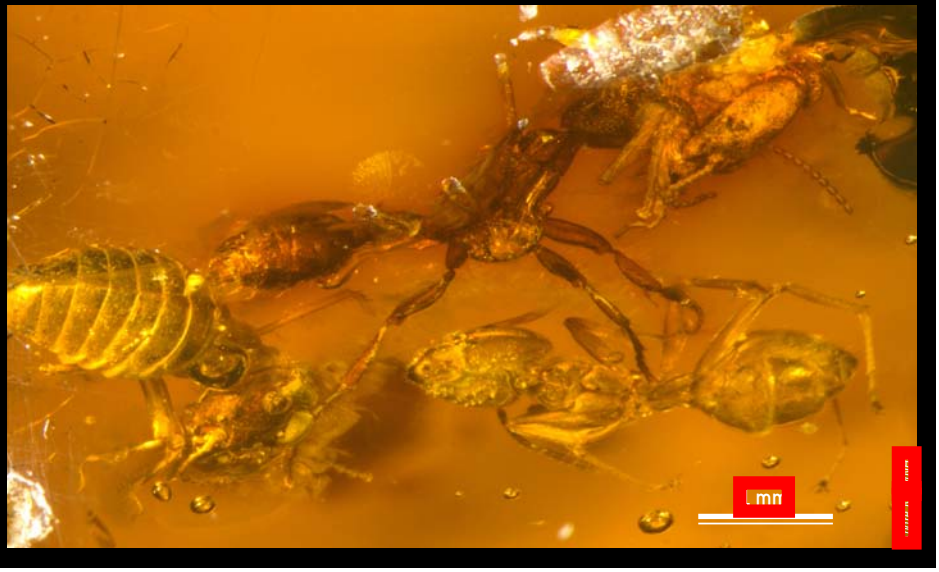
S. B.

R. Norris et al., PLoS One, vol. 9(8), e105948, 2014

Insolite

Un raid de fourmis immortalisé dans l'ambre

Un morceau d'ambre contenant trois fourmis du genre *Azteca*, trois termites *Nasutitermes* et une fourmi légionnaire *Neivamyrmex* a été découvert au Chiapas (Mexique) par David Coty, du Muséum à Paris, et ses collègues. Alors que les *Azteca* cohabitent avec les termites, les fourmis légionnaires sont prédatrices. Ici, la légionnaire tient dans ses mandibules un termite *Nasutitermes*, tandis que le corps d'un autre termite est lacéré. Une attaque était en cours lorsque la résine à l'origine de l'ambre a coulé, il y a plus de 10 millions d'années !



Immunologie

Un petit ver montre la voie... antibactérienne

L'étude d'un ver plat d'eau douce particulièrement résistant aux bactéries a permis d'identifier un mécanisme de défense similaire présent à l'état latent chez l'homme

Tout semble séparer l'homme du planaire *Dugesia japonica*, un ver plat d'eau douce réputé pour ses capacités de régénération. Pourtant, Éric Ghigo, de l'Unité de recherche sur les maladies infectieuses et tropicales émergentes (CNRS/IRD/Inserm/Université Aix-Marseille), à Marseille, et ses collègues ont mis en évidence un point commun inattendu entre les deux espèces : une voie de défense inédite contre les bactéries.

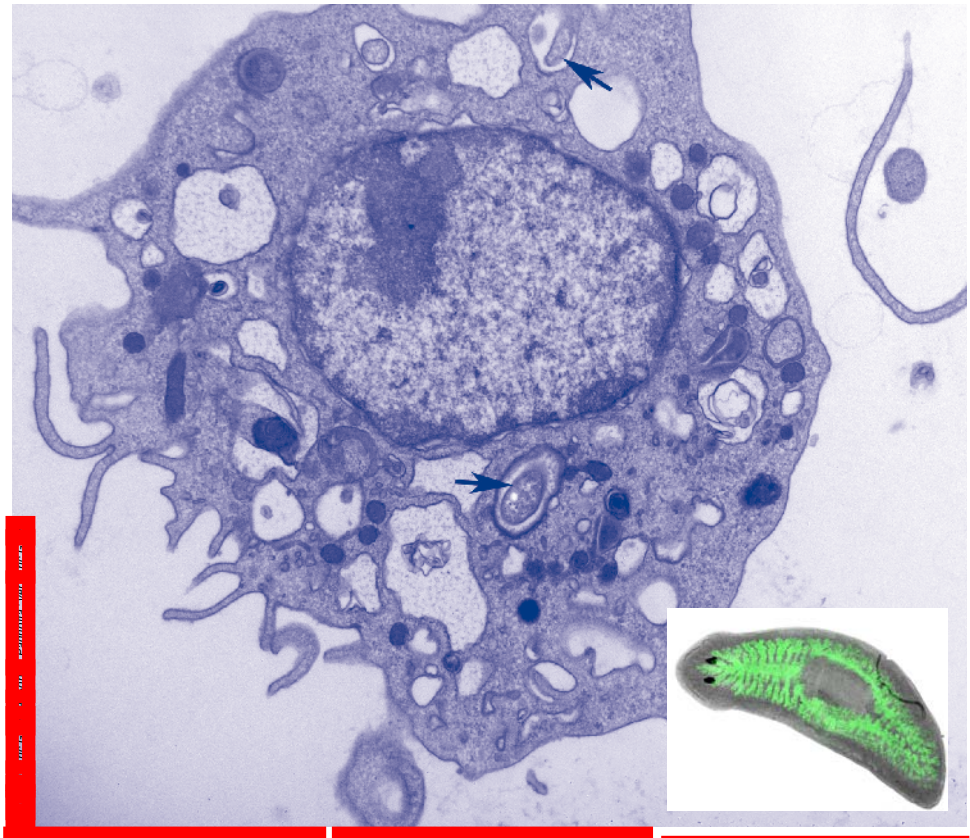
Les vers plats *D. japonica* se nourrissent de tout ce qui passe à leur portée : chair animale, mais aussi détritus, champignons et bactéries – et survivent fort bien à cette exposition aux microbes. Les biologistes se sont demandé quels mécanismes leur confèrent une telle résistance. Pour le savoir, ils ont étudié les gènes exprimés par le planaire lorsqu'il est exposé à des bactéries pathogènes pour l'homme – le staphylocoque doré (*Staphylococcus aureus*) et la bactérie de la légionellose (*Legionella pneumophila*). Ils ont ainsi identifié 18 gènes exprimés dans l'intestin du planaire et impliqués dans l'élimination de ces bactéries.

L'un d'eux est particulièrement intéressant, car son champ d'action s'est révélé inclure 16 bactéries pathogènes pour l'homme. Or le génome humain contient une séquence très similaire – un gène nommé *MORN2* dont on ignorait la fonction. Ce gène est-il capable de protéger l'homme contre les bactéries, comme son équivalent chez le planaire ? Oui, ont montré les biologistes : surexprimé dans des macrophages humains – des cellules qui éliminent les agents pathogènes en les « avalant » et en les « digérant », il les rend capables de détruire les bactéries *S. aureus*, *L. pneumophila* ainsi que celle responsable de la tuberculose, *Mycobacterium tuberculosis*.

Par quel mécanisme ? La bactérie *M. tuberculosis* survit aux macrophages en les empêchant de digérer ce qu'ils ont avalé – en l'occurrence les bactéries elles-mêmes –, ce qui leur permet de proliférer. Plus précisément, la bactérie bloque la maturation du compartiment dans lequel elle se retrouve une fois avalée – un phagosome – et empêche ce compartiment d'acquérir les enzymes qui détruiront son contenu. É. Ghigo et ses collègues ont montré que la protéine *MORN2* rétablit cette maturation du phagosome, permettant ainsi aux enzymes d'atteindre leur cible.

Ce mécanisme serait apparu chez un ancêtre commun du planaire et de l'homme et se serait conservé au fil de l'évolution. Toutefois, chez l'homme, le gène *MORN2* ne semble plus avoir l'activité de son ancêtre. Les biologistes espèrent mettre au point un traitement qui permettra de le réactiver pour combattre les bactéries qui, telle *M. tuberculosis*, multiplient les résistances aux antibiotiques.

Ce mécanisme n'existe pas chez les organismes modèles classiques utilisés pour étudier le système immunitaire, telle la mouche drosophile. Il a probablement été perdu au cours de l'évolution. Sans l'étude des défenses de ce petit ver aquatique, il serait encore longtemps resté dans l'ombre...



Un macrophage humain infecté par des bactéries *Mycobacterium tuberculosis (flèches)*. Contrairement à l'homme, le planaire *Dugesia japonica*, ver plat long d'une dizaine de millimètres *(voir le cartouche, le ver étant ici infecté par des bactéries* Legionella pneumophila, *en vert dans les intestins)*, résiste aux attaques de ces bactéries et de nombreuses autres.

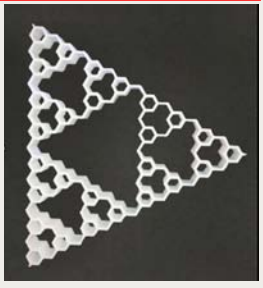
Marie-Neige Cordonnier

P. Abnave et al., Cell Host & Microbe, vol. 16, pp. 338-350, 2014

Actualités

Nid d'abeilles fractal

Les matériaux structurés en nid d'abeilles allient légèreté et solidité. Comment améliorer encore ces qualités ? Une équipe de cinq chercheurs de Boston, d'Oxford et de Lyon a montré qu'il est possible de le faire en répétant le motif en nid d'abeilles à différentes échelles (*ci-dessous*), à l'image d'une structure fractale.



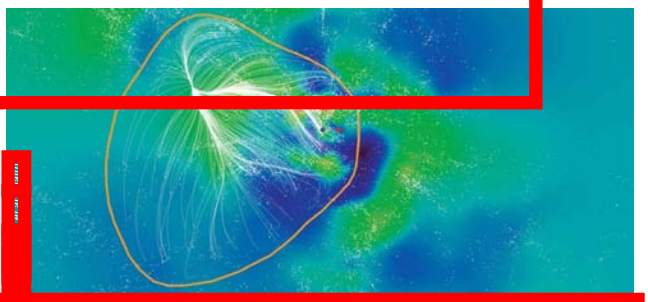
Ashkan Vaziri *(Northeastern University)* et ses collègues ont déterminé comment varient les propriétés mécaniques du nid d'abeilles hiérarchique en fonction des paramètres caractérisant le système (nombre de niveaux hiérarchiques, densité moyenne du réseau, etc.). Par exemple, avec cinq niveaux de hiérarchie, on peut multiplier par sept la résistance du matériau à la déformation !

Astrophysique

Laniakea : aux confins de notre superamas

Galaxies, amas de galaxies, superamas de galaxies... Aux plus grandes échelles, l'Univers donne l'image d'un réseau bien structuré où la matière se concentre dans certaines régions. Cependant, les superamas sont très mal définis. Quelles sont leurs frontières ? Brent Tully, de l'Université d'Hawaï, Hélène Courtois, de l'Université Claude Bernard à Lyon, et leurs collègues ont mis au point une nouvelle méthode pour trouver les contours du superamas de galaxies auquel appartient la Voie lactée. Ils s'inspirent de concepts utilisés en hydrologie.

Un bassin-versant est défini comme une région où toutes les eaux de pluie convergent vers une seule voie de sortie. Il est délimité par des lignes de partage naturelles – telles des lignes de crête –, qui ne peuvent être franchies par l'eau. Ce concept a été repris par les astronomes pour définir les superamas. Ils ont utilisé un catalogue de 8 000 galaxies dont on connaît la position et la vitesse propre (c'est-à-dire en soustrayant l'effet de l'expansion de l'Univers). En cartographiant ces objets et en extrapolant leurs trajectoires, ils ont regroupé toutes les galaxies qui convergent vers la même région suivant les lois de la gravité.



Cette figure montre une coupe du superamas Laniakea (et son contour en orange) et des superamas voisins. Les lignes blanches sont les trajectoires des galaxies.

B. Tully et ses collègues ont ainsi établi les contours de notre superamas. La Voie lactée se retrouve en périphérie de cette structure de 500 millions d'années-lumière de diamètre et contenant une masse d'environ 10^{17} masses solaires. Le nouveau superamas a été nommé Laniakea par les chercheurs, en s'inspirant des mots hawaïens *lani*, qui signifie ciel, et *akea*, qui veut dire immense.

S. B.

R. B. Tully et al., Nature, vol. 513, pp. 71-73, 2014

Santé

Édulcorants et intolérance au glucose

Et si, au lieu de combattre l'épidémie d'obésité et de diabète, les édulcorants y contribuaient ? C'est ce que suggèrent les travaux de Jotham Suez, de l'Institut Weizmann, en Israël, et ses collègues. Ils ont montré chez la souris que la consommation régulière de substituts non caloriques du sucre tels que l'aspartame ou la saccharine perturbe le métabolisme en modifiant la composition du microbiote intestinal – les bactéries de l'intestin.

Depuis quelques années, on s'interroge sur l'innocuité de ces molécules, sans parvenir à conclure. La plupart des édulcorants arrivant dans l'intestin sans être digérés, les biologistes se sont intéressés à leurs effets sur son microbiote. Celui-ci participe en effet à la régulation de nombreux processus physiologiques, dont le métabolisme du sucre.

Les biologistes ont donné à des souris de l'eau contenant du glucose ou un mélange de glucose et d'édulcorant imitant les produits commerciaux (utilisant environ 95 % de glucose et 5 % d'édulcorant) : les souris qui consommaient de l'édulcorant ont développé une intolérance au glucose. Deux expériences les ont alors convaincus que cette intolérance était due à une perturbation de la flore intestinale. D'une part, lorsqu'ils donnaient aux souris des antibiotiques tuant les bactéries intestinales, les souris ne devenaient pas intolérantes. D'autre part, lorsque l'on transplantait le microbiote de souris devenues intolérantes dans l'intestin de souris sans microbiote, ces dernières devenaient intolérantes.

L'édulcorant changerait la composition du microbiote, ce qui modifierait ses fonctions métaboliques. Or des modifications similaires ont été observées chez les souris et des humains atteints de diabète ou d'obésité…

M.-N. L.

J. Suez et al., Nature, en ligne le 17 septembre 2014

Environnement

Où en est la couche d'ozone ?

Dans les années 1980, on découvrait au-dessus de l'Antarctique un « trou » dans la couche d'ozone – en réalité une zone très appauvrie en ozone. La couche d'ozone est dégradée par des gaz regroupés sous le terme SAO (substances appauvrissant l'ozone). Le protocole de Montréal a été adopté en 1987 pour limiter leurs émissions. Sous l'égide de l'Organisation météorologique mondiale et du Programme pour l'environnement de l'ONU, quelque 300 chercheurs viennent d'évaluer son efficacité. Ils ont conclu que la couche d'ozone va mieux et devrait se reconstituer d'ici le milieu du siècle sur la plus grande part de la planète. Toutefois, certains remplaçants des SAO risquent d'exercer un effet de serre important.

G. J.

www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/ozone_2014/ozone_asst_report.htm

Géosciences

Titan : des dunes à l'envers

Des dunes dépassant parfois 100 kilomètres de long et parallèles à l'équateur s'étendent aux tropiques de Titan, le plus gros satellite de Saturne. Elles semblent s'étirer d'Ouest en Est, alors que dans cette région, le vent dominant au niveau du sol souffle dans le sens opposé. Antoine Lucas, du CEA à Saclay et associé au pôle de recherche en sciences planétaires de l'Université Paris-Diderot à Paris, et ses collègues ont modélisé la dynamique des vents pour résoudre cette contradiction apparente. Les dunes se seraient formées sous l'action des rafales violentes qui soufflent vers l'Est pendant les équinoxes. Les géologues ont aussi montré que l'orientation des dunes n'est compatible avec la dynamique des vents que si le sol ne s'érode pas. Il reste donc à identifier la source des sédiments transportés par le vent et dont ces dunes sont constituées.

S. B.

A. Lucas et al., Geophys. Res. Lett., en ligne le 10 septembre 2014

Archéologie

L'aile cavalière du Mont Castel

Des archéologues ont découvert qu'après la guerre des Gaules, une unité de cavalerie fut stationnée sur le Mont Castel qui domine Port-en-Bessin-Huppain, en Normandie.

Quand ils ont abordé ce plateau, Anthony Lefort et Cyril Marcigny, de l'Inrap, ont pris sur le fait un « détectoriste », qui leur a montré sa collection. Ils ont été étonnés d'y voir des monnaies de toute la Gaule du I^er^ siècle avant notre ère… Pensant avoir affaire à un affabulateur, ils ont sondé le mont en deux endroits. Ils ont alors eu la surprise de trouver le même genre d'échantillon varié de monnaies ; elles se trouvaient dans les limites de ce qui s'est révélé être un casernement militaire. Reconnaissables aux trous des poteaux de fondation, les bâtiments rectangulaires sont disposés les uns par rapport aux autres suivant un plan très géométrique… qui trahit son ingénieur romain.

La découverte de restes d'armement romain, de clous de semelles de *caligae* et d'éperons suggère un cantonnement d'une *ala* gauloise, c'est-à-dire d'une « aile de cavalerie ». Après Alésia, les Romains ont en effet employé des troupes auxiliaires pour maintenir la paix, et les cavaliers gaulois avaient l'avantage de pouvoir intervenir vite, tout en connaissant bien le terrain. Manifestement, ils étaient payés avec des monnaies collectées (pillées ?) dans toute la Gaule.

François Savatier

Deux des pièces en argent trouvées au Mont Castel

Océan des Tempêtes… magmatique !

Sur la Lune, l'Océan des Tempêtes est une vaste région presque plane de près de 3 200 kilomètres de diamètre. On a longtemps pensé qu'il s'agissait d'un bassin d'impact. Les mesures gravimétriques des deux sondes GRAIL écartent cette hypothèse. Des structures linéaires délimitant une forme quasi rectangulaire se cachent sous la lave refroidie. Il s'agit probablement d'anciens rifts, vestiges de l'activité magmatique de la Lune. L'impact d'un astéroïde aurait, lui, produit un bassin de forme circulaire.

Les Néandertaliens, disparus plus tôt

Les derniers Néandertaliens auraient disparu il y a quelque 35 000 ans, mais l'équipe de Thomas Higham, de l'Université d'Oxford, avance que cela s'est produit plus tôt. Les chercheurs ont affiné les méthodes de datation au carbone, puis ont estimé les âges de 196 échantillons fossiles humains provenant de 40 sites néandertaliens en Europe. Les résultats suggèrent que les derniers Néandertaliens auraient disparu il y a 41 000 à 39 000 ans. Selon ces nouvelles datations, les Néandertaliens et les hommes modernes, qui ont commencé à pénétrer en Europe il y a 45 000 ans, n'ont pu se côtoyer que brièvement.

Suivez les dernières actualités de Pour la Science sur les réseaux sociaux

Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

POINT DE VUE

L'Europe et les vols habités dans l'espace

En dehors de sa contribution à la Station spatiale internationale, l'Europe ne devrait pas s'engager maintenant dans d'inutiles et très coûteuses missions habitées vers la Lune ou vers Mars.

Thierry COURVOISIER

Doit-on envoyer des hommes ou des femmes dans l'espace ? Cette question occupe souvent les discussions, tant parmi le public que chez les professionnels de l'espace. L'EASAC *(European Academies Science Advisory Council)*, qui rassemble les académies des pays membres de l'Union européenne, de la Norvège et de la Suisse afin d'apporter des connaissances scientifiques dans les processus de décision politique en Europe, a souhaité contribuer à la réflexion stratégique européenne en matière d'exploration spatiale. Un rapport écrit par un groupe d'experts dans différents domaines d'activités spatiales vient ainsi de paraître (disponible sur www.easac.eu). Voici quelques-uns des points discutés.

L'exploration spatiale est l'un des éléments centraux de notre découverte du monde. Elle se situe entre la connaissance détaillée de notre planète acquise au fil de siècles de voyages et l'observation de l'Univers lointain avec nos télescopes et satellites. Poursuivre cette exploration, c'est approfondir ce chaînon de notre connaissance entre l'espace accessible à tous, sur Terre, et celui qui n'est accessible à personne. C'est aussi poursuivre des défis technologiques passionnants, par exemple construire des instruments de mesure légers et fonctionnant avec un minimum d'énergie. C'est encore mettre en œuvre d'importantes collaborations industrielles pour développer et déployer dans l'espace, milieu hostile, des systèmes complexes répondant à des exigences très strictes.

Pour toutes ces raisons, la nécessité de poursuivre et développer un programme d'exploration spatiale vigoureux est une évidence. Ce programme doit inclure une composante européenne autonome importante. Il est en effet essentiel pour l'Europe de maîtriser les technologies spatiales afin de diminuer sa dépendance vis-à-vis des États-Unis et ainsi asseoir son indépendance sur la scène mondiale. Ce qui n'est pas en contradiction avec une étroite collaboration intercontinentale, tant dans le cadre de projets à la pointe de la science que pour des raisons qui peuvent être plus politiques ou sociétales. Une concertation accrue entre tous les acteurs de l'exploration spatiale permettrait déjà d'harmoniser les différents programmes et éviterait des compétitions stériles.

DES MISSIONS HABITÉES VERS MARS ne sont pas nécessaires sur le plan scientifique et poseraient de nombreux problèmes non encore résolus

En matière de vols habités, le seul élément européen est la contribution à la Station spatiale internationale, ou ISS. Ce programme s'est développé à l'origine pour des raisons dont la science n'était qu'un élément mineur. Aujourd'hui, cependant, l'ISS est devenue un laboratoire fiable qui livre des résultats de premier plan en biologie, en médecine fondamentale ou en science des matériaux et des fluides. L'Europe devrait donc participer pleinement dans les années à venir à l'exploitation scientifique de ce laboratoire unique.

Faut-il prévoir des missions habitées pour explorer nos plus proches voisins, la Lune et Mars ? L'analyse des potentialités et des difficultés d'une telle mission indique que, dans l'avenir proche, seule une exploration robotique doit être considérée. D'une part, la présence humaine dans l'exploration martienne ou lunaire n'est pas nécessaire sur le plan scientifique. D'autre part, un vol – de longue durée – vers Mars poserait de nombreux problèmes non encore résolus, par exemple la protection de l'équipage contre les effets des rayons cosmiques ou le développement de moyens pour assurer nourriture et survie.

Il s'ensuit notamment que le coût d'une mission habitée vers Mars ne peut être évalué. De tels projets ne doivent ni ne peuvent faire partie des efforts de planification actuels ! Quant à d'éventuels vols habités en direction de la Lune, ils devront aussi venir après une exploration systématique automatisée et non la précéder.

Se pencher sur le programme d'exploration européen et sur l'éventualité de vols habités mène naturellement à des considérations plus générales sur certains aspects de la politique spatiale européenne.

ENVOYER DES COSMONAUTES sur une autre planète ? Cela coûterait très cher et il faudrait auparavant trouver la solution à de nombreux problèmes, par exemple la protection des personnes contre le rayonnement cosmique qu'elles subiront pendant leur long voyage.

Le programme spatial des pays européens a des composantes nationales, mais il s'inscrit en premier lieu dans celui de l'ESA, l'Agence spatiale européenne, qui peut se targuer de très beaux succès depuis des décennies. Les chercheurs européens imaginent maintenant, en continuité avec les réalisations passées, des projets ambitieux dans divers domaines. L'Europe a les capacités technologiques et industrielles de réaliser nombre de ces projets. La réelle limite est le financement. Pour Mars, le programme d'exploration est ainsi limité à une seule mission robotique. Il ne paraît donc pas opportun de transférer des ressources budgétaires de ces programmes vers l'exploration spatiale humaine.

Pour finir, mentionnons un autre aspect, d'ordre éthique. Le coût extrêmement élevé des vols habités est en grande partie lié à la volonté de diminuer au maximum les risques encourus par les équipages. Or l'exploration passée de notre planète s'est faite en prenant des risques considérables. Par exemple, sur les quelque 265 personnes ayant participé avec Magellan à la première circumnavigation, seules 18 sont revenues. On peut donc se demander dans quelle mesure notre culture actuelle de la sécurité est propice à l'exploration humaine de l'espace et si une approche acceptant plus de risques pourrait être plus fructueuse. C'est un débat de société, et une telle discussion devrait notamment avoir lieu entre les acteurs des programmes d'exploration.

L'exploration spatiale amène des contributions très variées à nos sociétés : des connaissances fondamentales, de nouvelles technologies, de nouvelles approches industrielles... Elle contribue aussi à une culture de collaboration et de paix internationales. Et pour de nombreux jeunes, elle constitue une motivation à s'investir dans les sciences et les techniques. Étant la première puissance économique du monde, l'Europe est capable de poursuivre dans cette voie. Mais il reste à développer une stratégie internationale afin d'optimiser les programmes d'exploration humains et robotiques, et l'étude de l'EASAC en est une étape. ■

Quelques-uns des projets de l'ESA

BepiColombo : exploration (robotisée) de Mercure, en collaboration avec le Japon (lancement en 2015)

ExoMars : mission robotique vers Mars avec un orbiteur et un atterrisseur, puis un rover (2016 puis 2018)

Solar Orbiter : mission robotique d'étude du Soleil (2017)

Cheops : satellite dédié à l'étude des exoplanètes (2017)

Euclid : télescope spatial dédié à l'étude des effets de la matière noire sur l'Univers (2020)

JUICE : mission robotique vers Jupiter et ses lunes (2022)

Thierry COURVOISIER est astrophysicien à l'Université de Genève et président des Académies suisses des sciences. Il a présidé le groupe de travail à l'origine du rapport de l'EASAC.

Réagissez au Point de vue sur www.pourlascience.fr

ENTRETIEN

Médecine personnalisée et cancer : quel avenir ?

Entretien avec Fabrice ANDRÉ

Depuis une dizaine d'années, de nouvelles techniques d'analyse moléculaire – notamment le séquençage génétique à haut débit – ont doté la cancérologie de pistes de traitements individualisés, adaptés à la tumeur particulière du patient. L'étude génomique des tumeurs permet de dresser un catalogue des altérations et de rechercher, parmi les médicaments connus, celui le plus approprié aux caractéristiques de la tumeur étudiée. Toutefois, les choses ne sont pas aussi simples : un patient ne porte pas une, mais des tumeurs ; les caractéristiques d'un cancer évoluent au fil du temps ; il n'existe pas autant de médicaments que de spécificités tumorales, mais autant de spécificités que de patients. Or rien qu'en France, près de trois millions de personnes de 15 ans et plus étaient concernées par le cancer en 2008 selon le dernier rapport de l'Institut national du cancer (juillet 2014)... Alors, qu'attendre de cette nouvelle médecine, dite personnalisée ou de précision ? Le point avec Fabrice André, médecin oncologue spécialisé dans le cancer du sein à l'Institut Gustave Roussy et directeur de l'unité UMR981 (Inserm, Gustave Roussy, Université Paris XI).

POUR LA SCIENCE
Qu'entend-on exactement par médecine personnalisée en cancérologie ?

FABRICE ANDRÉ : La médecine personnalisée est la recherche, parmi les options thérapeutiques existantes, de la mieux adaptée à chaque patient en fonction des spécificités génétiques et biologiques de sa tumeur, de l'environnement du patient et de son mode de vie. Avec ce profil génétique, biologique et environnemental, on cherche à déterminer quels mécanismes moléculaires contribuent à la progression du cancer chez le patient, afin de les cibler le mieux possible lors du traitement. Ces mécanismes peuvent concerner toutes les voies : la signalisation intracellulaire, le métabolisme, le système immunitaire, la réparation de l'ADN...

PLS
Comment concrètement met-on en évidence les mécanismes impliqués dans la progression d'un cancer donné ?

F. A. : On effectue une biopsie de la tumeur, de préférence dans une région produisant des métastases, car ce sont les cellules de ces régions qui évoluent le plus vite (la médecine personnalisée est avant tout destinée aux personnes présentant un cancer qui s'étend). On séquence le génome de cet échantillon et l'on y recherche les anomalies. On compare alors ces altérations génomiques avec celles déjà répertoriées par ailleurs chez d'autres patients, ce qui permet d'identifier les mutations susceptibles de jouer un rôle dans la progression tumorale. Ces mutations touchent des gènes, dont on recherche ensuite la fonction soit dans les travaux déjà publiés, soit en réalisant d'autres études.

PLS
Une fois que l'on a caractérisé la tumeur, comment « personnalise-t-on » le traitement ?

F. A. : Plusieurs approches sont possibles. La thérapie ciblée consiste à cibler des molécules spécifiques des cellules cancéreuses, choisies en fonction des caractéristiques de la tumeur, afin de bloquer leur croissance tout en limitant les dommages sur les cellules normales. Les molécules actuellement utilisées sont par exemple des anticorps dits monoclonaux, qui se lient de façon spécifique à une protéine de la surface des cellules tumorales impliquée dans leur croissance.

Ainsi, l'anticorps trastuzumab (Herceptin®) a été conçu pour se lier à une protéine de la membrane cellulaire, HER2, surproduite dans certains cancers du sein. Cette protéine est le récepteur d'un facteur de croissance cellulaire. Sa surproduction à la surface des cellules cancéreuses augmente le recrutement du facteur de croissance, et donc la croissance de la tumeur. L'anticorps limite ce recrutement, ce qui ralentit la croissance tumorale.

PLS
Quels sont les autres types de traitements utilisés en médecine personnalisée ?

LA MEDECINE PERSONNALISEE ou de précision consiste, en cancérologie, à rechercher le traitement le mieux adapté au patient en fonction des caractéristiques génétiques de sa tumeur et de l'environnement du patient. On prélève des cellules cancéreuses métastatiques (en général par biopsie, mais des techniques sont développées pour récupérer celles qui circulent dans le sang) ; on analyse le génome de ces cellules, et l'on y recherche des anomalies ; on compare ensuite ces résultats avec des banques de données (mutations trouvées chez d'autres patients, médicaments…) afin de déterminer le traitement correspondant le mieux au profil génétique de la tumeur.

A. : La thérapie ciblée n'est qu'une des modalités possibles de la médecine personnalisée, où l'on cherche à agir sur un gène impliqué dans la survenue du cancer (un oncogène). D'autres approches visent à pallier des déficits de réparation de l'ADN observés dans certains cancers, à rétablir le processus par lequel une cellule programme sa mort lorsqu'elle détecte une anomalie, à bloquer le métabolisme ou encore à stimuler le système immunitaire à l'aide d'un vaccin antitumoral pour qu'il détruise les cellules cancéreuses.

PLS

Quels sont les obstacles rencontrés dans ces différentes stratégies de médecine personnalisée ?

A. : La principale limite est liée à l'analyse des gènes mutés : d'un point de vue bio-informatique, on ne sait pas aujourd'hui faire la différence entre un gène dont la mutation est responsable de la genèse d'un cancer ou de sa progression, et un gène dont la mutation n'est que passagère, sans lien avec l'évolution du cancer. Les outils actuels de bio-informatique permettent de repérer une mutation, mais pas de savoir si le gène touché est celui qui a causé la progression tumorale. Or ce sont justement les gènes mutés impliqués dans cette progression que l'on veut bloquer. Les données sont là, il s'agit de les rendre intelligibles.

PLS

Quelles sont les pistes de recherche pour distinguer les mutations qui jouent un rôle de celles qui n'en jouent pas ?

A. : Les bio-informaticiens créent des algorithmes visant à déterminer, parmi les 10 ou 20 mutations détectées, lesquelles sont des moteurs dans la genèse du cancer étudié, puis à les classer selon l'importance de leur rôle. Une partie des tests cliniques en cours ont d'ailleurs pour objectif d'évaluer la pertinence de ces algorithmes de décision plutôt que l'efficacité du médicament prescrit. C'est le cas de l'essai international WINTHER, que je coordonne avec Jean-Charles Soria, cancérologue à l'Institut Gustave Roussy. Cet essai vise à évaluer si la survie sans progression de la maladie est meilleure avec un traitement choisi à l'aide des données génétiques du patient et d'un score prédictif bio-informatique qu'avec le dernier traitement standard prescrit au patient.

PLS

Comment fonctionnent ces algorithmes ?

A. : Ils consistent en des règles permettant de définir quel gène muté est impliqué dans la progression du cancer. Pour améliorer les algorithmes, les bio-informaticiens développent notamment des encyclopédies de lignées cellulaires. Ces encyclopédies sont comme des bibliothèques : elles répertorient des milliers de lignées cellulaires dont toute l'analyse génomique a été faite et qui ont été exposées à divers médicaments. Elles permettent, dans des modèles précliniques, de savoir quelles anomalies sont importantes dans un contexte cellulaire donné.

PLS

Quelles sont les autres limites de la médecine personnalisée ?

A. : Une autre limite importante est l'hétérogénéité intratumorale. Dans une tumeur, les cellules ne sont pas toutes identiques, et répondent donc différemment aux traitements. Plus l'hétérogénéité est grande, plus la réponse à un traitement est aléatoire. Or tous les patients ne sont pas à la même enseigne : certains présentent une forte hétérogénéité

ntratumorale, tandis que chez d'autres, elle est très peu marquée.

Il est donc nécessaire de quantifier cette hétérogénéité, afin de mieux orienter les patients : la médecine personnalisée ayant peu de chances d'être efficace chez des personnes identifiées comme ayant une forte hétérogénéité intratumorale, ces personnes pourraient être orientées vers d'autres stratégies, telles que les traitements par les agents cytotoxiques. Des outils se mettent en place pour quantifier l'hétérogénéité d'une tumeur (séquençage haut débit, analyse des instabilités génomiques), mais nous n'y sommes pas encore.

PLS

Pourquoi de telles hétérogénéités au sein d'une tumeur ?

A. : C'est une question cruciale à laquelle on ne sait pas encore répondre. Comprendre les mécanismes qui créent ces hétérogénéités est une étape indispensable pour que les thérapies personnalisées fonctionnent. Cela permettrait de combiner ces thérapies avec d'autres évitant l'adaptation de la tumeur : sans une telle combinaison, il y a un fort risque qu'une population de cellules de la tumeur survive à l'agent anti-cancéreux choisi et que, *in fine*, la tumeur s'adapte au traitement et lui résiste.

PLS

Cette limite semble insurmontable. Ne risque-t-il pas d'y avoir autant de mécanismes créant des hétérogénéités que de patients ?

A. : Les hétérogénéités intratumorales sont certes un frein pour l'instant, mais le fait d'avoir identifié ce frein fournit une piste précieuse sur l'orientation à donner aux recherches. Nous savons à présent qu'il faut chercher le mécanisme qui crée l'hétérogénéité, c'est-à-dire très probablement du côté de la machinerie moléculaire qui répare l'ADN : quelles molécules de cette machinerie sont impliquées dans l'apparition de nouvelles mutations ? Une fois identifiées, ces molécules constitueront de nouvelles cibles pour des médicaments.

PLS

Ne s'agit-il pas d'un combat perdu d'avance ? Si ces mécanismes de résistance apparaissent au fur et à mesure, il y aura toujours de nouvelles résistances…

A. : Je comprends votre point de vue, mais soyons lucide. La médecine personnalisée ne prétend pas guérir les patients atteints d'un cancer métastatique. Cette approche a pour objectif d'améliorer la survie des patients, tout en accumulant les données chez les patients qui ont pu bénéficier de cette approche, de façon à comprendre pourquoi le bénéfice est modeste. Le traitement en sera un peu amélioré, de nouvelles données seront alors accumulées et, à l'issue de leur analyse, de nouvelles améliorations seront proposées, etc. Peu à peu, le cancer métastatique, une maladie grave, résistant à tout traitement, se transformera en une maladie chronique. Mais aucun médecin ne vous dira que l'on va guérir le cancer grâce à cette approche, ou alors c'est un menteur.

PLS

Lorsque vous avez identifié une mutation, vous recherchez, dans des banques de médicaments, ceux qui pourraient agir sur tel ou tel gène. Comment faites-vous, concrètement ? Tous les médicaments de ces banques ont-ils été testés pour agir sur l'expression des gènes ?

A. : La plupart, oui. On sait à peu près sur l'expression de quelles protéines les médicaments agissent *in vitro*. Mais effectivement, l'une des limites de l'approche réside dans le fait que l'activité du médicament n'est pas toujours la bonne, car on l'utilise dans un autre contexte médical que celui dans lequel son activité est connue.

PLS

Le fait de ne pas connaître *a priori* l'activité des médicaments utilisés en thérapie ciblée n'est-il pas problématique ?

A. : Non, car il s'agit d'essais thérapeutiques sur des personnes résistantes à tout traitement. Considérons une telle patiente ayant une anomalie sur un gène. En temps normal, cette patiente est dirigée, avec son consentement, vers des études cliniques de phase I ou II, des études qui testent des médicaments qui ne sont pas encore sur le marché. Il peut s'agir de molécules ciblées, mais le test est réalisé en aveugle : le choix de l'essai

Quelques essais en cours

SHIVA : cet essai clinique de phase 2 de l'Institut Curie, à Paris, vise à évaluer l'efficacité d'une médecine fondée sur la nature de la tumeur et non sa localisation. Répartis aléatoirement en deux groupes, des patients dont la tumeur présente une anomalie génétique ciblable se voient attribuer soit un traitement conventionnel (chimiothérapie) soit la thérapie ciblée correspondante.

MOST : cet essai clinique de phase 2 coordonné par le Centre Léon Bérard, à Lyon, vise à évaluer si un traitement de trois mois par une thérapie ciblée spécifique d'une anomalie génétique de la tumeur permet de stabiliser le cancer, voire d'augmenter l'espérance de vie, ou si un traitement plus long est nécessaire.

BATTLE : cet essai clinique de phase 2 américain rassemble en quatre sous-groupes des patients atteints d'un cancer du poumon, en fonction des mutations de leurs tumeurs. Un traitement spécifique est donné à chaque sous-groupe.

clinique ne dépend pas forcément de l'anomalie génétique de la patiente. Dans l'approche personnalisée, la patiente est aussi orientée vers des études cliniques, sauf que le médicament qu'elle recevra sera choisi pour cibler son anomalie génétique. L'efficacité du médicament dépendra certes de son activité dans ce contexte et de la pertinence de la cible, mais cette patiente aurait de toute façon été orientée vers des thérapies ciblées testées en essais thérapeutiques.

PLS

A-t-on déjà des résultats encourageants avec la médecine personnalisée appliquée au cancer ?

A. : Il y a des résultats positifs, dans le sens où des patients résistants à tout traitement classique ont pu bénéficier de cette approche. Il est en revanche encore trop tôt pour mesurer l'impact de la médecine personnalisée : le bénéfice sera-t-il minime ou important ? On sait malheureusement déjà qu'il risque d'être très modeste au départ, même s'il a de grandes chances de s'améliorer ensuite.

PLS

Quand aura-t-on une idée plus précise de ce que l'on peut attendre de cette approche ?

A. : Je pense que dans cinq ans, on y verra clair. Tout ne sera pas réglé, mais on connaîtra nos capacités à soigner par cette méthode-là, les bénéfices attendus et les perspectives d'amélioration de cette approche. Notamment, l'étude SAFIR02, que nous avons lancée en 2013 en partenariat avec les laboratoires AstraZeneca, s'achèvera. Elle a pour objectif de tester l'efficacité de l'approche à grande échelle, sur des patients atteints d'un cancer du poumon ou du sein.

PLS

Selon vous, cette approche est-elle prometteuse ?

A. : La médecine personnalisée ne guérira pas les patients qui ont des métastases, mais elle va très certainement améliorer leur vie. Le fait qu'il soit possible d'analyser des milliers de gènes en quelques jours nous permet d'aborder le traitement anticancéreux d'une nouvelle façon. Au lieu de prédéfinir les gènes que l'on cherche, on fait l'inverse : on part sans *a priori*, on analyse tous les gènes et on cherche, dans le nuage d'anomalies génomiques, celles qu'il nous semble important de bloquer. Ce détournement de l'approche ne peut qu'être bénéfique. ■

Propos recueillis par Marie-Neige CORDONNIER

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

Avec l'application « Pour la Science », retrouvez dès leur sortie le mensuel *Pour la Science* à 4,49 € et son hors-série trimestriel *Dossier Pour la Science* à 5,49 € en version numérique optimisée pour tablette : lecture intuitive, sommaire interactif, contenus enrichis, feuilletage hors connexion, etc.

Découvrez aussi l'application « Cerveau & Psycho »

Disponible sur App Store — Disponible sur Google play

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

Téléchargez gratuitement l'application sur App Store et Google Play.
Un extrait du numéro en cours de parution vous est offert !

HOMO SAPIENS INFORMATICUS chronique de Gilles Dowek

Détecter un informaticien dans un dîner en ville

Le mode de pensée des informaticiens se distingue par le rôle central qu'y jouent les algorithmes.

Comment savoir, dans un dîner en ville, si le convive assis en face de vous est informaticien ou non ? Une manière de procéder consiste à lui poser cette question : « Comment savoir si une image contient ou non un cercle rouge ? » S'il répond que c'est facile, qu'il suffit de regarder l'image, etc., ce n'est pas un informaticien. Si, en revanche, il trouve la question embarrassante, répond que c'est sans doute possible, mais certainement difficile, etc., c'est presque sûrement un disciple d'Alan Turing et de Donald Knuth.

Cet algorithme de détection illustre au moins deux traits de la « pensée informatique », c'est-à-dire de la manière spécifique dont les informaticiens pensent les problèmes.

Tout d'abord, pour un informaticien, une question introduite par l'adverbe interrogatif *comment* appelle, en réponse, un algorithme. Comment savoir si un mot contient la lettre *a* ? Une façon de procéder est de comparer successivement chacune des lettres du mot à la lettre *a* jusqu'à soit trouver la lettre *a*, soit atteindre la fin du mot. La question « comment savoir si un mot contient deux fois la même lettre ? » est analogue, mais plus intéressante, car, en plus de l'algorithme naïf consistant à comparer chaque lettre à toutes les autres, on connaît un deuxième algorithme, plus rapide.

Qualifier de difficile la question « Comment savoir si une image contient un cercle rouge ? », c'est dire qu'il est difficile de construire un algorithme pour décider si une image, par exemple donnée pixel par pixel, contient ou non un cercle rouge – beaucoup plus difficile, par exemple, que de construire un algorithme pour décider si un mot contient la lettre *a*, ou deux fois la même lettre.

Seconde caractéristique : dans la description d'un tel algorithme, un informaticien utilise des opérations telles que « comparer deux lettres », « comparer la couleur de deux pixels », etc. qui, en théorie, demanderaient à être décomposées en opérations plus élémentaires ; mais il n'utilise pas d'opérations que nous savons exécuter tout en ignorant comment nous les exécutons, par exemple déterminer si une image contient un cercle rouge ou attribuer un tableau à un peintre.

L'informaticien n'utilise pas d'opérations que nous savons exécuter tout en ignorant comment nous les exécutons

En effet, nous savons tous plus ou moins distinguer un Lorenzetti d'un Basquiat. Et, sauf à supposer que nous puissions exécuter un processus non algorithmique, il doit donc exister, quelque part dans un recoin de notre cerveau, la traduction biologique d'un algorithme qui distingue les Lorenzetti des Basquiat. Mais nous ignorons tout de cet algorithme : nous ne savons pas, par exemple, l'« expliquer » à un ordinateur.

C'est un vieux paradoxe : les ordinateurs font des choses qui nous semblent difficiles, comme multiplier des nombres de 12 chiffres, mais ils ne parviennent pas à faire des choses qui nous semblent faciles, comme distinguer un Lorenzetti d'un Basquiat. Ce qui est une évidence pour tout un chacun, car il peut exécuter une multitude d'algorithmes naturels, biologiquement codés dans son cerveau, sélectionnés par des millions d'années d'évolution et dont il ignore le fonctionnement, devient une énigme pour les informaticiens. C'est pourquoi les informaticiens portent sur le monde un regard émerveillé. Vous savez comment distinguer un Lorenzetti d'un Basquiat ? Eh bien, un informaticien, lui, ne sait pas.

Cette nouvelle définition de la connaissance, non comme faculté de résoudre un problème, mais d'expliquer comment on le résout, est peut-être propre à l'informatique. Mais il est plus vraisemblable que l'informatique soit uniquement, pour des raisons historiques faciles à comprendre, à l'avant-garde d'un mouvement réflexif plus vaste, qui valorise davantage les méthodes de résolution que les solutions elles-mêmes. Demain, on pensera peut-être qu'il n'est pas suffisant que les écoliers sachent quel est le pluriel des mots « souris » et « chacal », mais qu'il faut aussi qu'ils sachent expliquer l'algorithme donnant le pluriel d'un mot. ■

Gilles DOWEK est chercheur à l'Inria et membre du conseil scientifique de la Société informatique de France.

© Pour la Science - n° 445 - Novembre 2014

NOTO,
toute votre bibliothèque avec vous, partout, tout le temps.

Découvrez **NOTO,** la plateforme d'ouvrages interactifs. Grâce au code imprimé dans l'ouvrage, accédez à sa version numérique.

Profitez de toutes les possibilités offertes par **NOTO :** annoter, partager, archiver, travailler en mode online ou offline, grâce à l'application gratuite.

Une nouvelle façon d'enseigner et d'apprendre !

Vous souhaitez plus d'informations ? Contactez-nous : **monavis@deboeck.com**

NOTO bib
ACCÈS NUMÉRIQUE POUR BIBLIOTHÈQUES

de boeck

NOTO
VERSION NUMÉRIQUE

CABINET DE CURIOSITES SOCIOLOGIQUES par Gérald Bronner

Une justice sous influence

La justice est supposée être impartiale, mais elle est rendue par des juges notablement influencés, à leur insu, par leur environnement.

La justice est souvent représentée comme une femme tenant un glaive et une balance, dont le regard est dissimulé par un voile censé éviter que des éléments perturbateurs n'influencent son verdict. Il est naturel d'attendre de la justice qu'elle soit impartiale et indépendante. C'est une des demandes légitimes notamment des citoyens ayant la chance de vivre en démocratie. Seulement, dans ces mêmes démocraties, on ne cesse de l'accuser de ne pas toujours prendre des décisions équitables. Tel homme politique se considère comme harcelé, tel individu spolié.

Il est vrai que certains jugements peuvent laisser dubitatifs. Ainsi, la sanction d'un an de prison ferme prononcée à l'encontre du sinistre individu qui lança un chaton contre un mur (sans le tuer) doit-elle quelque chose à l'emballement médiatique qui l'avait précédée ? Est-il possible que ceux qui ont à juger voient leurs décisions biaisées au point de devenir injustes ? Ce serait là une violation de la déontologie des magistrats qui rappelle que : « L'impartialité [...] ne s'entend pas seulement d'une absence apparente de préjugés, mais aussi, plus fondamentalement, de l'absence réelle de parti pris. » Aussi incommode que soit cette idée, il est pourtant facile de montrer que les professionnels de la justice peuvent se laisser influencer par des facteurs arbitraires, parce qu'avant d'être des juges, ils sont des humains dont le cerveau est une machine à la fois merveilleuse et faillible.

Ainsi, une étude a montré que des juges qui devaient statuer sur des demandes de liberté conditionnelle étaient nettement plus enclins à l'accepter après une pause déjeuner qu'avant ! En d'autres termes, un juge fatigué et affamé aura tendance à être plus sévère qu'un juge rassasié. Qu'à cela ne tienne, il suffit peut-être de prévoir des petits en-cas pour éviter ce déséquilibre du jugement. Mais que faire quand un phénomène aléatoire est de nature, lui aussi, à fausser un verdict ?

Des psychologues allemands ont montré que des juges, pourtant expérimentés, se laissent influencer par le résultat parfaitement arbitraire d'un lancer de dés. Ils ont soumis à ces professionnels le cas d'une femme coupable d'un vol à l'étalage. Son dossier présentait exactement les mêmes données pour chacun des sujets de l'expérience. La seule différence venait d'un dé que l'on tirait devant eux ; ils devaient dire si le nombre de mois de la peine de prison infligée était supérieur ou inférieur au chiffre apparaissant sur le dé. Ensuite, ils devaient indiquer le nombre précis de mois. Ce dé était pipé (mais les sujets de l'expérience l'ignoraient), et ne donnait que des chiffres 3 ou des 9. Ceux pour qui le dé indiquait le chiffre 9 condamnèrent en moyenne la voleuse à huit mois de prison, tandis que ceux qui avaient obtenu le chiffre 3 lui en infligèrent seulement 5 !

> Il n'est pas de meilleure méthode pour déjouer les contraintes qui s'exercent sur nous que de les connaître pour tenter de les apprivoiser

Ces résultats sont inquiétants, car si des juges expérimentés peuvent se laisser influencer, à leur insu, par un simple lancer de dés, que penser de l'impartialité de leur jugement lorsqu'ils sont confrontés à une polémique médiatique ou à des enjeux idéologiques, dont on suppose qu'ils ont un pouvoir de suggestion notablement supérieur ?

Le bandeau qui masque le regard de la justice peut alors être interprété de bien des façons. Ce n'est sans doute pas une raison pour désespérer de cette institution fondamentale, mais une occasion de rappeler cette évidence que si la justice doit être au-dessus des hommes, c'est bien par des hommes qu'elle est administrée. Dans ces conditions, il n'est peut-être pas absurde que, dans les écoles de magistrature, on enseigne désormais quelques bases concernant le fonctionnement du cerveau humain. Car c'est bien lui qui nous permet de juger. Or la somme des biais, illusions ou obstacles qui peuvent peser sur notre raisonnement est immense. Les progrès spectaculaires des sciences de la cognition au cours des 50 dernières années offrent l'espoir d'améliorer les conditions de notre raisonnement. En effet, il n'est pas de meilleure méthode pour déjouer les contraintes qui s'exercent sur nous que de les connaître pour essayer de les apprivoiser. ■

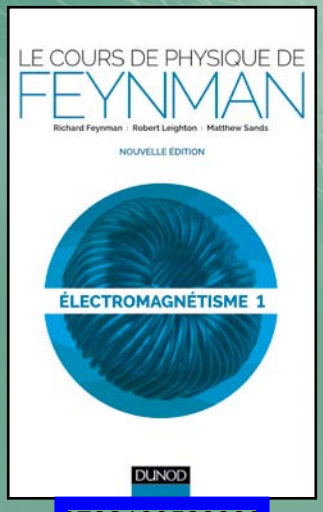
Gérald BRONNER est professeur de sociologie à l'Université Paris-Diderot.

© Pour la Science - n° 445 - Novembre 2014

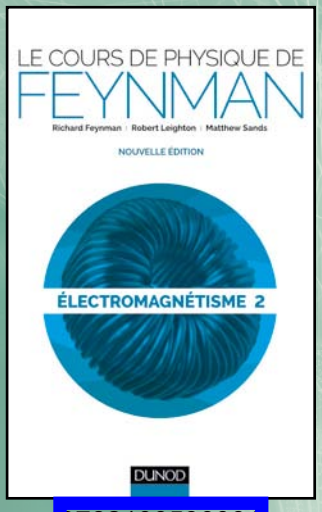
Nouvelles Éditions

Le COURS de PHYSIQUE de FEYNMAN

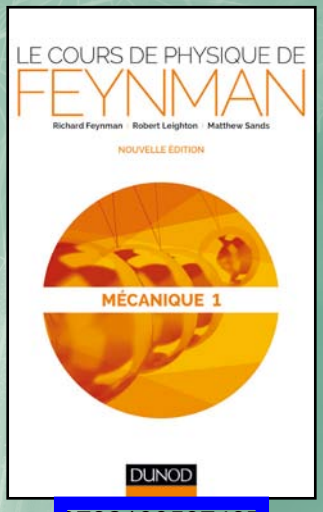
Une vision expérimentale et extrêmement personnelle de la physique



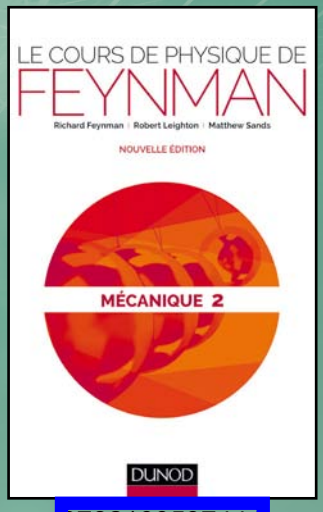
9782100589999



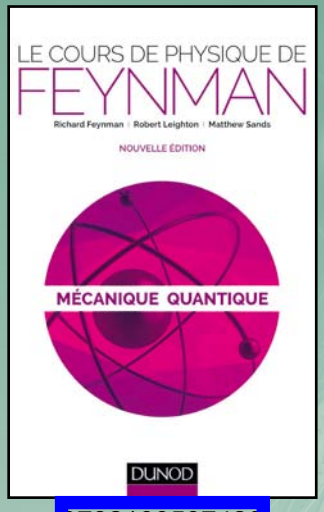
9782100590001



9782100597437

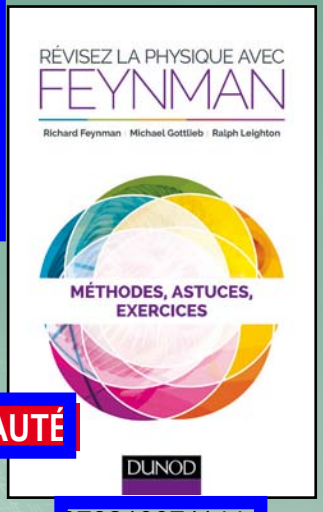


9782100597444



9782100597420

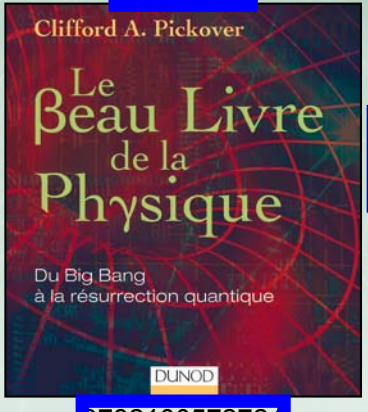
Le **complément indispensable** du légendaire cours de Feynman !



NOUVEAUTÉ

9782100711444

Et aussi



9782100572724

Une odyssée extraordinaire…

Tous nos ouvrages sont disponibles en librairie

www.dunod.com

DUNOD
ÉDITEUR DE SAVOIRS

Lu sur SciLogs.fr
Les blogs scientifiques de Pour la Science

Pourquoi une médaille d'or du CNRS à un informaticien ?

par Thierry Viéville, sur *Intelligence mécanique*

Si un informaticien, Gérard Berry, a reçu cette année la médaille d'or du CNRS, c'est qu'il existe bien une science informatique ! Alors pourquoi cette science nous semble-t-elle si difficile à cerner ? C'est qu'elle ne nous est pas familière. Nous n'en avons pas appris les concepts à l'école. Pourtant, quelques notions simples permettent de comprendre les travaux de G. Berry. Voyons lesquelles.

La première est celle de système réactif. On présente souvent un programme comme une suite d'instructions qui s'exécute une fois, du début à la fin. Mais, par exemple, en temps normal, votre smartphone n'exécute pas un programme : il se contente d'attendre, et de réagir quand il reçoit un texto ou que vous touchez l'écran. L'informatique embarquée dans les objets courants est surtout composée de tels logiciels réactifs, qui exécutent une action en réponse à des événements.

Ce n'est pas si simple. Le processeur doit surveiller en même temps les textos, le niveau de batterie, l'écran tactile, etc. Il doit basculer d'une tâche à une autre en permanence ! Et si chaque programme réagit indépendamment à chaque événement, des conflits et des réactions indésirables surviennent inévitablement. Pour garantir le bon fonctionnement du système, il faut donc le modéliser.

C'est là qu'entre en jeu l'approche événementielle. Pour formaliser un système réactif, il faut tenir compte du temps, des délais de réponse, des mécanismes de synchronisation et du contexte, imprévisible. Le système peut être dans plusieurs états : éteint, allumé, avec tel composant en marche, etc. La vérification formelle consiste à garantir par des raisonnements logiques que, parmi les millions d'états possibles, les programmes conduisent le système dans des états corrects.

Pour ce faire, l'idée clé est de considérer le temps comme une succession d'événements. Peu importe l'heure exacte à laquelle l'avion va ouvrir son train d'atterrissage, puis atterrir : ce qui compte, c'est qu'il ouvre son train avant d'atterrir. Seuls comptent les événements.

Cette approche permet de visualiser le fonctionnement du système comme une suite de déplacements d'un état à un autre, en exécutant des actions correspondant à ces changements d'état. On parle de graphe des états du système et de transitions entre états, qui forment un automate à nombre fini d'états. Ce point de vue a permis de développer de nombreux outils pour déterminer *a priori* le comportement des logiciels.

Gérard Berru, médaille d'or du CNRS 2014

Cependant, en pratique, un programme ne s'exécute pas instantanément. Les calculs demandent un certain délai. Comment traiter un événement qui survient pendant une transition ? Pour contourner ce problème, G. Berry et ses collègues ont introduit l'hypothèse synchrone : on suppose que le système calcule instantanément comment passer d'un état à un autre. Bien sûr, les calculs ne sont pas instantanés, mais on peut considérer que la fin d'un calcul est elle-même un événement, et c'est sur la base de cet événement que l'état du système est calculé sans délais. Cette astuce simplifie considérablement la modélisation des systèmes réactifs.

Reste un dernier obstacle : comment décrire tous les états possibles d'un système réactif ? G. Berry et ses collègues ont proposé pour cela un langage de programmation, nommé Esterel. Il comporte des instructions telles que « émettre un événement », « exécuter une action à l'arrivée d'un événement », « enchaîner deux actions », etc. Les informaticiens ont montré qu'avec 11 fonctions « primitives », ce langage permet de définir tout ce qui est imaginable pour un système réactif.

Les ingénieurs peuvent ainsi décrire le comportement souhaité sous forme de modules qui émettent et reçoivent des signaux. Un traducteur automatique engendre ensuite l'automate correspondant, qui peut alors être vérifié et implanté dans un circuit électronique ou sous forme logicielle.

Voilà comment quelques concepts simples permettent aujourd'hui de garantir la sûreté de systèmes informatiques complexes ! ■

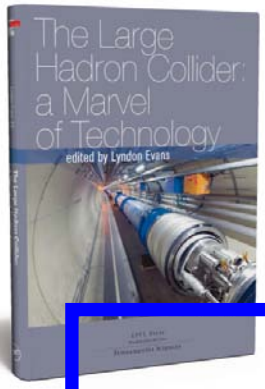
Thierry VIÉVILLE est directeur de recherche en neurosciences computationnelles à l'Inria et tient le blog Intelligence mécanique (www.scilogs.fr/intelligence-mecanique).

Retrouvez tous nos blogueurs sur www.scilogs.fr et suivez-les sur les réseaux sociaux

PRESSES POLYTECHNIQUES ET UNIVERSITAIRES ROMANDES

Editeur scientifique de référence depuis 1980

NOS AUTEURS CERN :



THE LARGE HADRON COLLIDER

A Marvel of Technology

Edited by Lyndon Evans (Project Leader of the LHC)

The world's greatest scientific experiment explained by key scientists and program leaders. The book reveals how its technology and detectors lead to a new understanding of our universe.

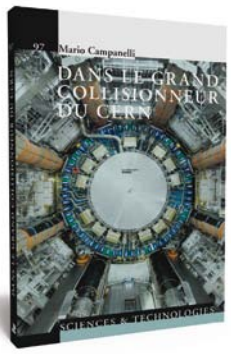
2014, 256 p, couleur, ISBN 978-2-9400222-34-6

DANS LE GRAND COLLISIONNEUR DU CERN

Mario Campanelli (Projet Atlas, LHC)

Ce livre fait pénétrer le lecteur non initié dans l'instrument scientifique le plus grand du monde : le LHC. Après les grandes découvertes de l'univers et de la réalité microscopique du siècle dernier, le collisionneur nous fait progresser aujourd'hui dans un «nuage de probabilités» aux frontières de l'antimatière.

2014, 144 p., ISBN 978-2-889150-31-1



L'ODYSSEE DU ZEPTOESPACE

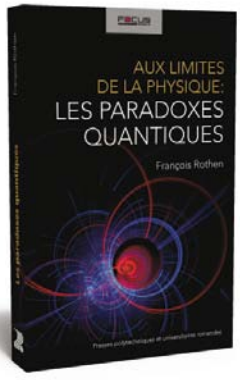
Un voyage au cœur de la physique du LHC

Gian F. Giudice (CERN)

Pourquoi et comment la découverte du boson de Higgs va bouleverser notre vision du monde. Un ouvrage exceptionnel, déjà traduit en plusieurs langues

2013, 360 p., ISBN 978-2-88074-998-9

Récemment parus dans le même domaine



AUX LIMITES DE LA PHYSIQUE: LES PARADOXES QUANTIQUES

François Rothen (Uni. Lausanne)

Un voyage passionnant au cœur d'un impossible pourtant bien réel... bienvenue dans le monde quantique!

2012, 304 p., ISBN 978-2-88074-967-5

DE L'ATOME ANTIQUE À L'ATOME QUANTIQUE

A la recherche des mystères de la matière

Christian Gruber et Philippe-André Martin (EPFL, Lausanne)

25 siècles de recherches sur l'atome: une extraordinaire aventure scientifique accessible à tous.

2013, 352 p, coul., ISBN 978-2-88915-003-8

NOUVEAUTÉS

ET OUVRAGES DE RÉFÉRENCE

www.ppur.org
www.epflpress.org

Ouvrages disponibles en librairie

La saga

humaine réécrite

En paléontologie humaine, les 15 dernières années ont été riches en découvertes. À leur lumière, les scientifiques ont dû revoir pratiquement tous les chapitres de l'histoire de l'humanité.

Kate Wong

L'automne dernier, en 2013, le monde a suivi, *via* des tweets, des blogs et des vidéos, la progression des scientifiques à travers Rising Star, un ensemble de grottes situé près de Johannesburg, en Afrique du Sud. Les difficultés et les dangers du relief souterrain n'ont pas détourné les chercheurs de la récompense promise : les restes fossilisés d'un membre éteint de la famille humaine. En paléontologie humaine, les travaux de terrain sont en général réalisés dans la plus grande discrétion, mais cette fois les scientifiques ont envoyé de captivantes missives multimédia tout au long de leur cheminement, pour que tous puissent assister au spectacle.

Des spéléologues avaient repéré les ossements en septembre 2013, alors qu'ils explo-raient des grottes de la fameuse région de Cradle of Humankind (« Berceau de l'humanité »). Les chercheurs étaient certains de l'importance de ces vestiges même avant d'entreprendre leur analyse. Les spécimens individuels représentés dans le registre fossile humain le sont soit par des fragments de crâne, soit par des parties du squelette postérieur au cou. Or on avait découvert les deux.

Peu après le début des fouilles, les chercheurs se sont rendu compte que la découverte était encore plus importante. Le sol de la grotte ne recélait pas les restes d'un individu, comme on l'a d'abord pensé, mais ceux d'un groupe entier d'humains archaïques.

Au cours de deux expéditions couvrant une période de quatre semaines au total, l'équipe dirigée par Lee Berger, de l'Université du Witwatersrand à Johannesburg, a récupéré plus de 1 500 ossements ou fragments d'os, à une trentaine de mètres au-dessous du campement scientifique où les fossiles sont catalogués et rangés en lieu sûr. En fait, seule une couche superficielle de la grotte a été fouillée : beaucoup d'autres ossements attendent d'être mis au jour.

L'équipe de L. Berger n'a pas encore publié les résultats de l'étude des fossiles trouvés. Ces derniers sont peut-être ceux d'une espèce nouvelle pour la science qui, comme les fossiles découverts il y a quelques années par L. Berger et ses collègues dans le site voisin de Malapa, éclairera les origines du genre *Homo*. Peut-être, grâce au grand nombre d'individus du site, obtiendra-t-on des informations sur la structure sociale du groupe. Il est aussi possible que la comparaison des vestiges humains avec ceux d'animaux permette de comprendre comment ils se sont retrouvés là.

La trouvaille de Rising Star n'est que la plus récente d'une série de découvertes qui bouleversent la connaissance de l'évolution humaine. De nouveaux fossiles ajoutent des branches à l'arbre de parenté de notre espèce ; des données climatiques révèlent les conditions sous lesquelles nos prédécesseurs ont acquis leurs traits distinctifs ; des études sur les primates précisent ce qui nous différencie, sur le plan cognitif, des grands singes ; des analyses d'ADN nous renseignent sur les interactions des populations anciennes et sur les changements que connaît notre espèce. Étant donné cette profusion de nouveaux résultats, les scientifiques ont eu à récrire la saga humaine, de l'aube de l'humanité jusqu'au triomphe de *Homo sapiens* et l'extinction des autres espèces archaïques.

Pour se rendre compte à quel point la paléoanthropologie a progressé, remontons à la fin des années 1990, époque où les scientifiques pensaient avoir une assez bonne compréhension de notre évolution. Le registre fossile d'humains était relativement riche et les indices génétiques, là où il y en avait, corroboraient l'histoire racontée par les fossiles.

L'idée communément admise était que les premiers hominines (le groupe qui comprend l'homme moderne et ses proches parents éteints) étaient apparus en Afrique de l'Est il y a plus de 4,4 millions d'années, puis que notre genre, *Homo*, a émergé il y a un peu plus de deux millions d'années. Les hominines seraient restés en Afrique jusqu'il y a un million d'années ou un peu plus, après quoi ils auraient commencé à gagner d'autres régions de l'Ancien Monde. Avec leur installation dans ces nouveaux territoires, de nouvelles espèces de *Homo* seraient apparues, dont les Néandertaliens en Eurasie.

Ces espèces auraient prospéré durant des centaines de milliers d'années, jusqu'à ce qu'une nouvelle espèce originaire d'Afrique commence à s'étendre sur le globe. Plus intelligent, armé de meilleures techniques et doté de la parole, *Homo sapiens* se serait imposé, conduisant les Neandertaliens et d'autres formes anciennes à l'extinction.

Il n'y aurait pas eu de mélanges ou d'hybridations ayant transmis des gènes néandertaliens aux générations suivantes, mais un remplacement pur et simple de la vieille garde par la nouvelle, *Homo sapiens* ayant au mieux surpassé, au pire éliminé, les hominines qu'il a rencontrés lors de son expansion hors d'Afrique. Et il y a environ 30 000 ans, la seule espèce d'hominines restante était la nôtre.

Le genre *Homo*, né en Afrique australe ?

Tel était donc le scénario en vigueur dans les années 1990. Les indices fossiles et génétiques accumulés depuis lors ont remis en question, voire infirmé, chaque élément de ce récit de nos origines. Par exemple, des fossiles datant de sept millions d'années, découverts à partir de 2001 dans le désert du Djourab au Nord du Tchad, ont étendu le registre fossile de plus de deux millions d'années et ont suggéré la possibilité que les hominines aient émergé non pas en Afrique de l'Est, mais à l'Ouest. Et les fossiles d'environ deux millions d'années de Malapa, en Afrique du Sud, suggèrent que le genre *Homo* ait pu naître dans cette partie du continent plutôt qu'en Afrique de l'Est.

Des fossiles issus de Dmanisi, en Géorgie, et datant de 1,78 million d'années montrent que les hominines ont commencé à se répandre hors d'Afrique des centaines de milliers d'années plus tôt qu'on ne le pensait, bien avant que *Homo* n'ait acquis de longues jambes, un gros cerveau et des outils, caractéristiques qui, croyait-on, avaient rendu possible la sortie d'Afrique.

Et l'étonnante découverte sur l'île de Florès, en Indonésie, d'un petit hominine qui y vivait encore il y a 17 000 ans indique que nos prédécesseurs ont peut-être commencé à sortir d'Afrique plus tôt que ne le suggèrent les fossiles de Dmanisi : le corps exceptionnellement petit et le cerveau de *Homo florensis*, comme on nomme les vestiges indonésiens, pourraient être les traits hérités d'un ancêtre de forme australopithèque qui serait sorti d'Afrique il y a deux millions d'années ou plus.

Aucun autre chapitre de l'odyssée humaine n'a sans doute été aussi amplement réécrit que celui qui détaille l'ascension de *H. sapiens*. Le registre fossile brosse

© Pour la Science - n° 445 - Novembre 2014

DES SCIENTIFIQUES SPELEOLOGUES, dont K. Lindsay Eaves *(a)*, ont récupéré plus de 1 500 restes fossiles *(b)* d'hominines anciens dans une des grottes de Rising Star, en Afrique du Sud. Les chercheurs ont scanné en 3D la grotte *(c)* afin de documenter leurs fouilles.

Glossaire

Les définitions taxonomiques peuvent varier selon les auteurs. Voici le choix adopté dans ce numéro.

Hominidés : ce terme désigne la famille (*Hominidae* en latin) à laquelle appartient le genre humain. Cette famille regroupe les grands singes (chimpanzés, gorilles) et les espèces humaines.

Homininés : il s'agit de la sous-famille (en latin *Homininae*) des Hominidés regroupant la lignée humaine et celle des chimpanzés.

Hominines : désigne la lignée humaine après séparation de celle des chimpanzés, il y a peut-être 7 millions d'années. Les hominines (en latin *Hominini*) incluent les genres *Australopithecus*, *Homo*, etc.

aujourd'hui le tableau d'une espèce qui, loin d'être d'emblée destinée à dominer le monde, a failli s'éteindre à ses débuts à la suite de changements climatiques. Par ailleurs, le fossé cognitif entre *H. sapiens* et les espèces archaïques n'est pas aussi grand que certains l'avaient estimé. La découverte notamment d'outils en os pour le travail des peaux montre que les Néandertaliens étaient bien plus avancés sur le plan technique qu'on ne l'a supposé. Et des indices de la décoration des corps avec de la peinture, des bijoux ou des plumes attestent de la présence de traditions symboliques, jugées autrefois propres à *H. sapiens*. L'idée de Néandertaliens rustres et balourds a vécu.

Au vu des points communs entre *H. sapiens* et les Néandertaliens, il n'est pas surprenant que des études génétiques aient montré l'existence de croisements entre ces deux groupes d'humains – croisements assez fréquents pour que les génomes des non-Africains actuels contiennent 1 à 4 % de matériel génétique néandertalien. Et comme différentes personnes portent différents fragments d'ADN néandertalien, le total du matériel génétique néandertalien qui persiste dans les populations humaines d'aujourd'hui est bien supérieur : au moins 20 %, selon des calculs récents.

H. sapiens s'est hybridé non seulement avec les Néandertaliens, mais aussi avec les Denisoviens – une forme identifiée via l'ADN récupéré d'un fragment d'os de doigt datant de 40 000 ans et trouvé dans une grotte sibérienne. Ces croisements avec des hominines archaïques semblent avoir bénéficié à *H. sapiens*, qui a ainsi acquis des gènes l'aidant à survivre : par exemple, de l'ADN hérité des Néandertaliens semble avoir renforcé son système immunitaire, et une variante de gène provenant des Denisoviens aide les Tibétains à supporter les hautes altitudes.

Aux origines de nos traits distinctifs

Malgré tous ces liens avec des espèces proches dans l'arbre de l'évolution, quelques traits nous distinguent nettement d'elles. Le présent numéro spécial explore l'apparition de certaines de nos particularités, par exemple notre transformation en prédateurs, notre capacité sans égale à coopérer, la division du travail au sein d'un groupe ou le développement rapide de la culture. Il s'agit en particulier de comprendre quels ont été les facteurs qui ont orienté l'évolution humaine dans ces directions et quels avantages *Homo sapiens* a pu en tirer. Les réponses que proposent aujourd'hui les scientifiques sont parfois inattendues.

L'AUTEUR

Kate WONG est rédactrice et chef de rubrique à *Scientific American*.

BIBLIOGRAPHIE

M. Hammer, **Le métissage des espèces humaines**, *Pour la Science*, n° 430, août 2013.

K. Wong, **Le premier de notre genre ?**, *Pour la Science*, n° 423, janvier 2013.

S. Manzi et F. Di Vincenzo, **Le dernier ancêtre de l'homme moderne**, *Pour la Science*, n° 411, janvier 2012.

Le buissonnant RAMEAU

Bernard Wood

Les découvertes de nouveaux fossiles et la paléogénétique ont compliqué la vision que l'on se faisait de l'évolution de l'homme – une évolution dont l'étude devient d'autant plus riche et intéressante.

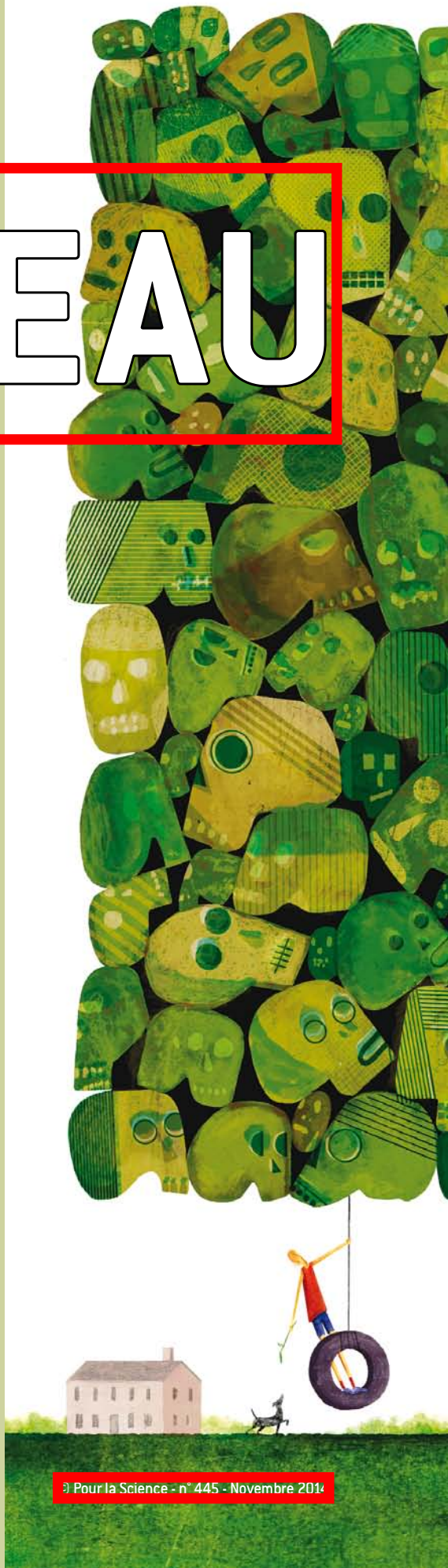
Notre vision de l'évolution de l'homme a évolué. Quand, dans les années 1960, j'ai commencé à étudier les plus anciennes formes préhumaines et humaines, il était admis que leurs fossiles étaient ceux de nos ancêtres. On pensait alors que plus un fossile préhumain était ancien, plus l'animal associé ressemblait à un grand singe.

Or le registre fossile montre aujourd'hui que, à de nombreuses reprises dans le passé s'étendant de quatre à un million d'années, plusieurs espèces préhumaines et humaines ont foulé en même temps le sol de la planète. Par ailleurs, la génétique a prouvé que les ancêtres des hommes modernes cohabitaient avec d'autres espèces humaines, dont l'homme de Néandertal et celui de Denisova. Ainsi, il est certain aujourd'hui que la famille humaine a souvent compté plus d'une branche simultanément, ce qui complique la recherche de nos ancêtres, mais rend aussi notre histoire évolutive bien plus riche et intéressante.

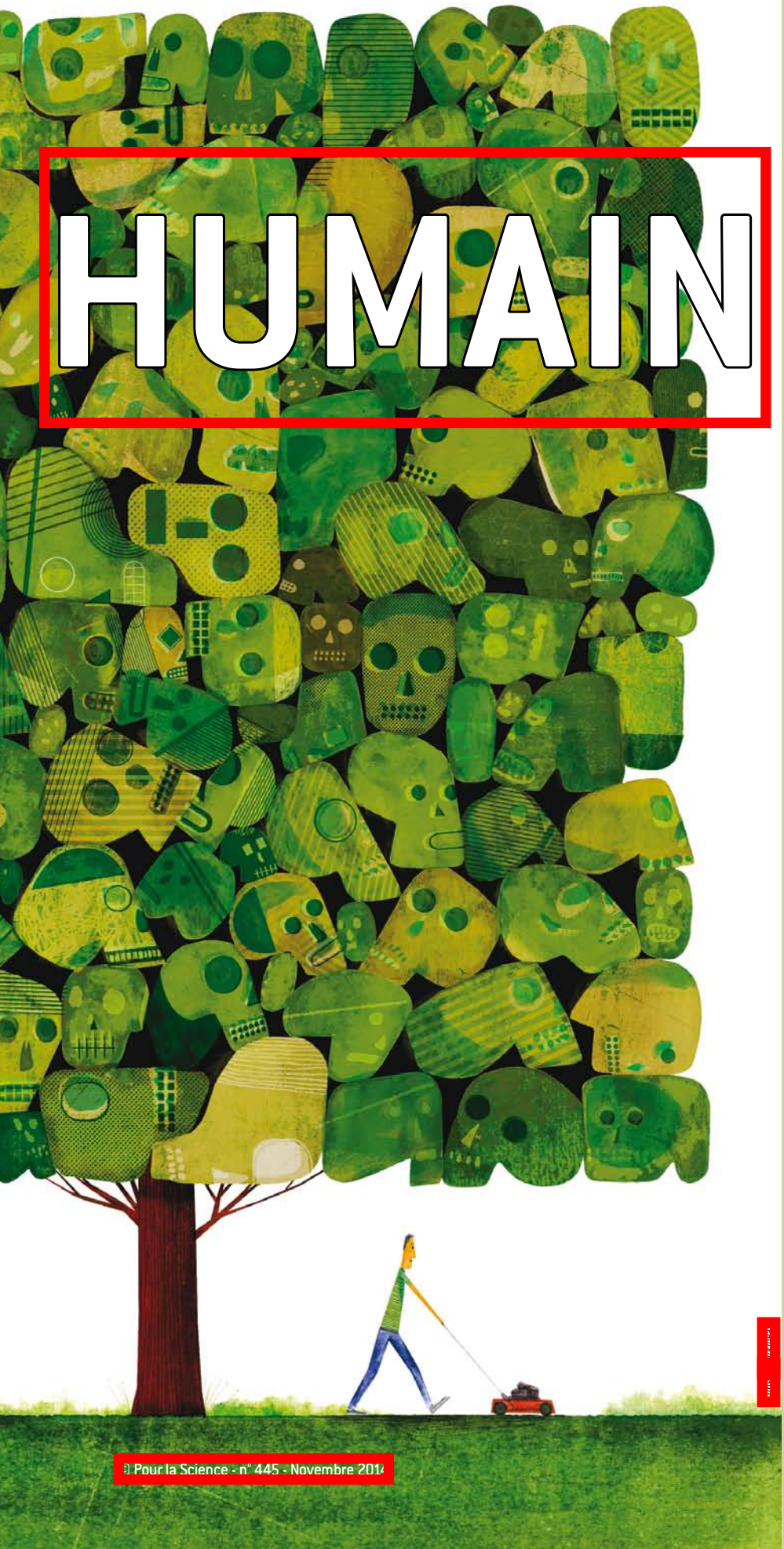
L'hésitation qu'éprouvent les paléoanthropologues confrontés à un nouveau fossile était palpable récemment, lorsque j'ai rendu visite au découvreur des deux fossiles de Malapa. Dans cette grotte située en Afrique du Sud, Lee Berger, qui travaille à l'Université du Witwatersrand dans le même pays, a découvert deux squelettes fossiles d'une espèce australopithèque inconnue auparavant : *Australopithecus sediba*. À peine avait-il ouvert les

L'ESSENTIEL

- L'essentiel de l'arbre phylogénétique humain se résumait autrefois à la séquence *Australopithecus*, *Homo erectus*, *Homo neanderthalensis*, *Homo sapiens*.
- Les nombreuses formes préhumaines fossiles découvertes en Afrique ont balayé cette vision.
- Il ressort que, à diverses époques, plusieurs espèces préhumaines ou humaines ont vécu simultanément.
- L'arbre de parenté des humains est pour cette raison devenu comparable à un buisson, dont la restitution est devenue de plus en plus complexe.



HUMAIN



caisses de bois où il les protège jalousement qu'il m'interrogeait : « Qu'en penses-tu ? ».

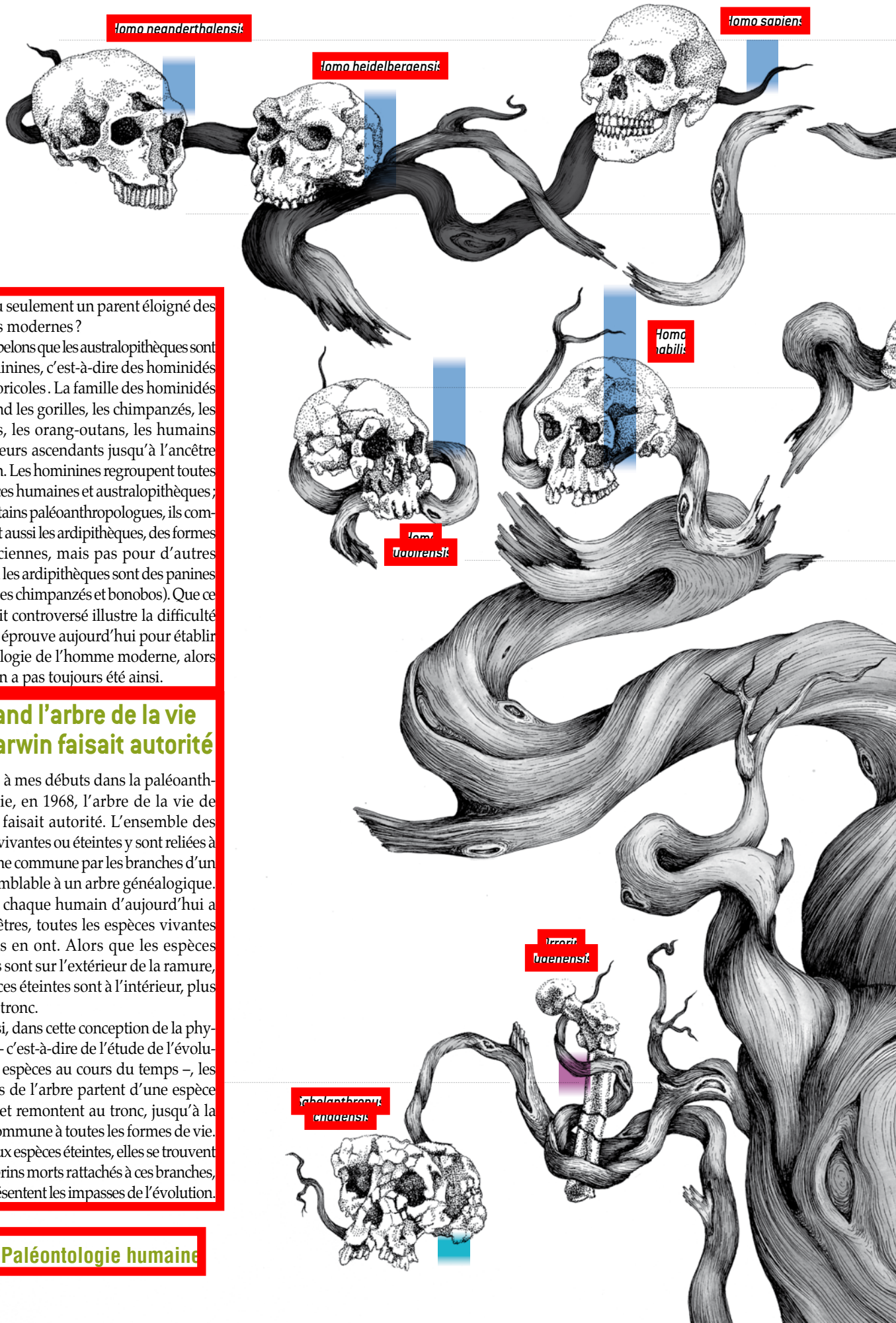
Étant donné que leurs propriétaires ont rendu leur dernier souffle il y a deux millions d'années environ, ces squelettes sont dans un état de conservation étonnamment bon *(voir l'encadré pages 32 et 33)*. Les chercheurs sont en effet plutôt habitués à découvrir une mandibule par-ci ou une phalange par-là, et si par chance ils trouvent deux os humains ou préhumains au même endroit, démontrer qu'ils proviennent du même individu n'a rien d'évident. Or *Au. sediba* est d'emblée connu par deux squelettes assez complets, qui ont beaucoup plus à dire qu'un os isolé. Ils sont en outre assez intacts pour éliminer tout risque de confusion entre les os de plusieurs individus.

Cela en fait des fossiles rares, comme ceux de Lucy, un *Australopithecus afarensis* découvert en Éthiopie en 1974, ou ceux du garçon de Turkana, un *Homo ergaster* trouvé au Kenya en 1984. Pour autant, si l'espèce découverte dans la grotte de Malapa a fait sensation, ce n'est pas pour le caractère complet et bien conservé des fossiles, mais parce que L. Berger a avancé qu'elle serait l'ancêtre directe du genre humain passé et présent : le genre *Homo*.

Des ancêtres du genre humain ?

Nous avons tous des ancêtres. J'ai par exemple la chance d'avoir l'un de mes parents encore vivant. J'ai aussi eu celle d'avoir connu mes quatre grands-parents, et d'avoir de vagues souvenirs de trois de mes arrière-grands-parents. J'ai aussi des oncles et des tantes qui ne font pas partie de mes ascendants. S'ils occupent une place essentielle dans l'arbre généalogique de leurs descendants, ils ne sont qu'accessoires dans le mien.

De même, l'importance phylogénétique d'une espèce préhumaine diffère selon qu'elle est l'ancêtre directe du genre *Homo* ou pas. C'est pourquoi L. Berger voulait que j'arrête d'admirer les détails dentaires et des mâchoires de ses australopithèques pour lui dire si je le rejoignais dans son idée que nous nous trouvions en présence de grands-parents des humains actuels ou si je pensais plutôt que nous avions seulement affaire à des oncles ou tantes… En d'autres termes, l'australopithèque découvert à Malapa est-il un ancêtre



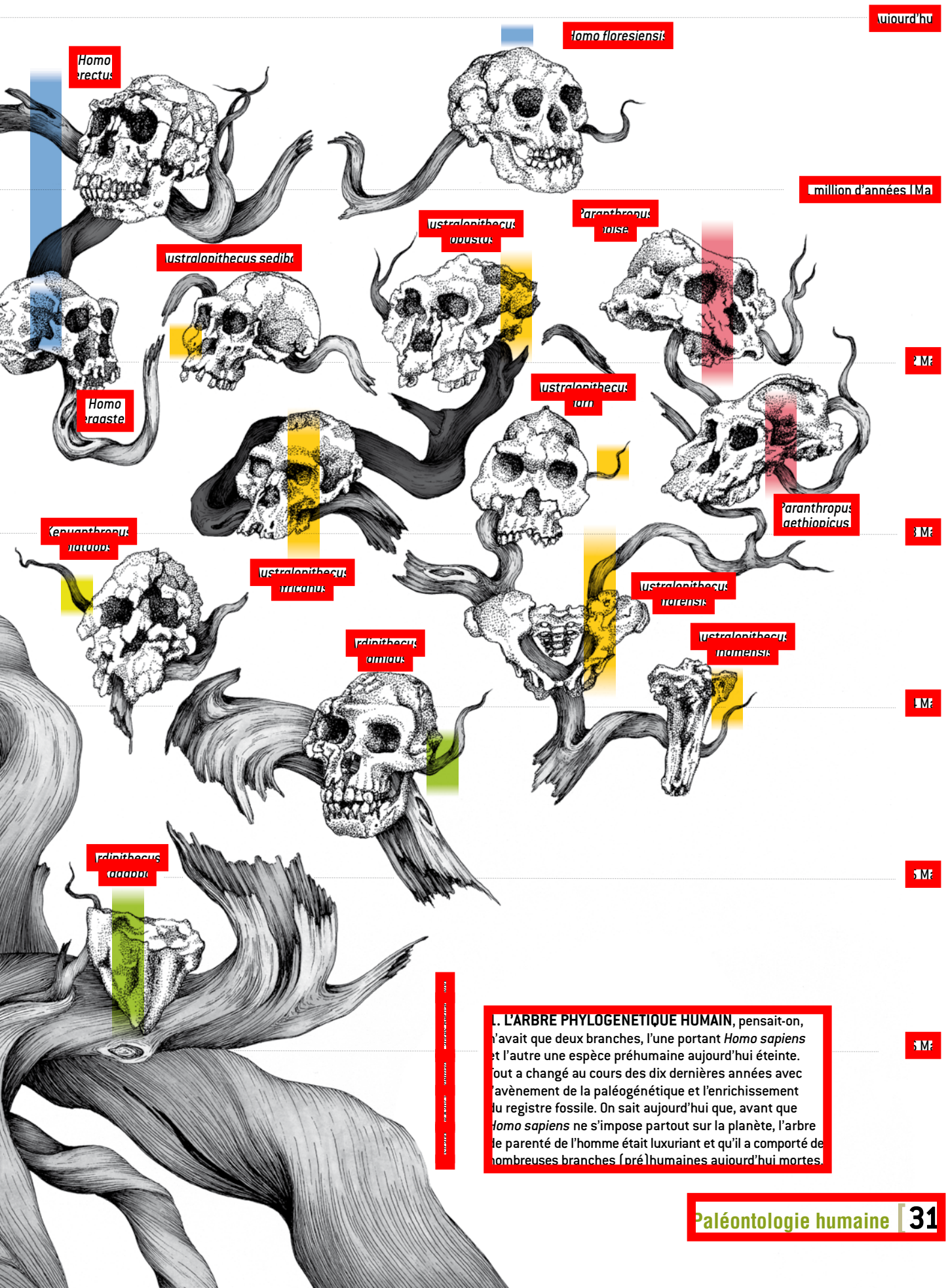
direct ou seulement un parent éloigné des hommes modernes ?

Rappelons que les australopithèques sont des hominines, c'est-à-dire des hominidés non arboricoles. La famille des hominidés comprend les gorilles, les chimpanzés, les bonobos, les orang-outans, les humains et tous leurs ascendants jusqu'à l'ancêtre commun. Les hominines regroupent toutes les espèces humaines et australopithèques ; pour certains paléoanthropologues, ils comprennent aussi les ardipithèques, des formes plus anciennes, mais pas pour d'autres pour qui les ardipithèques sont des panines (lignée des chimpanzés et bonobos). Que ce point soit controversé illustre la difficulté que l'on éprouve aujourd'hui pour établir la généalogie de l'homme moderne, alors qu'il n'en a pas toujours été ainsi.

Quand l'arbre de la vie de Darwin faisait autorité

En effet, à mes débuts dans la paléoanthropologie, en 1968, l'arbre de la vie de Darwin faisait autorité. L'ensemble des espèces vivantes ou éteintes y sont reliées à une racine commune par les branches d'un arbre semblable à un arbre généalogique. Comme chaque humain d'aujourd'hui a des ancêtres, toutes les espèces vivantes actuelles en ont. Alors que les espèces vivantes sont sur l'extérieur de la ramure, les espèces éteintes sont à l'intérieur, plus près du tronc.

Ainsi, dans cette conception de la phylogénie – c'est-à-dire de l'étude de l'évolution des espèces au cours du temps –, les branches de l'arbre partent d'une espèce vivante et remontent au tronc, jusqu'à la racine commune à toutes les formes de vie. Quant aux espèces éteintes, elles se trouvent sur des brins morts rattachés à ces branches, qui représentent les impasses de l'évolution.



1. L'ARBRE PHYLOGENETIQUE HUMAIN, pensait-on, n'avait que deux branches, l'une portant *Homo sapiens* et l'autre une espèce préhumaine aujourd'hui éteinte. Tout a changé au cours des dix dernières années avec l'avènement de la paléogénétique et l'enrichissement du registre fossile. On sait aujourd'hui que, avant que *Homo sapiens* ne s'impose partout sur la planète, l'arbre de parenté de l'homme était luxuriant et qu'il a comporté de nombreuses branches (pré)humaines aujourd'hui mortes.

Dans le cas du rameau humain, cette conception implique que les seules espèces se trouvant dans notre voisinage immédiat sur l'arbre appartiennent à des branches directement reliées au primate qui était l'ancêtre commun des humains, des chimpanzés et des bonobos. Cet ancêtre des hominines aurait vécu il y a entre cinq et huit millions d'années.

Dans les années 1960, la représentation que l'on se faisait de ce rameau était simple. À sa base se trouvait *Australopithecus*, l'homme-singe dont, depuis les années 1920, les paléoanthropologues découvraient des spécimens en Afrique australe. *Australopithecus* semblait avoir été remplacé par *Homo erectus*, un humain au cerveau plus gros originaire d'Asie qui, après être arrivé en Europe, y avait évolué pour donner l'homme de Néandertal ou *Homo neanderthalensis*, lui-même l'ancêtre de l'homme moderne ou *Homo sapiens*. Ainsi, *Australopithecus*, *Homo erectus*, *Homo neanderthalensis* étaient tous considérés comme des ascendants de l'homme moderne, c'est-à-dire comme les équivalents phylogénétiques de mes arrière-grands-parents, grands-parents et parents.

Le seul hominine qui n'était pas notre ascendant était le *Paranthropus*, que l'on nomme aussi australopithèque robuste à cause de ses mâchoires et de ses dents de grandes tailles. Dans la vision des années 1960 de la phylogénie humaine, cet australopithèque était notre seul oncle, une espèce correspondant à une brindille morte reliée à la branche humaine.

Les nouveaux fossiles des gorges d'Olduvai

Cette vision a changé avec la découverte par Louis Leakey (1903-1972) et sa femme Mary Leakey (1913-1996) de nouveaux hominines dans les gorges d'Olduvai en Tanzanie. La quête de fossiles préhumains s'est alors déplacée de l'Afrique du Sud vers l'Afrique de l'Est. Ce changement s'est opéré non seulement parce qu'en Afrique de l'Est, le flux des découvertes a vite atteint le débit d'un torrent, mais aussi parce que la géologie y est favorable à la datation.

En Afrique australe, les découvertes de fossiles se font essentiellement au sein de grottes creusées par le ruissellement dans de la dolomite (un carbonate de calcium et de magnésium). Même si à l'occasion, les chercheurs trouvent des squelettes bien préservés, tels ceux de Malapa, la plupart des fossiles que l'on y découvre proviennent de restes de repas de léopards et d'autres prédateurs. Le ruissellement de l'eau finit par provoquer des éboulements, qui les introduisent dans les grottes. On les retrouve donc au sein de cônes d'éboulis, ces tas coniques de matière détritique, qui ne respectent pas l'ordonnancement chronologique habituel des strates (les plus anciennes en bas).

Outre cette complication, les chercheurs étaient jusqu'aux années 1960 dépourvus de toute méthode permettant de dater les sédiments de ces grottes. Très grossière, la datation reposait sur l'étude des paléofaunes. Le climat influence en effet la composition de la faune, laquelle se reflète dans les assemblages d'ossements retrouvés dans les sites fossilifères.

En Afrique de l'Est, la situation géologique est très différente. Tous les fossiles d'hominines y proviennent de sites proches de la vallée du rift oriental, qui court depuis la mer Rouge jusqu'aux rives du lac Malawi (lac longeant la Tanzanie

Australopithecus sediba, ancêtre ou cousin du genre humain ?

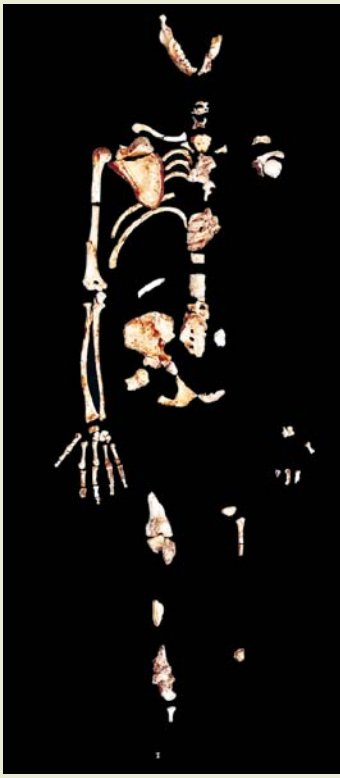
Les découvreurs des squelettes d'*Australopithecus sediba* dans la grotte de Malapa, en Afrique du Sud, pensent qu'il pourrait s'agir d'ancêtres du genre *Homo*. Dans le mélange inattendu de traits [illegible] *Au. sediba*, les traits humains vont dans le sens d'en faire un ancêtre, tandis que les traits simiesques tendent à en faire un cousin.

Ainsi, *Au. sediba* a de longs bras, manifestement faits pour grimper aux arbres, mais des mains aux longs pouces et aux doigts courts, qui semblent lui avoir conféré une bonne préhension, comparable à celle d'un humain moderne. Son corps était gracile comme celui d'un homme, ses jambes longues et sa cheville quasi humaine, bien que son talon soit simiesque.

La face aussi présente plusieurs traits humains : les dents sont fines, le nez proéminent et le front large et haut. En revanche, le cerveau, de 420 centimètres cubes, représente moins d'un tiers des 1 400 centimètres cubes du cerveau humain moderne et environ la moitié des 800 centimètres cubes de *Homo erectus*. Chose surprenante, même si le cerveau de *Au. sediba* est petit, son bassin est aussi large que celui d'un humain ; cela montre que, dans sa lignée au moins, ce n'est pas l'apparition d'un gros cerveau qui a conduit (pour faciliter l'accouchement) à un canal pelvien de grande taille.

Cette mosaïque de caractères anciens et modernes est si déconcertante que si les paléontologues n'avaient pas su que les divers os de *Au. sediba* ont été découverts en connexion, ils les auraient attribués à des espèces différentes… Ainsi, la signification de ces traits communs avec nombre de fossiles attribués au genre *Homo* n'est pas claire. Avant la découverte de *Au. sediba*, on pensait que c'était l'australopithèque *Au. afarensis* (l'espèce à laquelle appartenait Lucy) qui aurait évolué en *H. habilis*, lequel aurait donné notre ancêtre *H. ergaster*. Pour Lee Berger, découvreur de *Au. sediba*, l'australopithèque africain *Au. africanus*, plus gracile et considéré comme plus proche du genre *Homo* que *Au. afarensis*, serait l'ancêtre d'*Au. sediba*, lequel aurait conduit à *H. ergaster*.

Or, pour compliquer la situation, il existe un fossile attribué au genre *Homo* plus ancien que *Au. sediba*, mais il s'agit d'un maxillaire isolé… Un fossile aussi incomplet suffit-il à conclure ? En tout cas, si ce maxillaire est humain, l'ancêtre australopithèque du genre humain aurait vécu avant les spécimens de la grotte de Malapa, ce qui ne milite pas pour que *Au. sediba* soit notre ancêtre.



© Pour la Science - n° 445 - Novembre 2014

et le Mozambique, face au Malawi) et au-delà. Près de cette vallée créée par le lent écartèlement que subit l'Afrique se trouvent des volcans. On y découvre les fossiles au sein de sédiments déposés autour de lacs ou le long de rivières.

Un premier moyen de dater ces strates rocheuses s'appuie sur le fait qu'au moment où elles se sont formées, elles ont conservé l'orientation du champ magnétique terrestre. De plus, elles sont en général surmontées de strates de cendres issues des volcans du rift, dont les éruptions sont datables. Comme les cendres issues de la même éruption sont souvent répandues sur des centaines, voire des milliers, de kilomètres de distance, elles permettent aux géologues d'établir des liens chronologiques entre sites distants. Grâce à ces circonstances géologiques favorables, les chercheurs peuvent déterminer en Afrique de l'Est l'âge des strates indépendamment des fossiles qu'elles recèlent.

Les piles sédimentaires des gisements à hominines les plus riches d'Afrique de l'Est, tels ceux du bassin de l'Omo-Turkana ou encore de la vallée de l'Awash, couvrent souvent des millions d'années. Cette heureuse amplitude chronologique permet de placer chaque groupe de fossiles d'hominines entre une date où les formes correspondantes étaient certainement apparues et une date où elles avaient certainement déjà disparu.

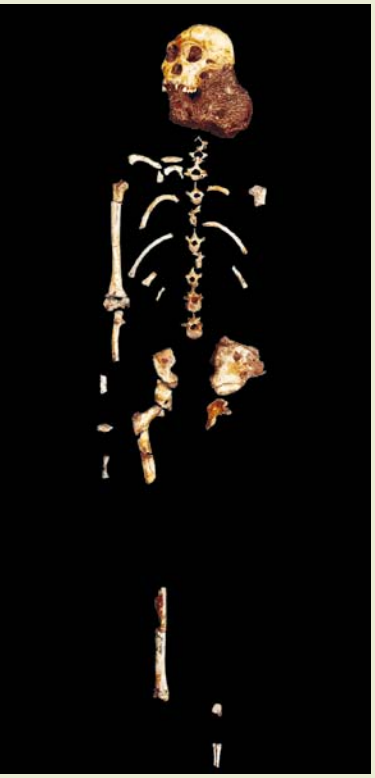
D'anciens métissages ?

Cette spécificité est-africaine a permis d'établir avec certitude que des espèces préhumaines et humaines ont, à plusieurs reprises, été contemporaines au cours de la période allant de quatre à un million d'années. Par exemple, pendant plus d'un million d'années, approximativement entre 2,3 et 1,4 millions d'années avant le présent, *Paranthropus boisei* et *Homo habilis* ont occupé la même région de l'Afrique orientale. Ils étaient si différents qu'il est à peu près impossible de confondre leurs crânes et leurs dents, même pour des fossiles très fragmentaires. Il est aussi clair que les hominines de l'Est sont différents de ceux du Sud, mais nous y reviendrons.

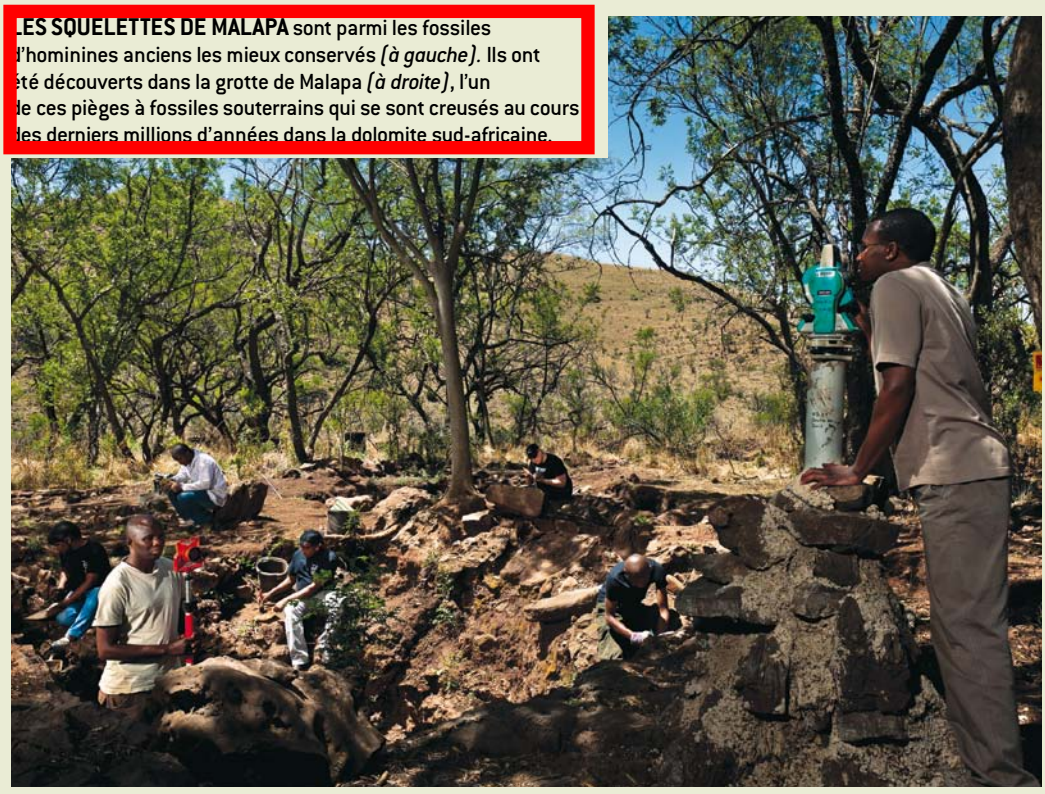
La découverte des fossiles de *P. boisei* et de *H. habilis* dans des strates proches est intéressante, non pas parce qu'elle rend envisageable leur cohabitation autour du même marigot, mais parce qu'elle implique que l'un au moins de ces deux hominines n'est pas notre ascendant direct. Nous savons aujourd'hui que les Néandertaliens et les hommes modernes se sont métissés. Peut-on s'attendre à la même chose dans le cas de l'australopithèque *P. boisei* et de l'homme habile (*H. habilis*) ? Leurs très grandes différences physiques suggèrent le contraire, et même à supposer ces deux espèces interfécondes, leur éventuel métissage n'a manifestement guère atténué ce qui les séparait.

En d'autre termes, l'idée d'un rameau formé d'une seule branche ne représente pas la situation phylogénétique des humains il y a quelques millions d'années. Le rameau humain d'alors avait plutôt l'apparence d'un faisceau de branchettes ; on pourrait même le comparer à un buisson *(voir la figure pages 30 et 31)*.

Dans le passé récent du genre *Homo*, plusieurs espèces ont aussi coexisté. *Homo neanderthalensis*, que l'on peut considérer comme déjà caractérisé il y a 250 000 ans, et qui a disparu il y a plus de 30 000 ans,



LES SQUELETTES DE MALAPA sont parmi les fossiles d'hominines anciens les mieux conservés *(à gauche)*. Ils ont été découverts dans la grotte de Malapa *(à droite)*, l'un de ces pièges à fossiles souterrains qui se sont creusés au cours des derniers millions d'années dans la dolomite sud-africaine.



est la première espèce humaine distincte de *Homo sapiens* à avoir été identifiée. C'était il y a plus de 150 ans, et au fil du temps, les chercheurs lui découvrent toujours plus de différences avec l'homme moderne. Depuis, nous savons aussi que *Homo erectus* a probablement vécu en Eurasie bien plus longtemps qu'on ne le pensait. En Indonésie, on a découvert récemment *Homo floresiensis*, probablement le quatrième hominine à avoir vécu sur notre planète au cours des 100 000 dernières années. Sans doute était-il confiné à l'île de Florès.

Un cinquième hominine révélé par une phalange

Un cinquième hominine, l'homme de Denisova, n'est connu que par une phalange datant de 40 000 ans… dont l'ADN qu'on a pu en extraire prouve le statut humain. Enfin, l'ADN des humains actuels a aussi livré des traces de métissage avec au moins une autre lignée humaine fantôme qui vivait encore il y a 100 000 ans. De toutes ces observations se dégage un fait certain : l'évolution de l'humanité a été bien plus buissonnante qu'on ne le pensait il y a seulement dix ans.

Ce fut une grande surprise, mais cela n'aurait pas dû être le cas, car le buissonnement évolutif semble plutôt avoir été la règle que l'exception au sein des groupes de mammifères dans le passé. Des voix critiques se sont cependant élevées. Elles accusent les paléoanthropologues d'avoir identifié à tort de nouvelles espèces humaines dans leurs données paléontologiques, soit par excès de zèle dû à la recherche de gloire, soit pour obtenir des financements pour leurs recherches.

Je ne partage pas du tout cette impression. Je pense au contraire que les nouvelles espèces décrites reflètent un phénomène évolutif réel.

Tout d'abord, le registre fossile est si lacunaire qu'il est logique de s'attendre à ce que l'on recense moins d'espèces que celles ayant réellement existé.

Ensuite, l'étude et la comparaison d'espèces vivantes proches l'une de l'autre nous apprennent que des espèces incontestablement différentes sont difficiles à distinguer à partir de leurs os et dents. Qui distingue par exemple au premier coup d'œil les différences séparant un squelette d'âne de celui d'un cheval de stature comparable ? Pourtant, les tissus mous de ces deux équidés sont très dissemblables.

En outre, on observe que la plupart des espèces de mammifères qui peuplaient la Terre il y a entre trois et un million d'années n'ont plus de descendants. Alors pourquoi serait-ce étonnant qu'il en soit de même chez les hominines ?

S'il est vrai qu'une grande diversité a existé chez les hominines du passé, alors il revient aux biologistes d'identifier les pressions sélectives qui l'ont produite. Les premières qui se présentent à l'esprit sont les pressions climatiques. Les climats régionaux et donc les habitats changent en effet au cours du temps : ils ont des tendances à long terme autour desquelles ils oscillent entre des extrêmes. Dans l'ensemble, au cours de la période qui va de quatre à un millions d'années, la tendance générale a été au refroidissement et à l'assèchement. Tout en suivant cette tendance, les climats africains ont aussi fluctué, à intervalles prévisibles, entre le chaud et humide et le froid et sec. Le type de posture, de régime alimentaire et de locomotion qui étaient bien adaptés à une époque pouvait ne plus l'être autant à une autre.

Une diversité ancienne

Une autre pression sélective qui a pu jouer un rôle pour favoriser la diversité des hominines était peut-être la compétition régnant entre eux ; si deux espèces d'hominines partageaient la même niche écologique, la pression qu'elles exerçaient l'une sur l'autre de par leur simple présence dans le même environnement a pu entraîner des réactions adaptatives, puis une évolution vers des stratégies de survie différentes. Nommé déplacement de caractère, ce phénomène tendant à accentuer les différences entre espèces pourrait expliquer comment *P. boisei* et *H. habilis* en sont venus à posséder des appareils masticatoires si différents. Tandis que celui du premier était adapté à la consommation de nourritures dures et fibreuses telles que les graminées, celui du second l'était à celle de fruits, plus mous mais plus difficiles à trouver.

Parce qu'ils impliquent des représentations du monde, des pratiques et des modes de vie différents, les fossés culturels séparant les groupes d'hominines distincts ont pu aussi s'opposer aux métissages nécessaires à la formation d'une seule espèce.

L'AUTEUR

Bernard WOOD a travaillé en Grande-Bretagne jusqu'en 1997. Depuis, il est professeur au Département d'anthropologie de l'Université George Washington, aux États-Unis.

BIBLIOGRAPHIE

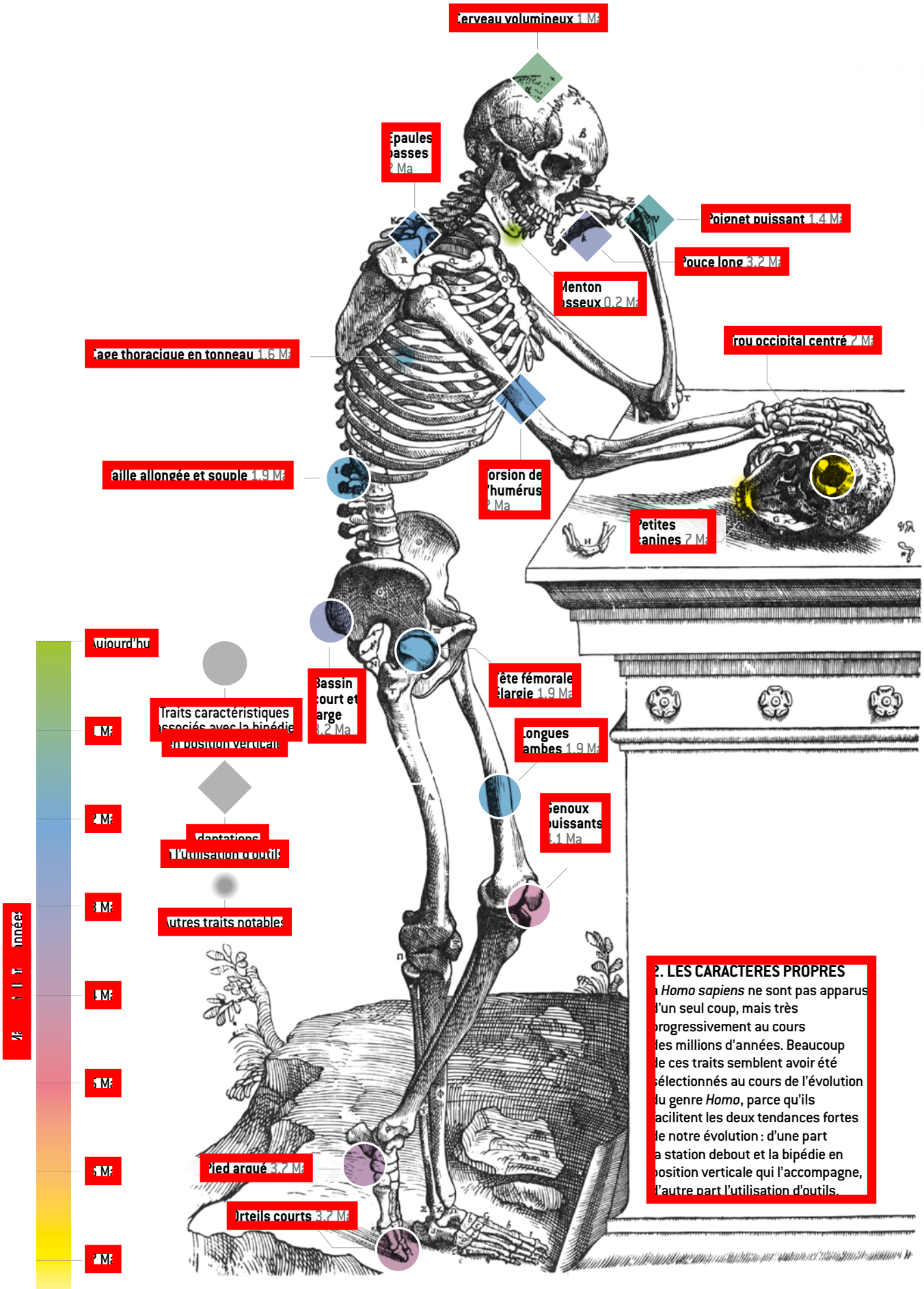
B. Wood, **Human evolution : fifty years after *Homo habilis***, *Nature*, vol. 508, pp. 31-33, 2014.

K. Wong, **Le premier de notre genre**, *Pour la Science*, n° 423, janvier 2013.

L'homme de Néandertal et l'invention de la culture, *Dossier Pour la Science*, n° 76, juillet-septembre 2012.

E. Callaway, **Fossils raise questions about human ancestry**, *Nature*, publié en ligne le 8 septembre 2011.

© Pour la Science - n° 445 - Novembre 2014



2. LES CARACTÈRES PROPRES

Homo sapiens ne sont pas apparus d'un seul coup, mais très progressivement au cours des millions d'années. Beaucoup de ces traits semblent avoir été sélectionnés au cours de l'évolution du genre *Homo*, parce qu'ils facilitent les deux tendances fortes de notre évolution : d'une part la station debout et la bipédie en position verticale qui l'accompagne, d'autre part l'utilisation d'outils.

Aujourd'hui, les chercheurs peuvent étudier les différences et ressemblances entre formes fossiles tant à l'échelle moléculaire qu'à l'échelle anatomique. Toutefois, s'agissant des premiers hominines, nous n'avons pas encore de données génétiques, de sorte que distinguer ascendants et cousins plus lointains reste difficile. La constatation que deux fossiles ont des mâchoires ou des dents de forme similaire ne suffit pas à prouver qu'ils partagent une histoire évolutive récente. De telles similarités peuvent en effet se produire lorsque des pressions sélectives comparables ont entraîné à des époques différentes des réactions adaptatives comparables, se traduisant par des solutions morphologiques similaires.

Convergences possibles

Pour illustrer cette idée de convergence, imaginons qu'il existe un type de hache aussi efficace dans l'abattage d'eucalyptus australiens que dans celui de sapins suédois. Si cet outil a jamais existé, le plus probable est qu'il aura été inventé deux fois – une fois par les aborigènes et une autre fois par les prédécesseurs des Vikings.

De même, un organisme ne peut répondre à une pression sélective que par un nombre fini de modifications morphologiques ou physiologiques, et il peut se produire que deux organismes différents mais assez proches s'adaptent à la même difficulté d'une façon similaire.

C'est pourquoi la découverte de traits communs dans les fossiles de deux espèces différentes n'implique pas forcément que ce sont des frères taxonomiques (la taxonomie est la science du regroupement des organismes en groupes partageant des caractères communs nommés taxons). Il peut s'agir aussi de parents proches mais différents, qui ont convergé vers des formes présentant la même adaptation à une certaine pression de sélection.

Comment évoluera la vision qu'a la science de l'évolution humaine ? Pour moi, il est clair que de nombreuses espèces d'hominines ont foulé la planète en même temps, et j'irais même plus loin : je suis prêt à parier que la diversité des hominines au cours des derniers quatre millions d'années, que l'on ne cesse de revoir à la hausse, existait déjà auparavant. En effet, les paléoanthropologues s'intéressent davantage aux hominines de moins de quatre millions d'années qu'aux plus anciens, ce qui introduit un biais dans les observations, étant donné les sites qu'ils explorent en priorité. On les comprend, tant la recherche de fossiles vieux de millions d'années est un travail ingrat. Parmi les mammifères, les hominines sont en outre les plus difficiles à trouver, de sorte qu'il faut trier beaucoup de fossiles de cochons et d'antilopes avant de découvrir un ossement d'hominine. Pour autant, si les paléoanthropologues essaient de mettre au jour des hominines plus anciens, ils en trouveront certainement.

LE CRANE est celui d'un jeune *Homo ergaster* mâle qui vécut il y a 1,6 million d'années près du lac Turkana, situé aujourd'hui au Nord du Kenya.

Une autre raison me pousse à prédire que nous découvrirons encore des espèces d'hominines anciens : le fait qu'il existe dans le registre fossile à peu près autant de lignées de mammifères avant trois millions d'années qu'après. Pour quelles raisons en irait-il autrement s'agissant des hominines ?

Enfin, on remarque que les zones où l'on a trouvé des fossiles d'hominines ne couvrent pour l'instant pas plus de trois pour cent de la surface de l'Afrique. Il est peu vraisemblable que des zones géographiques aussi limitées cachent toutes les espèces d'hominines ayant jamais vécu…

Une science de plus en plus difficile

Pour autant, toute découverte de plus de quatre millions d'années a toutes les chances de nous troubler encore plus. Plus on se rapprochera de la divergence entre la lignée humaine et celle des chimpanzés et bonobos, plus il sera difficile de distinguer un ancêtre direct de l'homme d'un cousin. Il sera aussi plus difficile d'établir qu'une nouvelle espèce est un hominine plutôt qu'un ancêtre des chimpanzés et des bonobos.

La paléoanthropologie est devenue plus difficile que jamais, et elle le sera encore plus à l'avenir, comme l'illustre bien le fait que, malgré l'intérêt porté par L. Berger à la question, je reste incapable de décider si les deux individus de Malapa font ou non partie des ancêtres directs du genre *Homo*.

© Pour la Science - n° 445 - Novembre 2014

FONDATION ÉCOLOGIE D'AVENIR

INSTITUT DE FRANCE

COLLOQUE

LES NOUVEAUX OGM

Sous la direction de **FRANCIS QUÉTIER**
(Professeur émérite Université Evry)

Informations, programme et inscription:
WWW.FONDATIONECOLOGIEDAVENIR.ORG

Jeudi 27 novembre 2014
15H-19H

LA MAISON DU BARREAU
4 RUE DE HARLAY - 75001 PARIS

Entrée gratuite - Réservation obligatoire - Places limitées

Kate Wong

Quand et comment nos ancêtres sont-ils devenus de redoutables chasseurs ? Des découvertes récentes éclairent cette question débattue depuis des décennies.

L. ***HOMO ERGASTER***, représenté ci par le garçon de Turkana, qui vivait au Kenya il y a 1,6 million d'années, était probablement un bon chasseur.

Quand l'homme est devenu PRÉDATEUR

Il y a quelque 279 000 ans, sur une rive surplombant un vaste lac dans la vallée du Rift, en Éthiopie, un groupe de chasseurs taillaient en pointe des morceaux d'obsidienne (une roche volcanique vitreuse) noir-verdâtre. Après avoir obtenu des arêtes tranchantes, ils attachaient chaque pointe à une hampe de bois pour fabriquer une sorte de javelot. Cette technique pourrait sembler rudimentaire comparée à celles d'aujourd'hui ; pourtant, elle était révolutionnaire. Elle a fourni aux membres de la lignée humaine une arme bien plus efficace qu'une lance tout en bois pour tuer à distance. Ils ont ainsi pu chasser une plus grande variété d'animaux, tout en évitant de trop s'approcher des grosses proies dangereuses, tels les hippopotames que le lac voisin abritait probablement.

Cette arme de jet à pointe de pierre était alors le chef-d'œuvre technologique de l'humanité. Sa conception, sa fabrication et son utilisation n'ont été possibles que grâce à l'acquisition progressive, sur des dizaines de milliers de générations, de caractéristiques qui ont permis à nos ancêtres de se procurer de la viande.

À l'ère des supermarchés et de la restauration rapide, il est facile d'oublier que nous autres humains sommes des chasseurs-nés. Cela peut sembler étonnant : nous sommes lents, faibles, et nous ne disposons ni des dents ni des griffes meurtrières des autres carnivores – des crocodiles aux guépards. Comparés à ces derniers, les humains apparaissent mal équipés pour capturer des proies. Nous sommes pourtant les prédateurs les plus redoutables, et nous l'étions déjà bien avant de fabriquer des véhicules pour traquer nos cibles et des fusils pour les tuer.

Au fil des millions d'années, l'évolution a transformé nos ancêtres essentiellement végétariens (tel le célèbre *Australopithecus afarensis* nommé Lucy) en primates meurtriers. Beaucoup de nos différences avec nos plus proches parents vivants, les grands singes, semblent résulter au moins en partie d'adaptations à la chasse. C'est par exemple le cas de notre capacité à courir sur de longues distances ou de notre cerveau développé. Des découvertes récentes ont éclairé certaines phases de cette transition ainsi que les débuts de la chasse au gros gibier. Aujourd'hui, les chercheurs comprennent mieux l'émergence des caractères qui ont aiguisé nos talents de chasseurs – et qui, ce faisant, nous ont rendus humains.

L'ESSENTIEL

- Des analyses récentes des évolutions anatomiques humaines, ainsi que des outils en pierre et des restes d'animaux, révèlent que nos ancêtres sont devenus chasseurs il y a au moins deux millions d'années, bien plus tôt qu'on ne le pensait auparavant.
- La chasse et le passage à un régime carnivore ont eu un impact profond sur l'évolution humaine : le cerveau a grossi, l'organisation sociale s'est modifiée et la capacité à se contrôler s'est accrue.
- C'est probablement en traquant du gibier que les premiers humains sont sortis d'Afrique.

Pour saisir l'importance du rôle de la chasse dans notre évolution, remontons quelque trois millions d'années en arrière. À l'époque, les hominines, c'est-à-dire les représentants de la lignée humaine depuis qu'elle a divergé de celle des chimpanzés, se sont retrouvés à la croisée des chemins. Le climat était en train de changer, et les régions boisées d'Afrique, où nos lointains ancêtres se nourrissaient depuis longtemps de fruits, de noix diverses et de feuilles tendres, laissaient la place à des milieux plus ouverts, où ce type de nourriture était rare. Une lignée, celle des australopithèques robustes, semble s'être adaptée en développant des mâchoires et des dents énormes, capables de broyer des herbes et d'autres plantes dures. La lignée qui comprenait notre genre, *Homo*, a suivi une voie différente, avec un régime alimentaire incorporant des quantités croissantes de protéines et de graisses animales. Ces deux approches ont assuré la survie de nos prédécesseurs pendant une longue période. Mais finalement, il y a environ un million d'années, les australopithèques robustes se sont éteints.

Les chercheurs ne comprendront sans doute jamais les raisons exactes de leur extinction. Peut-être étaient-ils devenus si spécialisés que lorsque les conditions environnementales ont encore changé, ou qu'un nouveau concurrent, peut-être du genre *Homo*, est arrivé, ils n'ont pas pu exploiter d'autres ressources alimentaires. Quoi qu'il en soit, en se tournant vers un régime carnivore, la lignée *Homo* a adopté une stratégie gagnante, qui a fini par assurer son emprise sur la planète.

Un corps taillé pour rattraper les proies...

Nos ancêtres hominines ont subi de nombreux changements anatomiques et physiologiques qui les ont aidés à concurrencer les félins à dents de sabre et d'autres grands carnivores, longtemps maîtres de la savane. Une série importante de caractéristiques a compensé notre manque de vitesse. Bien que nous soyons de piètres sprinteurs, avec notre mode de locomotion bipède, nous excellons à la course sur de longues distances. S'agissant d'endurance, aucun autre primate ne nous arrive à la cheville. Daniel Lieberman, de l'Université Harvard, et Dennis Bramble, de l'Université de l'Utah, estiment que cette endurance est une adaptation à la chasse. Elle aurait permis aux hominines de poursuivre leurs proies jusqu'à ce qu'elles ralentissent ou s'effondrent d'épuisement. À en juger par les témoignages fossiles – qui révèlent des articulations élargies aux membres postérieurs et des orteils courts, parmi de nombreuses autres caractéristiques utiles à la course –, cette aptitude s'est développée dans le genre *Homo* il y a environ deux millions d'années.

Des changements physiologiques ont accompagné ces modifications anatomiques. Plus actifs que leurs prédécesseurs, les hominines avaient besoin d'un moyen d'éviter une surchauffe de l'organisme. Selon Nina Jablonski, de l'Université d'État de Pennsylvanie, la perte de la fourrure et l'acquisition dans la peau de glandes sudoripares ont permis à nos ancêtres de limiter l'augmentation de la température corporelle au cours des poursuites. Avec ce système de refroidissement intégré, dont le développement aurait déjà été bien avancé à l'époque de *Homo ergaster* (il y a 1,6 million d'années), les humains excellent au marathon.

... et pour les tuer !

Rattraper la proie ne constituait que la moitié du travail : encore fallait-il pouvoir lui porter un coup mortel, de préférence avec un objet lourd ou pointu et en respectant une distance de sécurité. Les premiers représentants du genre *Homo* en étaient-ils capables ?

Les hommes modernes excellent dans l'art de lancer avec vitesse et précision. Par contraste, nos cousins chimpanzés obtiennent de piètres résultats. En 2013, Neil Roach, de l'Université George Washington, et ses collègues ont cherché à savoir pourquoi nous sommes bien meilleurs au lancer que les chimpanzés, et quand nous le sommes devenus. En étudiant des joueurs de baseball universitaires, ils ont montré que la clé de cette aptitude réside dans l'énergie élastique des muscles de nos épaules. Trois caractéristiques des hommes modernes, absentes chez les chimpanzés, augmentent notablement l'amplitude de certains mouvements réalisables par la partie supérieure de notre corps, et ainsi sa capacité à emmagasiner et à libérer cette énergie : une taille mobile, un humérus plus rectiligne et une articulation de l'épaule orientée vers le côté plutôt que vers le haut comme chez les grands singes. Selon Jean-Luc Voisin, de l'Institut de paléontologie humaine, à Paris, la morphologie du thorax est également bien adaptée au lancer chez l'homme.

L'AUTEUR

Kate WONG est rédactrice et chef de rubrique au magazine *Scientific American*.

Chasseurs ou charognards ?

De grands ensembles de restes d'animaux ont été découverts en Afrique de l'Est, parfois vieux de deux millions d'années. Trois indices suggèrent qu'il s'agit de proies chassées par des humains et non de charognes subtilisées aux autres prédateurs :

- **Une prépondérance d'individus dans la force de l'âge, alors que les lions tuent plutôt des individus âgés.**
- **Peu de traces de morsures de carnivores sur les os.**
- **La présence de petites carcasses, qui auraient été entièrement dévorées si les proies avaient été chassées par des lions.**

© Pour la Science - n° 445 - Novembre 2014

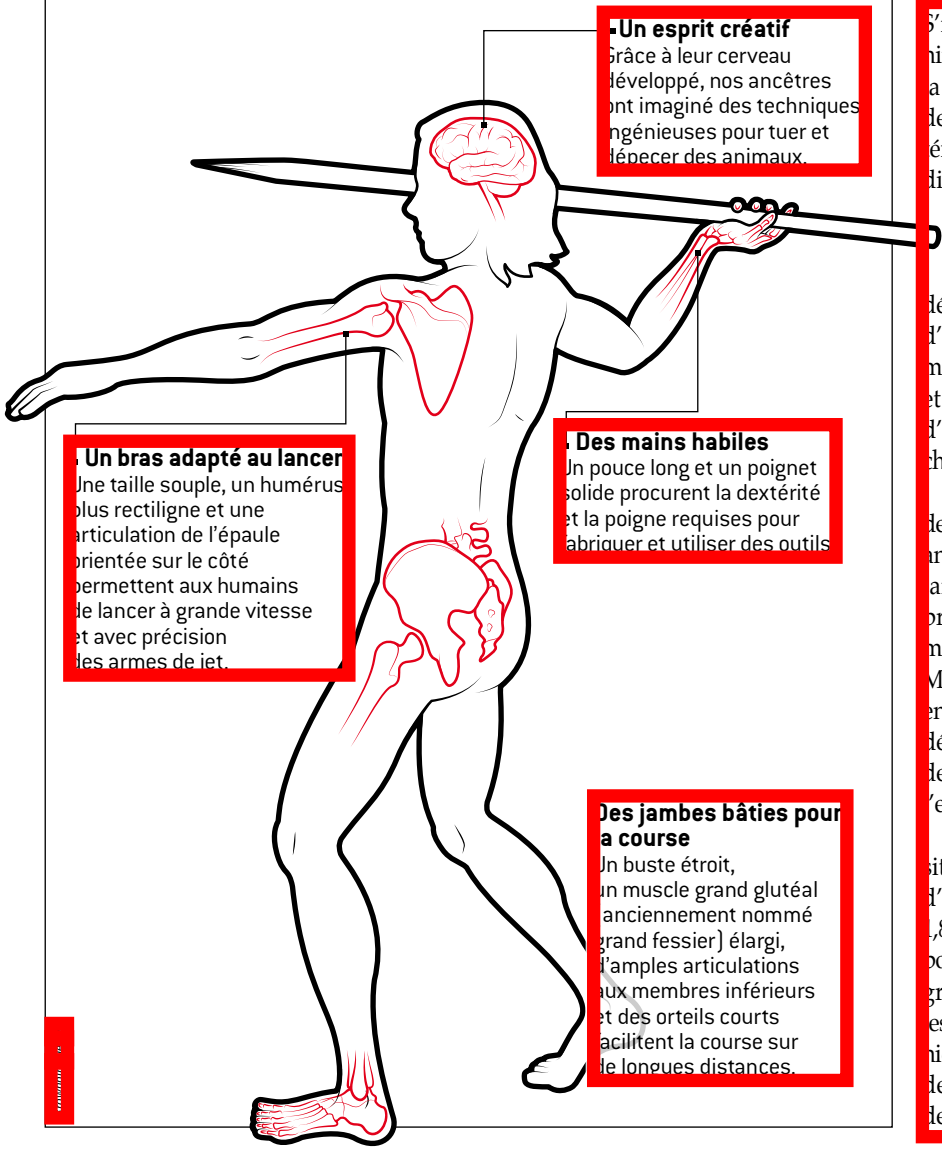
En analysant les enregistrements fossiles, l'équipe de N. Roach a reconstitué l'apparition des caractéristiques permettant de lancer un projectile à grande vitesse. La taille plus longue (le nombre de vertèbres lombaires est en moyenne de cinq chez l'homme contre trois chez les grands singes) et l'humérus moins tordu semblent s'être développés en premier, chez les australopithèques. Le changement d'orientation de l'épaule aurait débuté il y a quelque deux millions d'années, chez *Homo erectus*.

Il est difficile d'établir avec certitude que la sélection naturelle a entraîné l'émergence d'un trait en raison d'un avantage particulier qu'il procurait, par exemple pour la course d'endurance ou pour le lancer. Dans certains cas, la sélection a peut-être promu cette caractéristique pour une raison différente, et c'est seulement ensuite que le trait aurait servi à autre chose. Notre taille allongée, par exemple, semble d'abord avoir été l'une des adaptations qui ont facilité la marche bipède. Mais plus tard, avec d'autres traits complémentaires, elle a pris un nouveau rôle, aidant nos ancêtres à augmenter leur torsion afin de lancer un objet sur une cible avec plus de force.

Néanmoins, N. Roach estime que c'est bien l'avantage procuré pour le lancer qui a piloté l'évolution de l'épaule, il y a environ deux millions d'années. En effet, cette évolution désavantageait nos ancêtres pour une autre activité importante : grimper dans les arbres, où les hominines ont longtemps trouvé de la nourriture et un refuge contre les prédateurs vivant au sol. « Quand vous n'arrivez plus à grimper facilement dans les arbres, il vous faut trouver autre chose », remarque N. Roach. Dès lors, un bras plus efficace pour le lancer aurait facilité l'accès des hominines aux nourritures animales riches en calories, tout en leur permettant de repousser les prédateurs qui essayaient de les attaquer ou de voler leur gibier.

ANATOMIE D'UN CHASSEUR

Contrairement à la plupart des prédateurs, nous autres humains sommes lents, faibles et ne disposons pas de griffes ni de crocs meurtriers. Mais nos ancêtres ont développé une série d'autres caractéristiques, dont certaines sont représentées ci-dessous, qui font plus que compenser ces défauts.



Un esprit créatif
Grâce à leur cerveau développé, nos ancêtres ont imaginé des techniques ingénieuses pour tuer et dépecer des animaux.

Un bras adapté au lancer
Une taille souple, un humérus plus rectiligne et une articulation de l'épaule orientée sur le côté permettent aux humains de lancer à grande vitesse et avec précision des armes de jet.

Des mains habiles
Un pouce long et un poignet solide procurent la dextérité et la poigne requises pour fabriquer et utiliser des outils.

Des jambes bâties pour la course
Un buste étroit, un muscle grand glutéal (anciennement nommé grand fessier) élargi, d'amples articulations aux membres inférieurs et des orteils courts facilitent la course sur de longues distances.

Les plus anciennes traces de chasse

S'il y a deux millions d'années, les hominines avaient une anatomie bien adaptée à la chasse, cela ne prouve pas qu'ils tuaient des animaux pour se nourrir. Seuls des témoignages archéologiques de chasses, difficiles à établir, en apporteraient une preuve décisive. Des outils en pierre et des os entaillés montrent que les premiers humains ont commencé à dépecer des animaux il y a 2,6 millions d'années. Mais tuaient-ils les proies eux-mêmes, ou laissaient-ils les grands félins et les autres carnivores s'en charger ? En d'autres termes, étaient-ils chasseurs ou charognards ?

Cette question divise les experts depuis des décennies. Jusqu'à récemment, les plus anciennes traces de chasse connues – des lances en bois et des restes d'animaux provenant du site de Schöningen, en Allemagne – ne remontaient qu'à 400 000 ans. Mais ces dernières années, l'étude de grands ensembles de restes d'animaux dépecés, découverts en Afrique de l'Est et datant de l'époque des premiers *Homo*, a révélé l'existence de chasses bien plus anciennes.

L'un de ces ensembles provient d'un site nommé FLK-Zinj, situé dans la gorge d'Olduvai, en Tanzanie. Il y a quelque 1,8 million d'années, des hominines y transportaient des carcasses de gnous et d'autres grands mammifères pour les découper et les manger. La paléoanthropologue britannique Mary Leakey a mis au jour la plupart des ossements dans les années 1960 et, depuis, le débat se poursuit : s'agissait-il

2. LES PLUS ANCIENNES PREUVES
de la pratique de la chasse par les humains sont des outils de découpe en pierre vieux de deux millions d'années *(a)* et des os entaillés *(b)* provenant du site de Kanjera South, au Kenya. Au fil du temps, nos ancêtres ont inventé des armes plus meurtrières, telles les lances à pointes de pierre de Kathu Pan, vieilles de 500 000 ans et reconstruites ici *(c)*, et les pointes de flèches de Pinnacle Point, datées de 71 000 ans *(d)*. Ces deux derniers sites se trouvent en Afrique du Sud.

d'animaux chassés ou de charognes récupérées ? Henry Bunn, de l'Université du Wisconsin à Madison, a suggéré que ces deux tactiques laissaient des signatures différentes dans ce qu'on nomme le profil de mortalité des ossements. Par exemple, quand des lions chassent de grands mammifères, tel le cob à croissant (une antilope africaine), ils s'attaquent surtout aux individus âgés. Ainsi, si les premiers humains récupéraient le gibier tué par les lions à FKL-Zinj, les cobs âgés devraient être surreprésentés dans les restes découverts. Or H. Bunn et ses collègues ont montré que les carcasses les plus nombreuses étaient celles d'individus dans la force de l'âge, et non celles d'animaux jeunes ou âgés. C'est ce qu'on s'attend à trouver quand les humains chassent eux-mêmes.

En fait, le profil de mortalité de FLK-Zinj ressemble beaucoup à celui des animaux traqués aujourd'hui par les chasseurs-cueilleurs Hadza, en Tanzanie, et par les San, au Botswana, qui utilisent des arcs et des flèches. De telles armes à longue portée ne semblaient pas exister à l'époque, mais H. Bunn pense que les hominines se plaçaient en embuscade dans des arbres situés à proximité des points d'eau ; de là, ils visaient avec des lances pointues en bois les animaux qui passaient au-dessous d'eux pour aller se désaltérer.

Des traces de chasse encore plus anciennes proviennent d'un site de l'Ouest du Kenya, nommé Kanjera South, sur les rives du lac Victoria. Joseph Ferraro, de l'Université Baylor, au Texas, Thomas Plummer, du *Queens College*, à New York, et leurs collègues y ont découvert des milliers d'outils en pierre et d'os dépouillés de leur chair et de leur moelle. La plupart de ces os, qui remontent à environ deux millions d'années, appartenaient à de petites et jeunes antilopes. Ils présentent peu de dégâts typiques des morsures de carnivores, ce qui conforte l'hypothèse selon laquelle les hominines chassaient les proies, plutôt que charogner. En outre, observe T. Plummer, la petite taille de ces antilopes implique que, si des grands carnivores les avaient tuées, ils auraient complètement consommé les carcasses, sans laisser le moindre tissu derrière eux.

Les restes de Kanjera constituent « les plus anciennes preuves solides de la pratique de la chasse », selon T. Plummer. Et cette activité n'était pas exceptionnelle. Les ossements proviennent de couches sédimentaires correspondant à des centaines, voire des milliers d'années, ce qui a conduit les chercheurs à parler d'état carnivore persistant des hominines. Ces individus s'étaient engagés dans une consommation routinière de quantités substantielles de viande. Ce n'était pas leur seule nourriture – l'analyse des outils retrouvés sur le site indique qu'ils préparaient aussi des plantes, notamment des tubercules –, mais la viande constituait l'un des piliers de leur régime alimentaire.

Le basculement de nos ancêtres vers une alimentation carnée a eu un impact considérable. Les vestiges fossiles et archéologiques indiquent que ce changement a créé une boucle de rétroaction : la consommation d'aliments caloriques a favorisé la croissance du cerveau, ce qui a conduit à l'invention de nouvelles techniques grâce auxquelles nos ancêtres ont obtenu encore plus de viande (ainsi que des aliments végétaux de qualité), d'où une nouvelle expansion de la matière grise. Par conséquent, depuis 2 millions d'années et jusqu'il y a 200 000 ans, la taille du cerveau a notablement augmenté, passant d'environ 600 centimètres cubes en moyenne chez les premiers représentants du genre *Homo* à quelque 1 300 centimètres cubes chez *Homo sapiens*.

Une étape clé de l'évolution humaine

Le passage à un régime carnivore a aussi dû transformer l'organisation sociale de nos ancêtres, en particulier quand ils se sont mis à chasser des proies plus grandes, que l'on pouvait partager avec d'autres membres du groupe. Travis Pickering, de l'Université du Wisconsin à Madison, explique que ce développement a conduit à une organisation sociale plus élaborée chez les hominines, notamment une division du travail : les hommes chassaient du gros gibier tandis que les femmes ramassaient des plantes, et les deux groupes se retrouvaient à la

© Pour la Science - n° 445 - Novembre 2014

in de la journée en un lieu central pour manger. Cette organisation aurait déjà été en place à l'époque de FLK-Zinj. Même si ce partage des responsabilités entre les sexes peut paraître archaïque aujourd'hui, il s'est révélé remarquablement efficace.

En passant à un régime carné, nos ancêtres auraient en outre appris à mieux se contrôler. On pense souvent que la chasse a favorisé l'agressivité chez les humains – une idée fondée sur l'agressivité manifestée par les chimpanzés communs *(Pan troglodytes)* lorsqu'ils chassent ; mais pour T. Pickering, elle aurait au contraire développé la pondération. À l'inverse des chimpanzés, qui ont une grande force et des dents meurtrières, les premiers hommes ne pouvaient pas maîtriser leurs proies en se contentant d'être agressifs. Ils auraient alors gagné en contrôle émotionnel et chassé avec leur tête plutôt qu'avec leurs muscles. Selon T. Pickering, le développement d'armes permettant de tuer à distance a aidé les hominines à découpler la chasse et les émotions agressives.

Les travaux de la primatologue Jill Pruetz, de l'Université d'État de l'Iowa, soutiennent cette hypothèse. Elle a étudié une population inhabituelle de chimpanzés vivant dans les prairies du Sénégal. Contrairement à leurs congénères forestiers, qui chassent des singes de grande taille à mains nues, les chimpanzés sénégalais ciblent surtout de minuscules primates nocturnes, nommés galagos, et utilisent des bâtons pointus, qu'ils plantent dans les creux d'arbres où

EN VIDEO

Pourquoi les humains sont de meilleurs lanceurs que les chimpanzés : http://bit.ly/1dLdUbr

BIBLIOGRAPHIE

H. T. Bunn et A. N. Gurtov, **Prey mortality profiles indicate that early Pleistocene *Homo* at Olduvai was an ambush predator,** *Quaternary International*, vols. 322-323, pp. 44-53, 2014.

N. T. Roach *et al.*, **Elastic Energy Storage in the shoulder and the evolution of high-speed throwing in *Homo*,** *Nature*, vol. 498, pp. 483-487, 2013.

J. V. Ferraro *et al.*, **Earliest archaeological evidence of persistent hominin carnivory,** *PLoS One*, vol. 8(4), e62174, 2013.

W. Leonard, **Ressources alimentaires et évolution,** *Pour la Science*, n° 304, février 2003.

dorment leurs proies pendant la journée. Or les chimpanzés sénégalais chassent bien plus calmement que ceux des forêts – qui rouent frénétiquement leurs proies de coups –, peut-être parce que leurs « lances » leur permettent de garder leur sang-froid.

La chasse aurait aussi contribué à un autre aspect spécifique de l'humanité. *Homo sapiens* est le seul primate qui a colonisé tout le globe. Pendant les cinq premiers millions d'années de notre lignée, les hominines sont restés en Afrique. Puis, il y a environ deux millions d'années, *Homo* a commencé à en sortir. Pourquoi ce désir soudain de voyager ? Les théories sont nombreuses, mais c'est peut-être la chasse qui les a entraînés hors de leur terre natale. À cette époque, une grande partie de l'Eurasie était recouverte des mêmes types de prairies que celles où *Homo* trouvait sa nourriture en Afrique. Ainsi, les hominines étaient peut-être en train de poursuivre du gibier quand ils ont fait leurs premiers pas hors d'Afrique.

Bien d'autres migrations ont suivi au cours des millénaires ultérieurs, chacune provoquée par des circonstances particulières. Nos ancêtres ne traquaient sans doute pas toujours du gibier lors de ces voyages pionniers. Cependant, leur capacité à coloniser des contrées éloignées et à prospérer dans de nouveaux environnements se fondait sur les mêmes caractéristiques physiques et comportementales qui leur ont permis de devenir les plus redoutables prédateurs que le monde ait connus. ■

Le CLIMAT moteur d'évolution

Peter deMenocca

Ces derniers millions d'années, l'Afrique de l'Est a connu plusieurs changements climatiques. La végétation s'est modifiée et, dans la lignée humaine, seules ont survécu les espèces ayant une certaine capacité d'adaptation.

J'ai escaladé le versant abrupt d'une colline près de la rive ouest du lac Turkana. Du haut de ce monticule, on profite d'une vue imprenable sur cette région du Nord du Kenya : le lac et ses reflets émeraude contrastent avec le désert ocre et aride qui l'entoure *(voir la figure 1)*. Niché au sein du grand Rift est-africain, ce lac est alimenté par la rivière Omo, au tracé sinueux. Cette dernière transporte les eaux de pluie qui s'écoulent des hauts plateaux éthiopiens, à des centaines de kilomètres au Nord, pendant la mousson estivale.

Dans la région du lac Turkana, la chaleur ne vous laisse aucun répit. À midi, on se sent comme dans un haut-fourneau. Le soleil brille intensément et le sol rocailleux est brûlant. En scrutant l'horizon poussiéreux, avec le lac scintillant au loin, il est difficile d'imaginer que cet endroit n'a pas toujours été un désert. Pourtant, les preuves de périodes bien plus humides sont partout. La petite colline que je foule est un ensemble épais de sédiments issus d'un ancien lac datant de 3,6 millions d'années. À l'époque, le lac Turkana était plus étendu et remplissait l'ensemble du bassin. On retrouve dans le sable des restes de fossiles d'algues et de poissons. Durant certaines périodes, ce désert rocailleux était couvert de végétation, d'arbres et de lacs.

De plus en plus de paléoanthropologues pensent que les changements climatiques dans cette région ont joué un rôle important dans l'évolution humaine. Elle contient, avec d'autres sites de l'Afrique de l'Est et du Sud, la plus grande partie du registre fossile des premiers hommes et de leurs ancêtres depuis leur séparation de la lignée des singes il y a sept millions d'années.

L'ESSENTIEL

- Le changement climatique serait un facteur important dans l'évolution humaine.
- Les scientifiques ont reconstitué l'évolution du climat à partir d'indices trouvés dans les sédiments et des dents fossilisées.
- La disparition de certains ancêtres de l'homme coïncide avec des transitions vers des climats plus arides en Afrique de l'Est.
- Le changement de climat et de végétation a favorisé les espèces qui, telles celles du genre *Homo*, avaient une alimentation variée.

1. LE LAC TURKANA, AU KENYA, est situé dans la Vallée du Rift, une région riche en fossiles humains et préhumains. La région a connu une alternance de périodes sèches et humides.

2. CETTE TEMPETE DE SABLE transporte des poussières du continent africain vers la mer Rouge. Ces particules se déposent au fond de l'eau et forment des sédiments. Si les dépôts sont nombreux, cela indique un climat plutôt sec dans l'Est de l'Afrique. Les géologues analysent ces sédiments pour reconstruire les cycles secs et humides du climat est-africain.

De plus, deux changements majeurs dans le climat africain, espacés d'environ un million d'années, coïncident avec deux événements importants dans l'arbre de l'évolution humaine. Le premier choc évolutif a eu lieu il y a entre 2,9 et 2,4 millions d'années. « Lucy » et son espèce *(Australopithecus afarensis)* se sont éteintes, laissant la place à deux groupes assez différents. L'un correspond aux premiers membres du genre *Homo*. Ils présentaient les premiers traits modernes, y compris des cerveaux volumineux. Ces individus ont fabriqué les premiers outils. L'autre groupe qui a émergé à cette époque, connu sous le nom de *Paranthropus* ou *Australopithecus robustus*, était physiquement différent, avec une carrure solide et des mâchoires puissantes *(voir la figure 3)*. Mais cette lignée a fini par disparaître.

Le second choc s'est produit il y a entre 1,9 et 1,6 million d'années. Une espèce plus carnivore, donc au cerveau encore plus développé, *Homo erectus* (aussi nommée *Homo ergaster* lorsqu'on parle spécifiquement des fossiles africains), est apparue. Son squelette plus long et plus souple est difficile à distinguer de celui des humains modernes. Cette espèce a été aussi la première à quitter l'Afrique pour peupler l'Asie du Sud-Est et l'Europe. La fabrication d'outil en pierre a connu une amélioration majeure : les premières haches sont apparues, avec de grandes lames façonnées avec soin sur les deux côtés.

Quels facteurs ont pu déclencher ces jalons évolutifs, précurseurs de l'homme moderne ? Des chercheurs pensent que deux épisodes de changement climatique pourraient en avoir été la cause. Ces deux secousses écologiques, venues après de longues périodes de changement extrêmement graduel, ont transformé le berceau de l'humanité en prairies de plus en plus arides. Outre ces changements importants et ponctuels, le climat a connu des variations cycliques de plusieurs milliers d'années, oscillant entre des épisodes secs et humides. Les ancêtres de l'homme ont donc dû s'adapter à des changements rapides de la végétation et des ressources disponibles.

La disparition d'aliments favoris conduit à l'adaptation, l'extinction ou l'évolution d'une espèce.

Les chercheurs ont établi comment et pourquoi le climat africain et la végétation ont changé durant ces périodes à partir d'un ensemble de nouvelles observations. Ils sont aujourd'hui capables d'extraire et d'analyser les restes moléculaires d'anciens végétaux africains trouvés dans des sédiments. La composition chimique des dents qui appartenaient aux ancêtres de l'homme révèle ce qu'ils mangeaient, en particulier quand la végétation a changé. Les paléoanthropologues ont remarqué que les espèces qui avaient prospéré étaient celles ayant un régime varié. Cette importance de la flexibilité face aux variations de l'environnement semble récurrente dans l'histoire évolutive humaine. Rick Potts, paléoanthropologue à l'Institut Smithsonian, parle de « sélection par la variabilité ».

La vie façonnée par le climat

Les théories associant les variations climatiques et l'évolution remontent à Charles Darwin (1809-1882). Il postulait que des grands changements du climat modifient de façon importante la végétation – et donc l'alimentation –, les abris et les différentes ressources disponibles dans une région. La disparition d'un aliment favori ou le remplacement d'une longue saison humide par une saison sèche créent une pression qui conduit les espèces à s'adapter, disparaître ou évoluer. L'environnement, déterminé par le climat, favorise les espèces dotées de certains traits. Avec le temps, ces organismes et leur héritage génétique deviennent dominants parce qu'ils survivent en plus grand nombre au changement.

Le processus n'est pas toujours subtil ou doux. Chacun des grands épisodes d'extinctions massives d'espèces des derniers 540 millions d'années a été accompagné de perturbations environnementales. À chaque fois, entre 50 et 90 % des espèces ont péri, et de nouvelles espèces très différentes ont émergé et proliféré. Par exemple, les mammifères ont bénéficié de la collision d'une météorite de la taille de Paris dans l'actuelle péninsule du Yucatán au Mexique, il y a environ 66 millions d'années. Cette collision a entraîné la disparition des dinosaures et de nombreuses autres espèces, conduisant au développement rapide des mammifères et à leur diversification.

© Pour la Science - n° 445 - Novembre 2014

Un groupe de ces mammifères a donné, après une longue évolution, l'homme moderne. Pour cette lignée, les chercheurs ont imaginé plusieurs scénarios incluant le rôle de l'environnement dans son évolution. Par exemple, dans la version la plus simple de la « théorie de la savane », les ancêtres de l'homme, avec leur bipédie naissante, leur gros cerveau et leur capacité à fabriquer des outils, auraient été mieux armés pour affronter les savanes herbeuses en pleine expansion où la compétition pour les ressources était féroce. Ils auraient distancé leurs contemporains qui vivaient dans les arbres, les forêts étant en déclin.

Cette vision, que l'on retrouve encore aujourd'hui dans les manuels scolaires, n'est pas correcte. Il n'y a pas eu une migration unique d'habitat de la forêt vers les prairies, mais plutôt une succession de cycles de périodes humides et sèches et des transitions marquées vers des conditions plus sèches. Aussi, nous n'avons pas acquis les caractéristiques humaines en une seule étape, mais plutôt en une série de poussées concentrées aux moments où l'environnement changeait.

Les traces de ces changements de paysage et de leur impact sur l'évolution se retrouvent dans les sédiments aussi bien

3. *PARANTHROPUS BOISEI* *(en bas)* **et** ***Homo ergaster*** *(en haut)* **vivaient dans les savanes d'Afrique de l'Est. Le premier se nourrissait exclusivement de certaines herbes tandis que le second avait une alimentation variée. Ainsi, lors de changements du climat et de la flore, le premier n'a pas pu s'adapter et son espèce a disparu.**

terrestres que marins. Les sédiments du sol africain sont souvent difficiles à analyser à cause de l'érosion et d'autres altérations géologiques. En revanche, au fond des océans, les sédiments reposent intacts. En forant dans le sol océanique proche des côtes africaines, les géologues ont prélevé des carottes de sédiments, témoins des conditions environnementales en Afrique de l'Est sur une période de plusieurs millions d'années. En 1987, j'ai participé à une telle campagne de relevés d'échantillons. Nous étions une équipe de 27 scientifiques à bord d'un navire de recherche spécialement dédié au forage en mer.

Lorsque le responsable du forage criait « carotte sur le pont », nous nous équipions de nos casques de chantier et quittions, à regret, les laboratoires climatisés du bateau pour monter sous un soleil brûlant récupérer une par une des carottes de dix mètres de long prélevées au fond de la mer Rouge. À cet endroit, le fond est à environ 2000 mètres. Et depuis la séparation des lignées des grands singes et de l'homme, il y a plus de sept millions d'années, le sol océanique a accumulé près de 300 mètres de boue

dans les abysses sombres et tranquilles, à un rythme d'environ quatre centimètres tous les 1 000 ans.

Les sédiments à cet endroit sont un mélange de carbonate de calcium de couleur claire, provenant de coquilles fossilisées de plancton, et de grains limoneux plus foncés apportés des terres africaines et de la péninsule Arabique par les vents de mousson *(voir la figure 2)*. Les carottes présentent des strates aux couleurs et à l'aspect variés. Lorsque le mélange est plus foncé et granuleux, cela indique que le climat africain était sec et poussiéreux. Lorsqu'il est clair, cela reflète des conditions plus humides, peu de poussière étant emportée par le vent.

En observant la carotte de sédiments sur une table du laboratoire du bateau, nous pouvions voir que les couches foncées et claires se répétaient avec une certaine régularité tous les mètres environ, soit tous les 23 000 ans. Ces relevés ont mis en évidence que le climat africain avait présenté une alternance régulière de conditions humides et sèches. Il était clair que le scénario d'une transition unique de la forêt vers la savane ne correspondait pas à ces données. Les ancêtres de l'homme avaient dû faire face à des changements climatiques réguliers.

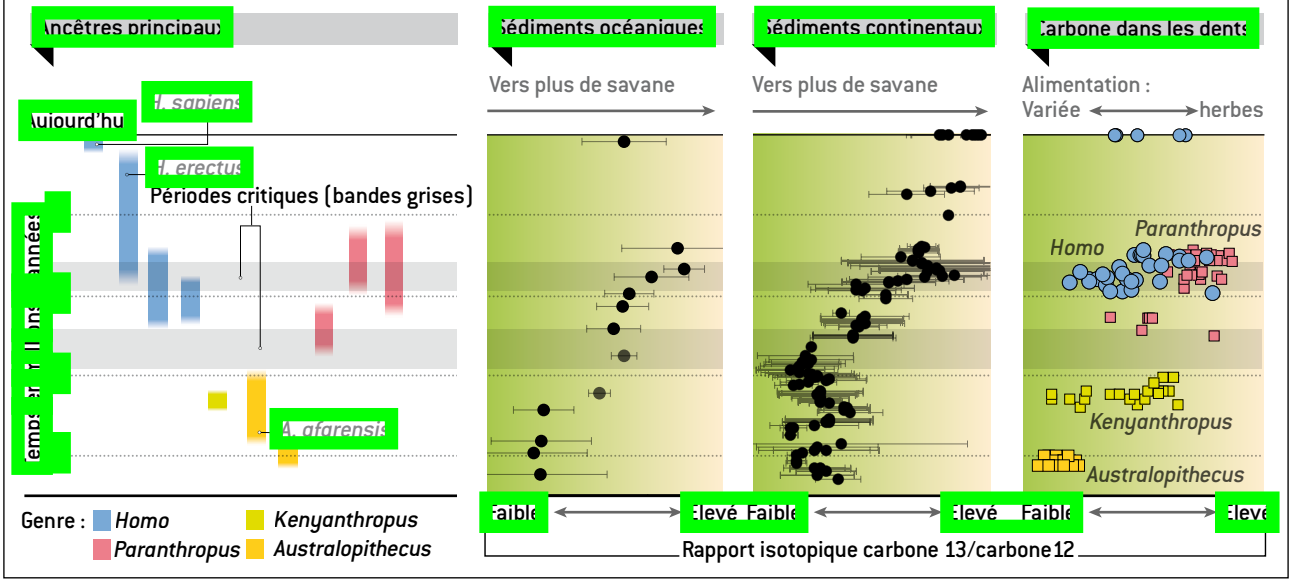
Quelle est l'origine de ce cycle d'environ 23 000 ans ? Cette périodicité reflète la sensibilité connue de la mousson africaine et asiatique à la précession des équinoxes terrestres. L'axe de rotation de la Terre ne pointe pas toujours dans la même direction : cette direction décrit au cours du temps un cône avec une période qui est aujourd'hui de 25 800 ans, mais cette valeur n'est pas constante). La précession est due au couple exercé par les forces de marée du Soleil et de la Lune sur le renflement équatorial de la Terre. Du fait de cette variation dans l'inclinaison de la Terre, le Nord de l'Afrique et l'Asie du Sud reçoivent plus ou moins de chaleur au cours de l'été, ce qui augmente ou diminue l'intensité de la mousson et de ses précipitations. Pendant ce cycle de 23 000 ans, les régions touchées par la mousson sont alors alternativement plus humides ou plus sèches.

Ainsi, il faut imaginer qu'à certaines époques humides, le Sahara était une région verte occupée par de nombreux animaux – éléphants, hippopotames, girafes, crocodiles – et par des chasseurs de gazelles. L'art rupestre d'il y a entre 5 000 et 10 000 ans témoigne de cet environnement riche en eau qui est aujourd'hui recouvert de dunes de sable. Le Nil était bien plus important qu'aujourd'hui et déversait dans la mer Méditerranée des sédiments noirs riches en matière organique, nommés sapropels. On retrouve sur le fond marin méditerranéen l'alternance de couches blanches accumulées durant les périodes sèches et de couches sombres de sapropels, qui racontent la même histoire du climat africain que les couches de poussière de la mer Rouge.

En plus de ces cycles réguliers alternant des périodes sèches et humides, on observe des transitions plus marquées vers des climats secs. Ces épisodes ont modifié radicalement la végétation en remplaçant la forêt par la savane. Il y a huit millions d'années, l'Afrique de l'Est ne présentait que quelques parcelles de prairies. Cinq millions d'années plus tard, le paysage était dominé par de vastes savanes permanentes, telles la plaine du Serengeti en Tanzanie.

LES CONSÉQUENCES D'UN CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA LIGNÉE HUMAINE

Deux étapes dans la lignée humaine semblent coïncider avec des changements climatiques en Afrique de l'Est. Il y a trois millions d'années, l'espèce *Australopithecus afarensis* s'est éteinte. Deux groupes, *Paranthropus* et *Homo*, sont apparus. Durant cette période de transition, le rapport isotopique du carbone dans les sédiments continentaux et marins suggère que la végétation est-africaine a évolué d'un environnement boisé et humide vers celui de savanes sèches. Il y a deux millions d'années, un proche parent de l'homme moderne, *Homo erectus*, quitte en partie l'Afrique. L'étude du carbone montre qu'à cette époque, un deuxième changement climatique a accentué la domination de la savane. L'analyse isotopique des dents de *H. erectus* suggère que son alimentation variée lui a permis de s'adapter à ce nouveau changement climatique. En revanche, *Paranthropus*, dont le régime alimentaire était plus spécialisé, n'a pu survivre au changement des milieux.



© Pour la Science - n° 445 - Novembre 2014

Ce changement radical n'a pas été sans impact sur l'évolution de l'homme : Lucy et ses semblables ont disparu. Son espèce, *Au. afarensis*, est apparue il y a 3,9 millions d'années en Afrique de l'Est et y a vécu 900 000 ans avant de s'éteindre. Elle a laissé la place aux genres *Paranthropus* et *Homo*, qui a fait son apparition quelques centaines de milliers d'années après *Paranthropus*.

Et Lucy s'est éteinte

Une étude détaillée de la végétation de cette époque et de l'alimentation des uns et des autres a permis de constater que les changements chez les ancêtres de l'homme ont coïncidé avec les changements climatiques. Lucy n'aurait pas su s'adapter au changement de végétation qui a accompagné les modifications climatiques. Il en aurait été de même un peu plus tard pour *Paranthropus*, lors d'un deuxième changement important, qui a donné lieu à des savanes encore plus sèches.

Les savanes sont des écosystèmes tropicaux dominés par des plantes herbacées et parsemés d'arbres et d'arbustes contenant de la lignine. Les herbes de savane se développent dans les régions chaudes et sèches car, pour absorber le carbone de l'atmosphère, elles utilisent un type de photosynthèse spécifique dit en C4. Dans ce processus, la perte d'eau par évaporation est limitée, ce qui est un avantage dans un milieu sec. Ces plantes exploitent aussi mieux le dioxyde de carbone que celles utilisant un autre type de photosynthèse, dit en C3, ce qui est le cas des plantes ligneuses telles que les arbres et certaines herbes. Comme le processus en C3 utilise aussi plus d'eau, les plantes en C3 sont mieux adaptées aux environnements humides que les plantes en C4.

Thure Cerling et ses collègues, à l'Université de l'Utah, ont développé une manière de reconstruire l'histoire de la végétation des anciens paysages grâce à des proportions isotopiques qui diffèrent selon le type de photosynthèse utilisé par les plantes. Le carbone dans la nature est principalement à l'état de carbone 12, mais il est présent en petite quantité sous forme de carbone 13 (le noyau de carbone présente un neutron supplémentaire par rapport au carbone 12). Les herbes en C4 absorbent plus de carbone 13 que les arbustes et les plantes ligneuses en C3. Par conséquent, ces dernières ont un rapport de carbone 13 sur carbone 12 plus bas. Les chercheurs ont découvert que l'analyse des échantillons de sol d'un environnement donné et la mesure du rapport isotopique carbone 13/carbone 12 fournissent une estimation précise de la part d'herbe par rapport aux plantes ligneuses présentes dans la région.

En utilisant cette approche dans les sédiments est-africains issus de sites où l'on avait trouvé de nombreux fossiles d'hominines, les chercheurs ont appris que, il y a plus de huit millions d'années, les paysages étaient essentiellement constitués de forêts et d'arbustes en C3. Ensuite, la proportion de plantes ligneuses en C4 a augmenté graduellement. Puis un changement relativement important et rapide s'est produit il y a entre trois et deux millions d'années.

Au cours de cette transition, les savanes se sont étendues rapidement à travers le Kenya, l'Éthiopie, et la Tanzanie d'aujourd'hui. Cette extension a été accompagnée d'une augmentation des populations de mammifères herbivores ; le nombre abondant de fossiles retrouvés dans les roches de cette époque le confirme. Vers deux millions d'années, les antilopes africaines semblent avoir subi, comme nos ancêtres, diverses spéciations, extinctions et adaptations – la forme des cornes diffère selon les espèces et permet de suivre la dynamique des différentes populations.

Les bovins, la famille à laquelle appartiennent ces ongulés, représentent près d'un tiers de tous les fossiles africains mis au jour. Ils fournissent une collection bien plus riche que les fossiles de nos ancêtres, beaucoup plus rares. La paléontologue Elisabeth Vrba, de l'Université Yale, a conduit une analyse dans toute l'Afrique sur l'évolution des bovins durant les six derniers millions d'années. Elle a identifié des époques spécifiques durant lesquelles les taux de spéciation et d'extinction des bovins étaient supérieurs à la moyenne sur l'ensemble de la période. Les deux événements les plus importants se sont produits il y a près de 2,8 et 1,8 millions d'années, soit aux époques d'extension des prairies observées par les géologues.

La coïncidence ne serait cependant pas aussi marquée, selon René Bobe, de l'Université George Washington et Anna Behrensmeyer, de l'Institut Smithsonian. En analysant près de 8 000 fossiles de bovins d'Afrique de l'Est, ils ont montré que nombre d'espèces ont développé des molaires spécialisées pour mâcher l'herbe abrasive de

L'AUTEUR

Peter deMENOCAL est professeur au Département de sciences de l'environnement à l'Observatoire de la Terre à l'Université Columbia, aux États-Unis

BIBLIOGRAPHIE

S. C. Antón *et al.*, **Evolution of early homo : an integrated biological perspective**, *Science*, vol. 345, pp. 1-13, 2014.

F. d'Errico et W. E. Banks, **Tephra studies and the reconstruction of Middle-to-Upper Paleolithic cultural trajectories**, *Quaternary Science Reviews*, 2014.

T. E. Cerling *et al.*, **Stable isotope-based diet reconstructions of Turkana basin hominins**, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 110(26), pp. 10501-10506, 2013.

P. B. deMenocal, **Climate and human evolution**, *Science*, vol. 331, pp. 540-542, 2011.

Le volcanisme italien, coupable de la disparition des Néandertaliens ?

Peter deMenocal montre dans son article que les variations climatiques ont influé sur l'évolution de l'homme. Considérons ici le cas de la disparition de l'homme de [illegible] responsable, d'autres facteurs naturels ont pu jouer.

L'une des hypothèses est celle d'éruptions volcaniques. En effet, certaines grandes crises géologiques, qui ont conduit à la disparition de nombreuses espèces, ont été provoquées par un volcanisme important.

Les champs Phlégréens, dans la région de Naples, sont entrés en éruption il y a entre 40 900 et 37 300 ans et ont émis un volume de 80 à 150 kilomètres cubes de matière volcanique dans l'atmosphère.

Or c'est sur la période comprise entre 45 000 et 35 000 ans que la population en Europe a été marquée par la disparition de l'homme de Néandertal *(Homo neanderthalensis)* et l'arrivée de l'homme moderne *(Homo sapiens)* venu du Proche-Orient. Certains chercheurs ont avancé l'hypothèse que l'éruption aurait joué un rôle dans l'extinction des Néandertaliens.

Outre la disparition des Néandertaliens, cette période de transition entre le Paléolithique moyen et le Paléolithique supérieur a connu une diversité culturelle importante. Pour suivre à la fois l'évolution culturelle et la dynamique des populations, il faut adopter une approche historique de la période, c'est-à-dire établir une chronologie précise des événements et des interactions de l'homme de Néandertal et de l'homme moderne.

Une telle démarche est confrontée à plusieurs difficultés : la précision des méthodes de datation est entachée de marges d'erreurs importantes et l'association de certaines cultures avec l'homme de Néandertal ou l'homme moderne n'est pas évidente.

Le Paléolithique moyen est caractérisé par la culture mousterienne. Elle est définie principalement par la manière de façonner les outils de pierre dont la méthode dite Levallois. Le Moustérien est l'œuvre, en Europe, des Néandertaliens.

Puis différentes cultures dites de transition se sont développées en Europe. Elles pourraient être liées au fait que l'homme de Néandertal et l'homme moderne se sont côtoyés et se sont influencés culturellement.

LA CALDEIRA DE L'OUEST DE LA BAIE DE NAPLES s'est formée lors des deux éruptions majeures des champs Phlégréens, il y a 36 000 et 14 000 ans.

Une industrie typiquement de transition est le Châtelperronien en Europe occidentale. Marquée par la production de lames au dos retouché et la présence de parures, elle est associée aux derniers Néandertaliens alors que les hommes modernes arrivent de l'Est, porteurs de la culture aurignacienne, dont les premiers signes émergent entre 41 000 et 40 000 ans en Europe méridionale.

En Italie, on trouve l'industrie uluzzienne, qui était associée aux Néandertaliens. Des recherches récentes proposent, sur la base de dents isolées découvertes il y a longtemps dans la grotte du Cavallo (dans les Pouilles), que les Uluzziens étaient des hommes modernes, mais cela reste controversé.

Le manque de datation fiable rend donc ardu l'établissement d'une chronologie de l'évolution des cultures. Par ailleurs, certaines analyses stratigraphiques anciennes ne sont pas toujours fiables, car les sols ont pu être altérés. La datation au carbone 14 n'est pas d'un grand secours pour établir un historique précis, l'étalonnage de la méthode et les marges d'erreur sur les résultats conduisant à des incertitudes sur les dates qui ne permettent pas de les ordonner dans le temps, en particulier lorsque l'on compare différents sites. En effet, il est important d'établir une chronologie pour chaque site, mais aussi d'établir une relation spatiale de contemporanéité entre différents sites. Il est donc difficile d'établir une carte de la présence des différentes cultures (et donc des espèces) en fonction du temps.

Le projet anglais RESET a pour but d'étudier l'adaptation des hommes aux variations climatiques de ces 80 000 dernières années en rapprochant les données des paléontologues et des géologues. Pour établir une chronologie fiable, les chercheurs du projet utilisent les cendres volcaniques. Ces cendres se déposent sur des surfaces étendues à l'échelle d'un continent et permettent, une fois identifiées comme provenant d'une éruption particulière, de synchroniser les stratigraphies de différents sites, fixant un instantané temporel et spatial de la répartition des cultures.

Francesco d'Errico et William Banks, du CNRS et de l'Université de Bordeaux, ont utilisé cette approche pour étudier la transition entre le Paléolithique moyen et supérieur à l'aide des émissions volcaniques des champs Phlégréens, que l'on retrouve partout en Europe méridionale. Les éjectas de ce volcan ont été identifiés dans 11 sites.

En associant ce marqueur aux résultats stratigraphiques, F. d'Errico et W. Banks montrent que les cultures uluzzienne et proto-aurignacienne sont chronologiquement séparées et que la culture uluzzienne est probablement néandertalienne. Ainsi, les Néandertaliens auraient développé une culture avec des traits modernes indépendamment des hommes modernes. Les chercheurs montrent aussi que l'Aurignacien avait déjà remplacé l'Uluzzien dans certaines régions avant l'éruption du volcan. Celui-ci ne serait donc pas responsable de la disparition des Néandertaliens.

L'étude d'un plus grand nombre de sites présentant des restes d'éjecta des champs Phlégréens permettra de consolider ces conclusions.

La disparition de l'homme de Néandertal reste une question ouverte. Elle pourrait être liée, par exemple, à la confrontation avec l'homme moderne ou à une fusion des deux espèces.

© Pour la Science - n° 445 - Novembre 2014

a savane, mais que cette adaptation n'était pas uniforme dans toute la région : ils ont aussi retrouvé des fossiles de bovins plus adaptés à des régions humides. Les chercheurs confirment qu'il y a eu des transitions globales vers des climats plus arides, mais que la dynamique d'adaptation des espèces est complexe à interpréter.

Si l'analyse reste sujette à caution dans ses détails, une tendance globale se dégage : le changement de végétation a probablement eu une influence sur nos ancêtres, en modifiant les ressources alimentaires disponibles. L'étude isotopique des sols a permis d'esquisser la flore à diverses époques ; celle de l'émail des dents permet d'en savoir plus sur ce que mangeaient les hominines. Par exemple, l'analyse d'une dent d'un homme moderne vivant en Occident pointerait vers une alimentation à base de plantes en C4, car une grande part de l'alimentation – la viande de bœuf, les boissons sucrées, etc. – dérive du maïs, une herbe en C4.

Régime alimentaire varié ou restreint ?

Le changement de ressources alimentaires semble avoir joué un rôle durant l'évolution de l'homme, il y a environ deux millions d'années, lorsque le genre *Homo* est apparu. Th. Cerling et ses collègues ont examiné les dents des fossiles trouvés dans le bassin de Turkana. En 2013, ils ont montré qu'il existait une distinction nette entre le régime des premiers *Homo* et celui des *Paranthropus*. Une espèce, *Paranthropus boisei*, a parfois été surnommée l'homme casseur de noix à cause de ses grandes molaires et des os massifs de sa mâchoire. Il n'en est rien : les données concernant les isotopes du carbone dans l'émail des dents de cette espèce indiquent que son régime était peu diversifié et fondé principalement sur de la végétation en C4. En outre, de fines rayures microscopiques sur les dents renforcent l'idée d'une alimentation à base d'herbes abrasives en C4.

La grande surprise a concerné *Homo*. L'analyse des dents les plus anciennes indiquait un régime en contradiction avec l'environnement de l'époque, dominé par de l'herbe en C4. Les données isotopiques des dents indiquaient un régime constitué d'environ 65 % d'aliments en C3 et 35 % d'aliments en C4. Les premiers humains avaient donc une alimentation diversifiée qu'ils devaient chercher dans un environnement de plus en plus uniformément couvert par la savane. Ce qui *a priori* semble être un inconvénient a aussi eu l'avantage de conférer à *Homo* une grande flexibilité vis-à-vis des variations climatiques. *Homo* a dès lors pu transmettre ses gènes à sa lignée tandis que *Paranthropus*, qui pourtant se nourrissait de plantes en C4, a fini par s'éteindre, son régime étant trop spécialisé. Les végétaux dont il se nourrissait ont probablement disparu lors du changement climatique.

Par ailleurs, il est tentant de spéculer que les outils en pierre les plus complexes apparus avec *Homo* – les haches, les couperets et autres – étaient plus adaptés pour aider leurs propriétaires à exploiter plusieurs sources de nourriture. Nous ignorons ce qu'ils mangeaient exactement, mais nous pensons que la diversité alimentaire a finalement constitué un avantage.

Ces résultats, qui reposent sur les plantes en C3 et en C4, nécessitent d'être consolidés par de nouvelles données. Une technique particulièrement prometteuse a été développée ces dernières années pour suivre de façon continue les changements passés de la végétation. Les feuilles de toutes les plantes terrestres sont recouvertes d'une pellicule cireuse qui les protège. Lorsque des plantes meurent ou sont abrasées, la couverture cireuse est emportée par le vent, avec la poussière minérale et d'autres particules. Ces couvertures sont faites de petites molécules carbonées robustes, des lipides. Elles sont résistantes à la dégradation et portent la signature isotopique du carbone de leur plante mère, en C3 ou en C4. Une fois récupérés dans les sédiments, les lipides cireux des plantes peuvent être analysés, et leur signature en carbone déterminée. L'abondance relative des signatures en C3 ou en C4 nous permet d'estimer les quantités d'herbe par rapport aux arbres et broussailles présents dans les anciens milieux.

Sarah Feakins, de l'Université du Sud de la Californie, et ses collègues ont appliqué cette technique afin de reconstruire l'environnement des hominines. En analysant les sédiments issus d'un site de forage dans le Golfe d'Aden, ils ont confirmé que les plaines herbeuses d'Afrique de l'Est se sont étendues il y a entre trois millions et deux millions d'années, pour couvrir jusqu'à la moitié des terres.

S. Feakins a aussi montré qu'on pouvait retracer les cycles courts de climats humides et secs avec ces biomarqueurs de cire. La végétation a donc évolué en partie selon les cycles courts alternant entre forêt et savane. Sur le site fossilifère de Olduvai Gorge, en Tanzanie, où des hominines ont vécu il y a 1,9 million d'années, Clay Magill et Kate Freeman, de l'Université d'État de Pennsylvanie, ont utilisé les mêmes biomarqueurs et ont trouvé des changements similaires.

Homo a pu s'adapter aux variations climatiques et aux changements de végétation car il avait une alimentation variée.

L'ensemble de ces observations a permis de reconstruire l'histoire climatique de la région. L'image de notre ancêtre sortant de la forêt pour investir la savane sans jamais revenir en arrière a vécu. Il faut plutôt se représenter les ancêtres de l'homme confrontés à des cycles climatiques rapides et réguliers et à deux changements importants qui ont établi la prépondérance de la savane africaine telle que nous la connaissons aujourd'hui. La capacité de nos ancêtres à s'adapter au changement semble avoir été un atout majeur. D'autres éléments enrichiront peut-être ce scénario, mais une chose est sûre : la réponse à la question « D'où venons-nous ? » n'est plus hors de portée.

L'ÉMERGENCE

Frans de Waal

Notre capacité à coopérer au sein de grands groupes sociaux a des racines évolutives anciennes. On en retrouve les prémices chez d'autres primates, voire chez des mammifères plus éloignés.

L'ESSENTIEL

- La coopération est répandue dans le monde animal, mais seuls les êtres humains la mettent en œuvre au sein de grands groupes organisés et sont dotés d'une moralité complexe.
- Toutefois, les fondements de ces aptitudes, tels l'empathie et l'altruisme, sont aussi observés chez nos cousins primates.
- Les capacités de coopération de *Homo sapiens* auraient permis à l'humanité de devenir l'espèce dominante sur Terre.

Comment l'humanité est-elle devenue la forme de vie dominante sur la planète, avec une population de plus de sept milliards d'individus qui s'accroît encore ? L'explication classique est axée sur la notion de compétition. Nos ancêtres auraient pris possession de territoires, éradiqué d'autres espèces – dont nos frères néandertaliens – et chassé les grands prédateurs jusqu'à provoquer leur extinction. Nous aurions conquis la nature par la force.

Ce scénario semble toutefois peu plausible. Nos ancêtres étaient trop petits et trop vulnérables pour dominer la savane. Ils devaient vivre dans la crainte des meutes de hyènes, d'une dizaine de grands félins et de bien d'autres animaux dangereux. Le succès de notre espèce résulte plus probablement de notre esprit de coopération que de notre penchant pour la violence.

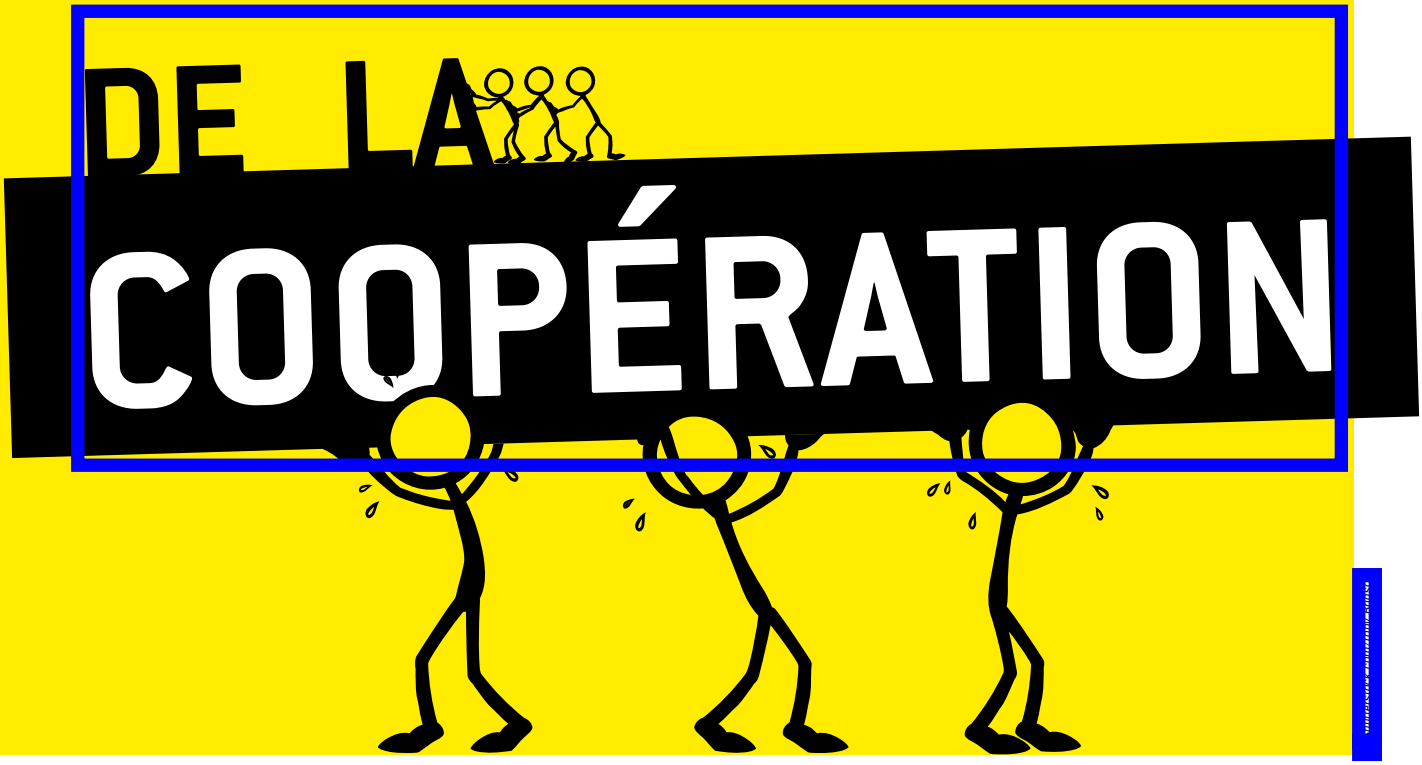
Notre propension à coopérer a des racines évolutives anciennes. Pourtant, seuls les humains s'organisent en groupes capables de réaliser des entreprises titanesques. Seuls les humains ont une moralité complexe, qui met l'accent sur la responsabilité vis-à-vis d'autrui et qui se traduit en pratique par la réputation et la punition. Et nos actions démentent parfois l'idée d'un être humain fondamentalement égoïste.

Évoquons par exemple un sauvetage spectaculaire, survenu en 2007 dans le métro de New York. Wesley Autrey, un ouvrier de 50 ans, a vu un homme tomber devant une rame à l'approche. Comme il était trop tard pour le hisser sur la plateforme, W. Autrey a sauté entre les rails et a couvert l'homme de son corps pendant que cinq voitures lui passaient par-dessus.

Qu'est-ce qui l'a poussé à mettre sa vie en danger pour aider un inconnu ? Pour répondre à cette question et déterminer comment la coopération a émergé dans notre espèce, recherchons d'abord des comportements du même type chez nos cousins évolutifs, en particulier chez nos plus proches parents actuels : les chimpanzés et les bonobos.

Au Centre Yerkes de recherche sur les primates, à l'Université Emory, aux États-Unis, j'observe souvent des cas de coopération désintéressée chez ces animaux. Mon bureau surplombe un grand enclos où une femelle âgée, Peony, se prélasse au soleil avec d'autres chimpanzés. Chaque fois que ses rhumatismes la font souffrir et qu'elle peine à grimper sur la structure d'escalade en bois, une femelle plus

DE LA COOPÉRATION



eune, avec laquelle elle n'a aucun lien de parenté, l'assiste en se plaçant derrière elle et en poussant des deux mains son ample postérieur. J'ai aussi vu des chimpanzés apporter de l'eau à Peony, qui a parfois du mal à marcher jusqu'au robinet. Lorsqu'elle se dirige vers ce dernier, d'autres accourent, prennent un peu d'eau dans la bouche et se placent devant elle. Peony ouvre alors la bouche pour qu'ils y crachent un jet d'eau.

Nombre d'études récentes ont documenté la coopération entre primates, dont on tire trois principales conclusions. Tout d'abord, la coopération n'exige pas un lien de parenté. Bien que ces animaux favorisent leur famille, ils ne coopèrent pas qu'avec elle. L'ADN extrait d'excréments de chimpanzés récoltés dans les forêts africaines a permis de déterminer quels animaux chassent et se déplacent ensemble. La plupart des partenariats étroits dans les forêts impliquent des individus sans relation de parenté. Les amis se toilettent mutuellement, s'avertissent de la présence de prédateurs et partagent leur nourriture. C'est aussi le cas chez les bonobos.

Ensuite, la coopération se fonde souvent sur la réciprocité. Des expériences montrent que les chimpanzés se souviennent des faveurs qu'ils ont reçues. Des chercheurs ont étudié une colonie en captivité, où le rituel du toilettage avait lieu le matin, avant le nourrissage. Lorsque certains individus s'emparaient de nourriture, par exemple d'une pastèque, ils étaient vite entourés de mendiants qui tendaient la main en gémissant et en suppliant. Les chercheurs ont constaté qu'un singe avait plus de chances de recevoir une part s'il avait fait la toilette du propriétaire plus tôt dans la journée.

L'empathie, une faculté partagée par tous les mammifères

Troisièmement, la coopération peut être motivée par l'empathie, une faculté partagée par tous les mammifères, des rongeurs aux primates. Nous nous identifions à ceux qui souffrent ou sont dans le besoin. Cette identification éveille des émotions qui nous poussent à les assister. Les chercheurs pensent désormais que les primates vont jusqu'à se préoccuper du bien-être des autres même lorsqu'ils ne manifestent pas de souffrance. Dans une expérience classique, deux singes sont placés côte à côte et l'un des deux choisit un jeton coloré parmi d'autres, de couleurs différentes. Une des couleurs récompense seulement l'animal lui-même, tandis qu'une autre récompense les deux. Après quelques essais, le singe choisit le plus souvent le jeton « pro-social ». Cette préférence n'est pas fondée sur la peur des autres, puisque les singes dominants (qui ont le moins à craindre) sont les plus généreux.

Dans cette expérience, se soucier des autres ne coûte rien aux primates, mais ce n'est pas toujours le cas ; les singes peuvent par exemple sacrifier la moitié de leur nourriture pour aider un congénère. Dans la nature, les chimpanzés adoptent des orphelins ou défendent leurs semblables contre les léopards, deux formes très coûteuses d'altruisme.

Chez les primates, cette tendance à prendre soin d'autrui s'est probablement développée à partir des soins maternels, nécessaires à tous les mammifères. De la souris à l'éléphant, les mères doivent réagir aux signaux de faim, de douleur ou de peur de leurs petits, sans quoi ces derniers risquent de mourir. Cette sensibilité, et les processus neuraux et hormonaux qui la sous-tendent, se sont ensuite répandus plus largement au

LES CHASSEURS DE BALEINES de Lamalera, qui effectuent un travail collectif dans des situations très dangereuses, ont un sens aigu de l'équité.

sein des sociétés animales, favorisant les liens émotionnels, l'empathie et la coopération.

Cette dernière procure des avantages importants, d'où son expansion rapide. La forme la plus répandue est la coopération mutualiste, caractérisée par la poursuite d'un objectif avantageux pour tous – par exemple lorsque des hyènes abattent un gnou ensemble ou qu'une dizaine de pélicans en demi-cercle poussent des poissons avec leurs pattes en direction d'une zone peu profonde, afin d'attraper simultanément de nombreuses proies dans leur bec. Une telle coopération repose sur une action coordonnée et un profit partagé. Son omniprésence s'explique probablement par les avantages immédiats qu'elle procure, tels que l'obtention de nourriture ou la défense contre les prédateurs.

Ce type de coopération entraîne des comportements tels que le partage. Si une hyène ou un pélican monopolisait toute la nourriture, le système cesserait de fonctionner. La survie dépend du partage, ce qui explique l'importance accordée à l'équité de la répartition par les humains et les animaux. Des expériences ont montré que les singes, les chiens et certains oiseaux sociaux rejettent une récompense quand elle est inférieure à celle d'un compagnon qui a exécuté la même tâche. Les chimpanzés et les humains vont plus loin, en modérant leur part du butin collectif pour éviter de frustrer les autres. Nous devons notre sens de l'équité à une longue histoire de coopération mutualiste.

L'AUTEUR

Frans DE WAAL est professeur de primatologie à l'Université Emory, aux États-Unis, et dirige le Centre *Living Links* au Centre Yerkes de recherche sur les primates.

SUR LE WEB

Diaporama sur des animaux qui s'entraident : http://bit.ly/1p1GpIk

BIBLIOGRAPHIE

F. de Waal, **The Bonobo and the Atheist**, W. W. Norton, 2013.

M. Nowak, **Les cinq piliers de l'entraide**, *Pour la Science*, n° 419, 2012.

F. de Waal et M. Suchak, **Prosocial primates : Selfish and unselfish motivations**, *Phil. Trans. of the Roy. Soc. B*, vol. 365, pp. 2711-2722, 2010.

F. de Waal, **The Age of Empathy**, Harmony Books, 2009.

D. P. Fry, **The Human Potential for Peace**, Oxford University Press, 2005.

Les humains illustrent bien le lien entre partage et survie. Les chasseurs de baleines de Lamalera, en Indonésie, parcourent l'océan dans de grands canoës abritant une dizaine d'hommes. Ils rament en direction du cétacé, puis le harponneur saute sur son dos pour y planter son arme ; ils maintiennent ensuite l'embarcation à proximité de l'animal, jusqu'à ce que ses pertes de sang provoquent sa mort. Des familles entières sont liées par cette activité à haut risque, leurs hommes se trouvant (littéralement) dans le même bateau, et elles se partagent ensuite la nourriture. Or les anthropologues ont constaté que les habitants de Lamalera sont d'une équité extrême. Celle-ci était mesurée grâce à un outil nommé jeu de l'ultimatum, où les participants peuvent choisir de refuser une offre qu'ils jugent inéquitable. Dans des sociétés dont les membres sont plus autonomes, par exemple quand chaque famille cultive son propre lopin de terre, l'équité est moins importante.

Spécificités humaines

Une différence souvent soulignée entre les humains et les autres primates est que nous sommes les seuls qui coopèrent avec des inconnus et des étrangers à notre groupe – dans certaines circonstances. Dans la nature, en général, les primates de groupes différents sont en compétition. La façon dont les communautés humaines laissent les étrangers traverser leur territoire, partagent leurs repas avec eux, échangent des biens et des cadeaux, et s'allient contre des ennemis communs n'est pas une caractéristique répandue chez les primates.

Cependant, cette ouverture ne requiert pas d'explication évolutive particulière, comme certains l'affirment. La coopération entre étrangers est probablement une extension des tendances qui ont émergé au sein des groupes. Dans la nature, il arrive souvent que des capacités existantes soient appliquées au-delà de leur contexte initial. Ainsi, les primates utilisent leurs mains non seulement pour grimper aux arbres (leur utilisation première, sélectionnée au fil de l'évolution), mais aussi pour s'accrocher à leur mère. Des expériences où des singes capucins et des bonobos interagissaient avec des individus inconnus ont montré qu'ils étaient capables d'échanger des services et de partager de la nourriture. Autrement dit, la capacité de coopérer avec des étrangers existe chez d'autres espèces, même si,

© Pour la Science - n° 445 - Novembre 2014

dans la nature, les animaux sont rarement confrontés à des situations qui les incitent à la mettre en pratique.

L'une des caractéristiques qui nous est réellement propre est sans doute la nature très organisée de nos collaborations. Nous mettons en place des groupes hiérarchisés, capables de réaliser des projets d'une complexité et d'une ampleur uniques dans le monde animal. On peut par exemple penser à l'immense accélérateur de particules LHC du Cern.

Le plus souvent, la coopération chez les animaux est auto-organisée, dans le sens où les individus remplissent des rôles en fonction de leurs capacités et des places disponibles. Ils peuvent toutefois se coordonner finement. Ainsi, des orques se synchronisent parfois pour créer une vague qui pousse un phoque sur un bloc de glace. Autre exemple, des chimpanzés mâles peuvent se diviser en poursuivants et en bloqueurs pour chasser un groupe de singes à travers la canopée, comme s'ils avaient convenu au préalable de leurs rôles respectifs. Nous ignorons comment les objectifs communs sont établis et communiqués, mais ils ne semblent pas orchestrés par des chefs, comme c'est en général le cas chez les humains.

Ces derniers ont aussi des façons de renforcer la coopération qui n'ont jusqu'à présent pas été observées chez d'autres animaux. À travers les interactions répétées avec autrui, nous nous créons une réputation d'amis fiables ou non, et nous risquons des conséquences désagréables en cas d'efforts insuffisants.

La perspective d'une punition décourage également les individus de tricher. Dans les expériences de laboratoire, les humains punissent les profiteurs, même s'ils doivent en pâtir eux-mêmes – une pratique qui, à long terme, favorise la coopération au sein d'une population. Punit-on souvent les autres à son propre détriment en dehors du laboratoire ? Le débat fait rage, mais nos systèmes moraux impliquent en tout cas certaines attentes en matière de coopération.

En outre, nous sommes très sensibles à l'opinion publique. Lors d'une expérience, des chercheurs ont constaté que les gens donnaient plus d'argent à une bonne cause quand une image représentant deux yeux était affichée sur le mur devant eux. Quand nous nous sentons observés, nous faisons attention à notre réputation.

Ce souci de la réputation pourrait avoir été le ciment qui a permis aux premiers *Homo sapiens* de se rassembler dans des sociétés toujours plus nombreuses. Pendant une grande partie de la préhistoire, nos ancêtres ont mené des vies nomades, similaires à celles des chasseurs-cueilleurs actuels. Ces populations modernes montrent un goût prononcé pour la paix et les échanges entre communautés, que l'on retrouvait probablement chez les premiers *H. sapiens*.

Sans nier notre propension à la violence, je suis convaincu que l'origine de notre succès réside plutôt dans notre disposition à la coopération. En nous ancrant dans des tendances apparues avant le stade humain et partagées avec les autres primates, nous avons façonné nos sociétés en réseaux complexes d'individus qui coopèrent d'une multitude de façons.

Aux origines de la division du travail

[illegible]

Selon toute vraisemblance, les tâches au sein des premières sociétés humaines se sont d'abord réparties entre hommes et femmes. Cette division des tâches serait liée à l'apparition des outils et à leur développement.

On a aujourd'hui une bonne idée de la vie quotidienne des populations de *Homo sapiens* qui ont commencé à occuper l'Europe il y a 40 000 ans. On sait qu'elles vivaient de la chasse, de la cueillette et de la pêche, qu'elles connaissaient suffisamment leur environnement pour en exploiter toutes les ressources minérales, végétales et animales. Mais comment s'organisaient ces activités ? Y avait-il une répartition bien définie des tâches, où certains individus ou groupes d'individus (les femmes par exemple) étaient dévolus à des activités particulières, telles la fabrication d'outils de pierre ou la chasse ? Si répartition des tâches il y avait, était-elle immuable au cours de la vie des individus ou changeait-elle au fil des jours ou des ans ? Les rôles étaient-ils transmis d'une génération à la suivante comme c'était le cas, par exemple, de la fonction de scribe dans l'Égypte ancienne ?

En fait, on ignore presque tout de la division du travail dans les premières sociétés humaines. Pour les périodes plus anciennes, qui concernent les préhominiens, il est encore plus difficile de répondre, d'autant que les premiers représentants du genre *Homo* et les australopithèques avaient peut-être un mode de vie plus proche de celui des grands singes actuels que de celui de *Homo sapiens*. C'est donc surtout à propos de la période la plus récente, le Paléolithique supérieur (il y a 40 000 à 10 000 ans), que des hypothèses sur la division du travail dans les sociétés préhistoriques ont été avancées. Ces hypothèses, que nous allons ici détailler, reposent soit sur le comparatisme ethnographique, soit sur des indices archéologiques.

Indices ethnologiques

Par analogie avec des peuples qui vivent ou vivaient récemment de la chasse et de la collecte, une hypothèse communément admise est que les sociétés préhistoriques étaient relativement égalitaires et qu'en tout cas, elles ne comptaient pas d'artisans dont la tâche exclusive était de produire un type particulier d'objets. La plupart des chercheurs supposent cependant qu'il existait une répartition des tâches, dont la forme la plus simple est la division sexuelle du travail.

Selon ce tableau, les vieillards et les femmes se chargeaient de la cueillette et de la chasse au petit gibier proche, tels le lièvre chassé pour la viande ou le renard pour sa fourrure, les jeunes mères s'occupant des enfants en bas âge. Les enfants allaient ramasser le bois pour le feu autour du campement et aidaient les femmes à cueillir les substances végétales, à quérir de l'eau et à relever le petit gibier pris au piège. Les hommes adultes chassaient le grand gibier (renne, cheval, bison…) et allaient chercher au loin les produits non disponibles sur place, tel du silex de bonne qualité pour confectionner des outils.

Mais le point de départ ethnographique de ces reconstitutions est loin d'aller de soi. Tout d'abord, elles présupposent que la division sexuelle du travail est régie par les mêmes principes chez tous les chasseurs-cueilleurs, de l'Australie au Kalahari, de l'Amazonie à la Sibérie, alors que les groupes actuels vivant de la chasse et de la cueillette présentent toutes sortes de configurations. De plus, elles partent du principe qu'il existe des activités universellement masculines ou universellement féminines.

L'ESSENTIEL

- La répartition des tâches dans les sociétés humaines d'il y a plus de 10 000 ans est très peu connue.
- Il existait probablement une division sexuelle du travail, mais elle n'était pas nécessairement la même partout.
- La disponibilité procurée par le partage sexuel des tâches aurait favorisé la propension à fabriquer et à utiliser des outils.
- La décoration des parois de grottes et la taille de la pierre, par exemple, auraient été assurées par des individus spécialisés.

L'un des chercheurs qui est allé le plus loin dans ce sens est sans doute l'anthropologue français Alain Testart (1945-2013). Selon lui, à cause d'une croyance profondément enracinée en l'incompatibilité entre le sang menstruel et le sang d'un animal abattu, faire jaillir du sang serait interdit aux femmes. Testart motivait cette hypothèse par le fait que les femmes semblent ne jamais effectuer des tâches telles que tuer du gibier avec une arme coupante. Mais, outre que la vie sociale n'est pas régie par des lois universelles semblables aux lois de la physique, les contre-exemples, quoique rares, ne sont pas inexistants.

Comme l'a déploré en 2005 Linda Owen, de l'Université de Tübingen en Allemagne, les chercheurs s'en sont souvent tenus à des épures simplistes où le rôle des hommes et des femmes était caricaturé. Or au sein d'un même groupe, les activités domestiques, telles que l'entretien du feu, le travail des peaux, du bois ou le cordage, sont exécutées tantôt par les hommes, tantôt par les femmes, en fonction de la répartition globale des activités. Quant à la taille de la pierre, si elle semble pratiquée par les

1. REPRESENTATIONS PARIETALES
Des mains « négatives », par la technique du pochoir, dans la grotte argentine de Las Manos Pintadas. Des mesures portant sur des mains peintes au Paléolithique sur les parois de plusieurs grottes de France et d'Espagne tendent à montrer que certaines d'entre elles ont été réalisées par des femmes.

2. IL Y A PLUS DE 30 000 ANS, les individus qui ont peint les parois de la grotte Chauvet, en Ardèche, ont fait preuve d'une étonnante dextérité technique. Ils ont associé gravure et peinture, ont eu recours à divers procédés picturaux tels que l'estompe, à des effets de perspective, etc. Il est difficile d'imaginer que ce savoir-faire était partagé par tous les membres du groupe.

était confiée. Elle peut très bien avoir été le fait non d'un sexe plutôt que l'autre, mais d'un groupe spécifique, comme c'est le cas aujourd'hui dans certaines sociétés où un groupe particulier de chasseurs se charge de constituer des réserves en viande pour la communauté.

Indices archéologiques

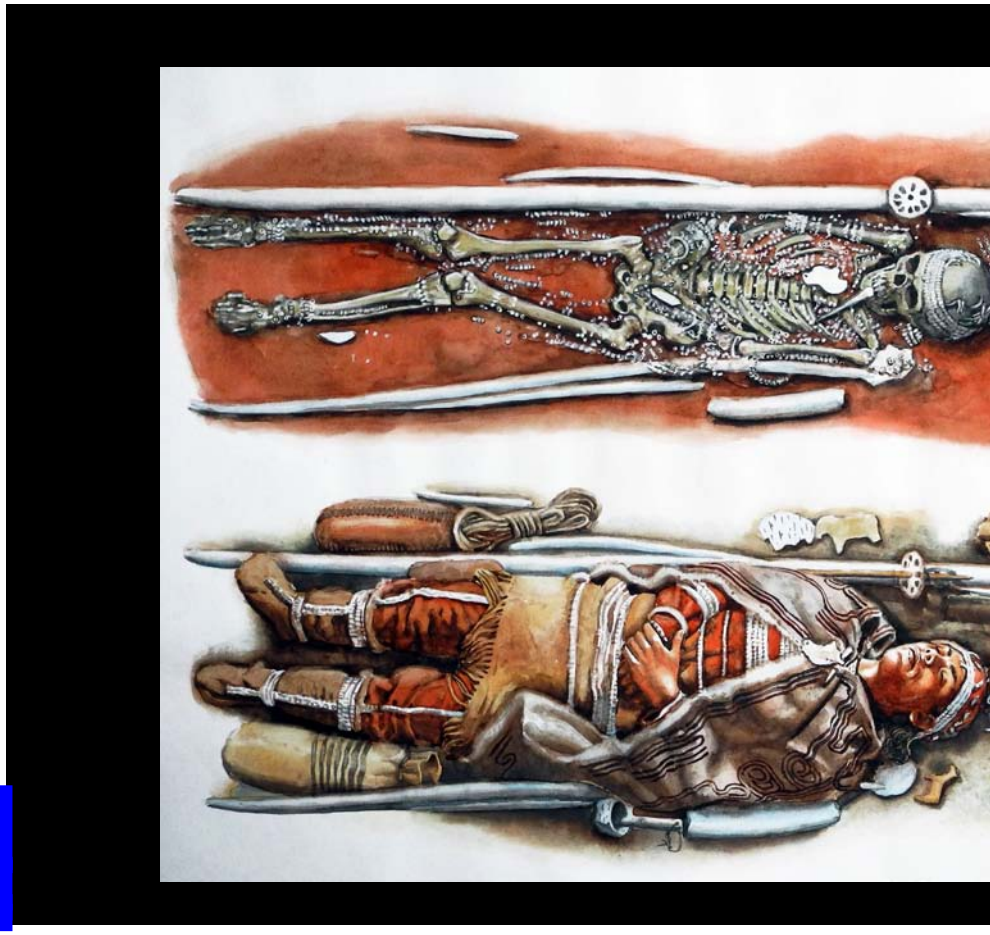
D'autres hypothèses se fondent sur des indices archéologiques indirects, tels que la présence d'aires d'habitat réservées à certaines activités, où l'on veut voir le reflet d'une répartition des tâches entre hommes et femmes. Armes, burins et déchets de pierre taillée seraient ainsi associés à la chasse, à la boucherie ou au travail de la pierre, tâches supposées masculines, tandis que foyers, aiguilles à chas ou grattoirs attesteraient d'activités féminines telles que le travail des peaux ou la préparation culinaire…

Ainsi, dans le site sibérien de Mal'ta, occupé entre –25000 et –14500, l'archéologue russe Mikhail Gerasimov a distin-

hommes dans presque toutes les sociétés où elle est connue, il existe des exceptions (Konso et Gamo du Sud de l'Éthiopie, Arawe de Nouvelle-Guinée, Tiwi et Jerramungup d'Australie, Koriaks de Sibérie, etc.), signalées notamment par Kathryn Weedman Arthur, de l'Université de la Floride du Sud, l'Australienne Caroline Bird, l'Américaine Jane Goodale (1926-2008), Sylvie Beyries, du CNRS *(voir la figure 5)*.

En fait, dans de nombreuses sociétés, il existe des activités pratiquées par les hommes comme par les femmes, mais pas de la même manière. Il arrive aussi que tous participent à une même activité, mais n'y exécutent pas la même tâche. Ainsi, la chasse par rabattage de grands troupeaux d'herbivores sollicite tous les membres du groupe, chacun ayant son rôle. Par ailleurs, il arrive que les étapes successives d'une chaîne opératoire soient confiées à des acteurs différents. Les carcasses de gibier peuvent être débitées par certains individus, alors que les quartiers de viande sont ensuite désossés par d'autres personnes chargées de la préparation du repas.

Même dans le cas où un site archéologique semble livrer des indices de spécialisation, nous ne pouvons rien présumer de l'identité de ceux à qui l'activité en question



© Pour la Science - n° 445 - Novembre 2014

gué en 1950 deux secteurs d'habitat : l'un a livré des bifaces, des poignards en os et des figurines d'oiseau, l'autre des grattoirs, des aiguilles, des alênes, des colliers et des statuettes féminines. Pour lui, il s'agissait respectivement d'une aire masculine et d'une aire féminine. C'était peut-être vrai, mais à condition de supposer que les habitants du lieu se conformaient à ce que nous savons aujourd'hui être un schéma bien simpliste.

En Israël, Dani Nadel, de l'Université de Haïfa, et Ehud Weiss, de l'Université de Bar-Ilan, ont fait des observations analogues sur le site d'Ohalo II, fouillé depuis les années 1990 et daté de 23000 à 22000 avant notre ère. Sur ce site occupé par des populations ignorant encore l'agriculture mais qui consommaient en abondance des céréales sauvages, ils ont repéré dans une des huttes deux aires d'activité séparées par une aire de passage : une zone sans doute peu éclairée, au fond de la hutte, dans sa partie Nord, avec une grande meule et des graines de céréales sur sa surface et éparpillées tout autour, et une seconde zone, avec des vestiges de débitage de pierre, sans doute mieux éclairée car plus proche de l'entrée. Ils suggèrent que la première zone, liée à la préparation de la nourriture, était féminine, et la seconde, dédiée à la fabrication des armes et des outils, masculine. Même si cette interprétation est tentante, il se peut aussi que la séparation des tâches ait été due à des raisons d'ordre hygiénique n'ayant rien à voir avec une répartition sexuelle.

De même, pour le site magdalénien de Verberie, dans l'Oise, Françoise Audouze, du CNRS, a suggéré en 2010 que la présence des lamelles à dos (petites lames de moins de trois centimètres présentant un « dos » comme nos couteaux actuels) – qui ne servent qu'aux armatures d'armes de jet – autour des foyers signalait une zone d'activité masculine, tandis que la présence des grattoirs à l'écart des foyers aurait indiqué une aire de travail des peaux, activité féminine. Or elle avait elle-même remarqué en 2007 que la réfection des armes de jet doit se faire près du foyer, car on a besoin de chaleur pour faire fondre les adhésifs, tandis que le travail des peaux doit se faire loin du feu, à cause du risque de projection d'escarbilles. Ainsi, la spécialisation de l'espace ne renvoie pas nécessairement à celle des occupants : un lieu peut avoir été réservé à une activité donnée, tout en étant fréquenté aussi bien par des hommes que par des femmes.

Division des tâches ou véritable spécialisation ?

Des niveaux de compétence différents dans les savoir-faire peuvent révéler une spécialisation des activités. C'est ainsi qu'à Étiolles (Essonne) et à Pincevent (Seine-et-Marne), les travaux menés depuis les années 1980 par Nicole Pigeot, de l'Université Paris I, et Monique Olive, du CNRS, ont montré que les très bons tailleurs de silex savaient produire de longues lames et des outils d'excellente qualité *(voir la figure 4)*, tandis que d'autres individus avaient une compétence plus médiocre, mais suffisante pour fabriquer occasionnellement des outils indispensables à la vie courante. Par ailleurs, des éclats inutilisables, fruits d'un travail encore plus malhabile, étaient peut-être dus à de jeunes enfants cherchant à imiter les adultes.

Ces différences de compétence révèlent-elles une division des tâches ou une véritable spécialisation ? Certaines activités artisanales sont si prenantes qu'on peut envisager l'hypothèse d'un travail « à temps plein ». Considérons par exemple les 13 300 perles en ivoire retrouvées dans les trois sépultures de Sungir, en Russie, datées d'environ 28 000 ans *(voir la figure 3)*. D'après Erik Trinkaus, de l'Université Washington à Saint-Louis, leur réalisation aurait nécessité, à raison de 30 minutes par perle, quelque 6 650 heures de travail, soit plus de trois ans en y consacrant 40 heures par semaine ! Difficile ici de ne pas imaginer des artisans spécialisés. Mais, faute de connaître le nombre d'individus impliqués dans cette activité, il est impossible d'évaluer le temps qu'ils y consacraient.

On peut aussi parler de spécialisation lorsqu'on parvient à établir l'existence de réseaux d'échange, où ceux qui allaient

3. LA DOUBLE SÉPULTURE de Sungir, en Russie, qui date d'environ 28 000 ans *(en haut, dessin de la découverte, en bas, une reconstitution)*. Les milliers de perles d'ivoire qu'elle contient suggèrent l'existence d'artisans spécialisés.

4. AU PALÉOLITHIQUE SUPÉRIEUR, on confectionnait la plupart des outils dans des lames obtenues à partir d'un bloc de pierre, nommé nucléus. Le nucléus ci-dessus, qui provient du site d'Étiolles, dans l'Essonne, a pu être reconstitué à la façon d'un puzzle. Il mesure plus de 70 centimètres, ce qui est exceptionnel. Le tailleur a pu en tirer des lames de plus de 30 à 40 centimètres de longueur, la plus grande mesurant 50 centimètres. Aucun tailleur moderne n'a pu jusqu'à présent égaler un tel niveau de compétence.

chercher au loin la matière première n'étaient pas ceux qui la façonnaient ou qui utilisaient les objets qu'elle a servi à fabriquer. De tels réseaux sont avérés dès le début du Néolithique avec, par exemple, la circulation des obsidiennes d'Anatolie centrale et orientale sur plus de 900 kilomètres, vers le Proche-Orient par voie terrestre et vers Chypre par voie maritime, introduites dans les habitats sous forme d'objets finis. Toutefois, les tentatives pour identifier de tels réseaux au Paléolithique supérieur ont jusqu'ici échoué.

En 2013, Dean Snow, de l'Université de l'État de Pennsylvanie, a évalué l'indice de Manning (rapport entre la longueur de l'index et celle de l'annulaire, qui dépendrait du sexe) des mains réalisées au pochoir *(voir la figure 1)* dans certaines grottes ornées de la région franco-cantabrique. Il en a déduit que 24 des 32 mains relevées dans huit grottes différentes sont féminines : les artistes paléolithiques seraient plutôt des femmes. En 2005, Dale Guthrie, de l'Université de l'Alaska à Fairbanks, s'était appuyé sur la largeur de la paume et du pouce pour attribuer la majorité des mains peintes à des adolescents.

Mais c'est passer bien vite d'un échantillon statistique réduit à l'ensemble de l'art pariétal, d'autant que la plupart des mains ont été intentionnellement représentées incomplètes. On peut tout au plus en retenir que les activités artistiques n'étaient pas le seul fait des hommes adultes.

D'autres indices de spécialisation peuvent être fournis par le mobilier funéraire. Mais ce type d'indice n'est utilisable qu'avec les premières nécropoles mésolithiques, où les restes humains sont suffisamment abondants pour que la détermination des sexes soit fiable.

L'exemple le plus remarquable vient de la nécropole de Bogebakken à Vedbaek. Ce site danois présente 22 tombes datées d'environ 4 800 ans avant notre ère. Tous les hommes portaient une ou deux lames de silex fixées à la taille. C'est aussi le cas d'un enfant mort-né, ce qui suggère que c'était un petit garçon et que ces lames constituaient un attribut masculin plutôt qu'un outil effectivement utilisé.

Les sépultures plus anciennes sont peu nombreuses et disséminées dans toute l'Europe. Il est donc difficile d'y repérer des récurrences et l'on note au contraire une très grande variabilité des pratiques funéraires. De plus, comme un grand nombre de sépultures paléolithiques ont été trouvées anciennement, on ignore souvent si

L'AUTEUR

Sophie ARCHAMBAULT DE BEAUNE est professeure à l'Université Jean Moulin-Lyon III et chercheure dans l'UMR Archéologies et sciences de l'Antiquité, à Nanterre.

BIBLIOGRAPHIE

S. A. de Beaune, **A critical analysis of the evidence for technical specialisation in the Upper Palaeolithic,** *Proc. of the XVII^th Congress of the Int. Union of the Prehistoric and Protohistoric Sciences*, 1-7 sept. 2014, Burgos (Espagne), à paraître.

B. Hayden, **Naissance de l'inégalité. L'invention de la hiérarchie.** CNRS Éditions, 2013.

T. Sigaut, **Comment *Homo* devint *faber*. Comment l'outil fit l'homme.** CNRS Éditions, 2012.

L. Owen, **Distorting the Past. Gender and the Division of Labor in the European Palaeolithic,** Kerns Verlag, 2005.

es objets retrouvés faisaient bien partie d'un dépôt funéraire ou s'ils se trouvaient par hasard dans le remplissage de la fosse.

Il existe pourtant quelques cas d'outils manifestement associés au défunt. Ainsi, l'adolescent de la grotte des Arene Candide, en Ligurie, décédé il y a quelque 23 440 ans, tenait dans la main droite une lame de silex longue de 25 centimètres et était entouré de quatre bâtons percés en bois d'élan. De même, les deux enfants de la sépulture de Sungir déjà évoquée étaient accompagnés de plusieurs sagaies et lances. Ces armes semblent avoir été associées aux défunts sans considération d'âge ou de genre, et ne permettent donc pas de déterminer le rôle des inhumés.

Une autre difficulté tient à ce que les squelettes les plus anciens ont été attribués à l'un ou l'autre sexe soit à partir de critères de robustesse des os, soit en fonction du mobilier qui les accompagnait. Or les études menées depuis ont montré que ces attributions étaient parfois erronées. Tel était le cas pour « l'homme de Menton », mis au jour dans la grotte italienne de Cavillon ; on avait d'abord considéré ce fossile comme masculin à cause de la présence de très nombreux outils, mais selon une analyse de l'os coxal réalisée en 1991 par Jaroslav Bruzek, chercheur au CNRS, il s'agirait en fait d'une femme.

Une répartition rationnelle des tâches ?

Il ne semble pas y avoir de différences significatives de mobilier dans les tombes masculines et féminines au Paléolithique supérieur et il faut donc interpréter la nature des mobiliers funéraires avec prudence. Les variations dans les pratiques funéraires au sein d'une même population peuvent dépendre de nombreux paramètres : appartenance du défunt à des catégories distinctes (sexe, âge, classe, origine), mais aussi circonstances particulières de la mort.

Est-ce à dire qu'on ne peut rien conclure, et qu'il faut passer des schémas simplistes de nos devanciers à une totale indétermination ? Assurément non. L'existence d'une répartition des tâches paraît évidente pour au moins deux raisons. La première, soulignée par l'anthropologue des techniques François Sigaut (1940-2012), est que la vie d'un groupe humain impose d'équilibrer l'ensemble des moyens mis en œuvre pour la survie et de scinder les activités en tâches simultanées ou successives, mais connectées.

Cela implique d'étudier non pas telle ou telle tâche spécifique, mais tout le répertoire des activités du groupe, afin de comprendre l'équilibre de l'ensemble. Dans cet ordre d'idées, Nicole Waguespack, de l'Université du Wyoming, a montré en 2005, à partir de données fournies par 71 populations actuelles de chasseurs-cueilleurs, que le temps passé par les femmes à la collecte des végétaux dépendait de la part que la viande des grands herbivores chassés par les hommes prenait dans l'équilibre alimentaire. Plus cette part était grande, moins elles devaient collecter de végétaux et plus elles pouvaient se consacrer à d'autres activités, techniques et non vivrières.

La seconde raison est que, très probablement, les tâches étaient confiées de préférence aux individus les mieux à même

5. UNE FEMME KORIAK du Kamtchatka, en Sibérie, taillant des outils de pierre pour fabriquer des grattoirs destinés à la préparation des peaux. Contrairement à une idée répandue, la taille des pierres n'est pas une tâche universellement masculine.

le les réaliser. Sans aller jusqu'à parler d'artisanat spécialisé, on peut penser que certains membres du groupe se chargeaient des tâches pour lesquelles ils étaient les plus doués, telles que la fabrication d'outils en pierre et en os ou encore la réalisation de peintures pariétales *(voir la figure 2)*. Le niveau de compétence nécessaire au façonnage de bifaces, par exemple, suggère que cette spécialisation existait déjà il y a plusieurs dizaines, voire plusieurs centaines, de milliers d'années.

Et il est possible que ce partage des tâches se soit souvent fait selon les sexes, mais ce qui revenait à l'un ou l'autre sexe n'était pas fixé de façon rigide : ainsi, même là où les femmes étaient plutôt cantonnées à des tâches domestiques, elles devaient réaliser des tâches traditionnellement assignées aux hommes. Si elles faisaient la cuisine, elles devaient aussi savoir faire du feu ; si elles découpaient le gibier et travaillaient des peaux, elles devaient aussi pouvoir fabriquer les outils de découpe, qui s'usent vite, ou du moins les réaffûter. Il pouvait donc y avoir des activités préférentiellement masculines ou féminines, mais la répartition des tâches élémentaires dont elles se composaient ne pouvait être que mouvante.

Quant à l'origine de la division sexuelle des tâches, elle a fait l'objet de plusieurs hypothèses. En 2006, Steven Kuhn et Mary Stiner, de l'Université d'Arizona, ont invoqué la diversification alimentaire. Pour eux, alors que les Néandertaliens chassaient uniquement du gros gibier, activité requérant la coopération de tous les membres du groupe, les *Homo sapiens* ont commencé à diversifier leur régime. La chasse au petit gibier et la cueillette sont alors apparues et ont été confiées aux femmes et aux enfants, tandis que les hommes se réservaient la chasse au gros gibier.

Mais le cas des Inuit, qui pratiquaient la division sexuelle des tâches alors qu'ils se nourrissaient presque uniquement de viande, ne va pas en faveur de cette hypothèse. De plus, on sait depuis peu, grâce à l'analyse de résidus organiques trouvés sur des outils ainsi qu'à d'autres analyses effectuées sur des dents de Néandertaliens, que l'alimentation de ces derniers était déjà aussi diversifiée que celle de *Homo sapiens*.

Du partage sexuel des tâches à l'emploi d'outils

François Sigaut, sans qu'il s'agisse à proprement parler d'une hypothèse explicative, a associé la division du travail à l'action outillée. Dans un ouvrage paru en 2012, peu avant sa mort, il remarquait qu'il existe deux types de sociétés animales : les sociétés fondées sur l'entraide et celles fondées sur l'échange. Dans les premières – c'est-à-dire les mammifères –, tous les individus se livrent aux mêmes activités, brouter par exemple, et sont peu ou prou semblables. Dans les secondes – en gros, les sociétés ovipares, insectes et oiseaux –, tous ne s'adonnent pas aux mêmes tâches, ce qui oblige à échanger des services ; dans les cas extrêmes, une différenciation morpho-physiologique peut même apparaître, comme chez les abeilles.

Or les ancêtres des humains connaissaient à la fois l'entraide et l'échange. Dans les sociétés humaines « primitives », les individus sont polyvalents, chacun sachant faire – ou étant susceptible de faire – tout ce que les autres peuvent faire. L'originalité consiste en ceci qu'il a existé dans toutes les sociétés, sans doute dès les débuts de l'hominisation, une répartition sexuelle des tâches. Chez les humains, l'évolution s'est faite sur une base radicalement différente de celle des autres sociétés animales : ce sont les deux sexes qui se sont spécialisés l'un vis-à-vis de l'autre. Mâles et femelles sont des partenaires non seulement pour la reproduction, mais aussi pour leur subsistance.

Or les espèces humaines sont aussi les seules à avoir développé l'action outillée dans des proportions qui n'a pas d'équivalent dans le règne animal. D'où l'idée que l'une et l'autre particularité seraient liées : la disponibilité procurée par le partage sexuel des tâches aurait favorisé la propension à fabriquer et à utiliser des outils ; réciproquement, le développement des tâches outillées aurait imposé de les répartir.

Ainsi, pour Sigaut, hominisation et répartition sexuelle des tâches sont allées de pair. Cette répartition n'est certes pas l'apanage des humains. Sans parler des sociétés d'insectes, on peut citer le cas des manchots empereurs qui coordonnent leurs plongées et chez qui ce sont les mâles qui couvent pendant que les femelles vont chercher de la nourriture. Mais les sociétés humaines seraient les seules à associer répartition des tâches et utilisation des outils. Réduits à leurs seules mains, hommes et femmes ne sont guère différents face au travail. Munis de ces objets éminemment humains que sont les outils, ils le deviennent. Ou plus exactement – car il ne s'agit pas là d'un fait de nature – les sociétés les font être différents.

À un degré ultérieur de l'hominisation, mais sans doute dès le Paléolithique supérieur, sinon dès l'époque des Néandertaliens à en croire Brian Hayden, de l'Université Simon Fraser, au Canada, une division sociale des tâches s'est ajoutée à la division sexuelle, et les inégalités sont apparues. Mais c'est une autre histoire. ■

© Pour la Science - n° 445 - Novembre 2014

SciLogs

La nouvelle communauté de bloqueurs scientifiques francophones

De blog en blog, explorez la science en direct avec ceux qui la font, commentez les articles et participez au débat !

Complexités

Vos raisonnements et conceptions seront remis en question par Jean-Paul Delahaye, auteur de la rubrique Logique et Calcul dans *Pour la Science*. Dans son blog, il présente des jeux et énigmes mathématiques, des paradoxes logiques et numériques et des nouveautés en informatique.

Signal sur bruit

Découvrez les réflexions de l'astrophysicien Richard Taillet. Matière noire, énergie sombre et autres découvertes en physique et astrophysique… votre soif de connaissance sera assouvie.

Best of Bestioles

Explorez chaque semaine les merveilles du monde animal dans le blog de Loïc Mangin, rédacteur en chef adjoint de la revue *Pour la Science*. Insectes, mammifères, crustacés, amphibiens et bien d'autres n'auront bientôt plus de secrets pour vous.

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

Connectez-vous maintenant pour découvrir www.Scilogs.fr

Suivez les dernières actualités des blogueurs également sur les réseaux sociaux

Proposé par POUR LA SCIENCE

La monogamie

Blake Edga

Des travaux récents alimentent le débat sur l'émergence de la monogamie chez les humains. Ce mode de vie en couple durable aurait facilité le développement d'un plus gros cerveau.

Les mammifères ne sont pas de grands monogames. Moins de 10 % de leurs espèces vivent exclusivement en couple. La monogamie est un peu plus courante chez les primates, dont 15 à 29 % des espèces privilégient ce mode d'existence. Cependant, très peu d'entre elles vivent la monogamie au sens où les humains l'entendent : un partenariat sexuel exclusif entre deux individus.

De toute évidence, la monogamie des humains est loin d'être parfaite. Ils ont des aventures extraconjugales, divorcent et, dans certaines cultures, sont mariés à plusieurs personnes à la fois. La polygynie (un homme marié à plusieurs femmes) est d'ailleurs présente dans la plupart des sociétés. Cependant, même là où elle est autorisée, elle ne concerne qu'une minorité d'individus. En général, l'organisation sociale repose sur l'hypothèse que la plupart des individus formeront des couples durables et entretiendront des liens exclusifs sur le plan sexuel.

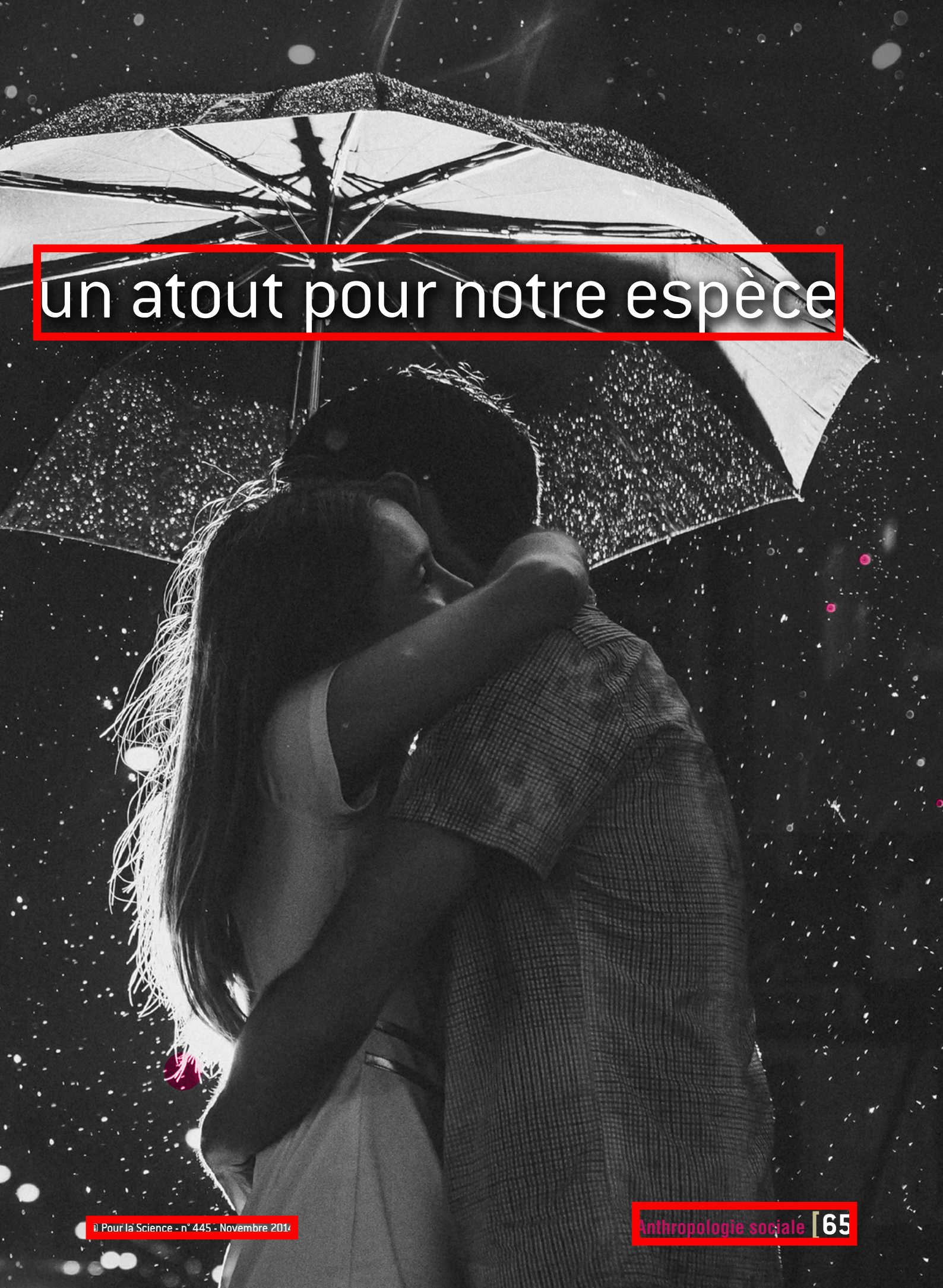
L'ESSENTIEL

- L'homme est en général monogame. Or moins de 10 % des espèces de mammifères le sont
- L'époque à laquelle a émergé la monogamie chez nos ancêtres reste indéterminée.
- L'espacement territorial entre femelles, le soin paternel ou les infanticides sont des explications possibles à l'émergence de la monogamie.
- La monogamie et le développement de liens sociaux ont favorisé l'évolution des humains.

La monogamie serait un héritage du parcours évolutif de notre espèce et aurait constitué une étape cruciale dans le processus de développement de nos ancêtres. Le couple est même devenu l'un des piliers des systèmes sociaux humains et l'une des clés du succès de notre évolution. « C'est le lien de couple qui a vraisemblablement engendré l'organisation sociale humaine », affirme Bernard Chapais, anthropologue à l'Université de Montréal.

Si la monogamie n'est pas l'exclusivité de l'homme, elle a en effet rendu possible l'émergence d'une caractéristique strictement humaine : la constitution de réseaux sociaux vastes et complexes. Les jeunes des autres primates n'établissent des liens de parenté que par leur mère. Les humains, eux, le font à partir de leurs deux parents, ce qui élargit, à chaque génération, le cercle familial. Leur réseau s'étend en incluant d'autres familles et croît même au-delà des groupes communautaires. Selon B. Chapais, la monogamie et ces liens tissés entre les

un atout pour notre espèce



groupes constituent « deux des caractéristiques essentielles de la société humaine ».

Depuis des décennies, les scientifiques s'efforcent de comprendre les origines et les conséquences de la monogamie humaine. Quand avons-nous commencé à former des couples qui durent toute la vie ? Pourquoi ce mode d'existence présentait-il un avantage ? Et cela a-t-il contribué au succès évolutif de notre espèce ? Ces questions fondamentales restent sans réponses définitives à ce jour et sont très débattues. Mais à la lumière de travaux récents, on commence à percer le mystère.

L'ardipithèque, déjà en couple ?

Selon Owen Lovejoy, anthropologue à l'Université d'État de Kent, aux États-Unis, l'étude des fossiles d'hominidés indique que la monogamie serait antérieure à *Ardipithecus ramidus*. Cette espèce est connue depuis la découverte, dans la région de la rivière Awash, en Éthiopie, d'une partie de squelette féminin datant de 4,4 millions d'années, et surnommé « Ardi ». Des hominines aussi anciens étaient-ils déjà monogames ? D'après O. Lovejoy, c'est possible. Quels sont ses arguments ?

La lignée des grands singes et la nôtre se sont séparées il y a plus de sept millions d'années. Nos prédécesseurs auraient adopté trois nouveaux comportements : ils auraient commencé à transporter de la nourriture dans leurs bras, désormais libérés grâce à la bipédie, à former des couples permanents et à dissimuler les signes extérieurs de l'ovulation féminine. Ces innovations auraient, avec l'évolution, permis l'émergence des hominines – la lignée humaine après séparation de celle des chimpanzés.

Selon cette hypothèse d'O. Lovejoy, le mode de reproduction ancestral reposant sur la promiscuité sexuelle a peu à peu cédé le pas à la monogamie lorsque, plutôt que de se battre entre eux, les hominines mâles de rang inférieur se sont mis à rechercher de la nourriture à offrir aux femelles avec lesquelles ils voulaient s'accoupler. Celles-ci ont préféré, plutôt que des prétendants agressifs, les mâles sur lesquels elles pouvaient compter pour se nourrir. Par la suite, les manifestations extérieures des périodes de fécondité des femelles ont disparu, car elles auraient attiré d'autres mâles pendant que leur partenaire sexuel attitré s'absentait pour rechercher de la nourriture.

L'AUTEUR

Blake EDGAR est coauteur de plusieurs ouvrages, notamment *From Lucy to Language*. Il collabore à *Archaeology Magazine*.

En chiffres

Moins de 10 % des mammifères sont monogames.

Entre 15 et 29 % des primates privilégient ce mode d'existence.

Il y a 7 millions d'années, les premiers hominidés sont apparus. Quand sont-ils devenus monogames ? On l'ignore.

80 % des sociétés humaines actuelles autorisent la polygynie.

60 à 80 % des foyers dans ces sociétés sont cependant monogames de fait.

Quand la transition vers la monogamie s'est-elle produite ? Pour étayer son scénario, O. Lovejoy attire l'attention sur les dents d'*Ar. ramidus*. La taille de ses canines, chez le mâle et chez la femelle, ne présente pas de grandes différences. Dans le cas des primates, fossiles ou modernes, les canines des mâles sont plus grandes que celles des femelles, car ces dents servent d'armes dans leurs combats pour la reproduction. Observez les canines d'un gorille, puis comparez-les aux nôtres. Chez les humains des deux sexes, ces dents sont relativement petites, un trait caractéristique de tous les hominines, y compris les premiers spécimens d'*Ardipithecus*. Selon O. Lovejoy, *Ar. ramidus* et les autres hominines monogames n'avaient plus besoin de telles armes, d'où la réduction de la taille des canines au fil de l'évolution.

Une certaine corrélation existe aussi entre le comportement reproductif des primates et le dimorphisme sexuel (la différence morphologique entre les mâles et les femelles d'une même espèce). Plus une espèce de primates est dimorphe, plus il est probable que les mâles se battent entre eux pour obtenir les faveurs d'une femelle. Par exemple, les gorilles mâles, polygynes, sont deux fois plus corpulents que les femelles (*voir la figure 1*). En revanche, les gibbons, monogames pour la plupart, ont des poids presque identiques chez les deux sexes. En matière de dimorphisme, les humains sont plus proches des gibbons : les hommes ont un poids qui dépasse d'au plus 20 % celui des femmes.

L'interprétation des fossiles a toutefois ses limites. Le paléoanthropologue Michael Plavcan, de l'Université de l'Arkansas, appelle à la prudence : entre les os fossilisés et le comportement social des hominines, il y a un pas qu'on ne peut pas toujours franchir.

Considérons le cas d'*Australopithecus afarensis*, l'espèce à laquelle appartenait « Lucy » et qui vivait il y a entre 3,9 et 3 millions d'années. Comme *Ardipithecus*, *Au. afarensis* avait de petites canines, mais son squelette révèle un niveau de dimorphisme intermédiaire entre celui des chimpanzés et celui des gorilles modernes. Le dimorphisme de la taille corporelle suggère que les mâles d'*Au. afarensis* se battaient pour les femelles, tandis qu'une absence de dimorphisme au niveau des canines indique que ce n'était pas le cas, précise M. Plavcan. Que conclure de ces observations contradictoires ?

© Pour la Science - n° 445 - Novembre 2014

1. LE GORILLE DES MONTAGNES mâle à dos argenté *(à droite)* dirige sa troupe au Rwanda. Les gorilles sont polygames. Ils vivent en petits groupes composés d'un mâle dominant, de plusieurs femelles et de leurs petits

De nombreux autres anthropologues contestent aussi le scénario de O. Lovejoy. Selon eux, d'autres facteurs que la recherche de nourriture ont pu favoriser la monogamie, et peut-être bien plus tardivement. En 2013, B. Chapais a publié des arguments montrant que les caractéristiques propres à la famille et à la structure sociale des humains (monogamie, liens de parenté à travers les deux parents, expansion du cercle des relations sociales) sont apparues par étapes successives.

Selon B. Chapais, les hominines mâles et femelles avaient initialement, comme les chimpanzés, plusieurs partenaires sexuels et des relations instables, de courtes durées. Puis s'est amorcé un processus de transition vers la polygynie avec des liens sexuels stables, que l'on retrouve chez les gorilles par exemple. Or entretenir plusieurs partenaires mobilise beaucoup d'énergie. Il faut lutter contre les autres mâles et surveiller les femelles. La monogamie a peut-être été la stratégie permettant de réduire les efforts requis par la polygynie *(voir l'encadré page 68)*.

B. Chapais refuse de spéculer sur le moment où s'est opéré ce tournant et sur l'espèce concernée. D'autres chercheurs suggèrent que cela s'est produit il y a entre 2 et 1,5 millions d'années, bien après l'émergence du genre *Homo*, et simultanément aux changements physiques qui se sont manifestés chez *Homo erectus*. Comparé à ses prédécesseurs, *H. erectus* avait un corps beaucoup plus imposant, avec des proportions plus proches de celles de l'homme moderne. Il était environ deux fois plus grand que Lucy et ses semblables. De même, *H. erectus* semble présenter moins de dimorphisme sexuel que les australopithèques et les premiers *Homo*. Il atteignait un degré de dimorphisme similaire à celui des hommes modernes.

Homo erectus, probablement monogame

Ces indices suggèrent que *H. erectus* avait un mode de vie nettement moins fondé sur la rivalité que celui de ses ancêtres. Dans la mesure où les primates mâles et femelles de taille corporelle similaire ont tendance à être monogames, la physionomie d'*H. erectus* traduirait aussi un comportement sexuel plus exclusif.

Si les chercheurs peinent à se mettre d'accord sur le moment où les humains sont devenus monogames, il y a peu de chances qu'ils s'entendent sur les raisons d'un tel bouleversement. En 2013, deux équipes ont, indépendamment l'une de l'autre, publié des études statistiques à partir des travaux scientifiques déjà publiés, afin de déterminer les comportements qui auraient pu conduire à la monogamie chez les mammifères en général et les primates en particulier. Les deux études visaient à trouver, parmi trois hypothèses – l'espacement territorial entre les femelles, la volonté d'éviter l'infanticide et le soin paternel –, celle la mieux à même d'expliquer l'émergence de la monogamie. Les chercheurs sont parvenus à des conclusions différentes...

D'après la première hypothèse, la monogamie s'est imposée quand les femelles ont commencé à avoir besoin de ressources alimentaires plus riches, mais rares (telles que des carcasses ou des fruits mûrs, riches en protéines). Les femelles ont occupé des territoires plus vastes afin d'avoir accès à davantage de nourriture, mettant ainsi plus de distance entre elles. Pour le mâle, il est devenu de plus en plus difficile d'entretenir plusieurs femelles, d'en trouver de nouvelles et de les isoler des autres mâles. S'établir avec une seule femelle aurait donc facilité la vie du mâle. Le mâle réduisait aussi le risque d'être blessé en parcourant son territoire et il pouvait plus facilement s'assurer que les petits de sa partenaire étaient bien les siens.

Les zoologistes Dieter Lukas et Tim Clutton-Brock, de l'Université de Cambridge au Royaume-Uni, ont trouvé des indices en faveur de cette hypothèse dans une analyse statistique portant sur 2545 espèces de mammifères. Ils ont construit un arbre

LA POLYGYNIE A L'ORIGINE DE LA MONOGAMIE ?

Chez l'homme, la monogamie est le type d'union le plus répandu, même si 80 % des sociétés autorisent la polygynie. En outre, la promiscuité sexuelle est très [illegible] primates, mais seul l'homme les combine. Comment ce système a-t-il évolué ?

Les anthropologues qui s'intéressent à cette question soulignent une autre spécificité humaine : la collaboration parentale, qui se manifeste par l'approvisionnement mutuel des conjoints et par celui des enfants, assuré jusque tard dans l'adolescence. Quels facteurs évolutifs ont conduit à ces spécificités ?

Nos plus proches parents, les chimpanzés et les bonobos, pratiquent la promiscuité sexuelle au sein de communautés multimâles-multifemelles. Comme on retrouve ce trait chez l'homme, il est probable qu'il caractérisait l'ancêtre commun aux humains et aux chimpanzés et que la monogamie a évolué ensuite dans la lignée humaine.

La plupart des théories échaudées sur le sujet supposent que les hominines sont passés directement de la promiscuité sexuelle de type chimpanzé à la monogamie, et que la transition s'est effectuée en réaction à une augmentation importante du coût de la maternité (due, par exemple, à l'accroissement du volume du cerveau et à sa conséquence, l'allongement de la période de croissance et de dépendance des enfants – la mère devant désormais approvisionner plusieurs enfants d'âges divers). La monogamie serait née des avantages que procurait la contribution paternelle dans ce contexte. Cependant, des chercheurs ont montré récemment *(voir l'article de Blake Edgar)* que les soins paternels ne sont pas la cause, mais bien la conséquence de l'évolution vers des liens sexuels stables.

De plus, la modélisation du passage direct de la promiscuité sexuelle à la monogamie repose sur des spéculations difficiles à étayer. Elle implique qu'un grand nombre de comportements ont changé de façon concomitante : l'alimentation des mères par les mâles, le choix de nourrir seulement une femelle, d'échanger les aliments contre des faveurs sexuelles...

Ainsi, cette transition en une seule étape apparaît peu probable. Une séquence plus réaliste postule un stade intermédiaire entre la promiscuité sexuelle et la monogamie : la communauté d'unités polygynes, comme chez le babouin hamadryas, où des mâles monopolisent chacun un certain nombre de femelles, privant ainsi les autres mâles de femelles. Plusieurs données provenant de la phylogenèse comparée des sociétés de primates, de la socioécologie et de la paléoanthropologie indiquent que la transition promiscuité-polygynie est vraisemblable et qu'elle rend compte de l'instauration du lien sexuel stable sans faire intervenir les soins paternels.

Si, par conséquent, la monogamie dérive de la polygynie, les modèles sur son origine doivent expliquer non pas le lien sexuel stable – acquis lors de la transition promiscuité-polygynie – mais la réduction du nombre de femelles par mâle. Les causes sont donc à rechercher dans les facteurs qui ont pu augmenter les coûts de la polygynie. À cet égard, plusieurs facteurs indépendants ont pu cumuler leurs effets. J'en mentionnerai trois.

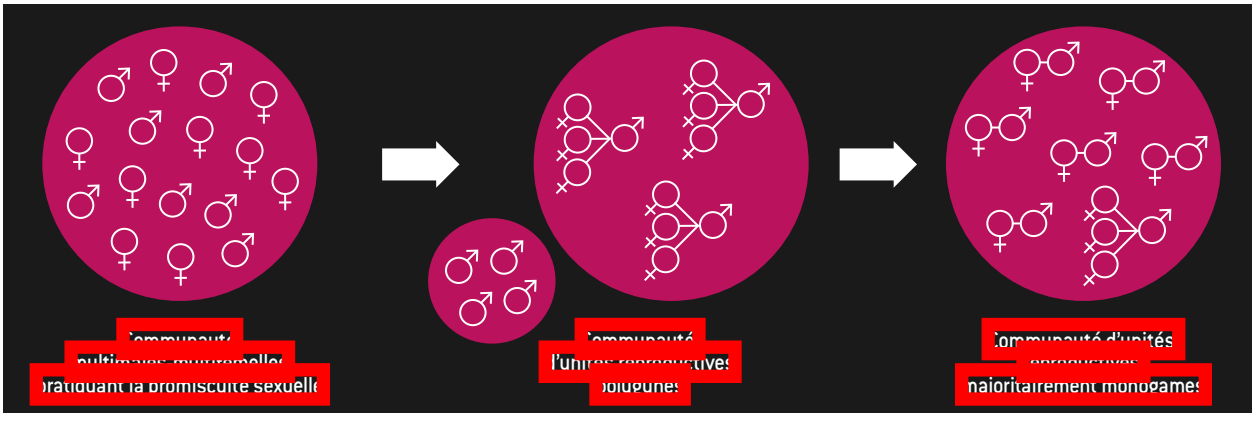
Avec l'augmentation des coûts de la maternité, un mâle pouvait difficilement approvisionner plusieurs femelles et leurs enfants de façon efficace et il devenait alors avantageux pour une femelle de préférer le mâle ayant le moins de femelles. Cette pression sélective aurait favorisé les mâles les moins polygynes et abouti à la monogamie.

Un autre facteur est l'expansion considérable des activités de coopération entre mâles pendant l'évolution humaine (chasse, alliances intra-groupes lors de conflits inter-groupes...). En rendant les mâles beaucoup plus interdépendants, la coopération rendait la compétition sexuelle plus dommageable socialement et créait une pression sélective pour la monogamie.

Un troisième facteur est lié à l'invention des armes et leur utilisation dans le but de blesser ou tuer un congénère. Comme un mâle habile dans le maniement des armes pouvait désormais infliger des blessures sérieuses à un mâle physiquement plus fort, il devenait beaucoup plus risqué pour un mâle de monopoliser plusieurs femelles. Une répartition égale des femelles entre les mâles – la monogamie – limitait les conflits.

Compte tenu de la multiplicité de coûts de la polygynie généralisée et de leurs effets cumulés, celle-ci devenait difficilement viable. La séquence promiscuité-polygynie-monogamie présente en outre l'avantage d'expliquer la présence des trois composantes dans le système de reproduction humain actuel : elles feraient partie de notre héritage évolutionnaire.

– Bernard Chapais
Université de Montréal



© Pour la Science - n° 445 - Novembre 2014

phylogénétique pour établir les relations de parenté entre les espèces. Ils ont ensuite indiqué le mode de vie des mammifères, selon que les femelles sont solitaires (avec un mâle qui partage le territoire de plusieurs femelles), vivent en couple ou en groupe. Puis les chercheurs ont mis en évidence que, au cours de l'évolution, 61 transitions vers la monogamie se sont produites, le plus souvent chez des carnivores ou des primates, ce qui suggère qu'une espèce tend à être monogame lorsque les femelles ont un régime composé d'aliments riches et rares. Ces résultats confortent l'idée qu'un mode de vie solitaire des femelles, de plus en plus éloignées les unes des autres, a incité les mâles à ne s'accoupler qu'avec l'une d'entre elles et à rester auprès d'elle.

D. Lukas reconnaît que si cette idée s'applique bien à certains mammifères, ce n'est sans doute pas le cas pour les humains. En effet, le caractère social de ces derniers paraît difficilement compatible avec une hypothèse qui repose sur la faible densité territoriale des femelles. Nos ancêtres avaient peut-être déjà développé un caractère trop social pour que les femelles s'éparpillent dans la savane comme d'autres mammifères. Cependant, l'hypothèse pourrait s'appliquer aux humains si la monogamie avait déjà cours chez les hominines avant que notre tendance à vivre en groupe se développe.

La deuxième hypothèse sur l'origine de la monogamie invoque la menace qui pesait sur les petits. Si un rival défiait ou supplantait un mâle dominant au sein d'un groupe, l'usurpateur pouvait tuer les petits qui n'étaient pas les siens. Les mères n'allaitant plus, elles recommençaient à ovuler, offrant ainsi au maraudeur l'occasion d'assurer sa propre descendance. Pour empêcher ces infanticides, la femelle aurait choisi un allié mâle capable de la défendre, elle et ses petits. Cette protection était d'autant plus difficile à assurer que le mâle avait plusieurs femelles à protéger.

L'anthropologue Kit Opie, de l'*University College* à Londres, apporte des éléments étayant cette thèse relative à l'infanticide. Avec ses collègues, il a réalisé des simulations numériques de l'histoire évolutionnaire de 230 espèces de primates. Puis il a utilisé une analyse statistique pour déterminer quel facteur semblait à l'origine de la monogamie. Il a constaté une corrélation significative entre la monogamie chez les primates et les différents facteurs imaginés. Cependant, seule une augmentation de la menace liée à l'infanticide précédait systématiquement l'apparition de la monogamie dans plusieurs lignées de primates.

La biologie et le comportement des primates modernes viennent conforter cette conclusion que le risque d'infanticide favorise la monogamie. La menace pesant sur les petits concerne surtout

L'ÉMERGENCE DE LA MONOGAMIE pourrait être liée à trois facteurs différents : l'espacement territorial entre les femelles, la volonté d'éviter l'infanticide et le soin paternel

es primates : ils ont de gros cerveaux qui mettent du temps à se développer et qui les rendent dépendants et vulnérables longtemps après la naissance. Or l'infanticide a été constaté chez plus de 50 espèces de primates, presque tous non monogames. D'où une question qui reste sans réponse : si l'hypothèse de l'infanticide est correcte, pourquoi n'y a-t-il pas plus de primates monogames ? La question est d'autant plus pertinente que, chez le gorille par exemple, la part de l'infanticide sur la mortalité des petits représente 34 %.

La troisième hypothèse relative à l'émergence de la monogamie concerne l'acquittement par les mâles de leur devoir de père. Lorsqu'un petit commence à exiger trop d'énergie et de nourriture pour sa mère qui l'élève seule, le père, s'il vit avec eux et fournit la nourriture et d'autres soins, accroît les chances de survie du petit et favorise le resserrement de ses liens avec la mère.

L'anthropologue Lee Gettler, de l'Université Notre-Dame aux États-Unis, donne un exemple. Selon lui, le seul fait que le père porte ses petits favoriserait la monogamie. En effet, les mères doivent fournir beaucoup de nourriture à leurs petits. Or, pour les primates ou les humains chasseurs-cueilleurs, transporter un bébé entraîne une dépense d'énergie comparable à celle exigée par l'allaitement. Le fait que les mâles soient devenus disponibles pour porter les petits a pu libérer les femelles pour qu'elles puissent elles-mêmes subvenir à leurs besoins énergétiques en allant chercher de la nourriture. Ainsi, elles s'alimentent mieux et commencent à se reproduire plus tôt dans la saison. Elles vivent aussi plus longtemps en moyenne. La monogamie sera ainsi sélectionnée.

Les soins paternels renforcent la monogamie

Les douroucoulis d'Azara, singes d'Amérique du Sud *(voir la figure 2)*, constituent un exemple pouvant aider à comprendre comment des soins paternels renforceraient la monogamie. Ces singes vivent en petits groupes familiaux constitués du père, de la mère, d'un bébé et d'un ou deux jeunes. La mère porte le bébé sur sa hanche juste après la naissance, mais le père assume presque la totalité des soins apportés au petit dès l'âge de deux semaines : il lui fait sa toilette, joue avec lui, le nourrit et le porte. Les deux adultes restent littéralement en contact, avec leur queue. Le simple fait que le mâle demeure aussi proche de la femelle et de son petit renforcerait les liens affectifs.

2. LE DOUROUCOULI D'AZARA, singe vivant en Amérique du Sud, est monogame. Le père se charge en grande partie des soins apportés aux petits.

Une étude génétique publiée cette année par quatre chercheurs, dont Eduardo Fernandez-Duque, de l'Université Yale, fournit la preuve que le douroucouli est monogame. L'ADN prélevé sur plusieurs groupes a révélé que sur 17 couples, toutes les femelles et tous les mâles, sauf un, étaient très vraisemblablement les parents biologiques de leurs 35 petits respectifs. Les couples chez les douroucoulis durent en moyenne neuf ans, et ceux qui demeurent avec le même partenaire se reproduisent plus fréquemment, un avantage décisif pour ce mode de relation.

Que nous disent l'étude statistique de K. Opie et ses collègues et celle de D. Lukas et T. Clutton-Brock sur l'hypothèse relative aux soins apportés par le père à sa progéniture ? Elles indiquent que la sollicitude paternelle est le facteur le moins déterminant parmi les trois hypothèses pour expliquer l'émergence de la monogamie. Cependant, affirme D. Lukas, « le soin paternel peut tout de même expliquer pourquoi une espèce *reste* monogame. »

La question des facteurs de l'émergence de la monogamie est donc encore ouverte. Une autre question est le bénéfice qu'aurait apporté la monogamie dans l'évolution de l'homme.

Sarah Hrdy, de l'Université de Californie à Davis, s'est intéressée à l'énergie nécessaire pour élever un humain : un bébé consomme quelque 13 millions de calories de sa naissance à l'âge de sa maturité. Pour une mère seule, la tâche est lourde. La monogamie avec la présence du père a permis d'augmenter l'apport de nourriture, mais cela reste insuffisant. Le pas décisif, que l'on observe dans de nombreuses sociétés humaines, a été franchi quand la mère a pu compter sur ses proches (sa famille et celle de son conjoint, ou d'autres

© Pour la Science - n° 445 - Novembre 2014

membres de son entourage) pour l'aider à nourrir l'enfant et à en prendre soin. « Les mères humaines laissent les autres porter leur bébé dès la naissance », note S. Hrdy, « c'est surprenant et tout à fait contraire à ce que font les singes. » En effet, aucun d'eux ne recourt à l'aide de ses proches pour s'occuper de ses petits.

H. erectus avait un corps et un cerveau beaucoup plus gros que ceux de ses ancêtres. Selon S. Hrdy, s'il a commencé à emprunter la voie humaine du développement tardif et de la dépendance prolongée, la coopération familiale a pu être la clé pour fournir l'énergie nécessaire aux soins des petits.

L'entraide sociale, un élément clé

Sans cette coopération, concluent Karin Isler et Carel van Schaik, tous deux à l'Université de Zurich, les premiers *Homo* n'auraient pas pu franchir la limite des 700 centimètres cubes qui caractérise le cerveau des singes. Pour s'acquitter du coût énergétique requis par un plus gros cerveau, un animal doit réduire son taux de natalité ou son taux de croissance, ou les deux à la fois. Or les humains sont parvenus à des périodes de sevrage plus courtes et à une meilleure capacité de reproduction que les animaux pourvus d'un cerveau dont le volume atteint 1 100 à 1 700 centimètres cubes. K. Isler et C. van Schaik attribuent cette performance à l'entraide sociale et familiale qui aurait permis à *H. erectus* d'avoir des petits plus souvent tout en leur procurant l'énergie nécessaire au développement de leur cerveau.

La coopération, d'une part sous la forme du couple monogame et, d'autre part, provenant de la famille nucléaire ou de la tribu, a permis aux humains de se développer avec succès, alors que nos ancêtres se sont éteints. La coopération pourrait bien être la plus grande compétence que nous ayons acquise au cours des deux derniers millions d'années – une compétence qui a permis à notre très jeune espèce de survivre aux changements et au stress environnementaux, et qui pourrait bien être déterminante pour notre avenir.

BIBLIOGRAPHIE

- J. Lukas et T. H. Clutton-Brock, **The evolution of social monogamy in mammals**, *Science*, vol. 341, pp 526-530, 2013.
- C. Opie *et al.*, **Male infanticide leads to social monogamy in primates**, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 110(33), pp. 13328-13332, 2013.
- B. Chapais, **Monogamy, strongly bonded groups, and the evolution of human social structure**, *Evolutionary Anthropology*, vol. 22(2), pp. 52-65, 2013.
- C. O. Lovejoy, **Reexamining human origins in light of *Ardipithecus ramidus***, *Science*, vol. 326, pp. 74, 2009

Quand est apparue la richesse ?

Valérie Lécrivain et Geoffroy de Saulieu

Pour l'anthropologue Alain Testart, la richesse n'a pas toujours existé. Elle serait apparue afin d'éviter de payer de sa personne, et non pour échanger des biens.

Qu'est-ce que la richesse ? Pour l'anthropologue français Alain Testart disparu en 2013, il s'agit de « tout objet matériel utile à l'homme susceptible d'appropriation, de conservation, de thésaurisation ou d'échange. » Aujourd'hui, la richesse monétaire est la forme de richesse qui domine dans nos sociétés ; elle fait l'objet de vifs débats, en raison de sa volatilité, de ses rapports problématiques avec la réalité économique qui semblent ébranler le monde périodiquement… Plus rassurante semble la richesse matérielle, et plus rassurante encore est la richesse foncière, c'est-à-dire la possession de terres. Nous sommes habitués à une société dans laquelle toutes ces formes de richesse peuvent s'acquérir. Leur caractère désirable nous semble d'une telle évidence que nous pensons que la richesse a toujours existé. Rien n'est plus faux, comme nous allons le voir en suivant la pensée de Testart.

Dans son dernier ouvrage *Avant l'histoire : l'évolution des sociétés, de Lascaux à Carnac*, Testart propose une histoire évolutive des sociétés où l'invention de la richesse constitue une sorte de palier évolutif. Une fois celui-ci atteint, on assiste à l'apparition de sociétés sédentaires, dont certaines adopteront l'agriculture et l'élevage, c'est-à-dire entreront dans l'ère néolithique. Les deux grandes innovations qui définissent le Néolithique – la sédentarité et le système agropastoral – n'ont pas été adoptées au même moment ni dans le même ordre dans les différentes régions du monde. C'est pourquoi la richesse serait apparue il y a quelque 10 000 ans en Afrique et au Proche-Orient, avant d'arriver en Europe, tandis qu'en Asie son invention se serait produite avant le Néolithique ; dans les autres régions, elle est plus récente.

Quand la richesse ne sert pas à se nourrir

Partout cependant, l'entrée d'une société dans le Néolithique a été précédée, accompagnée ou suivie par l'apparition de la notion de richesse. Dès lors, nous explique Testart, il a existé (et il existe sans doute encore) des sociétés sans richesse, même si l'on y confectionne des objets beaux et complexes. Afin de repérer la richesse au sein des sociétés préhistoriques, Testart propose de considérer la piste de l'ostentation, nous faisant découvrir par là que la richesse n'est pas l'apanage des sociétés agricoles.

Dans ces sociétés, qui constituent la majorité de celles qui ont été ethnographiées, la richesse existe presque toujours, mais pas de la façon qui nous est familière. Le plus souvent, les ethnologues ont constaté que son usage n'est pas d'ordre matériel ; par exemple, elle ne peut servir à se procurer de la terre, car celle-ci n'est pas aliénable – elle ne peut être ni vendue ni donnée, et l'on n'en dispose que si on l'utilise. La richesse existe, mais n'est pas indispensable à l'individu pour assurer sa subsistance, puisque chacun est cultivateur et tire son alimentation du sol. Ni le salariat, ni le fermage, ni le métayage ne se développent, et aucune classe de propriétaires fonciers n'apparaît. La richesse n'a pas la fonction que nous lui connaissons, la division du travail étant très peu marquée. Au mieux, elle sert à des échanges sporadiques.

Si la richesse ne sert ni à se nourrir, ni à se procurer des terres, ni à subjuguer autrui, ni à réaliser des échanges mar-

L. CE PENDENTIF scythique du IV^e siècle avant notre ère, est-il de la richesse, de l'ostentation ou les deux ?

L'ESSENTIEL

- Au Paléolithique, la richesse n'existait pas : on payait de sa personne en rendant des services.
- La richesse serait apparue il y a quelque 10 000 ans avec le passage à l'économie de production.
- Toutefois, la richesse avait initialement une utilité non pas économique, mais sociale.
- On peut classer les sociétés humaines en trois « mondes » : *l'un sans notion de richesse, un deuxième à richesse utile socialement et un troisième, le nôtre, à richesse utile économiquement.

chands, à quoi sert-elle dans ces sociétés ? Essentiellement à remplir certaines obligations sociales qui impliquent un paiement stipulé par la coutume ou le droit. Ainsi, la richesse joue en général un rôle crucial dans le mariage. Pour obtenir une épouse, le fiancé doit fournir au père de la mariée ce que les anthropologues nomment, avec des nuances diverses, le « prix de la fiancée » ou la « compensation matrimoniale », c'est-à-dire un certain nombre de biens (*voir l'encadré page 75*).

Comme beaucoup des sociétés en question sont guerrières, la richesse y sert aussi souvent à payer le « prix du sang », c'est-à-dire à dédommager par un certain nombre de biens les parents d'une personne assassinée. Maintes autres situations sont susceptibles d'entraîner des dépenses obligatoires, tels les deuils, les fêtes, les maladies, les amendes (pour adultère ou pour inceste, pour infraction à un tabou...), et ces situations varient d'une société à l'autre.

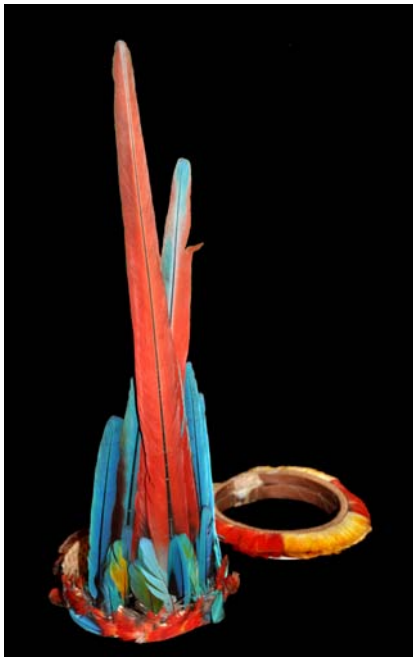
Dans de telles sociétés, qualifiées par Testart de « sociétés d'allure néolithique » car elles font penser par certains aspects aux sociétés agricoles de la préhistoire), la richesse répond à des besoins sociaux et ne sert pas à assouvir des besoins d'ordre matériel. L'ethnographie montre que ces sociétés sont principalement de type agricole ou horticole, mais aussi d'un type plus rare que Testart qualifiait de société de « stockeurs sédentaires » – des groupes de chasseurs-cueilleurs que la pratique du stockage a rendus sédentaires.

Des sociétés sans richesse

La recherche ethnologique a également établi que la richesse ne joue aucun rôle chez les chasseurs-cueilleurs nomades ainsi que chez les horticulteurs tropicaux ne pratiquant pas le stockage. Certes, des biens matériels tels que des arcs, des sarbacanes, des meules, des haches de pierre et des parures, etc. existent dans ces sociétés et y donnent lieu à de petits échanges d'objets ; mais ces biens n'interviennent jamais lors de grands moments de la vie sociale tels que le mariage, la naissance ou les funérailles. Pour obtenir une épouse, un futur mari est redevable de ce que les ethnologues nomment le « service pour la fiancée », c'est-à-dire qu'il devra payer, non pas avec des biens, mais de sa personne en se mettant au service de son beau-père. Dans ce type de mariage, le futur gendre réside chez son beau-père pendant une durée assez longue, souvent des années, au terme de laquelle il a enfin le droit d'emmener sa femme.

Un récit biblique en donne un exemple mythique bien connu. Dans sa jeunesse, le futur patriarche Jacob dut se réfugier chez son oncle Laban dont il découvrit la fille Rachel, qu'il voulut épouser. Toutefois, Laban exigea qu'il épousât d'abord son aînée Léa, de sorte que Jacob dut travailler sept ans pour obtenir Léa, et sept années de plus pour obtenir Rachel.

Dans ces systèmes où la richesse ne joue aucun rôle, l'idée de solder un meurtre en fournissant des biens n'est pas plus admise : la vendetta y est de règle et, là encore, on doit payer de sa personne pour l'accomplir. C'est bien parce que la richesse matérielle ne joue pas de rôle important dans les stratégies sociales (mariage, vendetta, etc.), et encore moins dans l'acquisition du



2. CES COIFFES ACHUAR, de la tribu amazonienne du même nom, ont nécessité un travail considérable et les plumes de nombreux toucans et d'aras. Elles étaient utilisées seulement au cours des fêtes rituelles.

pouvoir, que l'on peut parler avec Testart de sociétés sans richesse.

Cette forte opposition entre sociétés à richesse et sociétés sans richesse ne saurait laisser insensible l'archéologue, car elle nous parle de l'évolution même des sociétés humaines. Dès lors, il importe de se demander comment ces types de sociétés se différencient dans leurs traces archéologiques.

Testart a fait remarquer que les critères utilisés par les archéologues pour identifier la richesse ne sont pas ceux des ethnologues. Les archéologues se fondent en effet sur trois critères essentiels, mais insuffisants, afin de déterminer si un objet constitue une forme de richesse : la rareté de l'objet, le temps qu'a nécessité sa confection et le contexte de sa découverte. Expliquons.

La rareté d'un objet, due aux matériaux dont il est formé (or, pierre précieuse, etc.) ou à sa provenance lointaine, est généralement perçue en archéologie comme le signe de sa forte valeur. Un archéologue mettant au jour des biens exotiques tendra pour cette raison à les considérer comme précieux. Pour l'ethnologue, cette conclusion est trop rapide.

La tendance à collectionner graines, insectes colorés, bois, cailloux, minéraux… beaux et étonnants, bref à faire la collection des objets naturels remarquables, est un trait bien connu de l'être humain, constaté dans toutes les sociétés, depuis la lointaine préhistoire. Ce comportement suffit dans de nombreux cas à expliquer la présence étonnante d'un objet exotique parmi ceux recueillis par les fouilleurs. Ainsi, on a par exemple trouvé des outils paléolithiques taillés dans du silex jaspoïde chatoyant (silex proche du jaspe dans son apparence, donc remarquable) ou encore dans du cristal de roche ou des fossiles. Ces productions d'artisans paléolithiques ne sont pas sans rappeler l'habitude qu'avaient certains menuisiers d'autrefois de tailler le manche de leur outil préféré dans un bois précieux.

De même, les coquillages que trouvent souvent les archéologues ne sont pas forcément une forme archaïque de monnaie, ni même de biens d'échange. Ainsi, si les coquillages sont en effet de grande valeur pour les horticulteurs de Nouvelle-Guinée, ils n'en ont aucune chez les chasseurs-cueilleurs australiens, qui les apprécient pourtant beaucoup. Ces exemples montrent que la découverte d'un artefact rare ne signifie pas nécessairement que cet objet ait été précieux et susceptible d'être thésaurisé, ni même qu'il ait constitué une forme de richesse.

Le temps de travail nécessaire pour confectionner un objet est le deuxième indice de richesse pris en considération par les archéologues. Pour autant, si un temps de confection important confère à l'objet un caractère remarquable, cela en fait-il une richesse ? Cet indice n'est ni universel, ni suffisant. Par exemple, la confection de très belles couronnes chez les Indiens d'Amazonie, telles les Achuar (une population jivaro du Pérou et de l'Équateur), nécessite plusieurs dizaines de toucans, dont seulement quelques plumes sont utilisées *(voir la figure 2)*. Même si elles demandent un travail considérable et qu'elles sont très appréciées au sein de cette culture, ces couronnes n'ont jamais constitué une forme de richesse.

De même, si les archéologues calculaient le temps investi dans la sculpture des magnifiques proues des bateaux des Trobriandais, en Mélanésie, ils interpréteraient sûrement ces proues comme des signes de richesse. Or dans la société trobriandaise, le *nec plus ultra* de la richesse, ce ne sont pas les proues, mais des brassards et des colliers de coquillage assez frustes remis lors des cérémonies *kula*. Même dans les sociétés sans richesse, il peut exister de très beaux objets artisanaux. C'est sans doute dans cette catégorie qu'il faut classer les parures du Paléolithique supérieur européen *(voir l'encadré page 76 et l'article de F. d'Errico et M. Vanhaeren page 78)*.

Archéologie funéraire

Le troisième indice de richesse pour les archéologues est le contexte de la découverte. Il est ainsi fréquent en archéologie de penser que les objets découverts dans une tombe s'y trouvent à cause de leur valeur bien supérieure à celle des objets abandonnés dans les dépotoirs. Ce paradigme entraîne des interprétations du type « mobilier funéraire faible ou peu différencié = société égalitaire ». Pourtant, de nombreux exemples invitent à la prudence.

Par exemple, dans les sociétés de la côte Nord-Ouest de l'Amérique du Nord, la richesse jouait un rôle très important, de sorte qu'il y existait des gens très riches, d'autres très pauvres et même des esclaves. Pour autant, lorsqu'un richissime chef venait à mourir, seuls quelques objets personnels de peu de valeur l'accompagnaient dans

LES AUTEURS

Valérie LECRIVAIN est anthropologue et vice-présidente de la Société des amis d'Alain Testart.

Geoffroy DE SAULIEU, archéologue, travaille à l'Institut de recherche pour le développement (IRD), UMR 208.

© Pour la Science - n° 445 - Novembre 2014

'au-delà, et l'on ne plaçait pas dans la tombe es plaques de cuivre ouvragées qui, dans es sociétés, constituaient le summum de a richesse. Ces plaques de cuivre étaient lutôt distribuées aux convives au cours des potlatchs, des cérémonies funéraires hautement ostentatoires.

Ostentation, dépense et dépendance...

Ce dernier cas explique pourquoi, dans 'identification archéologique de la richesse, Testart a proposé de se laisser guider par 'ostentation. Les comportements ostentatoires sont bien connus en anthropologie sociale, où l'on fait souvent état de notions telles que la dépense ostentatoire, l'évergétisme (donations à une collectivité motivées par un esprit de civisme), les fêtes du mérite, etc. L'ostentation prend ainsi des formes différentes selon les sociétés. Elle s'observe lors des fêtes de village où sont échangés de nombreux biens de grande valeur, comme au cours du *kula* des habitants des îles Trobriand ou du potlatch des Amérindiens de la côte Nord-Ouest de l'Amérique du Nord. En Asie et en Indonésie, elle se rencontre plus particulièrement là où l'on érige des monuments tels que des mégalithes.

Testart a montré que la dépense ostentatoire est l'un des critères permettant de distinguer ce qu'il nomme le monde I, à savoir le monde sans richesse, du monde II, le monde marqué par la richesse *(voir l'encadré ci-dessous)*. Le repérage de l'ostentation est crucial, car il indique de quelle façon la richesse circule. Que faire en effet de la richesse une fois que toutes les obligations sociales (telles que les paiements du mariage et des funérailles, les compensations pour meurtre) ont été accomplies ? Où placer ce surplus de richesse ? À quoi pourrait-il encore servir ?

Dans une société à richesse monétaire, comme la nôtre, il peut servir à acquérir toutes sortes de services et de biens, y compris des terres. Toutefois, comme nous l'avons déjà évoqué, ce n'est pas le cas dans la plupart des sociétés ethnographiées où tous leurs membres sont cultivateurs et où la division du travail est peu marquée. Il n'y est possible ni de convertir le surcroît de richesse en terres, ni de le convertir en moyens de production importants, lesquels peut ni fabriquer ni se procurer lui-même. Ces biens standardisés constituent une sorte de monnaie ou « quasi-monnaie ». Bien que la richesse permette de s'affranchir de certaines dépendances parentales, et soit d'une certaine manière un facteur de liberté, elle est, presque en même temps, un facteur de dépendance économique : seul celui qui est suffisamment riche pour donner les biens lors de son mariage se trouve libéré ; les autres ne se marient pas, ou bien s'endettent auprès de plus riches

BIBLIOGRAPHIE

A. Testart, **Avant l'histoire. L'évolution des sociétés, de Lascaux à Carnac**, Gallimard, 2012.

A. Testart *et al.*, **Les esclaves des tombes néolithiques**, *Pour la Science* n° 396, octobre 2010.

H. Memel-Fotê, **L'esclavage dans les sociétés lignagères de la forêt ivoirienne (XVII^e-XX^e siècle)**, Cerap-IRD, 2007.

A. Testart, **Eléments de classification des sociétés**, Errance, 2005.

Un monde sans richesse, deux mondes à richesse

Selon l'existence de la richesse ou son absence dans les sociétés, Alain Testart décrit trois grandes catégories de sociétés qu'il qualifie de « mondes ». Le monde I est u[...] nomades (aborigènes d'Australie, San, etc.) et par certains horticulteurs, tels ceux d'Amazonie.

Ce monde sans richesse est tout en services et en droits personnels. Les mondes II et III comprennent uniquement des sociétés à richesse : le premier (monde II) se rencontre parmi les agriculteurs ou horticulteurs (Trobriandais, Naga...) et chasseurs-cueilleurs sédentaires stockeurs (Indiens de la Côte Nord-Ouest de l'Amérique du Nord, de Californie...) ; le second (monde III) correspond à divers empires anciens ainsi qu'aux sociétés des deux derniers siècles de l'histoire de l'humanité.

Dans le monde II, la richesse est instituée quand le détenteur d'une obligation sociale (tel le père d'une jeune femme à marier) accepte de recevoir des produits matériels durables à la place du travail.

Dans ce monde, les paiements peuvent être exorbitants : chez les Nuer, au Soudan, le prix traditionnel de la fiancée était de 20 vaches, alors que le nombre de vaches par habitant était à peine supérieur à un lorsque l'ethnologue britannique Evan Evans-Pritchard étudia cette population (*Les Nuers*, 1937).

Ce versement est d'autant plus contraignant que l'époux doit fournir des biens qu'il ne

CE BERGER NUER surveille un troupeau de vaches, principale forme de richesse chez les Nuer.

3. DANS CETTE TOMBE DE LA CULTURE DE MUNZIGEN (IV^e millénaire avant notre ère), l'individu en position fœtale *(à droite)* joue un rôle prééminent. Avec lui ont été enterrés un adulte *(sous lui)* et deux enfants, tous jetés sans soin dans la tombe. Des accompagnants sacrifiés ?

Sungir, un monde sans richesse au Paléolithique

Dans le passé, on pensait que le dénuement des chasseurs-cueilleurs du Paléolithique impliquait qu'ils vivaient au sein de sociétés égalitaires. Les dépôts paléolithiques ont fait dire depuis à certains archéologues que les sociétés du Paléolithique étaient plutôt des sociétés traversées par des inégalités.

Le plus étonnant de ces dépôts est celui de Sungir en Russie méridionale, daté de 28 000 ans : il s'agit de la tombe d'un homme et de deux enfants inhumés avec des parures en perles d'ivoire et des armes. Selon l'archéologue Randal White, les 10 000 perles des enfants correspondent à plus de 9 000 heures de travail. Si ces milliers de perles nous semblent somptuaires, rien, selon nous, ne permet de dire qu'elles l'étaient vraiment. Comme l'a souligné Alain Testart, « il peut y avoir des biens importants et rares dans des tombes (...) sans que ces biens représentent une richesse pour ceux qui les ont déposés, et sans que ces biens traduisent des inégalités de fortune ». En outre, l'ivoire n'était ni rare ni précieux au Paléolithique, puisque de nombreux troupeaux de mammouths occupaient alors l'Eurasie. Le seul critère du temps de travail est inopérant dans un contexte visiblement exceptionnel. L'accumulation de parures sur les enfants peut être la preuve de l'affection qu'on leur portait, ou liée au caractère exceptionnel ou dramatique de leur mort. Telle l'histoire de ce couple Eskimo Caribou, mentionné par l'explorateur canadien Farley Mowat (1953), qui revenait chaque année sur la tombe de son premier enfant, mort en bas âge dans des circonstances tragiques, pour y déposer des biens rares et délicats (jouets taillés, beaux vêtements...). Plus qu'un signe de statut ou de richesse, les milliers de perles en ivoire de Sungir incitent plutôt à nous interroger sur les circonstances particulières des décès, ce qu'illustre le caractère très exceptionnel de ce dépôt.

ont généralement défaut. L'excédent de richesse ne servira pas davantage à acquérir des objets désirables, peu disponibles dans ces sociétés.

C'est pourquoi l'excédent trouve sa meilleure utilisation possible dans les manifestations ostentatoires. Les individus ayant un surplus de richesse l'utilisent pour montrer à tous leur importance sociale, leur prestige, et par là même leur pouvoir. La conversion de l'excès de richesse en prestige est pour ainsi dire la seule stratégie qui s'offre à ces petites classes dominantes.

À ce propos, deux phénomènes liés à l'ostentation complètent les critères classiques et marquent l'irruption de la richesse dans les contextes archéologiques des dix derniers millénaires : le mégalithisme et les morts d'accompagnement. Le mégalithisme est la construction de monuments, funéraires ou pas, qui marquent ostensiblement le paysage. Il est la manifestation de puissance et de richesse d'un individu qui fait étalage de ses dépenses. Il est en outre la marque d'un travail collectif impliquant un long travail spécialisé.

Monuments d'ostentation

Ce monumentalisme commence dès le début du Néolithique. Vers 8700 avant notre ère, au Sud-Est de la Turquie, tandis que l'agriculture naît, une communauté de chasseurs-cueilleurs stockeurs sédentaires aménage un site cérémoniel au lieu-dit aujourd'hui de Göbekli Tepe (la colline au nombril en français). Cet endroit, auquel on attribue la fonction de temple, est parsemé de piliers monolithiques en calcaire taillés en forme de T pouvant mesurer trois mètres de hauteur et peser dix tonnes *(voir la figure 4)*.

En Europe occidentale, reprenant peut-être une tradition mésolithique, les premiers néolithiques d'Armorique érigent très tôt, dès le milieu du V^e millénaire, des mégalithes et des tumulus géants. Par exemple, sur la commune de Plouezoc'h dans le Finistère, le cairn de Barnenez mesure 72 mètres sur 20-25 mètres, avec neuf mètres de hauteur, et comprend 11 chambres funéraires ; au cours de sa construction, 12 000 à 14 000 tonnes de matériau ont été déplacées, ce qui signifie le travail constant d'équipes de spécialistes pendant des dizaines d'années. Qu'un tel mégalithe soit destiné à un seul homme ou à une collectivité a peu d'importance, car l'ethnographie et l'histoire ancienne

© Pour la Science - n° 445 - Novembre 2014

montrent que l'on se glorifie autant d'un projet égoïste que d'une entreprise d'intérêt public.

Autre exemple, le grand menhir de Locmariaquer, dans le Morbihan, a été transporté sur dix kilomètres avant d'être redressé et ancré dans le sol, alors qu'il est long de 20 mètres et pèse 380 tonnes. Testart a fait aussi remarquer que « le tumulus Saint-Michel, près de Carnac, long de 125 mètres, large de 60 mètres, haut de 10 mètres, est une véritable colline artificielle d'un volume de plus de 30 000 mètres cubes implantée sur un des points hauts de la topographie naturelle, […] d'où l'on domine toute la région ».

Quoi de plus ostentatoire que cette mise en scène grandiose nous rappelant encore aujourd'hui à quel point ceux qui ont commandité ces monuments inutiles ont été grands de leur vivant ? Il est clair que ce monumentalisme ostentatoire, très fréquent durant ces 10 000 dernières années, fait contraste avec les données du Paléolithique supérieur.

Le second grand indice archéologique de l'arrivée de la richesse est constitué par le phénomène des morts d'accompagnements. Dans de nombreuses cultures, des Vikings aux Mongols en passant par les Nubiens de Haute-Égypte, les Natchez du Mississipi ou la dynastie Zhou en Chine, on avait l'habitude de déposer dans la tombe d'un riche défunt les corps de dépendants mis à mort lors des funérailles. On constate que le défunt principal est toujours un personnage important, et la victime, une concubine, un serviteur ou un esclave.

Des esclaves sacrifiés

L'archéologue australien Gordon Childe (1892-1957) et beaucoup d'autres à sa suite y ont vu un marqueur de l'émergence des premiers royaumes mésopotamiens au IIIe millénaire avant notre ère, puisque les serviteurs royaux étaient mis à mort le jour de la mort de leur maître. Mais le phénomène apparaît bien avant l'aube des premières civilisations étatiques. Cette même coutume est abondamment attestée par l'ethnographie au sein de nombreuses sociétés non étatiques, telles les sociétés lignagères africaines ou celles de la côte nord-ouest américaine. Autant de sociétés d'allure néolithique où l'esclave, dépendant extrême, est une victime idéale, puisqu'il ou elle ne bénéficie d'aucune protection.

Certes, l'archéologue ne peut retrouver dans ses fouilles ce que l'ethnologue a constaté, d'autant que l'inhumation, parfaite pour la conservation archéologique, est loin d'être une pratique universelle. Malgré ces limitations, force est de constater que la présence de sépultures multiples simultanées, hiérarchisant les défunts par leurs positions relatives, augmente dès le Mésolithique, et surtout au Néolithique.

En 2010, Testart et trois archéologues ont publié dans ces colonnes une enquête archéologique sur les tombes néolithiques d'une vaste zone allant de la vallée du Rhône à la Slovaquie, datées d'entre 4500 et 3500 avant notre ère ; fondées sur des critères d'inhumation tels que la position des corps, celle des offrandes funéraires, etc., leurs analyses de ces nombreuses tombes invitent à penser que des dépendants – des esclaves sans doute – ont été mis à mort pour accompagner dans l'au-delà des personnages importants. Ce cas préhistorique européen est fort semblable aux traditions des sociétés lignagères akans du Sud de la Côte d'Ivoire, telles que les a recueillies l'anthropologue Harris Memel-Fotê (1930-2008) : le chef défunt était inhumé en disposant au préalable les corps de plusieurs esclaves dans le fond de la tombe. Une fois de plus, quoi de plus ostentatoire que vouloir montrer sa puissance jusque dans la mort ?

Au Paléolithique, la richesse n'est pas présente. Le monumentalisme n'apparaît pas non plus chez les chasseurs-cueilleurs nomades. Peut-on dire pour autant que la richesse n'apparaît qu'avec le Néolithique, c'est-à-dire avec l'agriculture ? Non, comme le montre le site de Göbekli Tepe. La richesse ne prend pas naissance avec le Néolithique, mais vient plus largement d'une économie primitive sédentaire et de stockage, c'est-à-dire avec des peuples d'agriculteurs, ainsi qu'avec des chasseurs-cueilleurs sédentaires stockeurs.

Ce phénomène n'est compréhensible que si l'on se souvient que la richesse primitive ne sert pas comme dans nos sociétés à acquérir des biens, mais à s'acquitter d'obligations sociales auxquelles tout individu est contraint de faire face dans sa société (mariage, deuil, amendes…). Pourquoi, en fin de compte, certaines sociétés sans richesse ont-elles évolué et abandonné leur vie sociale ancienne toute en services et en droits personnels ? C'est pour éviter précisément de devoir « payer de sa personne ». La fonction même de la richesse est qu'elle a un caractère libératoire : elle permet au gendre de se libérer des corvées dues au beau-père et au guerrier d'échapper à la vendetta. Ce que les hommes préhistoriques n'avaient pas prévu, c'est que cette « libération » allait nous asservir autrement.

4. LE TEMPLE DE GÖBEKLI TEPE, situé en Turquie, fut édifié il y a plus de 10 000 ans. Dans ce qui est le plus ancien édifice monumental connu, plus de 40 pierres taillées en forme de T de plus de trois mètres de haut et portant souvent des sculptures animales y sont disposées en cercle.

La richesse, question de définition

Francesco d'Errico et Marian Vanhaerer

Si l'on conçoit la richesse comme tout objet ou moyen dotant un individu d'un avantage social, alors la richesse existait au Paléolithique supérieur, voire peut-être avant.

Dans une discussion sur la notion de richesse, tout est question de définition. Si on lie cette notion à celle de biens mobiles – pouvant être échangés ou donnés – et au contrôle de leur production (*voir l'article de V. Lécrivain et G. de Saulieu, page 72*), il est évidemment difficile de l'appliquer à des sociétés de chasseurs-cueilleurs. En revanche, si l'on s'intéresse à cette notion du point de vue de l'individu, c'est-à-dire aux biens considérés comme de valeur par tous, détenus par une ou plusieurs personnes, et dont la possession marque un statut social particulier, on peut avancer que des richesses ont probablement existé au Paléolithique supérieur, c'est-à-dire environ entre 40 000 et 10 000 ans avant notre ère.

Bon nombre d'ethnologues ont longtemps soutenu que les sociétés de chasseurs-cueilleurs sont caractérisées par l'absence d'une division du travail marquée, d'un artisanat spécialisé, de richesses, et d'une stratification sociale autre que celle imposée par les différences naturelles telles que l'âge et le sexe. En d'autres termes, ces sociétés, où l'on nomme au plus un chef informel et temporaire, seraient égalitaires.

Cependant, il a ensuite été montré que des groupes humains qui ne produisaient pas de biens, mais connaissaient une division du travail et un pouvoir religieux ou politique ont bel et bien existé. C'est pourquoi, pour notre part, nous ne pouvons conclure que la richesse était absente chez les chasseurs-cueilleurs paléolithiques. Dès lors, quelle stratégie d'analyse pourrait-on appliquer pour vérifier, dans les données archéologiques, si une société connaissait ou non des formes de richesse ?

La parure, une richesse ?

Il est au moins une forme de richesse qui se prête à pareille analyse : la parure. L'ethnographie montre que chez les chasseurs-cueilleurs connus par l'histoire, les parures sont composées d'objets présentant une ou plusieurs de ces caractéristiques : 1) ces objets sont produits dans des matériaux au moins localement rares ; 2) leur fabrication nécessite beaucoup de temps et de travail ; 3) leur production exige des techniques complexes, maîtrisées seulement par certains membres du groupe ; 4) ils présentent une standardisation de forme et de couleur.

Les trois premiers comportements rendent possible le contrôle de la production d'objets de valeur ; le dernier garantit l'interchangeabilité d'objets ayant la même valeur. Dans les sociétés traditionnelles, le port ostentatoire de parures constituées de nombreux objets exotiques acquis par échange caractérise les individus appartenant à un groupe social dominant.

Selon les sociétés, ces richesses sont héritées, distribuées, échangées, détruites ou abandonnées de façon ritualisée, par exemple lors de funérailles. Les individus ayant accès à ces richesses sont la minorité ; les autres membres peuvent en recevoir, en prêt ou en cadeau, de petites quantités et posséder des biens de moindre prestige, car moins élaborés ou d'origine non exotique. Et les cérémonies, funéraires par exemple, réservées aux gens du commun peuvent être très différentes de celles destinées aux personnages jouissant de privilèges, ou simplement constituer une version simplifiée des premières.

CHEZ LES IBANS, une ethnie dayak de Bornéo, on marque son statut social lors des cérémonies religieuses en arborant de grandes coiffes de plumes. Une forme de richesse ?

Des études transculturelles indiquent que l'appartenance à un groupe social privilégié est souvent marquée par la construction de structures mortuaires durables. Nous devrions par conséquent pouvoir identifier des sociétés complexes du passé par la présence de sépultures associées à de telles structures et à des biens de prestige. Ces sépultures de gens fortunés pourraient y être les seuls témoignages funéraires, ce qui impliquerait que les pratiques funéraires réservées aux peu fortunés sont archéologiquement invisibles ; ou alors, les sépultures des moins fortunés seraient soit dépourvues de mobilier funéraire, soit accompagnées d'un mobilier de moindre prestige incluant de petites quantités d'objets exotiques.

Le mobilier funéraire de certaines sépultures du Paléolithique supérieur répond à ces critères de richesse. La femme inhumée il y a 16 000 ans à Saint-Germain-la-Rivière en Gironde, par exemple, arborait un grand nombre de canines perforées de cerf, malgré l'extrême rareté de cette espèce animale dans les restes de ce gisement et dans les sites contemporains du Sud-Ouest de la France (qui ont des assemblages fauniques dominés par des espèces à caractère steppique : antilope saïga, renne, cheval). Cela indique que ces dents ont dû être acquises au cours d'échanges avec des populations cantabriques ou méditerranéennes, chez qui le cerf a persisté tout au long de la dernière ère glaciaire. Les canines appartiennent presque exclusivement à des jeunes mâles, et de grandes perforations presque identiques y ont été pratiquées, dans l'objectif évident de standardiser pour garantir la valeur d'échange. Les autres habitants de ce site portaient d'autres types de parure, plus simples et d'origine locale, que les archéologues ont découverts en fouillant les couches d'habitat du site.

Les canines qui ornaient la femme semblent donc bien représenter une richesse marquant son appartenance à un groupe ou à un rôle social privilégié. Si l'on suit cette même logique, les trois sépultures richement dotées de perles d'ivoire et vieilles de 28 000 ans découvertes à Sungir en Russie pourraient représenter le plus ancien témoignage archéologique de richesse.

LES AUTEURS

Francesco D'ERRICO, préhistorien, est directeur de recherche au CNRS.

Marian VANHAEREN, préhistorienne, est chargée de recherche au CNRS.

Tous deux travaillent au sein de l'unité mixte de recherche CNRS Université de Bordeaux PACEA.

Si le passage de nos ancêtres arboricoles à *Homo sapiens* a été aussi rapide, c'est grâce à la combinaison d'innovations culturelles et d'aléas climatiques.

Ian Tattersal

L'OUTIL a-t-il forgé l'homme ?

Nous, humains, sommes d'étranges primates. Nous marchons debout, en équilibre précaire, balançant notre corps pesant sur deux pieds courts. Notre tête est étonnamment grosse, munie d'un visage minuscule et de petites mâchoires à l'avant d'une boîte crânienne en forme de ballon. Surtout, nous traitons les informations relatives au monde qui nous entoure d'une façon inédite. Nous déconstruisons mentalement notre environnement et nos expériences intérieures en symboles abstraits, avec lesquels nous produisons de nouvelles versions de la réalité : nous sommes capables non seulement de décrire ce qui est, mais d'envisager ce qui pourrait être. Et à notre connaissance, nous sommes les seuls à le faire.

Nos prédécesseurs n'avaient pas de telles caractéristiques. Le registre fossile montre qu'il y a seulement sept millions d'années, notre précurseur ressemblait aux grands singes, vivait principalement dans les arbres, portait son poids sur quatre membres, et présentait une grande face

prognathe et de puissantes mâchoires à l'avant d'une petite boîte crânienne. Selon toute probabilité, ses capacités cognitives étaient équivalentes à celles d'un chimpanzé moderne. Bien qu'intelligents, pleins de ressources et capables de reconnaître, voire de combiner, des symboles, les grands singes modernes ne semblent pas savoir les réarranger pour construire de nouvelles réalités. Ainsi, le passage de cet ancêtre à notre espèce, *Homo sapiens*, a nécessité une évolution importante et rapide.

Sept millions d'années peuvent paraître une longue période, mais pas pour ce type de transformation. Pour comprendre à quel point le changement a été rapide, il suffit d'observer les espèces de primates proches sur l'arbre évolutif : elles ne présentent en général pas de grandes différences physiques ou cognitives.

En outre, les scientifiques estiment que la longévité moyenne d'une espèce de mammifères est d'environ trois à quatre millions d'années, soit près de la moitié de la période pendant laquelle le groupe des hominines (notre espèce et les espèces proches éteintes) a existé et évolué jusqu'à changer d'apparence. Les histoires évolutives étant constituées d'espèces descendant d'autres espèces plus anciennes, la vitesse de spéciation ou d'introduction de nouvelles espèces a dû considérablement augmenter dans la lignée humaine pour expliquer les modifications radicales observées.

Pourquoi l'évolution au sein de notre famille a-t-elle été si rapide ? Quel mécanisme est à l'origine de cette accélération ? La réponse réside certainement dans la capacité de nos ancêtres à relever les défis en produisant des outils en pierre, des vêtements, des abris, du feu, etc. – c'est-à-dire ce que l'on nomme leur culture matérielle. Les scientifiques ont longtemps considéré que la sélection naturelle avait favorisé les humains archaïques doués de la plus grande capacité à innover et partager leur savoir-faire culturel. Les individus les plus aptes auraient survécu et se seraient mieux reproduits, ce qui aurait entraîné peu à peu des avancées chez l'ensemble des hominines.

Toutefois, ce type de perfectionnement, une génération à la fois, n'aurait pas été assez rapide pour une réorganisation radicale de la lignée humaine en sept millions d'années. À mesure que nos connaissances se précisent sur les changements climatiques des deux derniers millions d'années, un nouveau scénario se dessine : l'évolution de nos ancêtres se serait accélérée sous l'action conjointe d'importantes fluctuations climatiques et de la culture matérielle.

Les outils et d'autres technologies ont probablement permis aux premiers hominines d'occuper de nouveaux milieux, même si, lors des dégradations périodiques des conditions climatiques, ces aides ne pouvaient plus garantir leur survie. Il en a résulté un éclatement de nombreuses populations, permettant un enracinement rapide de nouveautés génétiques et culturelles, ce qui aurait favorisé l'évolution de certains groupes. D'autres ont tout simplement péri et l'espèce qui a finalement prévalu, la nôtre, doit sa victoire autant à des événements fortuits, tels ces changements climatiques, qu'à ses talents.

Malgré son rôle indéniable dans l'avènement de *Homo sapiens*, la culture matérielle n'est apparue qu'assez tardivement dans notre histoire évolutive. Plus de quatre millions d'années avant que nos ancêtres aient appris à utiliser des outils, ils ont d'abord dû abandonner une existence arboricole et s'essayer à la vie au sol, ce qui n'était pas un mince exploit pour un grand singe

L'ESSENTIEL

- La sélection naturelle des individus les plus aptes à innover et à s'adapter ne suffit pas à expliquer l'évolution radicale de la lignée humaine en sept millions d'années
- C'est probablement parce que les avancées culturelles se produisaient sur fond d'instabilités climatiques que l'évolution humaine s'est accélérée.
- La succession de périodes clémentes et rudes a favorisé l'éclatement de groupes qui avaient développé une culture matérielle.
- La compétition entre groupes a fait le reste

1. ENTRE L'EMERGENCE de *Homo habilis*, ici reconstitué par l'artiste Élisabeth Daynès, et celle de *Homo sapiens*, environ deux millions d'années se sont écoulés. Un temps court au regard des transformations observées sur cette période dans le rameau humain.

2. CETTE PLAQUE D'OCRE *(ci-dessus)* de la grotte de Blombos en Afrique du Sud *(ci-contre)*, qui date d'environ 77000 ans, est considérée, avec une autre découverte au même endroit, comme le premier exemple de pensée symbolique. Les motifs gravés sont si réguliers que les paléontologues pensent qu'il s'agit d'informations codées.

pourvu de quatre extrémités agrippantes. Le changement a dû se faire chez un grand singe déjà habitué à se tenir verticalement sur un tronc, qui répartissait le poids de son corps à la fois en le tirant à bout de bras et en le supportant sur ses jambes. De fait, les vestiges archéologiques suggèrent que cette posture a existé chez certains des premiers hominoïdes – la superfamille à laquelle appartiennent les grands singes et les hominines.

L'abandon des arbres a profondément modifié notre anatomie et a ouvert la voie aux adaptations ultérieures de notre lignée, mais il n'a pas accéléré la cadence évolutive des événements. Pendant environ cinq millions d'années après leur émergence, les hominines ont évolué comme tout groupe de primates. Au début, l'arbre de parenté des humains était touffu : de nombreuses espèces coexistaient à un instant donné, et toutes testaient les nouvelles possibilités qu'offrait la marche bipède.

De toute évidence, cette première expérimentation n'a pas conduit à des transformations majeures : durant cette période, tous les hominines semblent avoir été des variations sur un même thème. Répartis entre des milieux boisés et des habitats plus ouverts, ces ancêtres humains avaient conservé un cerveau et un corps de petite taille, ainsi que des proportions corporelles archaïques, avec des jambes courtes et des bras d'une grande mobilité.

L'évolution ne s'est accélérée qu'après l'entrée en scène de notre genre *Homo*, il y a environ deux millions d'années. La culture matérielle l'avait cependant précédé d'au moins un demi-million d'années, sous la forme d'outils en pierre – un argument de poids en faveur de l'idée selon laquelle la culture a joué un rôle important dans notre transformation rapide des grands singes arboricoles, évoluant doucement, à la lignée humaine vivant au sol, à forte capacité évolutive. Des paléontologues ont trouvé en Afrique des outils primitifs en pierre datant d'il y a 2,6 millions d'années, et des preuves encore plus anciennes de marques d'outils sur des os d'animaux. Les hominines les plus anciens ont certainement fabriqué des outils simples, tels que des éclats acérés de pierre.

Malgré leur anatomie archaïque, les premiers fabricants d'outils avaient largement dépassé le niveau cognitif des grands singes. Même après un entraînement intensif, les grands singes modernes ne comprennent pas comment percuter deux pierres afin d'en détacher un éclat de façon délibérée, comme le faisaient les premiers hominines. Ces éclats servaient notamment de couteaux pour découper les carcasses d'animaux herbivores. Ce comportement nouveau implique que les régimes alimentaires des hominines s'étaient vite élargis, passant de ressources principalement végétales à une nourriture à base de graisses et de protéines animales. Cette alimentation plus riche a permis au cerveau, grand consommateur d'énergie, de se développer rapidement chez les membres du genre *Homo*.

L'AUTEUR

Ian TATTERSALL est paléoanthropologue et conservateur émérite du Muséum américain d'histoire naturelle, à New York.

SUR LE WEB

L'atelier de l'artiste Élisabeth Daynès, spécialisée dans la reconstitution des hominines : http://www.daynes.com

BIBLIOGRAPHIE

I. Tattersall, **Masters of the Planet : The Search for Our Human Origins**, Palgrave Macmillan, 2012

I. Tattersall et J. Matternes, **Nombreux hier, seuls aujourd'hui,** dans **Sur la trace de nos ancêtres,** *Dossier Pour la Science*, n° 57, pp. 20-25, octobre-décembre 2007

© Pour la Science - n° 445 - Novembre 2014

Si les scientifiques débattent avec véhémence sur le fossile qui représenterait la plus ancienne incarnation du genre *Homo*, ils s'accordent sur le fait que les premiers hominines présentant des proportions équivalentes aux nôtres sont apparus il y a moins de deux millions d'années. À peu près à la même époque, des hominines se sont répandus dans de nombreuses parties de l'Eurasie à partir de l'Afrique. Ces individus marchaient debout et à grandes enjambées, vivaient dans la savane dégagée, loin de l'abri de la forêt, et avaient très probablement une alimentation riche en ressources animales. Les cerveaux des premiers *Homo* étaient à peine plus volumineux que ceux des premiers bipèdes, mais il y a un million d'années, le cerveau des espèces du genre *Homo* avait déjà doublé et, il y a 200 000 ans, il avait de nouveau presque doublé.

Cette vitesse d'accroissement stupéfiante a été identifiée chez au moins trois lignées indépendantes du genre *Homo* : celles qui ont conduit respectivement à *Homo neanderthalensis* en Europe, à *Homo erectus* en Asie orientale et à *Homo sapiens* en Afrique. Ces tendances parallèles indiquent non seulement que le fait d'avoir un grand cerveau a conféré un avantage de survie, mais aussi que l'augmentation de la taille du cerveau a concerné l'ensemble du genre *Homo* et non pas la seule lignée qui a conduit à *Homo sapiens*. Elle suggère aussi qu'il y a eu une course aux armements des espèces, car l'adoption d'armes à projectiles a fait des différents groupes d'humains les prédateurs les plus dangereux les uns pour les autres au moment même où ils étaient en concurrence pour les ressources.

Instabilités climatiques

L'explication classique du développement rapide du cerveau chez les hominines, privilégiée par les psychologues de l'évolution, est connue sous le nom de coévolution des gènes et de la culture. Ce processus implique l'action constante de la sélection naturelle sur des générations successives d'individus, avec une puissante rétroaction positive de l'innovation dans les sphères biologiques et culturelles. À mesure que des individus dotés de cerveaux plus développés prospéraient au fil des générations, la population serait devenue plus intelligente ; tour à tour, elle aurait produit des outils et d'autres innovations qui auraient contribué à son adaptation encore plus efficace à l'environnement. Dans ce modèle, l'action conjointe des gènes et de la culture au sein d'une même lignée aurait obligé nos prédécesseurs humains à devenir plus intelligents et à adopter un comportement plus complexe et les aurait prédisposés à une évolution plus rapide.

Toutefois, à la réflexion, il a sans doute fallu plus que cela. Une difficulté de ce scénario est qu'il suppose que les pressions de sélection (les contraintes auxquelles les espèces se sont adaptées) sont restées constantes durant de longues périodes. Or le genre *Homo* a évolué pendant une période d'âges glaciaires, au cours de laquelle la calotte glaciaire arctique a périodiquement avancé jusqu'à la latitude de New York et du Nord de l'Angleterre dans l'hémisphère Nord, tandis que l'hémisphère Sud connaissait des périodes d'une extrême aridité. Dans de telles instabilités environnementales, aucune pression de sélection n'a pu

Comment la culture influe sur notre évolution

La culture matérielle n'est pas la seule forme de culture qui a influencé l'évolution humaine. La culture au sens large, c'est-à-dire englobant le social, le politique, [illegible] agit avec notre évolution biologique, et ce par divers mécanismes.

Les premiers travaux qui ont mis en avant cette interaction datent des année 1970. On parlait alors d'évolution bioculturelle : l'homme modifie son environnement et, en retour, subit des pressions de sélection liées au nouvel environnement. Des individus portant une mutation avantageuse survivent mieux, transmettant leur mutation au fil des générations. Ce processus est lent, mais laisse des traces importantes dans notre génome. Par exemple, certains variants génétiques, moins sensibles aux répercussions de la pollution environnementale sur la fertilité humaine, augmentent en fréquence.

Au-delà de ces mécanismes de sélection, la culture agit sur la diversité génétique des populations et donc, à terme, sur leur évolution. Trois mécanismes ont été identifiés. Tout d'abord, dans de nombreuses sociétés, les échanges de conjoints entre les populations ne se font pas au hasard. Ainsi, la langue influe sur les échanges matrimoniaux : nous avons montré que lorsque plusieurs populations de langues différentes coexistent, les échanges entre populations de langues différentes sont réduits. De même, la culture peut contrôler les échanges matrimoniaux à tel point que des flux asymétriques s'opèrent entre populations. Des freins religieux limitent aussi les échanges de conjoints. La culture joue ici sur la différenciation génétique des populations : en modulant les échanges génétiques, elle conditionne les différences génétiques entre populations.

L'organisation sociale agit aussi sur la diversité génétique. Les sociétés ont des règles d'échanges matrimoniaux, de résidence, de filiation. Plusieurs travaux, dont les nôtres, ont montré que lorsque ces règles sont suivies, elles agissent sur la diversité génétique dans et entre les populations.

Enfin, la transmission culturelle du succès reproducteur joue un rôle important. Dans toutes les populations, le succès reproducteur, c'est-à-dire le nombre d'enfants atteignant l'âge de se reproduire, varie d'un individu à l'autre. Souvent, il dépend de facteurs culturels transmis. Par exemple, chez les Yanomami, en Amérique du Sud, un homme de haut statut social a un plus fort succès reproducteur, car il a plus de femmes. Son statut est transmis à son fils qui, à son tour, aura un fort succès reproducteur. Dans nos sociétés, le succès reproducteur dépend de la richesse. Par ce mécanisme, les variants génétiques de certains individus sont mieux transmis que d'autres, non pas pour des avantages biologiques qu'ils conféreraient, mais en tant que passagers pris en auto-stop par la culture.

La culture est donc un facteur important de l'évolution humaine. En modulant notre diversité génétique, elle agit sur notre réservoir de potentialité adaptative – réservoir qui pourra être utile dans un nouveau contexte écologique, vraisemblablement créé par l'homme…

– Evelyne Heyer
UMR 7206, MNHN, Paris

se maintenir. Plus nos connaissances sur ces oscillations climatiques progressent, plus nous réalisons à quel point les anciens environnements de nos ancêtres ont dû être instables. Des carottes extraites des calottes glaciaires et des boues du fond océanique révèlent que l'amplitude des oscillations a augmenté depuis environ 1,4 million d'années. Partout, les populations d'hominines ont donc dû réagir fréquemment à de brusques changements climatiques.

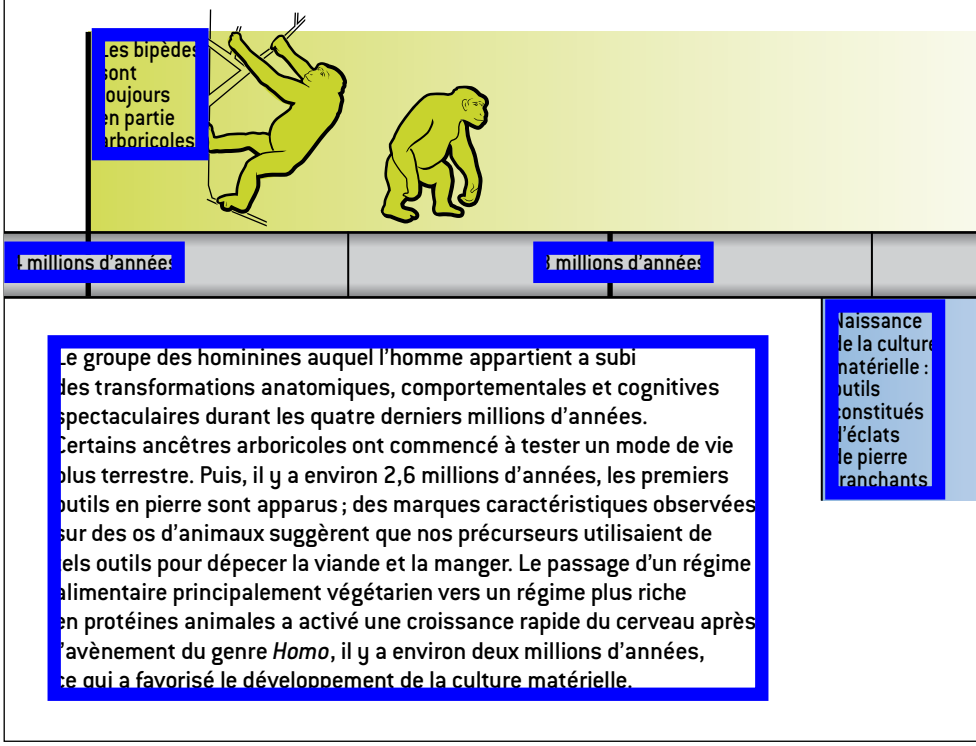
Des innovations sporadiques

Une autre difficulté de l'explication classique concerne le registre matériel lui-même. Au lieu de livrer le récit d'une complexité technologique croissante au cours des deux derniers millions d'années, les découvertes archéologiques suggèrent que l'innovation a été très sporadique. Par exemple, plusieurs centaines de milliers d'années, voire un million, pouvaient s'écouler entre l'introduction de deux nouveaux types d'innovations, et peu d'améliorations avaient lieu entre les deux. Les hominines de cette époque semblent avoir réagi au changement climatique en adaptant les anciens outils à de nouveaux usages, plus qu'en inventant de nouveaux genres d'outils.

Rien ne prouve non plus que les processus cognitifs des hominines se sont perfectionnés continûment au fil du temps. Même lorsque des espèces du genre *Homo* à cerveau plus développé sont apparues, des technologies et des modes de vie plus anciens ont subsisté ; et quand de nouvelles manières de procéder sont apparues, cela s'est produit par intermittence au sein des espèces existantes, et non pas *via* l'introduction de nouvelles espèces.

En particulier, les preuves d'une cognition symbolique moderne ont émergé de façon plutôt soudaine, et très tardivement. Les objets à vocation symbolique les plus anciens répertoriés (deux plaques d'ocre aplanies gravées de motifs géométriques, *voir la figure 2*) sont apparus dans la grotte de Blombos, en Afrique du Sud, il y a environ 77 000 ans, bien après l'entrée en scène de *Homo sapiens* (il y a quelque 200 000 ans). Les motifs étant trop réguliers pour être aléatoires, les paléontologues pensent qu'ils constituent des informations codées. Ces apparitions sont si soudaines qu'elles ne sauraient être la marque d'une avancée intellectuelle graduelle, au fil des générations.

UNE HISTOIRE DE L'INNOVATION



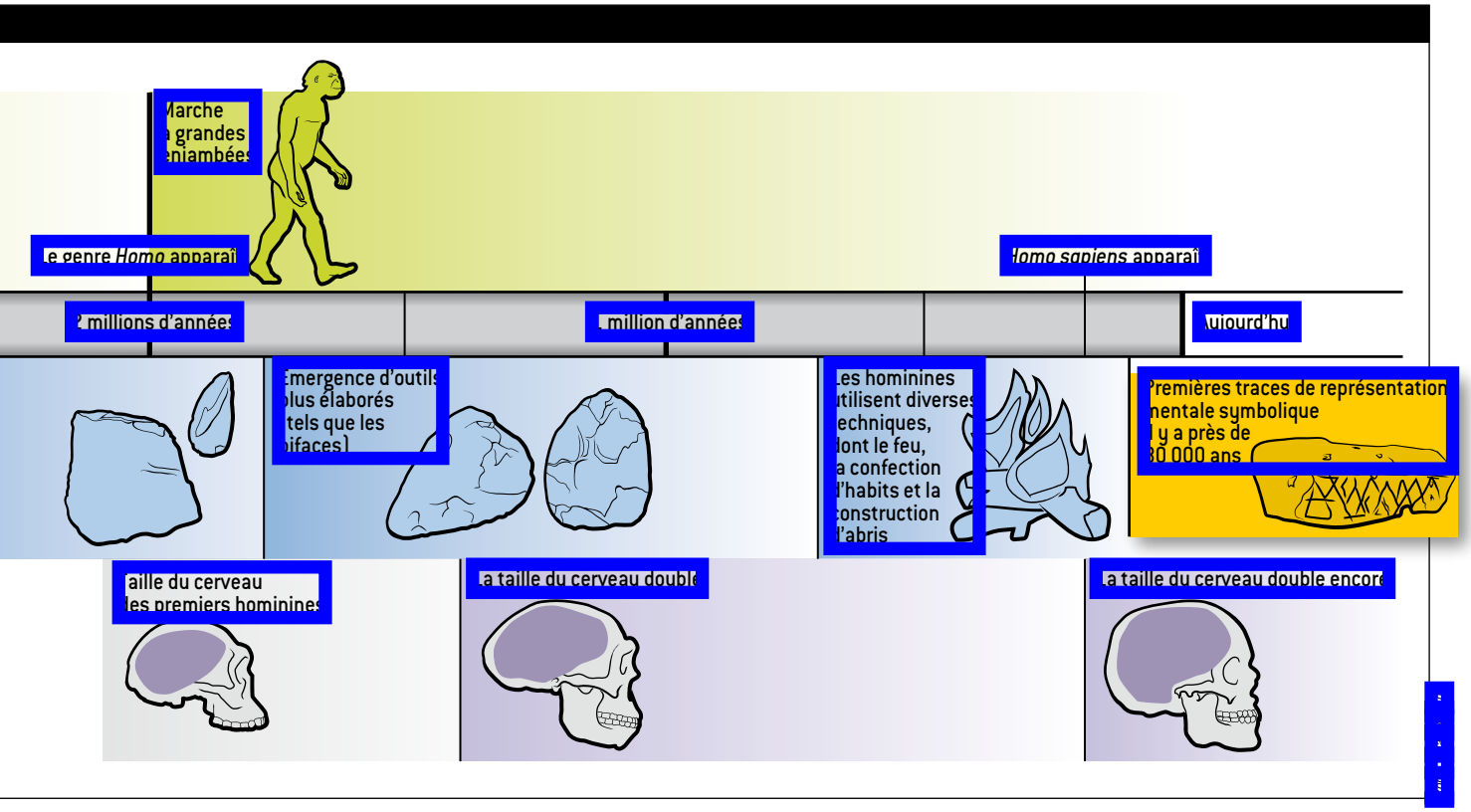
Le groupe des hominines auquel l'homme appartient a subi des transformations anatomiques, comportementales et cognitives spectaculaires durant les quatre derniers millions d'années. Certains ancêtres arboricoles ont commencé à tester un mode de vie plus terrestre. Puis, il y a environ 2,6 millions d'années, les premiers outils en pierre sont apparus ; des marques caractéristiques observées sur des os d'animaux suggèrent que nos précurseurs utilisaient de tels outils pour dépecer la viande et la manger. Le passage d'un régime alimentaire principalement végétarien vers un régime plus riche en protéines animales a activé une croissance rapide du cerveau après l'avènement du genre *Homo*, il y a environ deux millions d'années, ce qui a favorisé le développement de la culture matérielle.

> Il doit exister une taille de population qui favorise l'incorporation durable d'innovations tant génétiques que culturelles.

Dès lors, l'explication de l'évolution rapide des hominines à l'époque des glaciations est à chercher ailleurs que dans la progression linéaire d'une seule lignée humaine. Bien sûr, dans cette nouvelle interprétation, certains ingrédients – les pressions environnementales et la culture matérielle – seront les mêmes ; simplement, ils agiront différemment. D'autres facteurs doivent être à l'œuvre, notamment la taille des populations. Une population vaste et dense a trop d'inertie génétique pour être régulièrement poussée dans une direction donnée. En revanche, de petites populations isolées se différencient les unes des autres. Il doit donc exister une taille de population intermédiaire qui favorise l'incorporation durable d'innovations, tant génétiques que culturelles.

De nos jours, la population humaine est sédentaire, énorme et distribuée continûment sur toutes les régions habitables du globe ; mais à l'époque des glaciations, les hominines étaient des chasseurs cueilleurs nomades, clairsemés sur les continents eurasien et africain. Le changement climatique a constamment frappé ces petites populations locales. Les écarts de température et d'humidité, et même les fluctuations du niveau des mers et des lacs, avaient de

© Pour la Science - n° 445 - Novembre 2014



graves conséquences sur la disponibilité des ressources locales, modifiant la végétation et poussant les animaux à migrer. Les lieux où vivaient les hominines devenaient souvent hostiles, voire inhabitables, avant le retour de conditions plus clémentes.

Un isolement des groupes propice à la spéciation

Il y a entre un million d'années et 700 000 ans, des hominines ont acquis diverses technologies, allant de la fabrication d'outils à la cuisson des aliments et à la construction d'abris. Ces technologies leur auraient permis d'exploiter l'environnement plus efficacement que des espèces plus archaïques et de dépasser leurs limites physiologiques. Grâce à elles, ils auraient pu élargir les environnements qu'ils occupaient.

Durant les périodes clémentes, ces populations se seraient étendues et auraient occupé des régions marginales, inaccessibles sans la technologie qu'ils avaient acquise. Et lorsque les conditions climatiques se détérioraient, la culture aurait constitué une solution tampon incomplète pour lutter contre les éléments plus rudes. De nombreuses populations auraient alors vu leur taille décliner et se seraient fragmentées.

Les groupes isolés ainsi formés auraient présenté des caractéristiques idéales à la fois pour fixer des nouveautés génétiques et culturelles et pour connaître une spéciation subséquente. Les populations modifiées se seraient de nouveau étendues et seraient entrées en contact les unes avec les autres au gré des améliorations climatiques. Si une spéciation avait eu lieu, une compétition se serait probablement produite, conduisant à l'élimination sélective de certaines populations. Si la spéciation avait été incomplète ou inexistante, toute nouveauté génétique aurait été incorporée dans les populations fusionnées. De toute façon, un changement aurait eu lieu.

Dans les conditions perturbées de l'époque des glaciations, ce processus se serait répété de nombreuses fois, préparant la voie à une évolution exceptionnellement rapide, influencée par la possession d'une culture matérielle. Une fois la stabilité revenue, nous nous sommes retrouvés seuls, heureux bénéficiaires fortuits de progrès cognitifs, d'innovations culturelles et de changements climatiques, qui nous ont permis d'éliminer la concurrence d'autres hominines en un temps record, ou d'y survivre.

L'acquisition de notre mode unique de pensée symbolique a constitué un avantage certain sur nos concurrents. Cette acquisition semble s'être produite après l'apparition de notre espèce, *Homo sapiens*, et a très probablement été incitée par un stimulus culturel : l'invention du langage.

Cette idée d'une évolution dans laquelle notre espèce serait apparue au cours d'une séquence rapide d'événements aléatoires, indépendants des qualités spécifiques de nos ancêtres, est bien moins spectaculaire que l'idée classique d'un perfectionnement graduel au fil du temps, mais elle est plausible : malgré toutes ses qualités, *Homo sapiens* est une espèce imparfaite.

Considérer notre espèce comme le résultat d'un accident de l'évolution contient aussi une leçon profonde : si, à cause de notre composante culturelle, nous n'avons pas été modelés par l'évolution autant que d'autres espèces animales, si, avec *Homo sapiens*, l'évolution n'a pas conduit à un être parfaitement adapté à son environnement et à des tâches précises, nous disposons en retour d'un libre arbitre que n'ont pas d'autres espèces. Nous pouvons faire des choix concernant notre comportement. Et il est de notre devoir d'en assumer la responsabilité.

Le bond technologique décisif de nos ancêtres

Maxime Derex

Il y a 50 000 ans, les moyens techniques dont les humains disposaient pour vivre se sont soudain complexifiés. Pourquoi ? Des scénarios se dessinent…

Apparus il y a environ 200 000 ans en Afrique, les premiers humains anatomiquement modernes, c'est-à-dire d'une morphologie semblable à la nôtre, subsistaient d'une façon tout à fait similaire à celle de leurs contemporains *Homo erectus* et *Homo neanderthalensis*. Les vestiges archéologiques de l'époque attestent de la production d'outils qui nécessitaient des capacités cognitives et motrices supérieures à celles de nos plus proches cousins les chimpanzés, mais rien ne distingue les outils faits par *Homo sapiens* de ceux de ses contemporains. Il y a environ 50 000 ans cependant, nos moyens de subsistance se sont soudain complexifiés : outils de pierre spécialisés et finement travaillés, outils à base d'os, utilisation des ressources marines… La liste des innovations de l'époque est longue.

Cette révolution technique fut décisive pour notre espèce, puisqu'elle a entraîné l'augmentation de la densité des populations, l'expansion de notre espèce vers de nouveaux environnements ou encore l'extinction de la mégafaune du Pléistocène supérieur et des humains archaïques. Comment expliquer la soudaine complexification des outils employés par nos lointains ancêtres ?

Combinant modèles mathématiques, études de terrain et expériences en laboratoire, biologistes, psychologues, anthropologues, archéologues et primatologues tentent de répondre à l'une des plus passionnantes questions concernant l'origine de l'homme. Voici un aperçu des travaux les plus récents, des hypothèses liées à l'intelligence humaine jusqu'aux scénarios faisant intervenir la taille des groupes.

L'ESSENTIEL

- La soudaine complexification des technologies humaines il y a 50 000 ans est encore mal comprise.
- En alliant leurs approches, archéologues, biologistes et anthropologues tentent d'expliquer cette explosion technologique.
- La production de techniques complexes nécessite d'accumuler des innovations culturelles au fil des générations.
- L'amélioration des capacités d'apprentissage social et l'expansion des populations ont joué un rôle crucial dans ce processus.

1. GROUPE DE PÊCHEURS il y a 15 000 ans. Les outils utilisés par nos ancêtres pour se nourrir, se vêtir, s'abriter se sont brusquement complexifiés il y a 50 000 ans. L'apprentissage social et la taille des populations expliqueraient cet essor.

bref instant à l'échelle de l'évolution biologique, vous proposeriez probablement d'emblée des hypothèses en lien avec sa remarquable intelligence. Après tout, notre espèce est capable d'envoyer dans l'espace un véhicule d'exploration martienne quand le plus grand accomplissement technique des chimpanzés reste de collecter des termites avec un bâton.

Telle a aussi été l'une des premières idées des anthropologues : les comportements humains modernes seraient apparus à la suite d'un changement génétique qui aurait profondément affecté notre fonctionnement cognitif (par exemple notre créativité). Selon cette hypothèse, toujours défendue par une partie des scientifiques, l'amélioration de nos capacités cognitives nous aurait permis de trouver des solutions à des problèmes auparavant insurmontables et, ainsi, de coloniser de nouveaux environnements.

Le cas de l'explorateur européen perdu

Toutefois, les choses ne sont pas aussi simples. Il est certes probable que l'humain moyen ait une intelligence supérieure à celle du chimpanzé moyen. Néanmoins, nos capacités cognitives paraissent insuffisantes pour expliquer le succès écologique de notre espèce. Pour le comprendre, prenons le problème suivant, proposé par l'anthropologue Rob Boyd, de l'Université d'État de l'Arizona, aux États-Unis.

Imaginez-vous livré à vous-même dans une région inhospitalière où des groupes humains sont par ailleurs bien implantés, par exemple les régions arctiques du Canada. En l'absence de toutes les formes de technologie qui font notre quotidien, ce type d'environnement est particulièrement hostile pour un primate comme vous et moi : les températures sont le plus souvent négatives et la végétation, pauvre, est surtout composée de quelques espèces de mousses et autres herbes. Vous pensez-vous capable d'assurer votre propre subsistance à la seule force de votre intellect ? Si nos capacités cognitives étaient la seule raison de notre faculté d'adaptation à une grande diversité d'habitats, alors cela devrait être possible.

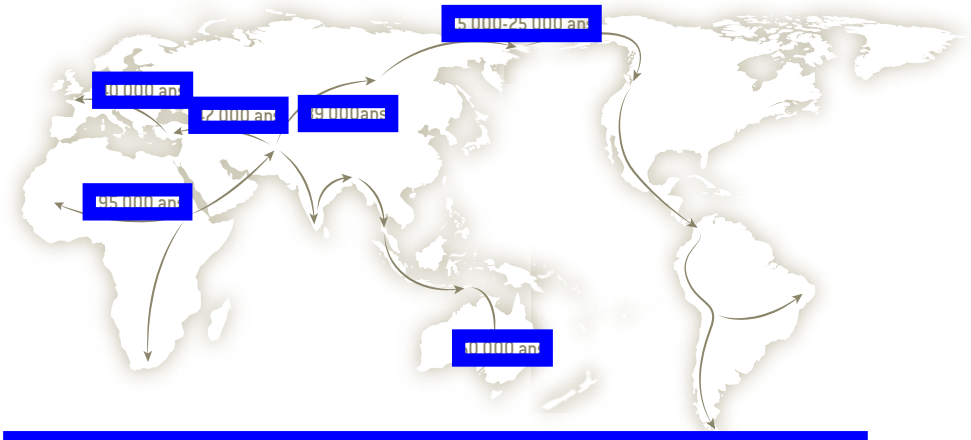
En fait, au cours des derniers siècles, ce type d'expérience a été involontairement mené à différentes occasions, ce qui permet d'avoir une estimation assez précise de votre probabilité de survie dans une telle situation. R. Boyd nomme ce type d'événement « les expériences de l'explorateur européen perdu » : des explorateurs possédant des réserves considérables de vivres et de matériel s'égarent dans des environnements non familiers, non loin d'endroits où prospèrent des populations indigènes. En dépit d'un temps d'apprentissage considérable (dû à leurs réserves de vivres) et d'efforts désespérés, ces explorateurs finissent bien souvent par mourir, en raison d'un manque d'information crucial sur la façon de s'adapter à leur nouvel environnement *(voir la figure 3)* ; et lorsque ces explorateurs survivent, c'est bien souvent grâce à l'hospitalité des populations autochtones. D'après les données historiques, il est donc raisonnable d'affirmer qu'en l'absence d'aide extérieure, votre probabilité de survie dans ce type d'environnement serait à peu près nulle.

La difficulté des explorateurs à s'adapter à ce type d'environnement hostile illustre les limites de nos capacités d'innovation individuelle. Dès lors, comment expliquer le succès des populations autochtones dans ces mêmes environnements ? Une partie de la solution peut être résumée par une métaphore attribuée à Bernard de Chartres, philosophe platonicien du XII[e] siècle : « Nous sommes comme des nains sur des épaules de géants. Nous voyons mieux et plus loin qu'eux, non que notre vue soit plus perçante ou notre taille plus élevée, mais parce que nous sommes portés et soulevés par leur stature gigantesque. » Cette formule illustre la dimension culturelle et cumulative des savoirs et des techniques. Si l'espèce humaine est capable de produire de tels accomplissements, ce n'est pas grâce à sa seule intelligence, mais surtout en raison de sa capacité à accumuler de la connaissance à travers les générations.

Les historiens des techniques défendent en effet l'idée selon laquelle les outils complexes ne sont jamais inventés spontanément, mais résultent de l'accumulation successive de nombreux changements mineurs. De la même façon qu'aucun animal n'a été doté de façon spontanée d'un organe aussi complexe que l'œil, les groupes humains bénéficient de techniques élaborées qui sont le fruit de la modification progressive et transgénérationnelle d'une ou de plusieurs techniques ancestrales.

Ce processus, nommé culture cumulative, nécessite que les innovations produites par un individu soient transmises à d'autres individus, lesquels pourront innover à leur tour à partir de cette base. Il en résulte des outils, des savoirs ou des techniques d'une complexité telle qu'aucun individu isolé ne saurait les produire par lui-même. La culture cumulative est donc ce qui a permis à notre espèce de coloniser

Les outils complexes ne sont jamais inventés spontanément, mais résultent de l'accumulation successive de nombreux changements mineurs.



2. L'EXPANSION DE L'ESPÈCE HUMAINE hors d'Afrique est l'une des conséquences de la révolution technologique du Paléolithique supérieur. La production d'outils, de techniques ou de savoirs complexes a permis à *Homo sapiens* de s'adapter rapidement à des milieux aussi divers que les steppes eurasiennes, les déserts africains ou les régions arctiques d'Amérique du Nord.

© Pour la Science - n° 445 - Novembre 2014

3. EN DEPIT DE RESERVES DE VIVRES CONSIDERABLES, les membres de l'expédition Franklin (1845) ne se sont jamais adaptés aux conditions de l'Arctique. Ils ont tous péri, alors que non loin de là, des Inuits vivaient de façon prospère dans ce même environnement. À elle seule, la créativité humaine ne permet pas de coloniser de nouveaux habitats…

une gamme d'environnements plus vaste que n'a pu le faire aucune autre espèce de vertébrés terrestres. Comment, cependant, cette accumulation d'innovations a-t-elle été possible ?

L'apprentissage social, le fait d'acquérir de l'information par l'observation d'un autre individu, est un facteur indispensable dans le processus de culture cumulative, puisque c'est par ce biais que l'information est transmise entre les individus, et donc entre les générations. En l'absence de transmission d'information, les innovations produites par un individu s'éteignent avec lui et l'accumulation culturelle ne peut opérer.

Pour autant, la capacité d'apprentissage social ne semble pas suffisante pour entraîner l'apparition de la culture cumulative. En effet, on sait aujourd'hui que cette capacité est répandue dans la nature : des mammifères, des oiseaux, des poissons et même des invertébrés acquièrent de l'information en observant leurs congénères. Toutefois, aucune autre espèce ne semble capable d'accumuler les innovations culturelles comme le fait l'espèce humaine. À quoi est due cette spécificité ?

Un apprentissage social amélioré

Le fait que l'apprentissage social soit observé chez de nombreuses espèces ne signifie pas que toutes les espèces le pratiquent de la même façon ni avec la même efficacité. Pour cette raison, il a été proposé que l'émergence de la culture cumulative soit due à l'amélioration des mécanismes d'apprentissage social chez l'espèce humaine. Par exemple, différentes études comparatives, cherchant à évaluer la performance relative des humains et des chimpanzés dans des tâches d'apprentissage social, ont montré que notre capacité à acquérir une technique par l'observation d'un congénère est non seulement plus rapide et plus précise, mais aussi plus systématique que celle de nos plus proches cousins *(voir l'encadré ci-dessous)*.

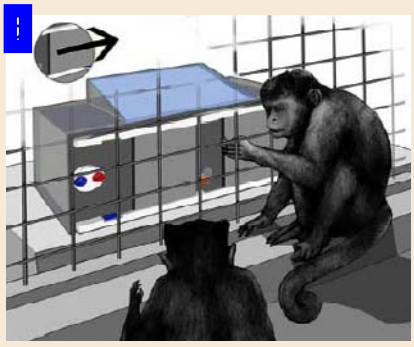
En d'autres termes, lorsqu'une innovation apparaît au sein d'un groupe humain, la probabilité qu'elle soit transmise est bien

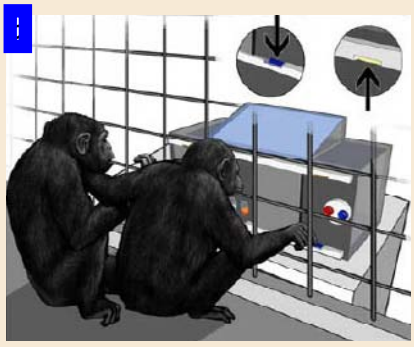
L'expérience des fruits artificiels

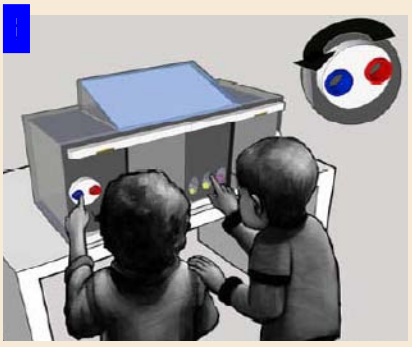
Si nombre d'espèces animales sont capables d'apprendre en observant leurs congénères, ce type d'apprentissage est plus ou moins rapide et efficace selon les espèces. Le développement d'études expérimentales comparatives

On expose des individus à des « fruits artificiels », des dispositifs qui n'offrent une récompense qu'après une certaine manipulation. À l'aide de ces dispositifs, on compare les performances d'individus isolés à celles d'individus en mesure d'observer leurs congénères, et l'on détermine ainsi l'efficacité avec laquelle les individus de différentes espèces acquièrent des comportements par apprentissage social.

En 2012, Lewis Dean, de l'Université de St Andrews, en Écosse, a par exemple étudié les performances de capucins *(a)*, de chimpanzés *(b)* et d'enfants *(c)* face à un tel dispositif. Ce dernier fournissait trois récompenses graduelles en trois étapes : une première apparaît quand on fait coulisser une porte *(a)*. Appuyer sur un bouton permet alors de libérer une meilleure récompense *(b)*. Il faut finalement tourner un bouton pour accéder à la plus belle récompense *(c)*. L. Dean et ses collègues ont ainsi montré que notre capacité à acquérir une technique par l'observation d'un congénère est non seulement plus rapide et plus précise, mais aussi plus systématique que chez les capucins ou les chimpanzés.







supérieure à ce qui est observé chez les chimpanzés. L'amélioration des capacités d'apprentissage social aurait ainsi permis à l'homme de franchir un seuil au-dessous duquel les innovations disparaissent trop vite pour qu'émerge une culture cumulative.

Plusieurs autres facteurs ont pu favoriser notre capacité à acquérir de l'information sociale. Des comportements spécifiques pourraient être apparus, durant lesquels les individus qui possèdent l'information auraient cherché à en faciliter l'acquisition par un observateur. Selon le psychologue Gergely Csibra, professeur à l'Université d'Europe centrale, à Budapest, les comportements pédagogiques sont observés dans toutes les cultures humaines, et l'évolution d'un système de « pédagogie naturelle » a donc pu contribuer à l'apparition de la culture cumulative.

En accord avec cette hypothèse, les études expérimentales comparatives ont montré que, contrairement aux chimpanzés, les enfants humains cherchent spontanément à faciliter l'apprentissage de leurs semblables en effectuant des démonstrations, lesquelles favorisent la réussite des observateurs.

Bien sûr, la capacité à communiquer de l'information est aussi facilitée par l'utilisation d'un langage articulé. Aucune autre espèce n'a une capacité aussi développée que la nôtre pour la communication, et il ne fait aucun doute que l'utilisation du langage permet de partager de l'information qu'il serait autrement difficile de transmettre. Cependant, en raison du manque de preuve directe sur les origines du langage, les relations entre la culture cumulative et le langage restent purement spéculatives. De plus, le développement de la syntaxe, qui permet de combiner des mots pour former des phrases, pourrait lui-même être une conséquence de l'apparition de la culture cumulative.

À ce jour, l'amélioration des capacités d'apprentissage social constitue l'une des pistes les plus prometteuses pour expliquer l'émergence de la culture cumulative ; et de nombreux travaux théoriques et expérimentaux s'accordent pour dire que cette amélioration a dû accélérer l'évolution culturelle. Cependant, des doutes subsistent sur le rôle qu'elle a pu avoir dans l'émergence des techniques complexes. L'explosion culturelle du Paléolithique supérieur n'a pas été homogène, ni dans l'espace ni dans le temps. Cela suggère que la complexification culturelle ne résulte pas directement de l'apparition soudaine de capacités individuelles spécifiques, et que d'autres facteurs sont susceptibles de déclencher l'émergence ou la disparition de pratiques culturelles complexes…

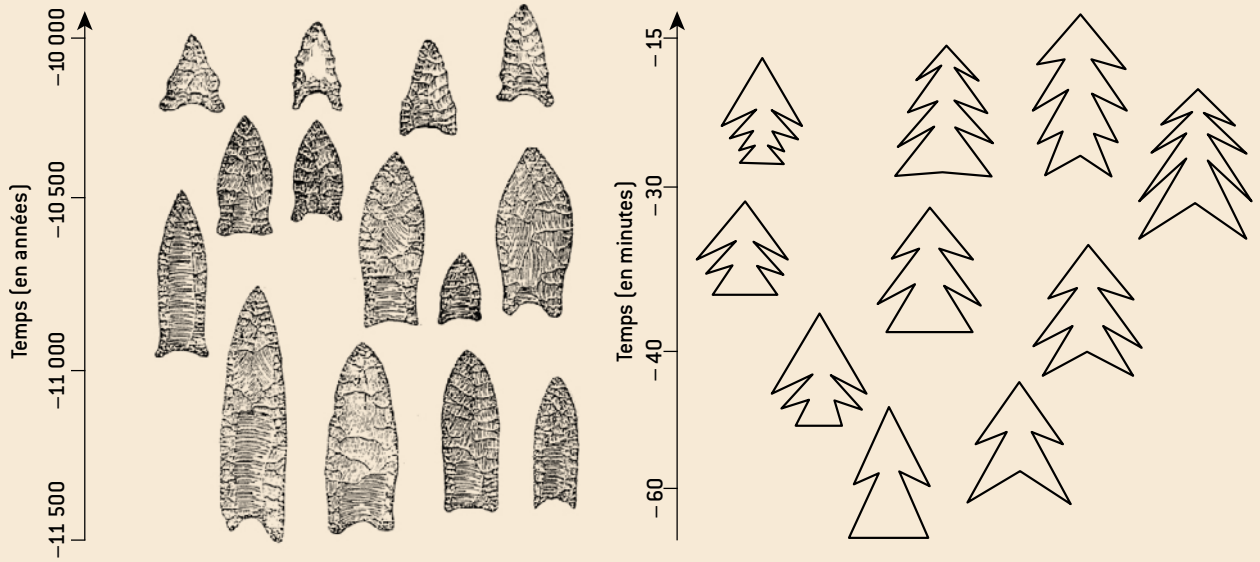
Un pas important dans la compréhension de l'évolution culturelle cumulative pourrait avoir été franchi à la suite

Des flèches virtuelles et des hommes

L'étude des vestiges archéologiques illustre à la fois l'existence de traditions culturelles locales et les changements graduels opérant sur de très longues [illegible] de cette évolution restent cependant difficiles à déterminer à partir de ce type de données.

Au mieux, on établit des corrélations entre certains événements (variations climatiques, accroissement de la population, etc.) et les changements observés dans les vestiges archéologiques. De nouvelles méthodes ont donc été développées pour étudier l'influence de différents facteurs sur l'évolution de la culture. L'évolution culturelle expérimentale consiste à observer l'évolution d'une technique au sein d'une microsociété sur une courte période – la réalisation d'une flèche en pierre sur ordinateur, par exemple *(à droite)*.

Comme dans le monde physique, l'efficacité de ces flèches virtuelles a été programmée pour dépendre de leur forme, et l'objectif pour les participants est de trouver la forme la plus efficace pour collecter un maximum de ressources. Placés dans des groupes de petite taille, les participants ont la possibilité d'observer les solutions produites par les autres membres de leur groupe. En modifiant la taille des groupes, la migration des individus entre les groupes ou encore l'accès à l'information sociale, on détermine les conditions qui favorisent l'évolution de la culture.



© Pour la Science - n° 445 - Novembre 2014

d'une étonnante observation archéologique. Découverts par les Européens au XVIII^e siècle, les Tasmaniens, peuple vivant sur une île au Sud-Est de l'Australie, furent rapidement décrits comme la population dotée du répertoire technologique le plus simple de toutes les populations humaines contemporaines (ils utilisaient 24 types d'outils en tout). Des travaux archéologiques menés à la fin du XX^e siècle ont révélé que le répertoire culturel des Tasmaniens était non seulement plus simple que celui des Australiens, vivant à seulement 200 kilomètres au Nord, mais aussi plus simple que celui de leurs propres ancêtres, quelques milliers d'années auparavant ! Cette régression culturelle fut d'abord considérée comme un mystère, avant que les données paléoclimatiques sur le niveau des océans ne suggèrent une explication.

Le mystère des Tasmaniens

Les vestiges archéologiques témoignent en effet d'une colonisation de la Tasmanie il y a environ 34 000 ans, lorsque la Tasmanie n'était pas encore une île et qu'une bande de terre reliait ce territoire au continent australien. La fin de la dernière ère glaciaire a cependant entraîné une montée des eaux, qui a recouvert cette bande de terre il y a entre 12 000 et 8 000 ans, isolant ainsi les Tasmaniens. Récemment, les données archéologiques ont montré que la simplification du matériel culturel tasmanien avait été postérieure à cet isolement. Les anthropologues en ont conclu que les Tasmaniens avaient été non seulement le peuple ayant eu les technologies les plus simples, mais aussi celui ayant subi le plus fort isolement des autres groupes humains. Cette observation a conduit à la formulation d'une nouvelle hypothèse liant la complexité technologique à la taille des populations.

Resté dans un premier temps au stade d'argument verbal, l'effet de la taille de la population sur la culture cumulative a été formalisé il y a une dizaine d'années par Joe Henrich, psychologue et économiste à l'Université de Colombie-Britannique, à Vancouver au Canada. En considérant que les mécanismes d'apprentissage social sont imparfaits, J. Henrich a montré que le maintien d'une technique complexe dépend du nombre d'événements d'apprentissage social, lequel dépend de la taille du groupe.

Imaginez par exemple qu'un individu découvre une technique de manufacture permettant de produire de redoutables flèches de pierre à partir d'un bloc de silex. Si une seule personne est capable d'observer cette technique, il y a une certaine probabilité pour qu'elle ne parvienne pas à la reproduire correctement. Bien sûr, la personne peut persévérer et finir par acquérir la bonne technique, mais pour cela, il faudra que de nouvelles démonstrations soient effectuées. Si un événement malheureux arrive au porteur de l'information, il est probable que celle-ci s'éteigne avec lui.

Dans un groupe d'une taille plus importante, la probabilité que personne n'arrive à acquérir la technique est plus faible, car la probabilité qu'un individu doué pour cette tâche soit présent dans le groupe est plus importante. L'acquisition de la technique par un individu supplémentaire permet à celle-ci d'être moins exposée à l'extinction, ce qui offre aux individus les moins doués davantage d'occasions pour l'acquérir.

Cette hypothèse est particulièrement intéressante, car elle implique que la probabilité d'apprendre une technique complexe est plus faible que celle d'apprendre une technique simple ; par conséquent, une réduction soudaine de la taille du groupe devrait surtout conduire à la perte de techniques complexes. Cette prédiction se révèle en accord non seulement avec de récentes études expérimentales, mais aussi avec les données archéologiques de Tasmanie.

Des modifications de la taille du groupe semblent donc influer sur le maintien des pratiques culturelles complexes. Peuvent-elles aussi agir sur leur apparition ? Oui, selon J. Henrich, car dans de rares cas, les erreurs d'apprentissage peuvent conduire à des innovations ; et comme le nombre d'événements d'apprentissage est supérieur dans les groupes de grandes tailles, le nombre d'erreurs fécondes, et donc d'innovations, devrait l'être aussi.

Depuis la publication en 2004 de ces travaux, qui ont reçu une attention considérable de la communauté scientifique, différents types d'études ont cherché à vérifier les prédictions de ce modèle théorique. Une méthode a, par exemple, consisté à étudier les liens entre l'évolution de la taille des populations ancestrales et les changements majeurs observés dans les vestiges archéologiques.

Les changements démographiques sont en effet connus pour laisser des traces dans

L'AUTEUR

Maxime DEREX est chercheur à l'Institut des origines humaines, au sein de l'Université d'État de l'Arizona (Tempe, États-Unis).

BIBLIOGRAPHIE

M. Derex, **Experimental evidence for the influence of group size on cultural complexity,** *Nature*, vol. 503, pp. 389-391, 2013.

L. G. Dean *et al.*, **Identification of the social and cognitive processes underlying human cumulative culture,** *Science*, vol. 335, pp. 1114-1118, 2012.

A. Mesoudi, **Cultural Evolution : How Darwinian Theory Can Explain Human Culture and Synthesize the Social Sciences,** University of Chicago Press, 2011.

P. J. Richerson et R. Boyd, **Not by Genes Alone,** University of Chicago Press, 2005.

J. Henrich, **Demography and cultural evolution : How adaptive cultural processes can produce maladaptive losses – The Tasmanian case,** *American Antiquity*, vol. 69, pp. 197-214, 2004.

À ÉCOUTER

Le jeudi 6 novembre 2014, de 14h à 15h, Maxime Derex évoquera sur le bond technologique qui s'est produit il y a 50 000 ans dans la partie *Actualités* de l'émission **La marche des sciences** sur *France Culture*. www.franceculture.com

4. UN CORBEAU CALÉDONIEN *(Corvus moneduloides)* utilisant un bâton pour récupérer une récompense. Loin d'être une spécificité humaine, l'utilisation et, parfois, la fabrication d'outils ont pu être observées chez diverses espèces animales. Mais aucun de leurs outils ne semble résulter de l'accumulation d'innovations successives.

le polymorphisme génétique des populations, de sorte qu'il est aujourd'hui possible d'inférer la taille des populations ancestrales à partir des données actuelles sur la diversité génétique. Ces données, obtenues par les généticiens des populations, ont permis de vérifier dans quelle mesure les diverses augmentations de complexité culturelle observées dans les vestiges archéologiques correspondent à des densités de population supérieures à un certain seuil.

Une autre étude, fondée cette fois sur des données ethnographiques, s'est intéressée aux moyens de subsistance liés aux ressources marines de dix populations insulaires d'Océanie. Afin d'éviter les effets induits par les migrations et les mouvements des populations modernes, l'anthropologue Michelle Kline, postdoctorante à l'Université d'État de l'Arizona, s'est appuyée sur les récits des premiers ethnologues. Par rapport aux données sur les populations ancestrales, celles relatives à des populations contemporaines sont plus précises, tant sur le matériel culturel utilisé que sur la taille des populations.

Dans les deux cas, ces études ont montré un lien entre l'évolution du matériel culturel et la taille des populations. Cependant, il n'est pas possible de savoir quel événement a causé l'autre ni même d'exclure l'existence d'un autre facteur responsable à la fois de l'augmentation de la taille des populations et de la complexité culturelle.

Pour cette raison, un nouveau type d'études, visant à observer l'évolution de la culture en conditions contrôlées, a été développé. Ces études expérimentales consistent à faire réaliser un outil – physique ou virtuel – à différents individus en modifiant les conditions de l'expérience afin de mesurer l'effet de différents facteurs sur l'évolution de la culture *(voir l'encadré page 90)*. Par exemple, dans une expérience récente menée à l'Institut des sciences de l'évolution de Montpellier, nous avons

Les petites populations sont incapables de maintenir des technologies complexes

demandé à des individus placés dans des groupes de différentes tailles de collecter un maximum de ressources à l'aide d'outils virtuels qu'ils devaient fabriquer (flèche en pierre ou filet de pêche). Comme l'avaient prédit les travaux de J. Henrich, les groupes les plus grands étaient ceux où l'évolution technique était la plus importante.

L'hypothèse de J. Henrich suggère également qu'il existe une rétroaction entre la taille de la population et la complexité culturelle. Si la taille de population perturbe l'évolution de la culture, l'inverse est aussi attendu : grâce à l'utilisation de nouvelles techniques, un groupe d'individus peut acquérir davantage de ressources et mieux se protéger des prédateurs, ce qui favorise son expansion. À son tour, l'augmentation de la taille de population accroît la quantité d'innovations produites dans un temps donné. Ainsi, une relation synergique s'installe, qui conduit à une explosion culturelle et démographique semblable à celle observée au Paléolithique supérieur.

Supposons que l'augmentation de la taille de la population a bien entraîné l'émergence de la culture cumulative. Une question reste alors encore en suspens : comment l'espèce humaine a-t-elle atteint une taille de population suffisante pour déclencher cette relation synergique ? Les hypothèses ne manquent pas : un changement climatique a pu rendre les conditions favorables au développement des populations humaines. Un changement dans les relations sociales de nos ancêtres a aussi pu se produire : si une population a plus tendance à vivre en groupe, cela peut favoriser les contacts et les échanges entre les individus et les groupes. Dans ce scénario, récemment formulé, les effets attendus sont similaires à ceux liés à une augmentation de taille de la population, qui ne devient alors plus un facteur nécessaire.

L'identification des facteurs indispensables à l'émergence de la culture cumulative ne constitue qu'une étape dans la compréhension de son origine. À terme, l'objectif sera de proposer un scénario crédible des événements ayant conduit à son émergence. La tâche se révèle difficile et seuls les efforts conjoints d'archéologues, anthropologues, biologistes et psychologues permettront de répondre à cette fascinante question.

La bonne nouvelle est que la culture cumulative est un processus auto-catalytique : de nombreuses innovations culturelles renforcent sans cesse les facteurs responsables de son évolution. Par le passé, l'imprimerie a permis de stocker l'information, ce qui l'a préservée de l'extinction tout en favorisant sa diffusion. Plus récemment, l'émergence d'Internet a encore facilité l'échange d'informations entre des personnes éloignées, ce qui a permis aux réseaux sociaux d'atteindre une taille considérable. L'imprimerie et Internet ne sont que deux des nombreuses innovations culturelles qui ont amélioré – et améliorent encore – le processus de culture cumulative. La connaissance étant elle-même un produit de la culture cumulative, parions que les secrets de notre histoire évolutive ne le resteront pas longtemps. ■

© Pour la Science - n° 445 - Novembre 2014

Actuellement en kiosque

www.pourlascience.fr
Le site de référence de l'actualité scientifique internationale
Disponible sur
Disponible sur App Store
DISPONIBLE SUR Google play

L'HOMME : une évolution

Au cours des 30 000 dernières années, les sociétés humaines ont connu de profonds changements, qui ont accéléré l'évolution génétique de l'homme. Et celle-ci n'est pas près de s'arrêter...

John Hawks

L'espèce humaine maîtrise son destin comme nulle autre. Nous avons neutralisé d'innombrables dangers, autrefois responsables de millions de morts : nous avons appris à nous protéger des éléments et des prédateurs ; nous avons développé des traitements contre de nombreuses maladies mortelles ; nous avons transformé les petits jardins de nos lointains ancêtres en vastes champs agricoles ; et nous avons spectaculairement augmenté nos chances de mettre au monde des enfants en bonne santé.

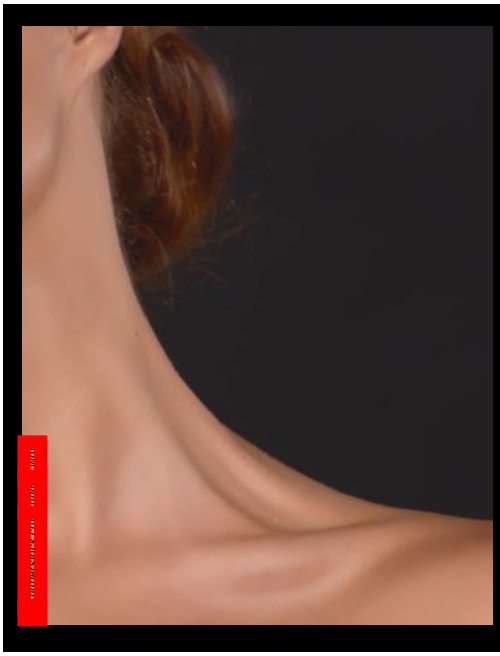
Nombre de gens pensent que le progrès technique nous permet désormais d'échapper à la sélection naturelle, et que l'évolution de l'homme est arrivée à son terme. Ils prétendent qu'il n'y a plus de « survie du plus apte » si presque tout le monde survit jusqu'à un âge avancé. Cette idée ne se rencontre pas seulement dans le grand public ; des biologistes tels que Steve Jones, de l'*University College* de Londres, ont eux aussi déclaré que l'évolution humaine est terminée.

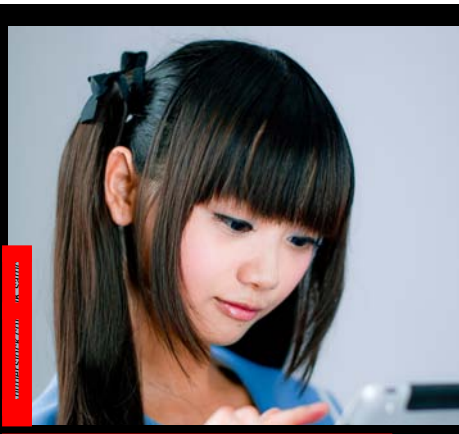
Mais ce n'est pas le cas. Nous avons évolué dans notre passé récent, et nous continuerons à le faire tant que nous existerons. Si l'on rapporte à une journée de 24 heures les sept millions d'années qui nous séparent de notre dernier ancêtre commun avec le chimpanzé, les 30 000 années qui viennent de s'écouler ne représentent que six petites minutes. Et pourtant, d'importants changements se sont déroulés pendant ce dernier chapitre de notre évolution : de vastes groupes humains ont migré vers de nouveaux environnements, notre alimentation s'est notablement modifiée et la population mondiale a été multipliée par plus de mille. En conséquence, le nombre global de mutations génétiques s'est accru, alimentant

L'ESSENTIEL

- Les hommes ont beaucoup évolué au cours des 30 000 dernières années. Les yeux bleus et la tolérance au lactose, par exemple, sont apparus récemment.
- Cette évolution résulte de plusieurs facteurs, tel le passage des groupes de chasseurs-cueilleurs aux sociétés agricoles, qui a conduit à un boom démographique. Plus une population s'étend, plus des mutations avantageuses ont des chances d'apparaître.
- Aujourd'hui, le brassage génétique est sans précédent, et l'homme va continuer à évoluer.

en marche





DE NOMBREUX CARACTERES très répandus sont relativement récents. La peau claire, les yeux bleus, les cheveux lisses et noirs des Asiatiques, et la capacité à digérer le lait à l'âge adulte ont tous émergé pendant les 30 000 dernières années.

une sélection naturelle rapide. L'évolution humaine ne stagne pas. Au contraire, elle semble accélérer.

L'analyse des squelettes anciens suggère que certains caractères humains ont récemment évolué de façon rapide. Il y a environ 11 000 ans, l'homme est passé du statut de chasseur-cueilleur à celui d'agriculteur, et s'est mis à faire cuire ses aliments. Dès lors, son anatomie a changé. Il y a 10 000 ans, par exemple, ses dents étaient en moyenne 10 % plus grosses qu'aujourd'hui en Europe, en Asie et en Afrique du Nord. Quand nos ancêtres ont commencé à manger des nourritures cuites plus molles, nécessitant moins de mastication, la taille de leurs dents et de leurs mâchoires a diminué peu à peu au fil des générations.

Si les anthropologues étudient ces caractères depuis des décennies, ils n'ont réalisé à quel point leur évolution est récente que depuis une dizaine d'années. En outre, l'analyse de génomes humains a précisé les traits sélectionnés. Par exemple, les descendants de fermiers produisent en général plus d'amylase salivaire, une enzyme clef qui décompose l'amidon contenu dans la nourriture. Partout où ils ont adopté des grains renfermant de l'amidon, les premiers agriculteurs semblent s'être adaptés pour mieux le digérer. À notre époque, la plupart des gens ont plusieurs copies du gène *AMY1*, qui est traduit en amylase. Cependant, les chasseurs-cueilleurs modernes, tels les Datooga de Tanzanie, tendent à avoir moins de copies que les descendants d'agriculteurs.

Une autre adaptation alimentaire représente l'un des exemples les plus étudiés de l'évolution humaine récente : la tolérance au lactose (un sucre présent dans le lait). Presque tous les humains naissent avec la capacité de produire la lactase, une enzyme qui décompose le lactose et facilite la digestion du lait, ce qui est essentiel pour la survie d'un enfant nourri au sein. À l'âge adulte, la plupart des gens perdent cette capacité. À cinq reprises au moins depuis que les hommes ont adopté les laitages, une mutation génétique a prolongé l'activité du gène de la lactase, maintenant le gène actif à l'âge adulte dans plusieurs populations. Trois des mutations se sont produites dans des parties différentes de l'Afrique subsaharienne, siège d'une longue tradition de pastoralisme. Une autre est courante dans la péninsule arabique et semble être apparue dans les populations anciennes de chameliers et de chevriers.

IL Y A 10 000 ANS, LES DENTS étaient en moyenne 10 % plus grosses qu'aujourd'hui en Europe, en Asie et en Afrique du Nord

La cinquième mutation (la plus commune) se rencontre aujourd'hui de l'Irlande à l'Inde et c'est en Europe du Nord qu'elle est la plus fréquente. Elle s'est d'abord produite chez un individu unique il y a quelques milliers d'années. En 2011, des chercheurs ont analysé de l'ADN prélevé sur Ötzi, un homme retrouvé momifié dans un glacier du Nord de l'Italie, et qui vivait il y a environ 5 500 ans. Il n'avait pas le variant génétique prodiguant la tolérance au lactose, signe que ce variant n'était pas encore répandu dans cette région 1 000 ans après sa première apparition. Par la suite, des chercheurs ont séquencé l'ADN extrait de squelettes de fermiers vivant en Europe il y a plus de 5 000 ans. Aucun ne portait la mutation du gène de la lactase. Pourtant, dans cette même région, cette mutation se retrouve aujourd'hui chez des centaines de millions de personnes : elle est présente chez plus de 75 pour cent des Européens. Ce n'est pas un paradoxe, mais une conséquence mathématique de la sélection naturelle. Une nouvelle mutation soumise à la sélection se répand à un rythme exponentiel : il faut d'abord de nombreuses générations pour qu'elle acquière une certaine fréquence au sein d'une population, puis sa croissance s'accélère et elle finit par dominer.

De nombreux traits physiques actuels sont aussi le fruit d'une évolution récente. Ainsi, l'épaisse chevelure noire et lisse dont sont dotés presque tous les Asiatiques de l'Est est apparue il y a moins de 30 000 ans, à la faveur d'une mutation du gène *EDAR*, qui joue un rôle crucial dans le développement

© Pour la Science - n° 445 - Novembre 2014

de la peau, des cheveux, des dents et des ongles. Ce variant génétique a été exporté en Amérique par les premières vagues de colonisateurs, venues de l'Est asiatique.

De façon générale, l'histoire évolutive de la pigmentation de la peau, des cheveux et des yeux a été simple et rapide. Aux premiers stades de notre évolution, tous nos ancêtres avaient la peau, les cheveux et les yeux noirs. Depuis, des dizaines de modifications génétiques les ont rendus plus clairs. Quelques-unes sont anciennes et présentes en Afrique, bien que plus répandues ailleurs dans le monde. La plupart sont récentes et ont émergé dans des populations spécifiques. Ainsi, une mutation d'un gène nommé *TYRP1* rend blonds certains habitants des îles Salomon. Une autre, sur *HERC2*, donne des yeux bleus. Des variants de *MC1R* procurent des cheveux roux au lieu de noirs. Et une mutation du gène *SLC24A5* éclaircit la peau ; elle se retrouve aujourd'hui chez 95 % des Européens. Comme dans le cas de la lactase, l'ADN ancien renseigne sur la date d'apparition de ces mutations. Les yeux bleus semblent remonter à plus de 9 000 ans. En revanche, on ne constate pas de changements massifs de *SLC24A5* dans l'ADN des squelettes de cette période ; l'éclaircissement de la peau des Européens qui lui est associé est donc postérieur.

Les variations de pigmentation font partie des différences les plus évidentes et les plus faciles à étudier. Mais les chercheurs se sont aussi penchés sur des caractéristiques moins visibles de l'anatomie humaine, concernant par exemple le cérumen sécrété dans les oreilles. Aujourd'hui, la plupart des gens ont du cérumen collant. Cependant, de nombreux habitants de l'Est asiatique ont un cérumen sec, qui s'écaille et ne colle pas. Les anthropologues ont remarqué cette différence il y a plus d'un siècle, mais les généticiens n'en ont trouvé la cause qu'il y a peu. Le cérumen sec résulte d'une mutation relativement récente du gène *ABCC11*. Vieille de 20 000 à 30 000 ans, cette mutation touche aussi les glandes sudoripares dites apocrines, qui produisent la sueur. Si vous avez des aisselles qui sentent la transpiration et du cérumen collant, il y a toutes les chances que vous soyez porteur de la version originale d'*ABCC11*. Si votre cérumen est sec et que vous n'avez pas besoin de déodorant, vous avez probablement le nouveau variant génétique.

Une mutation contre le paludisme

Quelques milliers d'années avant que le cérumen sec apparaisse en Asie, une autre mutation a sauvé des millions d'Africains d'une maladie mortelle. Un gène nommé *DARC* est traduit en une protéine qui se trouve à la surface des globules rouges et qui se lie aux chimiokines, des molécules du système immunitaire. Cette protéine séquestre les chimiokines lorsqu'elles sont en excès dans le sang. Il y a environ 45 000 ans, une mutation de ce gène a conféré une résistance à *Plasmodium vivax*, un des deux principaux parasites du paludisme infectant les hommes aujourd'hui. Les parasites ont besoin de la protéine codée par *DARC* pour pénétrer dans les globules rouges, de sorte qu'en entravant l'expression de ce gène, la mutation a enrayé leur prolifération. Le revers de la médaille a été une augmentation de la concentration sanguine de chimiokines provoquant des inflammations. Cette augmentation pourrait être liée au fait que les Afro-Américains ont plus de risques de contracter un cancer de la prostate que les populations d'origine européenne ou asiatique. Mais globalement, la mutation s'est révélée si avantageuse que 95 % des populations subsahariennes en sont porteuses, contre 5 % des Européens et des Asiatiques.

Nous avons l'habitude de nous représenter l'évolution comme un processus où

L'AUTEUR

John HAWKS est anthropologue à l'Université du Wisconsin, à Madison, aux États-Unis.

La pression des maladies

Les maladies constituent une importante pression de sélection, qui conduit à la préservation de nombreux variants génétiques (des versions différentes d'un même gène). Des dizaines de mutations différentes ont ainsi augmenté la résistance au paludisme dans des régions diverses. Elles modifient par exemple la physiologie des globules rouges (dans lesquels les parasites pénètrent alors plus difficilement) ou la réponse immunitaire.

es « bons » gènes remplacent inexorablement les « mauvais », mais les adaptations humaines les plus récentes attestent de la part essentielle du hasard. Les mutations bénéfiques ne persistent pas toujours. Tout dépend du moment où elles se produisent et de la taille de la population.

La puissance du hasard

Cette leçon m'a été enseignée pour la première fois par l'anthropologue Frank Livingstone (1928-2005). Le début de ma formation a coïncidé avec la fin de sa longue carrière, lors de laquelle il a étudié les fondements génétiques de la résistance au paludisme. Il y a plus de 3 000 ans en Afrique, une mutation s'est produite dans le gène codant l'hémoglobine, protéine qui transporte l'oxygène dans le sang. Quand un individu avait hérité de la mutation par ses deux parents, il développait une anémie falciforme, une maladie où des globules déformés bouchent les vaisseaux.

Les globules rouges sont normalement assez souples et flexibles pour se faufiler dans les minuscules capillaires, mais les globules mutants, qui avaient une forme de faucille, étaient rigides et pointus. Or ce changement de forme a aussi entravé la capacité du parasite du paludisme à infecter les globules rouges.

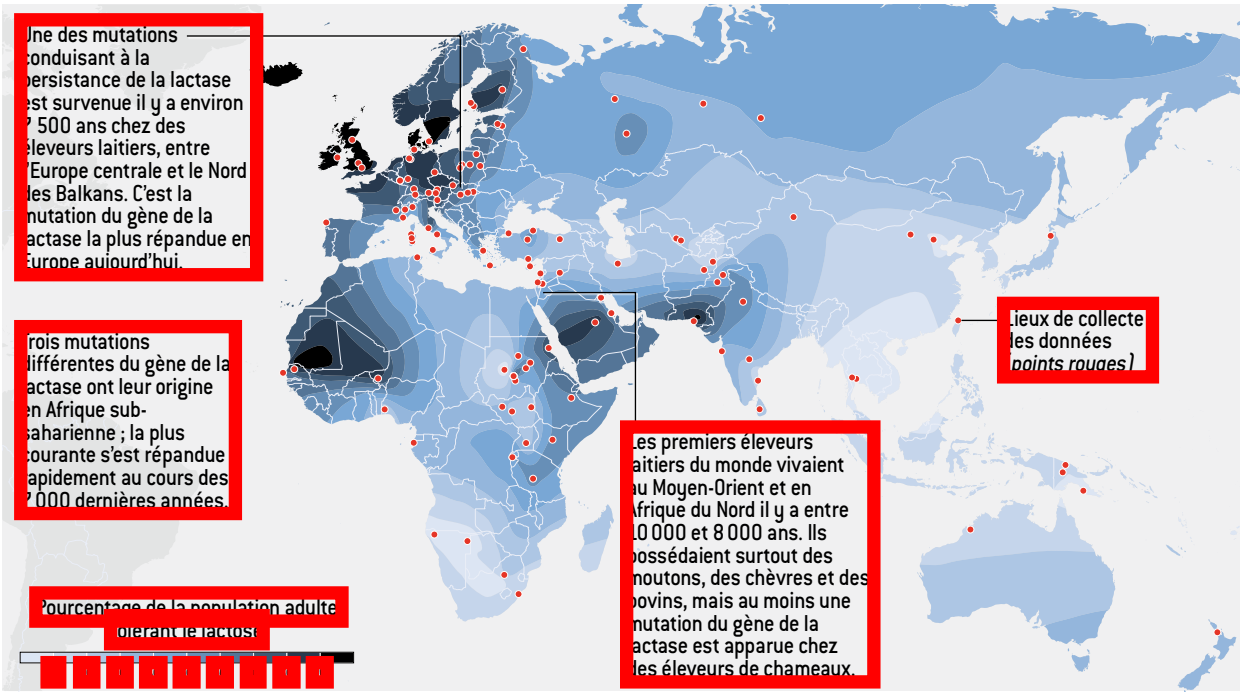
La protéine codée par le gène muté a été nommée hémoglobine S. Une autre variante de l'hémoglobine intéressait Livingstone : l'hémoglobine E. Aujourd'hui répandue en Asie du Sud-Est, cette variante confère une résistance notable au paludisme, mais sans les graves effets secondaires de l'hémoglobine S. « L'hémoglobine E semble largement préférable à l'hémoglobine S, lui-je un jour remarqué en cours. Pourquoi les Africains n'ont-ils pas plutôt cette version ? »

« Le hasard en a décidé autrement », répondu Livingstone. Sa réponse m'a sidéré. J'avais supposé que la sélection naturelle était la force la plus puissante dans l'arsenal de l'évolution. Puisque les Africains vivaient depuis des milliers d'années avec le parasite meurtrier du paludisme, j'étais convaincu que la sélection naturelle aurait dû éliminer les mutations les moins avantageuses et faire émerger la plus intéressante.

Livingstone m'a alors montré comment la préexistence de l'hémoglobine S dans une population compliquait la pénétration de l'hémoglobine E. Chez des individus dotés d'une hémoglobine normale, le paludisme fait des ravages et une nouvelle mutation conférant un léger avantage peut se répandre rapidement. Mais une population déjà équipée de la mutation protectrice qui crée l'hémoglobine S aura une mortalité moindre. Les porteurs de cette mutation sont toujours confrontés à la menace redoutable de l'anémie falciforme, mais l'hémoglobine E est un avantage relatif moins important dans une population qui a déjà cette forme imparfaite de résistance au paludisme.

QUI BOIT DU LAIT À L'ÂGE ADULTE DANS LE MONDE ?

Nous ne sommes capables de profiter des laitages à l'âge adulte que depuis peu. Pour digérer le lactose, le sucre contenu dans le lait, nous avons besoin d'une enzyme, la lactase, que le corps humain cesse généralement de produire à l'adolescence. Dans le monde, la plupart des adultes sont intolérants au lactose. Mais à cinq reprises au moins au cours des 10 000 dernières années, des mutations génétiques se sont produites de façon indépendante au sein de populations différentes, maintenant la lactase active tout au long de la vie. Ces adaptations sont d'abord apparues dans des régions où l'élevage laitier était commun. Aujourd'hui, la tolérance au lactose est particulièrement répandue dans nombre de ces points chauds évolutifs.



© Pour la Science - n° 445 - Novembre 2014

L'expansion d'une mutation ne dépend pas juste de sa probabilité de survenir, mais aussi du moment où elle survient. Une adaptation partielle avec des effets secondaires délétères peut l'emporter sur une meilleure version, au moins pendant quelques milliers d'années.

Depuis que les humains sont confrontés au paludisme, des dizaines de modifications génétiques ont augmenté la résistance à cette maladie dans des régions diverses. Chaque fois, une mutation aléatoire est parvenue à se maintenir dans une population locale en dépit de sa rareté initiale. Toutes ces mutations avaient peu de chances de perdurer, mais nos ancêtres étaient si nombreux et se sont multipliés si vite qu'elles ont été pérennisées. La grande taille des populations humaines explique aussi qu'elles se soient rapidement adaptées à leurs nouveaux habitats (car des mutations favorables ont plus de chance de survenir) quand elles sont parties à la conquête du globe.

L'évolution humaine se poursuit aujourd'hui. Les chercheurs peuvent l'observer « en direct », souvent en étudiant les tendances sanitaires et la natalité. Si les techniques médicales, l'hygiène et la vaccination ont considérablement allongé la vie, la natalité reste fluctuante pour nombre de populations.

Une évolution toujours en cours

En Afrique subsaharienne, les femmes enceintes au moment du pic de fréquence du paludisme (pendant ou juste après la saison des pluies) ont légèrement plus de chances d'arriver à terme quand elles ont un certain variant du gène *FLT1*, qui diminue le risque que leur placenta soit infecté par les parasites. Nous ne comprenons pas encore les mécanismes en cause, mais l'effet est important et mesurable.

Stephen Stearns, de l'Université Yale, aux États-Unis, et ses collègues ont examiné les archives des études de santé publique, à la recherche d'éventuels caractères corrélés aux taux de reproduction actuels. Pendant les 60 dernières années, aux États-Unis, les femmes relativement petites et fortes, ayant peu de cholestérol, ont eu un peu plus d'enfants en moyenne que les femmes présentant les caractères opposés. Le lien entre ces caractères et la taille de la famille reste à expliquer.

De nouvelles études de santé publique, tel le projet britannique UK Biobank, vont analyser les génotypes (les caractéristiques génétiques) de centaines de milliers de personnes et suivre leur santé tout au long de leur vie. Les interactions des gènes sont complexes, de sorte que nous devons examiner des milliers de cas pour comprendre quels changements génétiques influent sur la santé humaine. Retracer la généalogie des mutations permet d'observer l'évolution sur des centaines de générations, mais le déroulement précis est parfois masqué : nous voyons les gagnants sur le long terme, tel le variant génétique autorisant la persistance de la lactase, mais nous pouvons passer à côté de la dynamique à court terme. Les populations humaines sont sur le point de devenir la plus grande expérience de biologie évolutive jamais réalisée.

Un brassage génétique sans précédent

Que nous réserve l'avenir ? Au cours des derniers milliers d'années, l'évolution humaine a pris des chemins différents selon les populations, tout en maintenant une surprenante dose d'uniformité. De nouvelles mutations sont apparues, mais elles n'ont pas fait disparaître les vieilles versions des gènes. La plupart de ces versions ancestrales existent encore dans les populations actuelles. Et aujourd'hui, des millions de personnes traversent chaque année les frontières, d'où un brassage génétique sans précédent.

Dès lors, on pourrait croire que les caractères additifs (modulés par divers gènes aux effets indépendants, à l'instar de la couleur de la peau) se mélangeront un peu partout, au point de s'uniformiser sur la planète. Deviendrons-nous donc tous identiques à l'avenir ?

La réponse est non. Beaucoup des caractères qui varient entre les populations humaines ne sont pas additifs. Même la pigmentation n'est pas aussi simple, comme l'illustrent bien les populations métisses des États-Unis, du Mexique et du Brésil : elles ne sont pas constituées d'une masse indistincte de clones café au lait, mais de groupes panachés, où des blondes à peau sombre et taches de rousseur côtoient des hommes à la peau mate et aux yeux verts. Chacun de nos descendants sera une mosaïque vivante de l'histoire humaine.

SUR LE WEB

À propos de l'adaptation des Tibétains aux hautes altitudes : ScientificAmerican.com/sep2014/hawks-origins

BIBLIOGRAPHIE

M. Roffet-Salque et R. Evershed, **Les débuts européens de la production laitière**, *Pour la Science*, n° 438, 2014.

Y. Itan *et al.*, **The origins of lactase persistence in Europe**, *PLOS Computational Biology*, vol. 5, pp. 1-13, 2009.

P. Ward, ***Homo sapiens* évolue-t-il encore ?**, *Dossier Pour la Science*, n° 63, avril-juin 2009.

S. A. Tishkoff *et al.*, **Convergent adaptation of human lactase persistence in Africa and Europe**, *Nature Genetics*, vol. 39, pp. 31-40, 2006.

H. M. Lewis, **Evolution in the future**, *Scientific American*, vol. 164, pp. 221-223, 1941.

La sélection de livres POUR LA SCIENCE

À l'occasion de son numéro spécial sur l'évolution humaine, voici une sélection de livres de référence sur l'évolution et la paléontologie humaine. Devenez incollable sur la théorie de l'évolution, Darwin, l'homme de Neandertal …

Classification phylogénétique du vivant
Tome 2

Guillaume Lecointre, Hervé Le Guyader — Réf. 70113456

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

Éditions Belin 2013 – 608 pages – 39,90 € - 978-2-7011-3456-7

Et aussi : *Classification phylogénétique du vivant Tome 1 – 3e édition,* Guillaume Lecointre, Hervé Le Guyader

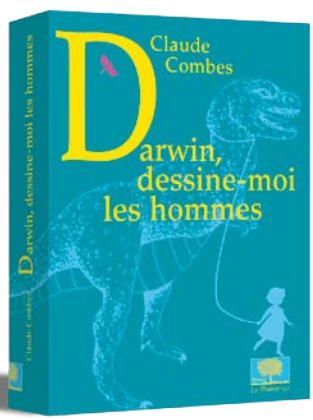
360 pages – 43 € - ISBN 978-2-7011-4223-9

Guide critique de l'évolution

Corinne Fortin, Guillaume Lecointre, Marie-Laure Le Louarn Bonnet, Gérard Guillot — Réf. 70114797

Cet ouvrage présente le cadre théorique – scientifique, épistémologique et historique – de la théorie de l'évolution et donne les clés pour contrer les nombreuses attaques dont elle fait l'objet. Accompagné de plus de deux cents reconstitutions d'animaux et de paysages, il fournit, en outre, de nombreux exemples illustrant la sélection naturelle, l'adaptation, l'apparition des espèces, etc.

Éditions Belin 2009 – 526 pages – 36,05 € - ISBN 978-2-7011-4792-0



Darwin, dessine-moi les hommes

Claude Combes — Réf. 74650300

« Yin me demanda un jour de lui dire qui avait dessiné les hommes, mais elle voulait aussi savoir qui avait dessiné les dinosaures, les chevaux et… les moutons bien sûr. Alors, j'ai parcouru avec elle l'histoire du vivant, cette histoire que l'on appelle évolution, et qui aurait pu, disent les savants, ne jamais exister. Une histoire grandiose qui a donné aux humains la capacité de poser des questions sans perdre celle de s'émerveiller. »

Éditions Le Pommier – 528 pages - 25 € - ISBN 978-2-7465-0300-2

Enquête sur les créationnismes
Réseaux, stratégies et objectifs politiques

Olivier Brosseau, Cyrille Baudouin — Réf. 70115795

Fruit d'une enquête minutieuse et riche d'interviews de grands spécialistes (biologistes, cosmologistes, sociologues, philosophes, etc.), cet ouvrage est à la fois un recueil d'informations sur les créationnismes et un outil indispensable pour exercer son esprit critique dès lors que la science est convoquée pour justifier des positions politiques.

Éditions Belin 2013
336 pages – 21,50 € - ISBN 978-2-7011-5795-5

Les gènes voyageurs

Éric Bapteste — Réf. 70115885

Savez-vous que l'échangisme est une pratique très répandue chez les microbes ? Que plantes et animaux deviennent en partie ce qu'ils mangent ? Ces phénomènes sont dus à des voyages de gènes qui transforment en profondeur le vivant. Une découverte récente qui pourrait bien révolutionner les sciences de l'évolution…

Éditions Belin 2013
192 pages – 19,50 € - ISBN 978-2-7011-5885-3

Darwin viendra-t-il ?

Luc Périno — Réf. 74650386*

Le samedi 30 juin 1860, quelques mois après sa publication retentissante, *L'Origine des espèces* doit être soumise à la critique de l'Église anglicane et de l'Académie des sciences, toutes deux hostiles à la théorie de la sélection naturelle. Le débat s'annonce agité. Toutes les personnalités scientifiques, politiques, ecclésiastiques et artistiques du royaume s'y annoncent. Darwin, l'auteur du livre, viendra-t-il en personne ?

Éditions Le Pommier 2008
162 pages – 23 € - ISBN 978-2-7465-0386-1

En partenariat avec les éditeurs

Belin ÉDITEUR INDÉPENDANT DEPUIS 1777 — Le Pommier

Pour commander ces ouvrages www.pourlascience.fr/librairie

ou en renvoyant le bon de commande ci-contre.

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

Dialogue sur l'émergence

Rémy Lestienne

Réf. 74650585*

Comment expliquer l'apparition de nouveautés radicales dans la nature, telles que la vie ou la conscience ? Le livre nous promène dans différents domaines de la science : physique statistique, chimie, biologie de l'évolution, neurosciences…, dans lesquels la question de l'émergence se pose avec une acuité particulière.

Éditions Le Pommier 2012

288 pages – 23 € - ISBN 978-2-7465-0584-1

Les voies de l'émergence

Introduction à la théorie des unités de niveau d'intégration

Chomin Cunchillos

Réf. 70119208

Rendre justice à l'un des plus grands biologistes théoriciens du XXe siècle – Faustino Cordon (1909-1999) – en diffusant le fruit de ses réflexions dans la communauté des biologistes, historiens des sciences et philosophes : c'est l'objectif de cet ouvrage. Ses principaux travaux et leurs développements les plus récents y sont exposés.

Éditions Belin 2014

320 pages – 35 € - ISBN 978-2-7011-9208-6

Mourir pour un crapaud

Catherine Bousquet

Réf. 74650536*

Pour le Britannique Bateson, farouche darwinien, aucun caractère apparu sous l'influence de l'environnement ne peut devenir héréditaire. Et voici qu'un Viennois, Paul Kammerer, amoureux des crapauds, ose prétendre le contraire ! Commence alors un long et terrible duel… Toute la vérité sur cette dramatique affaire a-t-elle été faite ?

Éditions Le Pommier 2011

336 pages – 33 € - ISBN 978-2-7465-0536-0

Comment la vie a commencé

Alexandre Meinesz

Réf. 70115911

D'où vient la vie ? Comment est-elle apparue sur Terre ? Quels ont été les premiers organismes vivants ? Comment l'évolution a-t-elle sculpté le vivant au fil du temps ? En s'appuyant sur les découvertes les plus récentes, l'auteur aborde les mystères de la vie avec un éclairage original sur l'évolution du vivant.

Éditions Belin 2011 (2e édition)

432 pages – 19,30 € - ISBN 978-2-7011-5911-9

La vie, et alors ?

Débats passionnés d'hier et d'aujourd'hui

Jean-Jacques Kupiec (Dir.)

Réf. 70116148

Sous la plume de grands spécialistes, ce livre réussit le tour de force de fournir à la fois une histoire critique, synthétique et accessible des sciences la vie, et un instantané des débats passionnés qui, en ce début de XXIe siècle, traversent cette discipline en pleine ébullition.

Éditions Belin 2013

416 pages – 23,50 € - ISBN 978-2-7011-6148-8

Des chiens et des humains

Dominique Guillo

Réf. 74650560*

Comment expliquer la relation si particulière que les humains entretiennent avec les chiens ? Pourquoi trouve-t-on des chiens depuis les origines dans presque toutes les sociétés, tantôt considérés comme les êtres les plus vils, tantôt traités comme les amis les plus intimes ? D'où viennent-ils ? Qu'ont-ils dans la tête ? Pourquoi leur parlons-nous ? Force est de constater que nous formons avec ceux-ci depuis les origines une véritable société.

Éditions Le Pommier 2011

256 pages – 9,90 € - ISBN 978-2-7465-0560-5

Tous ces livres sont également disponibles en librairie

À LIRE AUSSI

Qu'est-il arrivé à l'homme de Neandertal ?

Bruno Maureille

Réf. 74650389*

Éditions Le Pommier 2008

144 pages – 4,99 € - ISBN 978-2-7465-0389-2

Les dinosaures sont-ils un échec de l'évolution ?

Éric Buffetaut

Réf. 74650385*

Éditions Le Pommier 2008

144 pages – 4,99 € - ISBN 978-2-7465-0385-4

Qui étaient vraiment nos lointains ancêtres ?

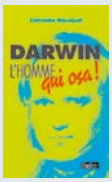
Bruno Maureille et Pascal Muraille

Réf. 74650234*

Éditions Le Pommier 2005

144 pages – 4,99 € - ISBN 978-2-7465-0234-9

Darwin, l'homme qui osa…



Catherine Bousquet

Réf. 70115119

Éditions Belin 2009

160 pages – 7,05 € – ISBN 978-2-7011-5119-9

BON DE COMMANDE

à retourner accompagné de votre règlement à :
Groupe Pour la Science • 628 avenue du Grain d'Or • 41350 Vineuil

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

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

J'indique mes coordonnées

Nom :

Prénom :

Adresse :

C.P. : Ville :

Pays : Tél. :

E-mail* :

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

SCIENCE POUR LA | 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 ❑

DPL445 Offre

HISTOIRE DES SCIENCES

La genèse de la police scientifique

L'analyse des traces laissées par les criminels s'est développée à la fin du XIX^e siècle. Mais elle s'ancre dans des pratiques remontant au Moyen Âge et s'appuie sur des procédés dont l'histoire reste méconnue.

Nicolas Quinche

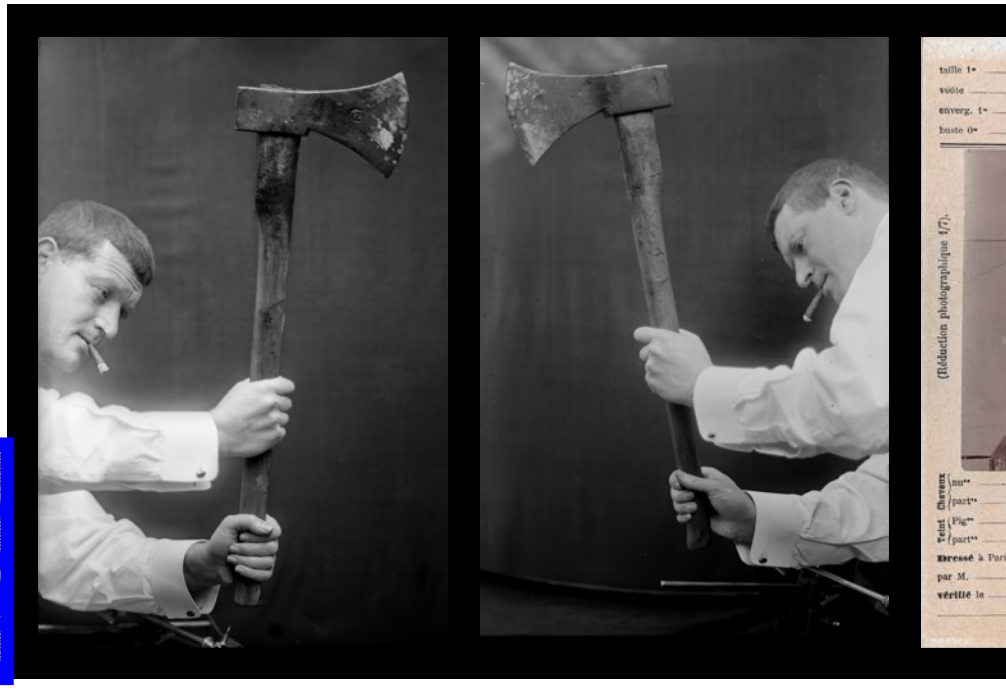
Quand la police scientifique et technique est-elle née ? Question simple, mais réponse complexe. Si on l'envisage en tant que discipline enseignée dans une structure policière ou académique, il est clair que ses prémices institutionnelles sont apparues à la charnière des XIX^e et XX^e siècles.

À cette époque, des mutations majeures touchent les procédés d'identification, les services d'identité judiciaire et les cursus. En France, dès les années 1880, Alphonse Bertillon, commis à la Préfecture de police de Paris, met au point des techniques d'identification, notamment l'anthropométrie, qui vise à identifier les récidivistes en se fondant sur les mensurations de certaines parties du corps. En Suisse, à l'orée du XX^e siècle, Rodolphe Reiss, en disciple de Bertillon, monte un cours de photographie judiciaire qui débouche en 1909 sur la fondation d'un institut de police scientifique à l'Université de Lausanne. L'Italie n'est pas en reste : dès 1896, Salvatore Ottolenghi professe un cours de police scientifique à Sienne.

S'il y a eu un essor indéniable de la police scientifique dans ces années, d'ailleurs favorisé par la vague des attentats anarchistes, il serait erroné de croire que la lecture des traces à des fins indiciales n'était pas pratiquée avant la genèse institutionnelle de la discipline. Les experts contemporains ont eu des devanciers méconnus, tant au Moyen Âge qu'au milieu du XIX^e siècle.

La recherche d'indices dans les traces et les empreintes est une pratique héritée des chasseurs médiévaux. La chasse médiévale suivait un protocole précis. Tout chasseur devait accomplir certaines actions. D'abord, il observait pour détecter des traces ; ensuite, grâce à son expérience, il identifiait l'animal à l'origine de ces traces. Il tentait enfin d'en dresser le signalement le plus précis. Dans les cas les plus favorables, il déterminait non seulement l'espèce et le sexe de la bête, mais aussi son poids, son allure, son âge.

Ce savoir s'apparente à l'exploitation des traces matérielles au cœur de la démarche des pionniers de la police scientifique contemporaine. Et certains, bien que formés aux sciences dures ou juridiques, revendiquent haut et fort tout ce que la police technique doit à ce savoir élaboré par les chasseurs. Des criminalistes de la fin du XIX^e siècle, tel André Frécon, récupèrent l'héritage des chasseurs médiévaux et modernes en intégrant la lecture des pattes d'animaux à leur champ de recherche. Le



ondateur du laboratoire de police technique de Lyon, Edmond Locard, rend en 1937 un hommage mérité à ses devanciers :

« Si l'on veut faire remonter la filiation du policier moderne jusqu'au suiveur de traces animales – et rien n'est plus légitime –, c'est dans les traités de vénerie de la Renaissance qu'il faudrait aller découvrir les grands ancêtres de Sherlock Holmes. Il est certain que l'analyse des empreintes de pas a été faite avec beaucoup plus de sagacité et de minutie par les chasseurs au temps où la chasse était un art, et le plus noble de tous, que par nos meilleurs limiers de la police contemporaine. »

Locard aurait d'ailleurs pu aller plus en amont, car les traités de chasse qui se multiplient à partir du XII[e] siècle, et notamment du XIV[e] siècle, contiennent déjà des chapitres fort conséquents consacrés à l'analuse des traces de pattes.

L'un des premiers exemples d'un traité de chasse médiéval mentionnant l'importance de la lecture des traces de pattes du gibier est un poème anonyme, *La Chace dou cerf*, rédigé dans la seconde moitié du XIII[e] siècle :

u reconnaîtras par le pied
uel cerf tu dois courir.
Gros rebords du pied et large talon,
c'est ce que personne ne doit dédaigner
S'il a les ergots gros et larges,
u es fou si tu u renonces.

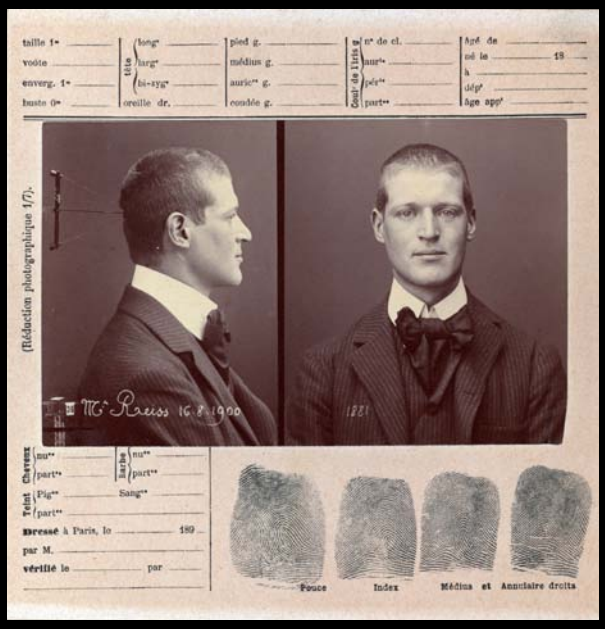
Pour dresser le signalement, le chasseur averti conseille non seulement d'analyser les traces de pattes, mais aussi de ramasser les « fumées » – les excréments laissés par le gibier – ou encore le « frayoir », les traces que le bois de l'animal laisse sur l'écorce des arbres lorsqu'il y frotte la tête, ce qui donne une indication sur sa taille.

Les poèmes médiévaux n'entrent cependant pas dans les détails. Ils ne dévoilent pas comment le chasseur distingue une trace de cerf de celle d'une biche. Il faut attendre les traités de chasse de la fin du XIV[e] siècle pour découvrir des analyses comparatives des traces des diverses espèces de gibier, et des procédures pour développer le sens de l'observation et de l'induction. Dans *Le livre de chasse du roy Modus*, rédigé entre 1374 et 1377, Henri de Ferrières donne ainsi la marche à suivre pour affiner son regard indicial :

« Si tu veux voir les différences et apprendre à distinguer par les traces le jeune cerf de la biche et le grand cerf du

L'AUTEUR

Nicolas QUINCHE est historien. En 2010, il a soutenu sa thèse de doctorat sur la genèse de la police scientifique à l'Université de Lausanne, où il a enseigné l'histoire contemporaine.



L. RODOLPHE REISS *(à gauche et à droite)*, disciple suisse du Français Alphonse Bertillon *(au centre)* et fondateur de l'Institut de police scientifique à l'Université de Lausanne en 1909, expérimente avec l'arme d'un crime en 1910 *(à gauche)*. Bertillon, un des pionniers de la police scientifique, a mis au point des techniques d'identification des récidivistes fondées sur l'anthropométrie. Les caractéristiques étaient rassemblées sur une fiche telle celle ci-contre, où les deux hommes se sont eux-mêmes pliés à l'exercice.

eune, et s'ils sont courables ou non, cherche
a te procurer les pieds d'une biche, ceux
d'un jeune cerf et ceux d'un vieux cerf bien
marchant. Regarde et examine les uns et
es autres et les empreins d'abord en terre
erme, puis en terre molle. Tu verras ainsi
a différence qu'il y a entre les traces et
sauras bien distinguer les biches des vieux
erfs et des jeunes. »

Sur les traces des empreintes digitales

Un croyait en revanche connaître sur le bout des doigts l'histoire de la dactyloscopie, l'étude des empreintes et traces digitales. Or la découverte récente de plusieurs documents a modifié en profondeur la fin du récit relatant les contributions des pionniers des empreintes digitales. Voici l'histoire communément racontée depuis des décennies dans les ouvrages consacrés à la genèse de la police scientifique.

C'est en Asie que l'on trouve les premières utilisations d'empreintes digitales. Dès le VII[e] siècle, des contrats de divorce et des reconnaissances de dettes en Chine portent les empreintes digitales de ceux qui ne sont pas capables de signer.

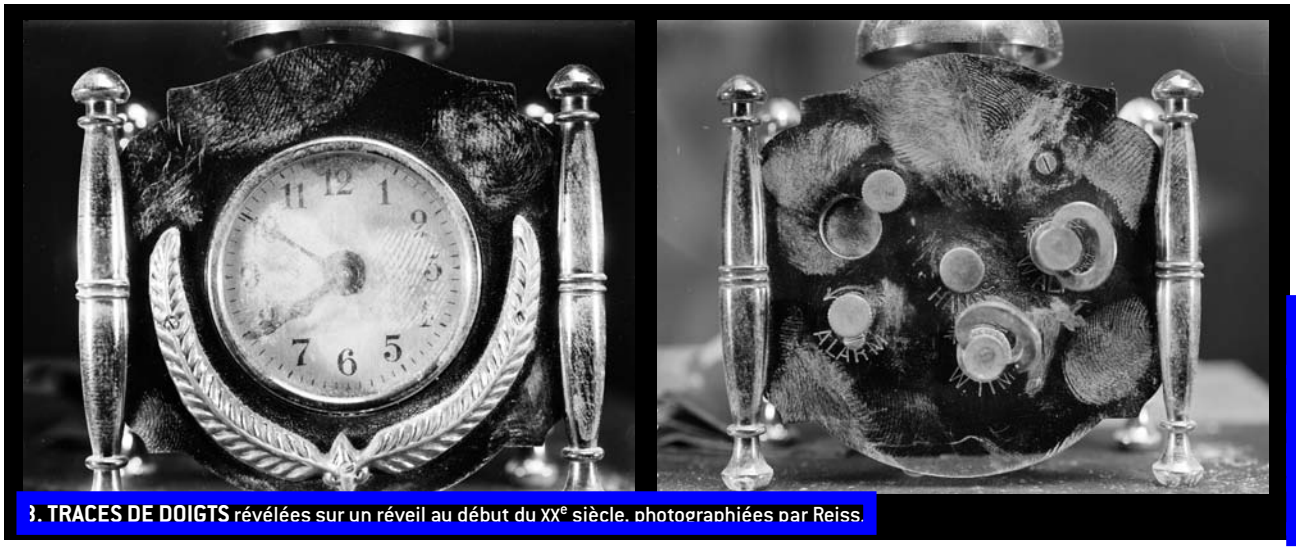
En Europe, on a perçu plus tardivement le potentiel des empreintes digitales. Elles n'apparaissent dans la correspondance qu'à

2. EMPREINTES extraites du traité de chasse de François Fortin *Les ruses innocentes dans lesquelles se voit comment on prend les oiseaux* [et] *plusieurs sortes de bêtes à quatre pieds* (1660).

partir du milieu du XII[e] siècle, au revers de certains sceaux en cire. Cette pratique médiévale, consistant à apposer dans la cire la trace digitale d'un doigt comme signe d'identité, n'est d'ailleurs pas une création *ex nihilo*. Des tablettes babyloniennes en argile du III[e] millénaire avant notre ère portent déjà la marque d'empreintes digitales.

En revanche, c'est bien en Europe que paraissent les premières études scientifiques consacrées aux empreintes digitales. En 1686, le médecin et anatomiste italien Marcello Malpighi publie une étude sur ces dessins, sans toutefois envisager la moindre application à des fins policières. En 1823, Johan Purkinje, professeur de physiologie à l'Université de Breslau, en Silésie (aujourd'hui Wrocław, en Pologne), propose la première classification des dessins digitaux. Mais il n'étudie pas leur permanence et ne les exploite pas à des fins d'identification.

Les premières mentions d'une utilisation des empreintes digitales dans le cadre de l'investigation criminelle apparaissent dans les traités de médecine légale dans les années 1820. Le toxicologue Mathieu Orfila propose d'utiliser les traces digitales dans les cas d'infanticide. En 1823, il incite ses collègues à regarder avec soin les traces sur le cou du nouveau-né mort par asphyxie pour déterminer s'il s'agit d'une mort accidentelle ou criminelle. Cette suggestion est même



3. TRACES DE DOIGTS révélées sur un réveil au début du XX[e] siècle, photographiées par Reiss.

© Pour la Science - n° 445 - Novembre 2014

Des doigts coupables dévoilés par l'iode

« M. Coulier, professeur au Val-de-Grâce, avait remarqué qu'il suffisait souvent qu'une petite quantité de substance étrangère fût déposée sur une feuille de papier, pour que l'iode vint, par son inégale condensation, en accuser la présence ; et même, que la plus légère modification physique de la surface du papier se révélait de cette manière ; il a basé sur cette propriété des vapeurs d'iode, un procédé d'exploration des actes falsifiés. [...] Lorsqu'un acte a été falsifié en partie, l'iode forme des taches plus ou moins foncées là où il y a eu des grattages ou lavages à l'aide de réactifs ; quelquefois même les caractères primitifs reparaissent [...]. M. Coulier a aussi obtenu, sur les points où le papier avait été doucement touché avec les doigts, des taches qui reproduisent fidèlement les dessins des papilles. Ces portraits des doigts coupables pourraient servir à reconnaître les falsificateurs, si, par malheur, les doigts ne glissaient pas d'ordinaire sur le papier, de manière à ne laisser qu'une empreinte confuse de matière grasse. »

Annales d'hygiène publique et de médecine légale, 1864

reprise dans le *Dictionnaire de médecine* en 1825 : « Les ecchymoses du cou devront être particulièrement étudiées sous le rapport de leur forme, afin de savoir si elles sont circulaires ou irrégulières, surtout si elles offrent des empreintes digitales, et si la peau y est entière ou écorchée. On conçoit combien cette recherche est importante, puisque le fœtus peut avoir été étranglé involontairement par l'effet de la compression qu'il éprouve de la part de l'orifice utérin, ou encore du cordon ombilical. »

Dès 1857 en Inde, un fonctionnaire chargé du versement des pensions, William Herschel, utilise les empreintes digitales pour identifier les fraudeurs analphabètes qui tentent de percevoir leur pension à plusieurs reprises. Au Japon, le médecin écossais Henry Faulds, tombé par hasard sur des poteries préhistoriques portant des empreintes digitales, se met à les étudier. Ses travaux débouchent en 1880 sur un article fondateur dans la revue *Nature*, où il suggère d'utiliser les traces digitales sur une scène de crime.

En fait, Faulds n'est pas le seul à avoir eu cette idée. Deux documents ont surgi récemment, remettant en lumière deux confrères qui sont arrivés indépendamment aux mêmes conclusions que lui.

En 2012, la maison Sotheby's de Londres met aux enchères une lettre écrite en 1840 par un obscur médecin du nom de Robert Blake Overton. Cette lettre écrite à la suite de l'assassinat du politicien William Russell, retrouvé égorgé dans son lit en mai 1840, est capitale pour l'histoire de la police scientifique, car son auteur y suggère d'utiliser les empreintes digitales des suspects pour les comparer avec des traces relevées sur les draps et l'oreiller de la scène de crime. Les policiers suivirent le conseil, mais ne trouvèrent aucune trace exploitable sur la scène... hormis celles des médecins légistes.

Paul-Jean Coulier révèle les empreintes

Le second document est un article d'un médecin français, Paul-Jean Coulier, paru en 1863 dans *L'année scientifique et industrielle* et passé inaperçu des services de police et de la justice pendant presque 30 ans. Qu'il s'agisse de ses travaux en physique ou de ses publications sur l'alimentation ou sur les applications du microscope en médecine, rien dans la production scientifique de Coulier, titulaire depuis 1856 de la chaire de toxicologie et de chimie de l'École de médecine du Val-de-Grâce, à Paris, n'indiquait qu'il allait écrire un chapitre fondateur d'une nouvelle discipline, la police scientifique.

Dans son article, il évoque la possibilité d'utiliser les empreintes digitales pour identifier l'auteur de documents falsifiés. Coulier a l'idée d'analyser des documents falsifiés à l'aide de vapeurs d'iode, employées à l'époque pour sensibiliser les daguerréotypes à la lumière. Il tire parti du fait que ces vapeurs révèlent les modifications physiques effectuées sur une surface. L'expérience mise au point par Coulier nécessite peu de matériel et de temps : il suffit de déposer des cristaux d'iode dans une cuvette et de la couvrir avec le document que l'on veut examiner. En 15 à 60 minutes, l'iode qui s'évapore naturellement se dépose à la surface du papier et dévoile les endroits où le faussaire a opéré des grattages ou des effacements. Dans certains cas, ces vapeurs feraient même réapparaître le texte effacé.

Ce n'est pas tout. Coulier a constaté que, sous l'effet des vapeurs, des taches apparaissent sur le document, précisément aux endroits touchés par l'expérimentateur lors de la manipulation. Pour peu que les doigts n'aient pas glissé, les taches iodurées reproduisent avec fidélité les papilles de la peau.

BIBLIOGRAPHIE

N. Quinche, **Experts du crime sur les bords du Léman**, Attinger, 2014.

J. Ribaux, **Police scientifique : le renseignement par la trace**, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2014.

N. Quinche, **Sur les traces du crime : de la naissance du regard indicial à l'institutionnalisation de la police scientifique en Suisse et en France**, Slatkine, 2011.

Police scientifique : les experts mènent l'enquête, *Dossier Pour la Science*, n° 70, janvier-mars 2011.

N. Quinche et P. Margot, **Coulier, Paul-Jean (1824-1890) : a precursor in the history of fingermark detection and their potential use for identifying their source (1863)**, *Journal of forensic identification*, vol. 60, pp. 129-134, 2010.

N. Quinche, **Crime, science et identité : anthologie des textes fondateurs de la criminalistique européenne (1860-1930)**, Slatkine, 2006.

Déjà conscient que ces lignes papillaires forment des motifs variés à l'infini, Coulier en déduit qu'il « ne serait pas impossible de reconnaître à ces vestiges l'individu qui aurait touché le papier ». Il suggère alors de comparer les empreintes digitales du suspect, prises sur une feuille et révélées par les vapeurs d'iode, et les traces figurant sur le document falsifié.

Notons que si le procédé de révélation des traces latentes et la comparaison avec les empreintes d'un suspect sont tout à fait pertinents, Coulier n'a pas encore déterminé la pérennité des dessins digitaux. Il soutient en effet que les motifs digitaux d'un individu pourraient se modifier au fil du temps. La méthode de Coulier comporte aussi des inconvénients. Pour peu que le doigt ait glissé sur le document, sa trace serait trop confuse pour permettre une identification. De plus, les traces digitales révélées disparaissent plus ou moins vite à l'air libre, d'où la nécessité d'en prendre une photographie dans les meilleurs délais.

Le plus étonnant dans cette découverte, c'est qu'elle n'ait pas été remarquée par les services de police et de justice. À part une mention de la technique dans les *Annales d'hygiène publique et de médecine légale* en 1864 *(voir l'encadré page 105)*, peu de policiers ont eu connaissance du procédé ou en ont tiré profit pour identifier les auteurs de faux documents. Il a fallu attendre les années 1900 pour que cette découverte intègre la panoplie des outils des experts.

En 1911, Reiss évoque l'utilité des vapeurs d'iode dans son manuel de police scientifique, sans toutefois mentionner le nom de Coulier. Une lacune désormais comblée.

4. MOULAGE DE TRACES DE CHAUSSURES
réalisé au début du XX^e siècle à l'Institut de police scientifique de Lausanne et photographié par Reiss.

© Pour la Science - n° 445 - Novembre 2014

CHAQUE MOIS

CHAQUE TRIMESTRE

L'APPLICATION *pour smartphone et tablette, telechargeable sur Appstore et Google Play*

LES VERSIONS NUMÉRIQUES *téléchargeables en PDF ou à lire en ligne sur le site*

18 ANS D'ARCHIVES ET DES CONTENUS INÉDITS *sur le site*

POUR LA SCIENCE

LA PRESSE SCIENTIFIQUE DE RÉFÉRENCE

WWW.POURLASCIENCE.FR • WWW.CERVEAUETPSYCHO.FR

Cerveau & Psycho

TOUS LES 2 MOIS

CHAQUE TRIMESTRE

L'APPLICATION *pour smartphone et tablette, telechargeable sur Appstore et Google Play*

LES VERSIONS NUMÉRIQUES *téléchargeables en PDF ou à lire en ligne sur le site*

10 ANS D'ARCHIVES ET DES CONTENUS INÉDITS *sur le site*

Retrouvez *Pour la Science* et *Cerveau & Psycho* également sur :

LOGIQUE & CALCUL

Les graphes-allumettes

Les graphes d'un seul tenant et dont toutes les arêtes sont de même longueur peuvent être dessinés en disposant des allumettes sur une table. Ils sont loin d'avoir livré tous leurs secrets.

Jean-Paul DELAHAYE

Avec des allumettes, les amateurs méticuleux fabriquent des sculptures étonnantes. Un exemple est celle réalisée par Patrick Acton, un passionné d'architecture gothique qui vit dans l'Iowa : longue de plus de deux mètres, elle représente la cathédrale Notre-Dame de Paris *(cliché ci-contre)*. Cette maquette a exigé 298 000 allumettes, 55 litres de colle et 2000 heures de travail (www.matchstickmarvels.com/the-models/notre-dame-cathedral).

Beaucoup moins d'allumettes suffisent à l'amusement d'un mathématicien. Grâce à elles, il découvre de nouveaux aspects de sa discipline en se posant des problèmes géométriques ou topologiques sur les dessins faisables avec des traits ayant tous la même longueur. Il tente de les traiter à la main en manipulant le contenu d'une boîte d'allumettes. Certaines questions le conduisent à établir de délicats catalogues. D'autres se révèlent plus ardues et créent de véritables sujets de recherche où il ne progresse que lentement.

Quand on dispose des allumettes sur une surface plane sans qu'elles se croisent, en les faisant se toucher par leurs extrémités et en composant une forme d'un seul tenant, on dessine des graphes d'un type particulier. Ce sont les « graphes-allumettes » ou « graphes-unités », car on peut supposer que la longueur d'une allumette fixe l'unité de longueur *(voir des exemples dans l'encadré 1)*. L'étude de ces graphes-allumettes est à la fois ludique et sérieuse ; c'est à elle que le mathématicien se consacrera de préférence aux constructions de cathédrales !

Deux graphes G et G' sont équivalents, ou « isomorphes », s'ils ont le même nombre de sommets et d'arêtes et s'il est possible de nommer les sommets de G et de G' d'une telle façon que les arêtes de G (ce sont des couples de sommets) soient exactement les mêmes que les arêtes de G'. Ainsi, dans l'encadré 1, les graphes *a* et *b* sont isomorphes. En revanche, les graphes *a* et *c* ne le sont pas, ni les graphes *c* et *d*. Précisons que les graphes dont nous parlerons ici ne sont pas orientés (l'arête *xy* est considérée identique à l'arête *yx*), et qu'il ne peut y avoir ni arête d'un sommet vers lui-même (pas d'arête *xx*), ni deux arêtes reliant deux fois les mêmes sommets (pas d'arcs doubles). Nous ne le répréciserons pas à chaque fois, mais nous ne considérerons que des graphes d'un seul tenant (on dit aussi « connexes ») : deux sommets quelconques sont toujours joignables par un chemin qui suit les arêtes.

LA CATHEDRALE NOTRE-DAME de Paris, maquette construite avec des allumettes.

Une première question intéresse le mathématicien : un nombre d'allumettes étant fixé, par exemple 6, combien existe-t-il de graphes-allumettes (d'un seul tenant) différents, c'est-à-dire non isomorphes ? On notera $a(n)$ ce nombre. Il est facile de déterminer $a(1) = 1$, $a(2) = 1$, $a(3) = 3$, $a(4) = 5$. Prenez quelques allumettes et amusez-vous à trouver $a(5)$ *(voir l'encadré 1 pour la réponse)*.

Dénombrements

Les valeurs de $a(n)$ définissent la suite A066951 de l'encyclopédie des suites numériques de Neil Sloane (https://oeis.org/A066951). On ne les connaît que jusqu'à $a(9)$ et cela seulement depuis 2013, grâce à un travail de Raffaele Salvia (http://arxiv.org/pdf/1303.5965v2.pdf). Aucune formule n'a été proposée pour $a(n)$.

Un autre décompte est intéressant : parmi les graphes-allumettes (d'un seul tenant) qu'on dessine avec n allumettes, combien sont topologiquement différents ? Cette question admet presque toujours une réponse différente de la première, car deux graphes G et G' sont topologiquement équivalents (on dit aussi « homéomorphes ») si en imaginant que les graphes sont faits de fils en caoutchouc, il est possible de déformer G pour obtenir G' (il ne faut pas se préoccuper des nœuds, mais seulement des

arêtes). Ainsi, les graphes *b* et *c* de l'encadré 1 sont topologiquement équivalents (alors qu'ils ne sont pas isomorphes). En revanche, les graphes *c* et *d* ne sont pas topologiquement équivalents et correspondent à des classes d'homéomorphie distinctes (*dessins A et B*).

Le second problème de dénombrement consiste à déterminer combien de classes d'homéomorphie différentes on obtient en dessinant des graphes-allumettes (d'un seul tenant) avec *n* allumettes. Notons $b(n)$ cette suite. On vérifie aisément que $b(1) = 1$, $b(2) = 1$, $b(3) = 3$, $b(4) = 5$. Rien ne change jusque-là par rapport à $a(n)$. Mais $b(5) = 10$ alors que $a(5) = 12$. En effet, comme l'illustre l'encadré 1, certains graphes non isomorphes appartiennent à la même classe d'homéomorphie. La suite $b(n)$ est la suite A003055 (https://oeis.org/A003055) de l'encyclopédie de N. Sloane qui propose les $b(n)$ jusqu'à $n = 9$. Là encore, aucune formule générale n'est connue pour $b(n)$.

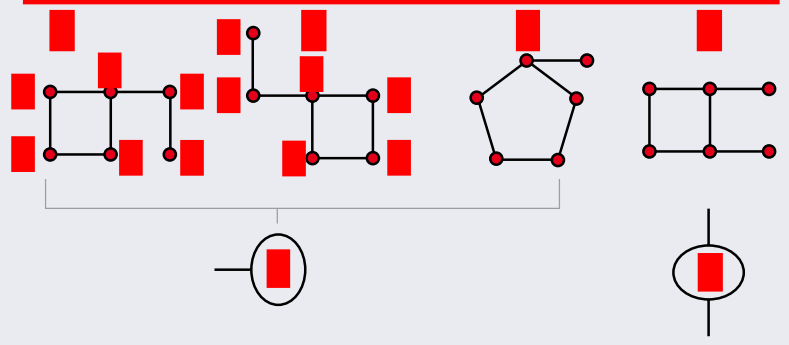
Un joli petit problème que vous pourrez traiter à la main avec seulement six allumettes (de la patience et de la concentration) consiste à retrouver les 28 graphes-allumettes différents qu'on peut faire, et à les regrouper en 19 classes d'homéomorphie. Un défi plus difficile est de mener le même travail pour sept, huit ou neuf allumettes. Vous contrôlerez vos recherches en consultant le récent catalogue publié par R. Salvia.

Les graphes *k*-réguliers

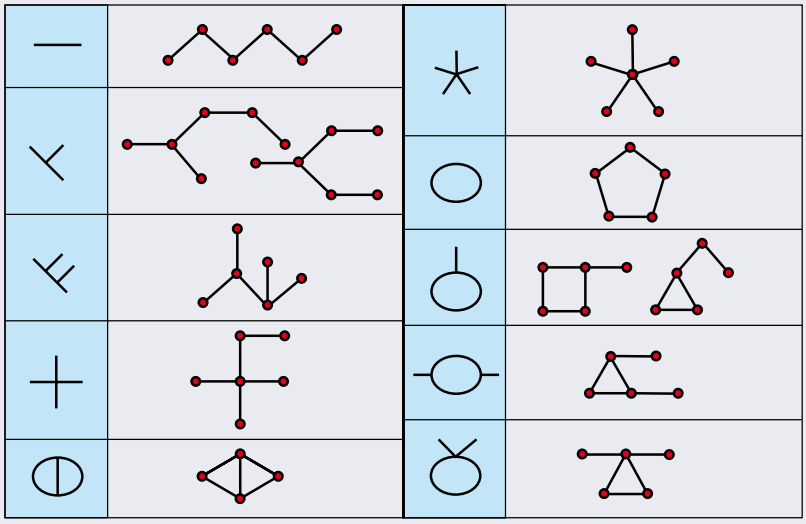
Calculer un tel catalogue est assez difficile, même avec un ordinateur, car les notions d'isomorphisme de graphes et encore plus d'homéomorphisme de graphes ne se laissent pas facilement programmer. Aller au-delà de $n = 9$ serait un bel exploit et permettrait de compléter le catalogue de R. Salvia et les données de l'encyclopédie des suites numériques. Qui veut essayer ?

Dans un graphe, on nomme « degré d'un sommet » le nombre de ses voisins, c'est-à-dire le nombre d'arêtes dont il est l'extrémité. Par définition, un graphe *k*-régulier est un graphe dont tous les sommets ont le même degré *k*. Un tel graphe présente un aspect homogène. Les graphes associés

1. Graphes isomorphes et homéomorphes



n :				5	6	7	8	9
a(*n*)				12	28	74	207	633
b(*n*)				10	19	89	84	197



Un graphe-allumettes est un graphe d'un seul tenant dessiné sur un plan, dont toutes les arêtes sont des segments de droite de même

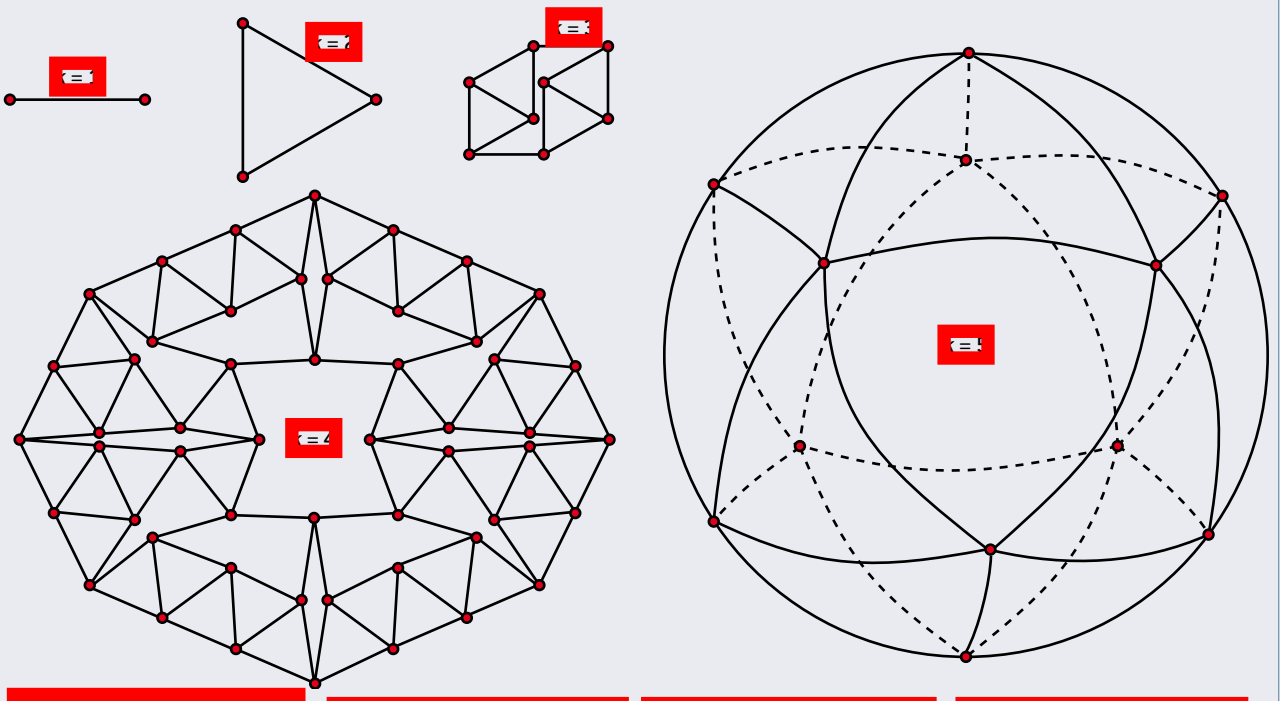
Deux graphes sont dits isomorphes si, en changeant le nom des sommets de l'un, on peut les rendre identiques, c'est-à-dire faire qu'ils aient exactement les mêmes arêtes. Les graphes *a* et *b* sont isomorphes, mais pas *a* et *c*, ni *c* et *d*.

Deux graphes sont topologiquement identiques, on dit « homéomorphes » si, en imaginant que chaque graphe n'est qu'un réseau de fils en caoutchouc parfaitement collés, on peut déformer l'un et obtenir l'autre. Les graphes *a*, *b* et *c* sont homéomorphes. Le graphe *d*, lui, n'est homéomorphe à aucun des autres. Les dessins *A* et *B* représentent les classes d'homéomorphie.

Ci-dessus sont indiqués les 12 différents graphes non isomorphes faisables avec cinq allumettes, qui se regroupent en 10 classes d'homéomorphie.

Le petit tableau indique le nombre $a(n)$ de graphes non isomorphes faisables avec n allumettes sur un plan, et le nombre $b(n)$ de classes d'homéomorphie de ces graphes-allumettes.

2. Les graphes-allumettes *k*-réguliers et le graphe de Harborth



Les graphes-allumettes dont chaque sommet est le point de rencontre de *k* arêtes exactement – les graphes *k*-réguliers – sont faciles à trouver pour $k = 1$ et $k = 2$. Pour $k = 2$, ce sont les graphes en anneaux composés de *n* sommets et *n* arêtes. Le plus petit est un simple triangle équilatéral. Trouver ces graphes-allumettes *k*-réguliers pour $k = 3$ est moins facile. La solution minimale comporte huit sommets. Pour $k = 4$, une solution est le graphe de Harborth, mais on n'est pas certain que ce soit la solution minimale. Pour $k > 4$, il n'existe aucune solution. Pour les graphes-allumettes sur la sphère, il existe une solution pour $k = 5$ qui est la projection sur la sphère des arêtes d'un cosaèdre inscrit.

aux polyèdres réguliers ou semi-réguliers sont tous des graphes réguliers. En 1986, un très joli problème a été posé par Heiko Harborth, de l'Université de Braunschweig en Afrique du Sud. Il porte sur les graphes réguliers faisables sur un plan avec des allumettes. Ce problème, qui n'est que partiellement résolu aujourd'hui, comporte deux questions : 1) Pour quelles valeurs de l'entier *k* existe-t-il des graphes-allumettes *k*-réguliers ? 2) Pour chaque *k* pour lequel de tels graphes existent, quel est le nombre minimal de sommets d'un graphe solution ?

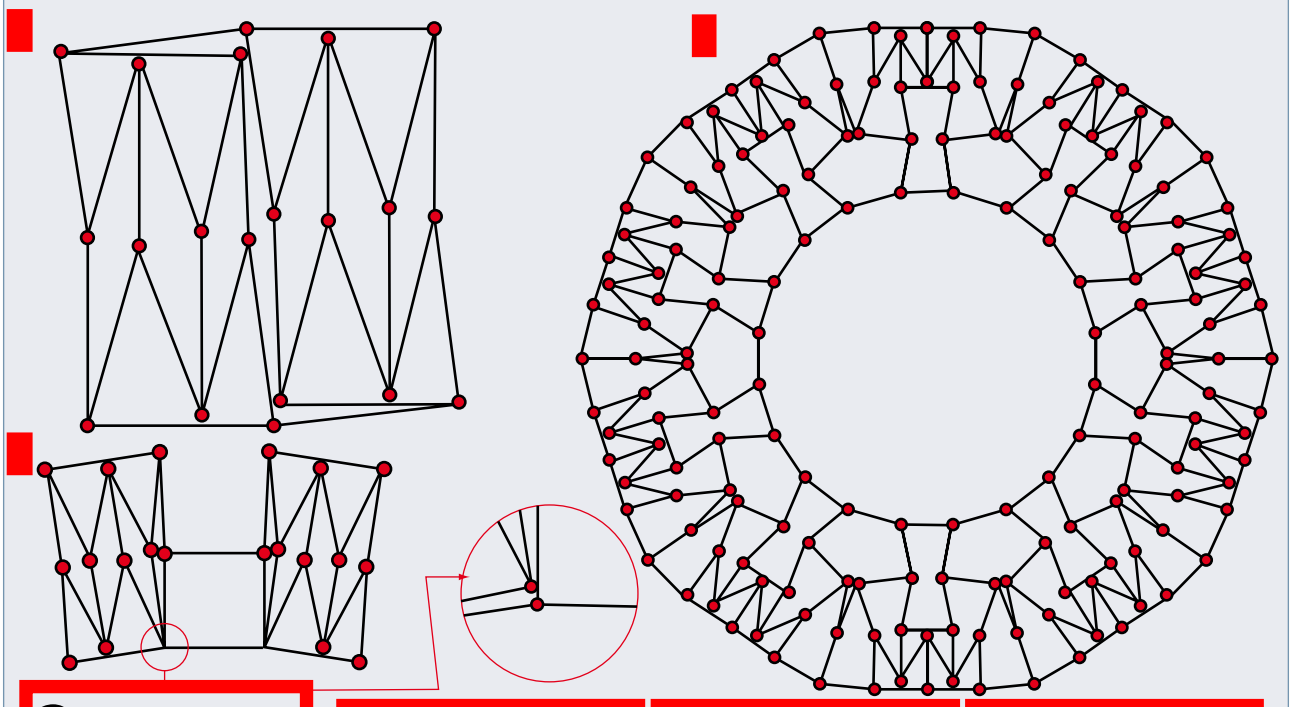
L'encadré 2 présente quatre dessins donnant des solutions pour $k = 1, 2, 3$ et 4. Le graphe pour $k = 3$ n'est pas tout à fait évident, cependant sa recherche constitue un petit casse-tête d'une difficulté raisonnable, qu'on proposera donc à ses amis en prenant l'apéritif. L'énoncé du défi sera : « Trouver une disposition d'allumettes sur la table, sans croisement et telle que chaque extrémité d'allumette en rencontre deux autres exactement ».

Prévoir 12 allumettes au moins. Si un de vos amis trouve la solution, demandez-lui alors de traiter le problème avec $k = 4$ (chaque extrémité d'allumette doit en rencontrer trois autres exactement). Cette fois, il faut prévoir 52 allumettes. La merveilleuse solution découverte en 1985 par H. Harborth porte aujourd'hui son nom. Ce graphe à 52 sommets est rigide : on ne peut pas le déformer en maintenant toutes les jonctions (la solution pour $k = 3$, elle, n'est pas rigide). Connaître exactement les coordonnées des sommets du graphe de Harborth est assez délicat, mais indispensable pour être certain que le graphe existe et démontrer sa rigidité. Ce travail n'a été fait qu'en 2006 par Eberhard Gerbracht, à l'aide d'un logiciel de calcul formel. Dans le cours de ses calculs, il a dû manipuler un polynôme de degré 22.

Le graphe de Harborth est-il minimal ?

Pour $k = 1, 2, 3$, on est certain qu'il n'y a pas de solution plus petite que celles indiquées dans la figure. Pour $k = 4$, on n'a pas encore réussi à démontrer que le graphe de Harborth est minimal. En 2011, Sascha Kurz, de l'Université de Bayreuth, et Rom Pinchasi, du *Technion* en Israël, ont établi à l'aide d'un programme qu'un graphe-allumettes 4-régulier a au moins 34 sommets. On est loin du nombre 52 de la solution de

3. Graphes où les triangles sont interdits



On recherche des graphes allumettes k-réguliers où la longueur T du plus petit circuit est différente de 3 : le graphe ne doit comporter aucun triangle. Pour $k = 3$ et $T = 4$, une solution à 20 sommets *(a)* a été trouvée récemment par S. Kurz et G. Mazzuoccolo qui proposent aussi une méthode donnant des graphes-allumettes 3-réguliers avec $T = 4$ et un nombre pair $\geqslant 20$ de sommets. L'idée *(b)* est de remplacer le quadrilatère de la partie centrale par une série de quadrilatères formant une chaîne (un quadrilatère supplémentaire augmente le nombre de sommets de 2). Pour le cas difficile $k = 3$ et $T = 5$ (pas de triangle, pas de quadrilatère), la solution minimale à ce jour est ce graphe à 180 sommets *(c)*.

H. Harborth, mais on ne sait pas faire mieux pour l'instant ; on recherche donc des graphes-allumettes 4-réguliers plus petits que le graphe de Harborth.

Pas de solution pour $k > 4$

Pour $k = 5$, on soupçonnait depuis longtemps qu'aucune solution n'est possible. Plusieurs preuves ont été proposées pour établir cette inexistence. Dans un premier temps, certaines comportaient des erreurs. Les preuves admises aujourd'hui sont dues à Aart Blokhuis, de l'Université d'Eindhoven, S. Kurz et R. Pinchasi. Aucune n'est assez simple pour être reproduite ici !

Remarquons que cette impossibilité ne concerne que le plan. Sur une sphère, en prenant les projections des arêtes d'un icosaèdre (le polyèdre de Platon à 20 faces) sur la sphère dans lequel il s'inscrit, on dessine à la surface de la sphère un graphe-allumettes 5-régulier *(voir l'encadré 2)*.

Pour $k = 6$, il n'y a pas de graphes-allumettes 6-réguliers au sens usuel, c'est-à-dire ayant un nombre fini de sommets, mais il est facile d'imaginer une solution infinie. Réfléchissez trois secondes (réponse : un pavage de triangles équilatéraux sur tout le plan).

Pour $k \geqslant 6$, on démontre, cette fois facilement, qu'il n'y a pas de solution. La démonstration utilise la formule d'Euler pour les graphes planaires. Celle-ci indique que pour un graphe planaire, on a toujours $S - A + F = 2$, où S est le nombre de sommets, A le nombre d'arêtes, et F le nombre de faces, c'est-à-dire de zones du plan créées par le graphe, y compris la zone extérieure au dessin du graphe).

Voici cette démonstration. Si le graphe est k-régulier, à chaque sommet arrivent exactement k arêtes, donc $kS = 2A$. La formule d'Euler devient :

$2A/k - A + F = 2$, ou $F = 2 + (1 - 2/k)A$.

Chaque zone du plan délimitée par le graphe comporte au moins trois arêtes sur son pourtour et chaque arête borde exactement deux zones. Cela signifie que $F \leqslant 2A/3$. On en tire $2A/3 \geqslant 2 + (1 - 2/k)A$ ou $0 \geqslant 2 + (1/3 - 2/k)A$. Or cela est impossible quand $k \geqslant 6$, car $(1/3 - 2/k)$ est alors positif ou nul. Cela achève notre démonstration.

Dans un graphe, la longueur de la plus courte liste d'arêtes qui se suivent et reviennent à leur point de départ se nomme taille du plus petit circuit. On note T ce

paramètre. C'est une donnée qui intéresse les mathématiciens, car les graphes ayant un T assez grand sont rares. Dans le cas du graphe de Harborth, $T = 3$ (il comporte des triangles). Un article publié récemment par S. Kurz et Guiseppe Mazzuoccolo, de l'Université de Modène, s'intéresse aux graphes-allumettes k-réguliers ayant $T > 3$ (donc plus difficiles à trouver).

On savait déjà que les graphes-unités 3-réguliers avec $T = 3$ existent si et seulement si le nombre de sommets est pair et supérieur à 8. L'article démontre que les graphes-allumettes 3-réguliers avec $T = 4$ existent si et seulement si le nombre de sommets est pair et supérieur ou égal à 20. Le graphe trouvé pour 20 sommets est étonnant et il faut le regarder de très près pour être certain que les allumettes (nécessairement excessivement fines) ne se touchent qu'à leurs extrémités *(voir l'encadré 3)*.

En plus du travail de démonstration mené pour les graphes ayant $T = 4$, les chercheurs ont réussi à construire un graphe-allumettes 3-régulier ayant $T = 5$ *(voir l'encadré 3, c)*. Il a 180 sommets et est très beau. On ignore si c'est le meilleur de sa catégorie.

Une démonstration utilisant à nouveau la formule d'Euler établit que les graphes-allumettes 3-réguliers ayant $T \geqslant 6$ sont impossibles.

Dans leur article, les deux auteurs rendent hommage à H. Harborth qui a introduit les problèmes de graphes-allumettes en 1986. Ils précisent que « les allumettes sont les moins chers et les plus simples des objets donnant naissance à des problèmes stimulants, difficiles et ayant un véritable intérêt mathématique. »

Les variantes de ces problèmes ont donné naissance à une famille d'énigmes mathématiques susceptibles de vous occuper longuement. Erich Friedman, de l'Université Stetson en Floride, s'est par exemple intéressé aux graphes-allumettes ayant deux sortes de sommets, les uns de degré n, les autres de degré m (généralisation naturelle de la notion de graphes-allumettes k-régu-

liers). En existe-t-il toujours ? Quels sont, pour n et m fixés, les plus simples ?

Sur la page http://www2.stetson.edu/~efriedma/mathmagic/1205.html, E. Friedman tient à jour les meilleurs résultats connus *(voir l'encadré 5)*.

Un problème NP-difficile

La difficulté à résoudre ces problèmes a une explication indirecte qui, cette fois, nous emmène au cœur de la théorie moderne du calcul. La difficulté s'explique par un résultat démontré par les Australiens Peter Eades et Nicholas Wormald : le problème de dessiner sur un plan un graphe dont toutes les arêtes ont la même longueur est « NP-difficile ». Cela signifie que si on savait faire cela efficacement (c'est-à-dire en temps polynomial en fonction du nombre d'arêtes), alors on saurait traiter efficacement une multitude d'autres problèmes dont certains sont unanimement considérés difficiles (ceux dénommés NP-complets). En clair, il ne fait pas de

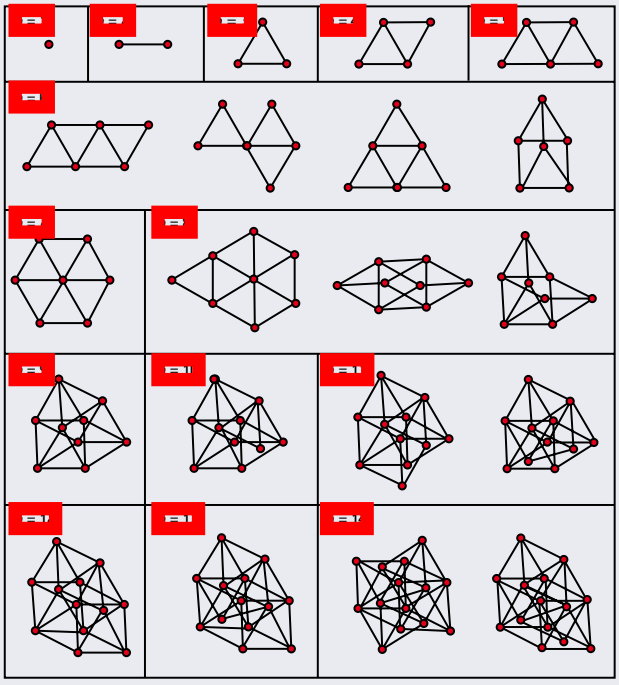
4. Le problème de Paul Erdős

En 1946, Paul Erdős se demande, quand on place n points sur le plan, combien de fois au plus on peut obtenir la même distance entre deux points. La question peut se [illegible] condition d'autoriser le croisement des arêtes.

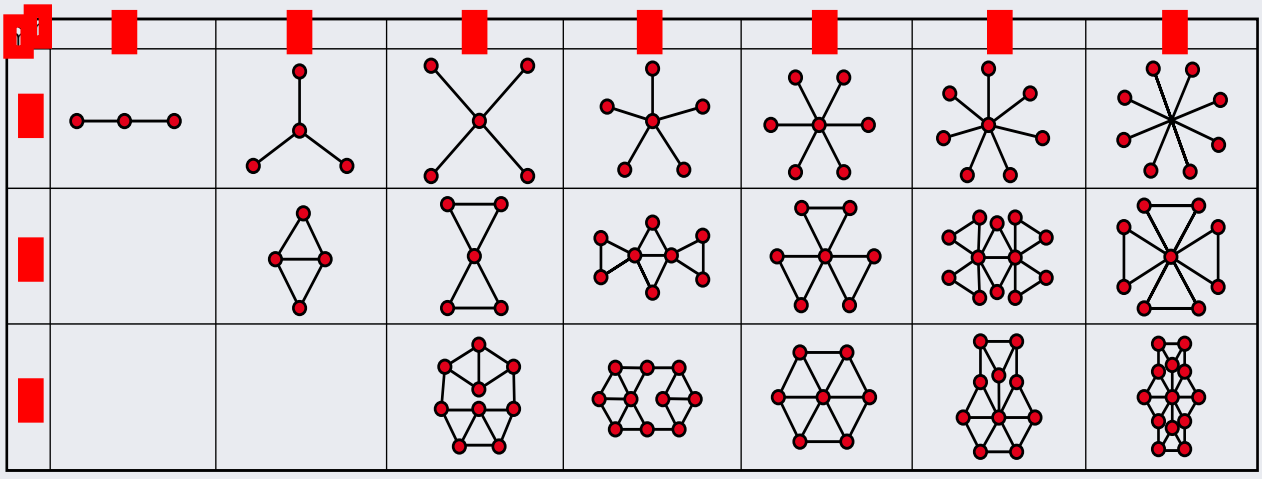
La question d'Erdős devient alors : quel est le maximum $f(n)$ d'arêtes que peut avoir un graphe-allumettes de n sommets ? Des petits dessins permettent de répondre assez facilement pour les premières valeurs de n ($n = 1, 2, ..., 6$). En revanche, pour aller plus loin, il faut s'armer d'une grande patience et de beaucoup d'ingéniosité… ou d'un ordinateur.

La suite $f(n)$ est la suite A186705 de l'encyclopédie des suites de Neil Sloane. Erdős démontra qu'il existe deux constantes positives c et c' telles que : $n^{1+c/\log(\log(n))} < f(n) < c' n^{3/2}$. L'exposant 3/2 du terme de droite a depuis été amélioré, d'abord en 1,44, puis en 4/3. Mais on n'en sait pas plus aujourd'hui, et bien sûr, pas plus que pour $a(n)$ et $b(n)$, on ne connaît de formule générale satisfaisante pour $f(n)$.

On a représenté ci-contre les meilleurs graphes-allumettes connus pour ce problème (dessins dus à C. Schade, voir le livre de P. Brass, W. Moser et J. Pach).



5. Les graphes de Erich Friedman



Erich Friedman s'est intéressé aux graphes-allumettes ayant uniquement des sommets de degré n ou m (n et m étant deux entiers fixés, ici $m = 1, 2, 3$ et $n = 2, 3, \ldots, 8$). Nous les nommerons « graphes-allumettes de type n-m ». On recherche à chaque fois les solutions minimales (voir la page www2.stetson.edu/~efriedma/mathmagic/1205.html).

doute que dessiner un graphe-allumettes en partant seulement de la donnée de ses arêtes exige des calculs qui deviennent déraisonnablement longs quand le nombre d'arêtes augmente.

Le maximum de points distants d'une unité

Un graphe-allumettes est un ensemble de points du plan dont tous ceux liés par une arête sont distants d'une unité exactement. Une question naturelle se pose à propos des ensembles des points distants d'une unité. C'est le grand mathématicien hongrois Paul Erdős qui y a pensé le premier en 1946. Un entier n étant fixé, on considère n points sur un plan ; combien au plus de couples de points peuvent-ils être mutuellement à distance 1 ? À la condition d'autoriser les croisements d'allumettes (ce qui jusqu'à présent n'était pas le cas), ce nombre, que nous noterons $f(n)$, est le nombre maximum d'arêtes d'un graphe-allumettes ayant n sommets. Erdős s'est penché sur cette suite $f(n)$ qui, depuis, a donné lieu à une série de publications. Quelques dessins permettent de trouver les premières valeurs de $f(n)$: $f(1) = 0, f(2) = 1, f(3) = 3, f(4) = 5, f(5) = 7, f(6) = 9$.

Au-delà, c'est nettement plus délicat comme le montrent les configurations optimales de l'encadré 4, qui conduisent aux valeurs : $f(7) = 12$, $f(8) = 14$, $f(9) = 18$, $f(10) = 20$, $f(11) = 23$, $f(12) = 27$, $f(13) = 30$, $f(14) = 33$.

La beauté et l'importance des mathématiques sont sans doute liées à ce que nous constatons en étudiant les graphes-allumettes : au départ, le sujet est simple, et semble n'être qu'une question combinatoire assez facile à maîtriser. Pourtant, en allant y voir de plus près, toutes sortes de mathématiques y glissent leur nez (dénombrements délicats, topologie, polynômes, classes de complexité, etc.) pour, finalement, constituer des vrais et difficiles sujets de recherche dont personne ne sait faire le tour et dont les avancées enrichissent les mathématiques d'objets fascinants, tel le graphe de Harborth. ■

Retrouvez la rubrique Logique & calcul sur www.pourlascience.fr

L'AUTEUR

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

BIBLIOGRAPHIE

S. Kurz et G. Mazzuoccolo, **3-regular matchstick graphs with given girth** (http://arxiv.org/abs/1401.4360), 2014.

S. Kurz et R. Pinchasi, **Regular matchstick graphs**, *The Amer. Math. Monthly*, vol. 118(3), pp. 264-267, 2011.

E. Gerbracht, **Minimal polynomials for the coordinates of the Harborth graph** (http://arxiv.org/pdf/math/0609360.pdf), 2006.

P. Brass, W. Moser et J. Pach, **Research Problems in Discrete Geometry**, Springer, 2005.

Références supplémentaires sur le site www.pourlascience.fr

SCIENCE & FICTION

Visions d'un autre monde

Ils peuvent voir de loin, de nuit ou à 360 degrés… Les héros de la science-fiction ont la vue perçante. Pourtant, les animaux terrestres n'ont rien à leur envier.

Roland LEHOUCQ et Jean-Sébastien STEYER

Les yeux des extraterrestres dans la science-fiction font preuve d'une grande diversité : globuleux comme ceux de Jar Jar Binks *(Star Wars)*, à pupille verticale pour les aliens de la série télévisée *V*, ou encore à facettes comme chez le monstre d'Edgar Burroughs dans la nouvelle *Yellow Men of Mars* (1948). Si ces organes sont variés, c'est qu'ils doivent aussi faire ressortir la personnalité de leur porteur : E. T. du film éponyme de Steven Spielberg a de grands yeux bleus, signe infaillible que c'est un gentil, tandis que l'atrabilaire Sebulba *(Star Wars)* a de petits yeux jaunes qui lui confèrent un regard perfide. Enfin, les yeux du monstre Alien ne semblent pas visibles, ce qui accentue l'angoisse provoquée par ce superprédateur.

La diversité des yeux extraterrestres rivalise avec celle des animaux sur Terre. Rien que chez l'homme, on peut identifier une personne d'après le motif unique de l'iris, une idée au centre de l'intrigue de *I Origins (voir la figure 1)*. La vision est un sens très répandu et l'évolution a conduit à une grande variété de systèmes sensibles à la lumière.

Un dispositif simple, présent chez des organismes unicellulaires, est celui de photorécepteurs capables de détecter la direction et l'intensité d'une source lumineuse. La cellule se dirige alors vers la lumière pour optimiser sa photosynthèse. Chez la plupart des êtres vivants, la lumière est détectée grâce à une famille de protéines nommées opsines. Celles-ci sont capables d'absorber la lumière pour la convertir en signal électrique traité par le système nerveux.

Dans le monde animal, on trouve deux grandes catégories d'yeux, les simples et les composés, apparus indépendamment au cours de l'évolution. Les yeux simples ont une surface sensible à la lumière sur laquelle l'image est formée. Le nautile est le seul exemple d'animal à œil simple fonctionnant comme un sténopé, que l'on nomme aussi *camera obscura* ou chambre noire. La lumière entre par un petit trou et se projette sur la face opposée. Avec ce système, l'œil voit net à toutes les distances en même temps, mais l'image est peu lumineuse, car la petite taille du trou ne permet pas de recueillir beaucoup de lumière.

En utilisant la réflexion, l'œil de la coquille Saint-Jacques forme une image plus lumineuse : une couche réflectrice concave, derrière la rétine, joue le rôle de miroir. Les rayons provenant d'une même direction sont ainsi réfléchis différemment selon leur incidence et sont concentrés sur un faible nombre de photorécepteurs, permettant la formation d'une image lumineuse. Enfin, chez les vertébrés et certains mollusques, l'image est formée par réfraction à travers un matériau transparent situé devant la rétine (le cristallin dans l'œil humain). Cela permet de dévier les rayons lumineux et de concentrer ceux provenant

L. DANS *I ORIGINS* (Mike Cahill, 2014), le héros étudie l'évolution de l'œil. Il tombe amoureux d'une femme et la retrouve grâce au motif unique de l'iris de ses yeux.

2. UN HOMME DOTE D'UN ŒIL MODIFIE pour être sensible aux rayons X *(à gauche)* pourrait voir directement à l'intérieur d'un corps placé devant une source de rayons X *(à droite)*.

d'une même direction sur une zone limitée de la rétine, à la manière d'une loupe.

Dans le film *La Mouche* (David Cronenberg, 1986), une tentative de téléportation tourne mal et le héros se transforme progressivement en mouche. Il expérimente ainsi la vision de ces insectes dotés d'yeux à facettes, composés de multiples récepteurs sensibles à la lumière, les ommatidies. Il y en a jusqu'à 30 000 chez certains coléoptères ! Les yeux composés sont apparus au début du Paléozoïque avec les premiers arthropodes : des sortes de cloportes présents dans les mers il y a 521 millions d'années avaient déjà des yeux comptant plus de 15 000 ommatidies.

Ces yeux à facettes confèrent à l'animal une vision à 360 degrés ou presque. Une autre façon d'avoir une vue large dépend de la position des yeux sur la tête. Cette caractéristique révèle aussi la position trophique de l'animal, proie ou prédateur.

Chez une proie, tels les moineaux, les lapins ou les souris, les yeux sont placés de part et d'autre de la tête. Cela augmente le champ visuel et facilite la détection d'un danger dans l'environnement. À l'inverse, chez un prédateur, tels les chats ou les rapaces, les yeux sont placés l'un à côté de l'autre à l'avant du crâne, ce qui permet d'avoir une vision binoculaire et de mieux estimer la distance d'une proie. On ne voit pas la position des yeux d'Alien, mais, dans le troisième opus de la saga, la vue du monstre est simulée par des lentilles *fisheye* qui augmentent le champ de vision et les chances de repérer la victime.

En l'air, Superman repère de très loin une catastrophe. Sa vision acérée n'est pas sans rappeler celle des rapaces. Ils peuvent distinguer des détails à des distances deux à trois fois supérieures à celles qui nous sont accessibles : un faucon crécerelle peut repérer une souris en volant à 50 mètres de haut et le faucon pèlerin peut apercevoir un pigeon à plus d'un kilomètre.

De nuit, rien n'échappe au Prédator

Quelle est la particularité de la vue du Prédator, le chasseur par excellence ? Sa vision est parfaitement adaptée pour traquer ses proies humaines : elle est sensible à la lumière infrarouge émise par leur corps chaud. Cependant, la vision au-delà du spectre visible n'est pas réservée à la science-fiction.

Par exemple, le crotale détecte ses proies dans l'obscurité totale grâce à des fossettes situées entre les yeux et les narines. Il s'agit de cavités creuses dont les parois sont tapissées de nerfs sensibles au réchauffement provoqué par l'absorption de rayonnement infrarouge. Leur maximum de sensibilité correspond au rayonnement émis par des proies dont la température est d'environ 30 °C. L'image dans ces récepteurs demeure assez rudimentaire : la lumière passe par un petit trou et forme sur le fond de la cavité l'image inversée de l'animal observé, comme dans une chambre noire. Cette image est trop floue pour permettre au serpent de bien reconnaître sa cible, qu'il identifie plutôt grâce à son odorat. Mais une fois la proie choisie, ce moyen de détection lui suffit pour l'atteindre à coup sûr.

A l'autre extrémité du spectre visible, la lumière ultraviolette est exploitée par d'autres animaux : l'abeille, l'hirondelle, le poisson zèbre… et les stomatopodes. Ces derniers sont des crustacés nommés aussi squilles ou, par les anglophones, « crevettes-mantes », même si ce ne sont ni des crevettes ni des mantes. Leurs yeux ont 8 pigments différents pour la lumière ultraviolette et 12 pour le visible. Ils bougent indépendamment l'un de l'autre, comme chez le caméléon, et offrent une vision à 360 degrés. Chaque œil est composé de trois sortes de pupilles indépendantes, ce qui confère à chaque œil une vision en relief. Enfin, ces animaux discernent la lumière polarisée.

Pour battre de telles caractéristiques, un extraterrestre devra être équipé d'une vision vraiment extraordinaire. Mais si ses yeux doivent composer avec les lois de l'optique, on peut s'attendre à certaines différences : notamment, ils seront adaptés au spectre lumineux de leur soleil. ■

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

ART & SCIENCE

Le réveil de la matière fatiguée

Comment donner à voir le vide quantique ? La parole abstraite des scientifiques s'associe à l'expression artistique de danseurs, de vidéastes, de musiciens… pour raconter l'origine de l'Univers.

Loïc MANGIN

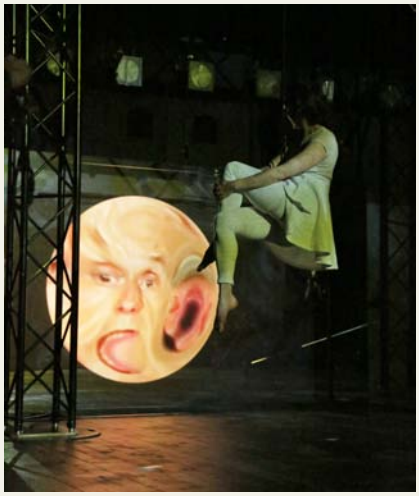
Comment est né l'Univers ? Selon les hypothèses en vigueur aujourd'hui, il résulterait des fluctuations du vide quantique ! Cette réponse est peu satisfaisante, car elle conduit à de nombreuses autres interrogations, à commencer par « Qu'est-ce que le vide quantique ? ».

À ce stade, deux options sont possibles : soit vous vous inscrivez à l'université pour faire de longues études de physique, soit vous guettez la venue dans votre région de *Origins*. Il s'agit d'un spectacle imaginé par la journaliste de radio Marie-Odile Monchicourt avec la participation de nombreux scientifiques, dont Michel Spiro, ancien président du conseil du Cern. Citons également parmi les contributeurs Hubert Reeves, Étienne Klein, Marc Lachièze-Rey, Pierre Sonigo, Sandrine Laplace, Stéphane Dugowson, Anatole Khélif…

L'idée centrale du projet est de donner à voir des concepts ardus qui défient le sens commun (c'est bien le cas du vide quantique) à l'aide d'un outil inédit de divulgation des connaissances, en l'occurrence un spectacle. Dans celui-ci, mis en scène par Jack Souvant, trois acrobates danseurs évoluent, parfois accrochés à des filins, sur une structure aérienne constituée d'éléments métalliques, tels des mâts, des escaliers et des rampes *(voir les photographies page ci-contre)*. La musique a été composée par Benjamin Moussay.

Par ailleurs, Pierrick Sorin, artiste vidéaste et scénographe, a conçu des « petits théâtres optiques », c'est-à-dire des dispositifs dans lesquels des physiciens et des mathématiciens donnent des indications et des informations sur divers concepts *(voir la figure ci-dessous)*. Par ce stratagème, la parole des scientifiques est transmise de façon ludique dans un contexte décalé.

Par exemple, selon É. Klein, le vide est empli d'une sorte de matière fatiguée qui ne demande qu'un peu d'énergie pour sortir de sa torpeur. Aussi voit-on, dans un des théâtres optiques, le physicien devenu une sorte de prince charmant réveillant une « matière au bois dormant » endormie.



Un premier volet de *Origins* consacré au vide quantique a été présenté les 15 et 16 septembre 2014 au Centre des Arts d'Enghien-les-Bains, l'établissement étant un des coproducteurs du projet avec le collectif *Bonheur Intérieur Brut*.

Le projet *Origins* organise également des *Labos* où se rencontrent artistes, scientifiques, philosophes et public. Ces échanges nourrissent l'écriture du spectacle. Dans l'un d'eux, M. Spiro raconte que les idées d'Albert Einstein sont plus accessibles aujourd'hui qu'à l'époque où elles ont été énoncées, grâce à des générations de pédagogues qui se sont succédé pour les digérer et les rendre plus intelligibles.

Il en ira sans doute de même des progrès récents de la physique, notamment la découverte du boson de Higgs en juillet 2012 et la mesure précise du fond diffus cosmologique par le satellite *Planck* en 2013. Ces deux résultats majeurs sont des étapes décisives sur le chemin qui nous conduit à la compréhension de l'Univers, de ses débuts et de son histoire. Et de fait, le vide quantique est la clef de voûte de cet édifice intellectuel en construction.

Nous avons donc là aussi besoin de quelques générations de pédagogues pour bien comprendre de quoi il retourne, et *Origins* nous montre le chemin. P. Sorin prévient : « On sort du spectacle peut-être plus perdu qu'on ne l'était en y entrant, mais avec cette conscience qu'il y a quelque chose que l'on ne maîtrise pas et qui influe beaucoup sur notre manière d'être au monde. » ■

Le site de ***Origins, le spectacle*** pour connaître les dates des prochaines représentations et des *Labos* : www.originslespectacle.eu

IDÉES DE PHYSIQUE

Mettez un turbo dans votre moteur

Les courses de Formule 1 sont aussi celles des ingénieurs, qui s'évertuent à concevoir des moteurs turbo plus performants.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Cette année, depuis le début de la saison, les bolides du constructeur *Mercedes* dominent sans partage les grands prix de Formule 1. L'une des clefs de ce succès est la mise au point d'un moteur turbo plus efficace que celui des concurrents. L'élément caractéristique de tels moteurs est le turbocompresseur : il récupère l'énergie restant dans les gaz d'échappement pour précomprimer l'air entrant dans le moteur, ce qui augmente la puissance de ce dernier. Comment les ingénieurs de *Mercedes* ont-ils amélioré les performances de leurs moteurs ? En écartant bien l'un de l'autre les étages de compression et d'échappement de l'air.

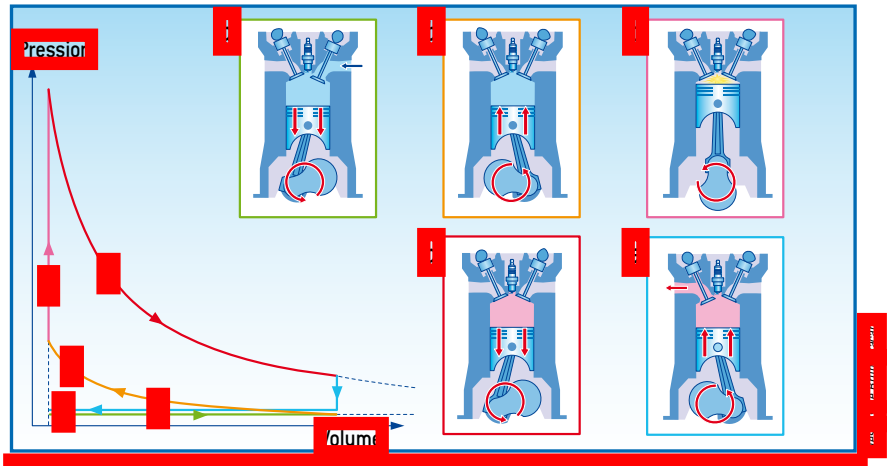
Pour comprendre, détaillons d'abord le principe du moteur à explosion à quatre temps *(voir la figure 1)*. Au plus bas de la course du piston, le volume de la chambre est à son maximum et rempli d'air. Ce dernier est alors comprimé par le piston toutes soupapes fermées, tandis que du carburant y est injecté dans les proportions qui assurent une combustion de tout l'oxygène disponible.

La combustion, très rapide, est déclenchée au point haut de la course du piston, grâce à une étincelle produite par la bougie. Le gaz, fortement chauffé et sous très haute pression, repousse violemment, jusqu'à son point bas, le piston qui fait tourner le vilebrequin et entraîne *in fine* le mouvement des roues. Au retour du piston, une soupape s'ouvre pour que les gaz brûlés s'échappent. Puis le cycle recommence avec la fermeture de la soupape d'échappement et l'admission d'air frais par une autre soupape.

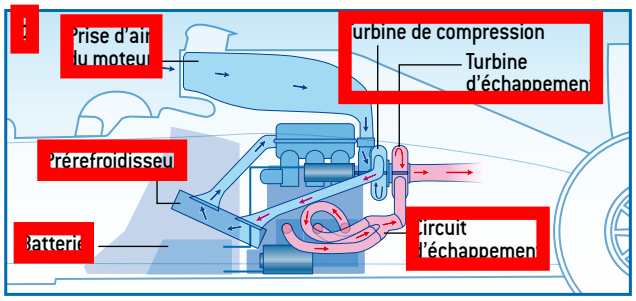
Comprimer l'air qui entre dans le moteur

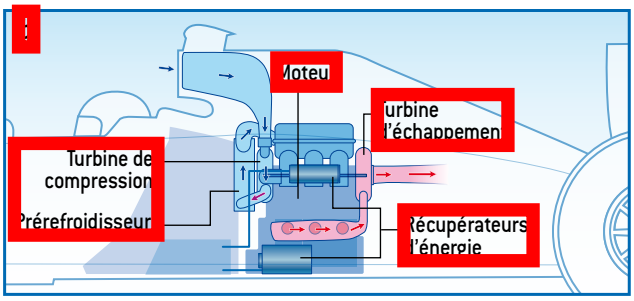
Comment augmenter la puissance d'un tel moteur ? Une première idée est de raccourcir la durée d'un cycle, c'est-à-dire de faire tourner le moteur plus rapidement. Le règlement de la F1 interdit cependant de dépasser 15 000 tours par minute, valeur sans rapport avec les performances des voitures de tourisme (de l'ordre de 3 000 tours par minute) et pour laquelle les efforts mécaniques sont déjà considérables.

Une deuxième idée est d'apporter plus d'énergie lors de chaque cycle. Dans un moteur à combustion interne, c'est la quantité d'essence injectée qui détermine l'énergie fournie. Or cette quantité de carburant est limitée par l'oxygène disponible pour la brûler. Il faut donc plus d'oxygène, c'est-à-dire plus d'air frais en départ de cycle, le tout sans changer la cylindrée du moteur (le volume total balayé par les six pistons), que le règlement limite à 1,6 litre.



1. LE CYCLE DU MOTEUR À EXPLOSION peut être représenté dans un diagramme pression/volume, les différentes étapes du cycle étant distinguées par la couleur du tracé *(à gauche)*. Ces étapes sont, successivement, l'admission de l'air *(a, en vert)*, la compression *(b, en orange)*, l'allumage *(c, en rose)*, la détente *(d, en rouge)* et l'échappement *(e, en bleu)*.





2. DANS UN MOTEUR TURBO CLASSIQUE, la turbine actionnée par les gaz d'échappement est très proche de celle servant à comprimer l'air qui entre dans le moteur *(a)*. La proximité du circuit d'échappement, chaud *(en rose)*, et de celui de compression, qui doit être froid *(en bleu)*, est un inconvénient. Dans le moteur turbo développé par *Mercedes*, les deux circuits sont bien séparés *(b)*.

Pour ce faire, la seule solution est de comprimer l'air avant son admission dans le moteur. Où puiser l'énergie requise ? Elle peut être prélevée directement sur l'arbre moteur ou, plus astucieusement, sur l'énergie résiduelle des gaz d'échappement.

En effet, le cycle du moteur à quatre temps a la particularité d'avoir une détente incomplète. Lorsque le piston est à son point bas, les gaz contenus dans le cylindre sont encore sous pression. L'énergie que ces gaz recèlent – de l'ordre de 10 % de l'énergie fournie par la combustion – est perdue lorsqu'ils s'échappent… sauf si l'on fait passer ces gaz dans une turbine. L'énergie ainsi récupérée peut actionner une seconde turbine qui précomprime l'air avant son admission dans le moteur. C'est le principe du turbocompresseur.

Refroidir l'air comprimé

L'idée est ingénieuse, mais des difficultés surgissent. Pour commencer, la précompression qui amène l'air entrant à une pression de 3,5 atmosphères a pour effet, comme toute compression « rapide », d'échauffer cet air. Sa température passerait ainsi de 20 °C à près de 150 °C. Or il n'est pas question de faire entrer dans le moteur un air aussi chaud, pour trois raisons.

Tout d'abord, pour une pression donnée dans le cylindre, plus l'air est froid, plus la masse d'air initiale (et donc la quantité d'oxygène disponible) sera importante. Ensuite, la température maximale en fin de compression ne doit pas dépasser la température d'auto-ignition du mélange air-essence, car cela déclencherait une combustion spontanée et erratique. Enfin, pour un rapport de compression donné, les lois de la thermodynamique indiquent que le rendement d'un moteur est d'autant meilleur que l'écart entre les températures extrêmes atteintes au cours du cycle est grand.

Pour débuter le cycle avec la température initiale la plus basse possible, on refroidit donc l'air précomprimé avec un prérefroidisseur (ou *precooler*) – un échangeur thermique entre l'air précomprimé et l'air ambiant.

Un autre problème est que dans la disposition habituelle des moteurs turbo, la turbine d'échappement et la turbine de compression se retrouvent côte à côte. La proximité de la circulation de l'air précomprimé, que l'on veut froid, et des gaz brûlés, qui sont chauds à près de 1000 °C, complique ainsi le refroidissement.

Or les ingénieurs de *Mercedes* ont rompu avec cette géométrie : dans leur modèle AMG F1 W05, les deux turbines sont placées de part et d'autre du bloc moteur et donc reliées par un arbre plus long. Grâce à cette séparation, les transferts thermiques sont réduits, ce qui diminue les besoins en refroidissement et permet d'avoir un air précomprimé plus froid. Le rendement du moteur est alors meilleur, le prérefroidisseur est plus petit et il en est de même pour les bouches de prise d'air, ce qui améliore l'aérodynamisme.

Les avantages du dispositif de *Mercedes* ne s'arrêtent pas là. L'un des défauts du turbocompresseur est son temps de réponse :

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.fr

Retrouvez la rubrique idées de physique sur www.pourlascience.fr

BIBLIOGRAPHIE

. Hecht, **Physique** chapitre de thermodynamique), de Boeck, 1999.

orsque le pilote appuie sur l'accélérateur, l faut un certain temps pour que les gaz d'échappement fassent tourner la turbine de récupération et déclenchent la turbine de précompression. En raccourcissant e circuit du prérefroidisseur et celui de 'échappement, quitte à diminuer un peu 'efficacité du moteur, les ingénieurs ont ortement réduit ce temps.

Cet avantage est renforcé par la présence d'un récupérateur d'énergie placé sur l'arbre du turbocompresseur. Lorsque e pilote ralentit ou n'a pas besoin du turbo, 'énergie des gaz d'échappement est convertie en énergie électrique et stockée dans une batterie, dans la limite réglementaire de deux mégajoules par tour de circuit. Cette énergie peut ensuite être utilisée pour remettre en route le turbo lorsqu'il devient nécessaire et que les gaz d'échappement ne sont pas encore assez efficaces. Le temps de réponse du turbo étant plus court, le besoin en énergie extraite du récupérateur est limité : comme l'énergie que celui-ci peut restituer ne doit pas excéder quatre mégajoules par tour, on peut utiliser plus souvent ce dispositif.

Cette nouvelle conception de l'intégration du turbo dans le moteur a rendu possibles plusieurs autres améliorations, notamment un nez plus aérodynamique et une boîte de vitesse placée plus à l'avant, d'où un meilleur positionnement du centre de gravité du véhicule. Comme la conception des Formule 1 est figée en début de saison, la concurrence n'a pu cette année que constater les performances des *Mercedes*, sans pouvoir s'adapter. Gageons que la créativité des ingénieurs sera au rendez-vous l'an prochain pour répondre au défi de la marque allemande. ■

© Pour la Science - n° 445 - Novembre 2014

QUESTION AUX EXPERTS

À quelles profondeurs trouve-t-on du pétrole ?

Les réservoirs exploités se situent entre 600 et 8 000 mètres de profondeur. Mais il existe des gisements plus profonds...

Jacques PIRONON et Raymond MICHELS

En 2009, on découvrait dans le golfe du Mexique un gisement pétrolier sous 1 260 mètres d'eau et atteignant 10 600 mètres de profondeur. La présence de pétrole à une telle profondeur était inimaginable il y a une trentaine d'années. Jusqu'où en trouvera-t-on ?

Le pétrole résulte de la dégradation de débris organiques, essentiellement d'origine végétale, sous l'action de la chaleur. Or la température augmente avec la profondeur, de 30 °C par kilomètre en moyenne. Enfouis au sein d'une roche sédimentaire (la « roche-mère »), les débris organiques se transforment d'abord en un solide carboné nommé kérogène, dont le charbon est une variété, puis donnent soit du pétrole et un peu de gaz (entre 80 °C et 150 °C), soit juste du gaz (au-dessus de 150 °C). On en déduit que le pétrole se forme à des profondeurs comprises entre 2 500 et 5 000 mètres en moyenne (même si, dans certaines conditions, elles peuvent dépasser 8 000 mètres), et le gaz jusqu'à 10 000 mètres.

Les fluides pétroliers migrent à travers les pores et les fractures des roches, en général vers le haut où la pression est plus faible, jusqu'à ce qu'une couche imperméable stoppe leur progression et entraîne leur accumulation dans une roche réservoir. C'est cette dernière que l'on exploite dans le cadre des ressources pétrolières dites conventionnelles. On trouve alors du pétrole dans une large gamme de profondeurs.

L'existence d'un gisement exige d'une part que la roche contienne des pores susceptibles d'abriter les hydrocarbures, d'autre part des conditions thermodynamiques adéquates. Or la porosité diminue avec la profondeur : des chercheurs du Service géologique américain et de l'Université de Liverpool ont montré en 2000 que dans les trois premiers kilomètres, la pression mécanique referme les pores et qu'au-delà, il se produit une compaction chimique, caractérisée par la dissolution des grains rocheux.

Cependant, une étude menée dans notre laboratoire ces deux dernières années a révélé que la présence d'hydrocarbures préserve le réseau poreux, par des effets à la fois mécaniques et chimiques. Par conséquent, les roches peuvent rester assez poreuses pour contenir du pétrole jusqu'à environ dix kilomètres de profondeur, voire un peu plus.

La stabilité dépend de la composition chimique

Outre la question du réservoir, se pose celle de la stabilité thermique du fluide. Au-delà de cinq kilomètres de profondeur, lorsque les températures dépassent 150 °C, on pensait jusque dans les années 1980 que le pétrole se cassait en molécules plus petites sous l'action de la chaleur, finissant par former du méthane et du graphite.

Toutefois, la présence d'hydrocarbures liquides à une grande profondeur (9,6 kilomètres, soit 252 °C) dans un puits américain contredisait cette idée, qui fut définitivement abandonnée en 1985 lors de la découverte du gisement d'Elgin, en mer du Nord, à 5 500 mètres de profondeur et à une température de 195 °C.

En collaboration avec le Laboratoire Réactions et génie des procédés, à Nancy, nous avons montré que la stabilité thermique du fluide dépend des interactions chimiques des hydrocarbures qui le composent. Un pétrole peut alors être stable à des profondeurs bien plus élevées qu'on ne le pensait – jusqu'à plus de 8 000 mètres (240 °C) pour celui d'Elgin.

Aujourd'hui, les réservoirs exploités se situent entre 600 et 8 000 mètres de profondeur. Aux États-Unis, la profondeur moyenne des puits de pétrole et de gaz est passée de 1 200 mètres dans les années 1950 à 2 100 mètres dans les années 2000. On estime que 15 % des réserves se situent entre 4 500 et 5 000 mètres, et 15 % au-delà.

L'exploitation des gisements profonds, notamment en mer, est rendue possible par l'augmentation du prix du baril. Selon l'*Energy Funds Advisors* (ENFA), les compagnies pétrolières louent parfois les appareils de forage à plus de 800 000 dollars (626 000 euros) par jour ! Et il faut en moyenne quatre mois pour forer jusqu'à 6 000 mètres... ■

Jacques PIRONON dirige le laboratoire GeoRessources (Université de Lorraine, CNRS, CREGU), à Nancy.
Raymond MICHELS est chargé de recherche au CNRS, au laboratoire GeoRessources.

SCIENCE & GASTRONOMIE

Épinards, salade et aubergine

Par capillarité, les aliments peuvent se gorger de solution aqueuse ou de matière grasse liquide... en surface plutôt qu'en volume.

Hervé THIS

Dans sa *Physiologie du goût*, le juriste Brillat-Savarin parle de « lois éternelles de la nature », dont l'oubli est cause de désastre culinaire. La chimie et la physique donnent d'utiles indications à qui veut cuisiner plus rationnellement qu'en suivant des recettes, et certains phénomènes ont une fréquence d'apparition qui mérite une attention spéciale. La capillarité est l'un d'entre eux.

C'est le phénomène qui permet à l'encre de monter le long des poils d'un pinceau, qui fait monter l'eau d'un verre le long des parois ou qui fait les ménisques (du latin *meniscus*, petite lentille) quand on plonge un tube en verre assez fin dans un liquide. Ce phénomène résulte des forces s'exerçant entre les molécules du liquide et le solide avec lequel le liquide est en contact. Selon les cas, ce sont des forces faibles, telles les forces de van der Waals (qui, par exemple, assurent la cohésion de l'huile liquide), ou des forces plus intenses, telles les liaisons hydrogène. De ce fait, la capillarité présente des intensités différentes suivant les liquides et les solides, mais elle s'exerce aussi bien sur l'huile que sur l'eau.

Depuis la publication de l'*opus magnum* de Brillat-Savarin, les gourmands ont été éblouis par l'œuvre, au point de tenir pour vraies les inventions littéraires qui s'y trouvaient. « On devient cuisinier, mais on naît rôtisseur. » Vraiment ? Et cette anecdote du « chanoine Chevrier » qui ne mangeait les épinards que lorsqu'ils avaient été cuits tous les jours d'une semaine dans du beurre, qu'en penser ? À quoi peut bien servir de cuire plusieurs jours de suite des épinards dans le beurre ? Vont-ils vraiment se gorger de beurre ?

Analysons. Les épinards sont du tissu végétal, constitué de cellules, sacs principalement composés d'eau, limités par une membrane (une double couche de phospholipides) et cimentés par la paroi végétale, faite principalement de cellulose et de pectines. Cuire dans du beurre ? D'abord le beurre fond, libérant le petit lait qui vient bouillir au fond de la casserole, puis la chaleur amollit les feuilles, parce qu'elle provoque la « bêta élimination » des pectines : ces polysaccharides perdent des fragments et laissent les molécules de cellulose se séparer ; le « ciment » se dégrade.

Macroscopiquement, on voit alors les épinards s'affaisser, se diviser, mais en aucun cas le beurre ne pénètre dans le tissu végétal. Au mieux, il peut s'introduire par capillarité entre les feuilles. Cuit-on une seconde fois que, à nouveau, le beurre fond, relâchant le petit lait, mais, cette fois, la composante lipidique du beurre ne peut que « diluer » le tissu végétal, qui continuera à se dégrader.

Ainsi, si l'on cuit dans du beurre, on obtiendra progressivement des fragments d'épinards dans du beurre. Pas du beurre frais, toutefois : on sait que le beurre chauffé doucement brunit, devenant d'abord un merveilleux beurre « noisette », dont la composition reste mystérieuse. Si le chanoine Chevrier a effectivement existé, et s'il a cuit les épinards dans du beurre, les épinards se sont moins gonflés de beurre que dispersés par capillarité dans du beurre noisette.

Autre pays, autre mœurs : l'Afrique du Nord raconte l'histoire de l'« imam bayaldi », un imam qui se serait évanoui quand sa jeune épouse aurait consommé une jarre d'huile d'olive tout entière pour cuire des aubergines. Là encore, même exagération, mais même type de phénomène de capillarité mis en œuvre, car les aubergines sont un tissu fibreux, que l'huile peut venir imbiber en prenant la place que l'eau aurait laissée en s'évaporant : on se souvient que les tissus sont surtout faits d'eau et que cette dernière s'évapore lors des fritures, ce que montrent à la fois les bulles autour d'un aliment frit et la fumée qui s'élève au-dessus de la casserole. Plus généralement, des tissus poreux ou lamellaires, par exemple, sont des proies faciles pour les liquides : pensons à nos éponges !

Quand sont réunies une grande surface de solide et un liquide, les forces de surface provoquent la migration du liquide par capillarité. Ainsi, la vinaigrette de la salade s'insère entre les feuilles quand on tourne l'ensemble. Ce qui est là un avantage devient un inconvénient quand on veut mincir, l'huile s'immiscant tout aussi bien que l'eau. Seul recours possible : limiter la quantité d'huile ajoutée ! ■

Hervé THIS, physico-chimiste, est directeur du Centre international de gastronomie moléculaire AgroParisTech-INRA et directeur scientifique de la Fondation Science & culture alimentaire (Académie des sciences).

Retrouvez la rubrique Science & gastronomie sur www.pourlascience.fr

© Pour la Science - n° 445 - Novembre 2014

DES GIGAOCTETS DE CULTURE SCIENTIFIQUE À VOTRE DISPOSITION !

OFFRE INTÉGRALE

1 AN • 96 €

Accès numérique illimité * + 1 numéro spécial offert !

À choisir ci-dessous

OFFRE EXCEPTIONELLE « NUMÉRO SPÉCIAL »

À retourner accompagné de votre règlement dans une enveloppe non affranchie à : Groupe Pour la Science – Service Abonnements – Libre réponse 60 002 – 75 281 Paris Cedex 06

❑ Oui, je m'abonne 1 an au prix de 96 € et reçois 12 nos de *Pour la Science* + 4 nos de *Dossier Pour la Science* et bénéficie de l'accès numérique illimité à 18 ans d'archives sur www.pourlascience.fr

+ En cadeau, à l'occasion de la sortie du nouveau numéro spécial de *Pour la Science*, je choisis 1 numéro parmi les titres suivants :

❑ N° 338 - M07703 déc. 2005

❑ N° 350 - M07703 déc. 2006

❑ N° 361 - M07703 nov. 2007

❑ N° 373 - M07703 nov. 2008

❑ N° 385 - M07703 nov. 2009

❑ N° 397 - M07703 nov. 2010

❑ N° 409 - M07704 nov. 2011

❑ N° 422 - M07704 déc. 2012

❑ N° 433 - M07704 nov. 2013

J'indique mes coordonnées

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

CP : _____ Ville : _____

Pays : _____ Tél. : _____

(pour le suivi client facultatif)

Je choisis mon mode de règlement

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

❑ Par carte bancaire

Numéro _____

Date d'expiration _____ / _____ Signature obligatoire

Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB) _____

Mon e-mail pour recevoir la newsletter *Pour la Science* et accéder aux contenus numériques (à remplir en majuscule)

_____ @ _____

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 ❑**

Conditions complètes de l'offre sur www.pourlascience.fr

Offre réservée aux nouveaux abonnés

PLS445

ETHNOLOGIE-HISTOIRE

D'Amérique en Europe

Éric Taladoire

CNRS Éditions, 2014
(288 pages, 22 euros)

Le sous-titre de l'ouvrage, *Quand les Indiens découvraient l'Ancien Monde*, est à contrepoint avec le point de vue européocentrique habituel sur les « grandes découvertes » et le « Nouveau Monde ». Même si l'auteur souligne à plusieurs reprises le caractère novateur de son étude, celle-ci s'inscrit dans une série d'ouvrages récents adoptant sur l'histoire un regard qui n'est plus européocentrique.

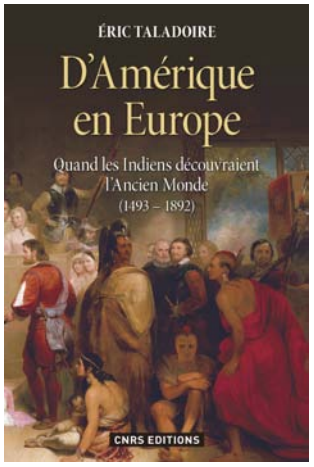
Les quatre siècles qui vont de la découverte de Christophe Colomb (1492) à 1892 sont divisés en deux périodes. L'articulation entre les deux se fait au moment de la venue de Pocahontas à Londres (1616), qui correspond à la fin du trafic esclavagiste de l'Amérique vers l'Europe, remplacé par le commerce d'esclaves venus d'Afrique.

Tour à tour mis au rang d'objets exotiques, témoins de la conquête, esclaves, intermédiaires, représentants officiels de populations, exhibés – malgré eux ou de bon gré –, caricaturés ou mythifiés, les Amérindiens apparaissent en Europe dans des rôles bien différents. Ce qui frappe d'abord, c'est le nombre des visiteurs (3724 cas documentés, rassemblés en annexe), qui ne sont que la partie visible de l'iceberg ; le nombre des esclaves qui ont été déportés d'Amérique en Europe demeure en fait inconnu.

Ce sont ensuite les flux, va-et-vient incessants malgré leur longueur à travers l'Atlantique, difficilement imaginables pour nous, habitués que nous sommes à la rapidité des échanges entre Ancien et Nouveau Mondes ; or certains voyageurs traversent l'océan à plusieurs reprises… Que nombre d'entre eux aient été razziés, convertis d'office, enrôlés ou emmenés de force vers un Ancien Monde qu'ils découvrent avec un mélange d'admiration (pour la technique) et d'horreur (pour la société), ce n'est pas une nouveauté. Que d'autres viennent pour en appeler à la justice royale – et s'en retournent –, pour sceller des alliances, comme les Iroquois, Cherokees, ou Abenatis, voilà qui l'est moins.

L'un des grands intérêts de l'ouvrage est d'abord de documenter les différentes facettes de ces échanges. Un autre est de montrer que les Amérindiens ne sont pas seulement victimes, mais acteurs, comme l'exprime bien le titre de la deuxième partie : *Une perspective inversée*. Un dernier mérite est celui de nous rendre très proches certains destins, parfois simplement ébauchés, d'autres fois mieux documentés. Humbles personnages ou lettrés, acteurs, élites, « sauvages » bons ou brutes : ce sont autant d'existences entrevues, autant d'émotions, de pièces d'une histoire qui commence à peine à s'écrire.

Nadine Guilhou
Université de Montpellier II



SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

La biodiversité en question

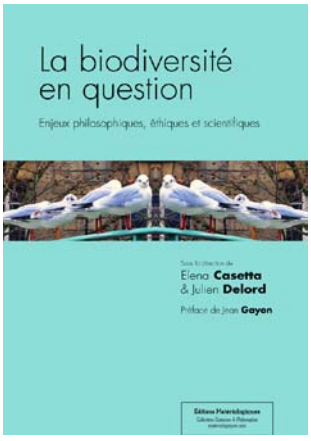
E. Casetta et J. Delord (dir.)

Matériologiques, 2014
(272 pages, 23 euros)

Il est des mots qui flambent et passent de bouche en bouche comme s'ils brûlaient les lèvres, mais en même temps qu'ils diffusent et se consument, ils se vident de leur sens. *Biodiversité* est de ceux-là. Le terme a rapidement investi l'espace public, mais on peut s'interroger sur ce qu'il recouvre et à qui il profite. Pour proposer des réponses, la philosophe Elena Cassetta et l'écologue Julien Delord ont réuni une équipe pluridisciplinaire de 15 auteurs capables de contextualiser et d'analyser les multiples facettes de ce mot-kaléidoscope.

Le mot biodiversité est partout ; associations de défense de l'environnement, médias, hommes politiques, tous en font grand usage, chacun se l'est approprié, s'en est fait sa propre idée. Depuis la création de ce néologisme à l'occasion d'un colloque sur la diversité du vivant tenu en 1986, le terme a essaimé dans toutes les strates de la société, aidé dans sa progression par le sommet de Rio en 1992, où il fut brandi comme une preuve de l'urgence. Car biodiversité s'entend d'abord au sens d'érosion de la biodiversité.

Mais de quelle diversité parle-t-on ? S'agit-il de la multitude des espèces, des variations moléculaires de séquences d'ADN ou de la variété des écosystèmes, auquel cas elle engloberait biotopes et paysages, et ne serait qu'un déroir synonyme de nature ? Et comment envisager la biodiversité sans l'inscrire dans une perspective historique, qui oblige à penser la relativité du concept d'espèce et les évolutions des écosystèmes dans le temps ? Qu'a gagné la diversité du vivant, thème de recherche aussi ancien que les sciences naturelles elles-mêmes, à devenir bio ? Existe-t-il un avant et un après ? L'écologie fonctionnelle qui s'était attachée dans les années 1970 à quantifier le nombre et l'abondance des espèces pour en inférer des prédictions sur la stabilité des écosystèmes, s'est-elle dotée d'un nouveau champ de recherche après 1986 ? Quant aux taxonomistes soudain intimés d'établir au plus vite un répertoire des espèces vivantes, ont-ils enrichi leur discipline de



nouveaux concepts et outils pour mener à bien l'impossible tâche dont ils sont investis ?

Ce sont ces questions et d'autres auxquelles répondent les auteurs de cet ouvrage. Tous s'accordent au moins sur un point : l'imprécision du terme trahit sa fragilité. La biodiversité serait-elle alors une coquille vide, une sorte de grand bazar de la biologie, un mot-valise dans lequel chacun met ce qu'il veut y trouver ? Elle est sans doute un peu de tout cela à la fois, mais l'ouvrage dépasse ce constat troublant. Il clarifie les enjeux scientifiques, rhétoriques et politiques de la biodiversité en donnant corps à sa polysémie.

Gérard Lambert
Centre Cavaillès, ENS, Paris

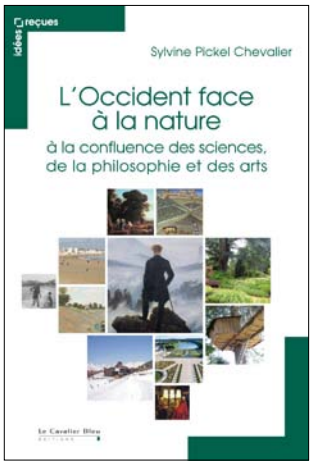
© Pour la Science - n° 445 - Novembre 2014

PHILOSOPHIE DES SCIENCES

L'Occident face à la nature

Sylvine Pickel Chevalier

Le Cavalier Bleu, 2014
(218 pages, 22 euros)



La nature est un concept vaste. Dans ce livre particulièrement intéressant et riche de références, une géographe nous invite à saisir la « complexité de la construction sociale » de ce concept propre à l'Occident.

L'auteur retrace l'histoire du mot nature depuis l'Antiquité jusqu'à nos jours, montrant ainsi qu'il s'est toujours inscrit dans une perception complexe du réel. On découvre ainsi que l'intérêt pour la nature durant l'Antiquité et le Moyen Âge ne reposait pas sur une notion esthétique, un sentiment affectif ou un plaisir contemplatif, mais plutôt sur la nécessité de civiliser un monde sauvage. La valorisation de la nature vient plus tard et commence à prendre forme durant la Renaissance.

Analysant des œuvres picturales (Robert Campin, Jan van Eyck, Giovanni Bellini…), l'auteur nous fait suivre l'émergence du paysage dans la culture occidentale, qui traduit l'importance qu'y a le monde matériel. À la Renaissance et à l'âge classique, la nature représentée par les peintres perd peu à peu ses dimensions terrifiantes et devient, sous le pinceau de Pieter Bruegel l'Ancien ou de Lucas van Valckenborch, le cadre de vie des populations paysannes. Aux XVII[e] et XVIII[e] siècles, le paysage devient enfin source d'émerveillement, mais il s'agit d'une nature idéalisée, sauvage sans être hostile.

La deuxième partie porte sur les bouleversements provoqués par « l'avènement de la société de loisirs ». L'auteur souligne le rôle de l'aménagement de sites considérés comme beaux et naturels qui permet aux classes aisées d'accéder à des environnements jusqu'alors inaccessibles. Ce faisant, on assiste à une codification des usages de la nature au service de cette nouvelle forme de consommation. L'idée de nature sauvage, à préserver, qui apparaît à partir du milieu du XIX[e] siècle, provient des populations urbaines et aisées. Il s'agit ici encore d'une construction, en partie imaginaire, d'un lieu rêvé, calme et pacifique. C'est lors de sa massification, à partir des années 1950, que ce tourisme devient particulièrement destructeur.

En partie contre ces excès émerge la recherche d'un développement rendant compatibles le besoin de « nature » et les exigences des usages, thème de la troisième partie du livre. L'auteur y met finement en lumière les multiples contradictions entre ces deux exigences. Afin de pouvoir respecter les populations locales, elle montre, à partir de son expérience en Indonésie, l'importance de pouvoir conjuguer la notion occidentale de la « nature » avec la perception très différente qu'on en a dans d'autres cultures.

Une réserve cependant : pour l'auteur, les loisirs semblent être l'élément moteur de la transformation du rapport à la nature, idée qui me paraît incomplète en ce sens que sont oblitérés les effets des inégalités sociales. Pour autant, voilà un ouvrage passionnant !

Valérie Chansigaud
Labo. SPHERE, Université Paris 7

BIOCHIMIE-NUTRITION

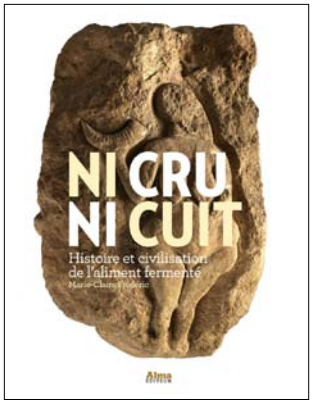
Ni cru ni cuit

Marie-Claire Frédéric

Alma, 2014
(350 pages, 29 euros)

Cette merveille de livre fourmille de détails passionnants sur la longue histoire de la fermentation dans l'alimentation. Merveilleuse histoire, parce qu'elle permit la survie de nos ancêtres, pour qui la transformation microbienne était incompréhensible. On a fait des mythes pour moins que cela !

Nous avons tous déjà rencontré des fermentations mystérieuses. Lors d'une promenade en bateau, nous pêchons des maquereaux et les laissons sur le pont arrière ; une fois à terre, ils sont « pourris ». Est-ce l'orage ? Nous confectionnons une brioche et mêlons à la pâte une poudre que nous croyons standardisée, à savoir de la levure lyophilisée ; celle-ci ne lève pas. Plus spécialisé, un problème récent rencontré au laboratoire : nous étudiions l'hydratation de



Traité de physique

Jacques Rohault

CTHS, 2014
(390 pages, 45 euros)

Le quatrième défaut que j'ay remarqué dans la méthode des Philosophes, est qu'ils ont négligé les Mathématiques, écrit Jacques Rohault (1618-1672) dans sa préface, ce qui identifie d'emblée comme l'un des premiers cartésiens. La clarté avec laquelle J. Rohault explique la physique de Descartes fit de son traité un immense succès au XVII[e] siècle. La réédition de cet ouvrage de 1671 permettra donc à chacun de comprendre pourquoi il contribua tant au dépassement de la physique aristotélicienne.

La maladie, catastrophe intime

Claire Marin

PUF, 2014
(184 pages, 8 euros)

La maladie n'est pas seulement une atteinte physique, elle est aussi l'intrusion d'une altérité qui bouleverse la personnalité du malade. L'auteur examine comment le soin doit aider le malade à se réapproprier son corps handicapé, voire à l'aimer. En proie à la souffrance, à la dégradation, il peut en venir à ne plus savoir qui il est. La maladie révèle-t-elle sa « vraie personnalité », jusque-là enfouie ? Ne fait-elle que détruire sans contrepartie un édifice bâti au fil des années et des habitudes ? Voici quelques-unes des questions traitées dans ce texte plein de sensibilité.

Les meilleurs blogues de science en français

Pascal Lapointe (dir.)

MultiMondes, 2014
(328 pages, environ 19,80 euros)

Cet ouvrage publié au Québec est parti d'un constat : il existe de nombreux blogs de science en français, mais ils sont encore jeunes et peu visibles. Pour y remédier, cette anthologie propose une compilation des meilleurs textes de la blogosphère scientifique francophone. La deuxième édition (2014) regroupe 52 billets sélectionnés par un jury de journalistes scientifiques et de blogueurs. Un panorama varié et vivant de la vulgarisation scientifique, avec des sujets étonnants, amusants et parfois profonds !

La science expliquée à mes petits-enfants

Jean-Marc Lévy-Leblond

Seuil, 2014

(104 pages, 8 euros).

Une conversation avec un enfant va, c'est naturel, « à sauts et à gambades ». Voilà qui convient au projet qu'a J.-M. Lévy-Leblond de mettre la science en culture. Il ne parle pas d'elle en spécialiste, mais en honnête homme sensible à ses aspects sociaux, engagiers, historiques. Il ne se croit pas obligé de l'idéaliser pour l'aimer, et ne cache ni certaines frustrations qu'il a connues à la fréquenter, ni les difficultés sociales et intellectuelles auxquelles elle est confrontée aujourd'hui.

Tout ce que vous n'avez jamais voulu savoir sur les thérapies manuelles

N. Pinsault et R. Monvoisin

PUG, 2014

(309 pages, 19 euros).

Chiropraxie, ostéopathie, rebouteux... Beaucoup de gens font appel à divers thérapeutes manuels ; leur offre est immense et à la mesure de la demande de thérapies alternatives. Face à cela, tant le kinésithérapeute – qui, après avoir appris sur des bases scientifiques, est souvent conduit à élargir sa pratique – que le patient peuvent être perplexes. Conçu comme un outil pour distinguer entre science et pseudoscience, ce livre est une contribution solide à l'épistémologie de la thérapie manuelle. De quoi remettre un peu d'objectivité dans la quête du pétrissage miracle !

La grotte de Font-de-Gaume

Jean-Jacques Cleyet-Merle

Éditions du Patrimoine, 2014

(65 pages, 12 euros).

La seule grotte ornée de décors polychromes visitable en France – Font-de-Gaume – se trouve à 800 mètres du village des Eyzies. Cette monographie célèbre enfin ce monument majeur, peuplé de bisons et autres animaux. Son contexte géographique, l'histoire de son occupation, celle de son étude et de ses pionniers y sont décrits. La présentation de la politique de conservation justifiant un maximum de 80 visiteurs par jour est particulièrement intéressante.

protéines, mais, le lendemain du jour où les composés furent mêlés, voilà que le mélange est d'un brun affreux. Nous avions oublié que les « germes », et donc la fermentation, sont partout.

Des germes, il y en a des bienfaisants et des malfaisants. Comme pour la chimie avec la cuisine, l'humanité les a utilisés depuis longtemps, sans les voir : ce sont les techniques de conservation des salaisons, des fromages, des vins, bières, choux fermentés... Ce serait une erreur d'oublier le *garum*, cette sauce chère aux Romains antiques et faite de poisson fermenté. Ou les cornichons à la russe, ou le yaourt... Un monde, rien que pour l'alimentation. On a dit que l'humanité était fille du feu, mais l'auteur, en collectionneuse de faits curieux de la microbiologie alimentaire, voit plutôt notre espèce prospérer avec la fermentation. Ni cru ni cuit, dit son livre. *Stricto sensu*, c'est exact... si l'on oublie que le mot « cuisson » désignait dans le passé aussi bien le fruit mûrissant que l'aliment transformé.

Bref, un livre à ne pas manquer, surtout quand on sait que la nutrition, la science qui explore ce qui se passe en nous après l'acte de manger, est en pleine… fermentation depuis que la biologie moléculaire permet d'explorer le microbiote intestinal et d'y découvrir des phénomènes inattendus. Nous mangeons des algues ? Leur polysaccharides ne sont pas assimilables, mais des micro-organismes commensaux de ces mêmes algues transfèrent des gènes à nos micro-organismes intestinaux… nous rendant capables, après une semaine environ, d'assimiler leurs nutriments. Et ce n'est là que le début d'une grande aventure scientifique.

Hervé This
INRA

VIES DE CHERCHEURS

Le labo *in vivo*

Dominique Buzoni-Gatel

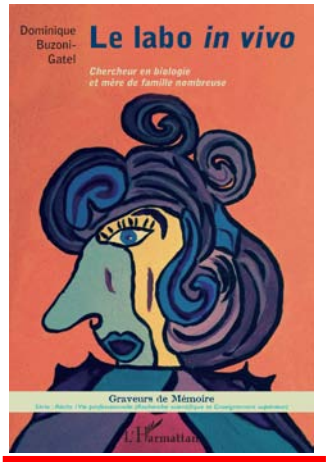
L'Harmattan, 2014

(140 pages, 14,50 euros).

Qu'est-ce que le métier de chercheur ? L'auteur nous fait une réponse très spontanée dans une collection qui publie des récits de vie. Directrice de recherche à l'INRA, elle raconte sa vie quotidienne. Captivé au bout de trois pages par la narration fluide et simple, un peu désorganisée mais de ce fait spontanée, j'ai lu avec intérêt sur le début d'une carrière, la réalité d'un métier et les problèmes pratiques qu'il pose à une mère de famille, laquelle avoue franchement les limites du « trop à faire ».

Sa vie professionnelle, l'auteur la résume ainsi : « un chercheur est, au cours de sa carrière, un travailleur manuel, un manager d'équipe, un chercheur d'or ». Cela renvoie respectivement à l'adresse de l'expérimentateur, à la gestion d'équipe qui échoie au chercheur vieillissant, et enfin à la recherche permanente de financements.

La narration allègre révèle pêle-mêle la liberté de l'emploi du temps quotidien, le contact enrichissant ou décevant des étudiants, le temps de travail non compté au laboratoire, les découvertes faites par hasard, la force de l'amitié et de la complicité avec certains collègues, quelques déboires de la gestion des ressources humaines quand on n'y est pas préparé… Mais il ne s'agit pas de la vie d'une star de la science – seulement de celle d'un chercheur de base. D. Buzoni-Gatel dessine avec humilité à quoi ressemble le travail d'une « fourmi », dont le sens n'apparaît qu'une fois ajouté à celui des collègues.



La description correspond plus à la vie d'un chercheur d'institut dédié à la seule recherche qu'à celle d'un enseignant-chercheur. Ici ou là, on voudrait sentir de la révolte contre un système qui oblige les chercheurs à demander de l'argent en permanence. Les lourdes charges administratives induites non seulement par la quête d'argent, mais par les incessantes tâches d'évaluation de soi et des autres sont cependant bien décrites. Tout cela pousse le lecteur à se demander si cette gestion de la recherche ne retire pas ce que la création exige de sérénité.

La vertu de cet ouvrage réside dans sa sincérité et la description sans prétention d'une chercheuse qui est aussi une mère, portée à valoriser les autres. Que ceux qui veulent faire de la recherche le lisent, car on y devine aussi un fort épanouissement personnel.

Marc-André Sélosse
MNHN, Paris

Retrouvez l'intégralité de votre magazine et plus d'informations sur www.pourlascience.fr

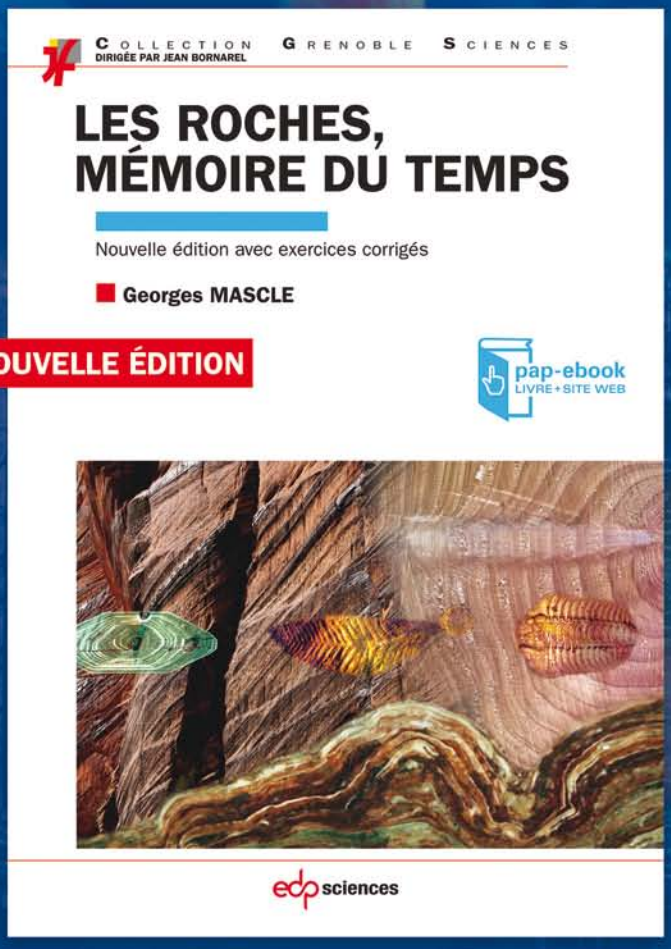
© Pour la Science - n° 445 - Novembre 2014

GRENOBLE SCIENCES

Les nouveautés

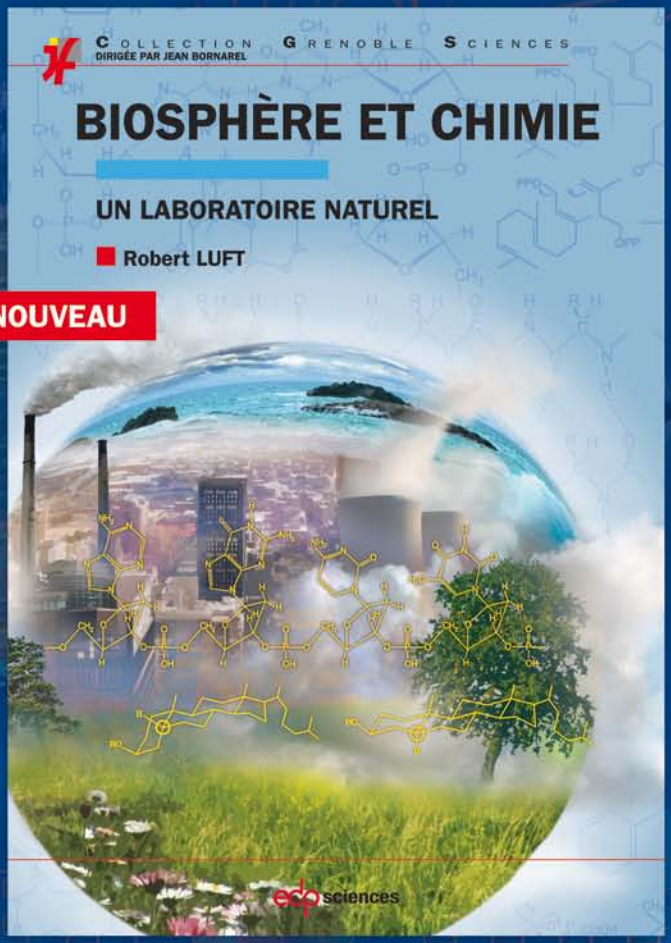
SCIENCES DE LA TERRE

La référence en termes de méthodes et de connaissances



BIOCHIMIE

Comprendre et prévenir les phénomènes chimiques dans la biosphère



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

POUR COMMANDER

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

GRENOBLE SCIENCES

http://www.grenoble-sciences.com

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

Université Joseph Fourier GRENOBLE

Région RhôneAlpes

DÉES SUR COMMANDE

Qu'est-ce qui vient sans avoir été appelé, se moquant de déranger ou non ? Qui joue à cache-cache alors que vous êtes sérieux ?

Les enfants mal élevés, bien sûr, voire certains adultes encore pires. Mais aussi les idées. Vous êtes en promenade, ou sous la douche, rien sur vous pour écrire, et hop !, une idée géniale vous passe par la tête. Vous interrompez tout, tentez de la mettre en œuvre… Disparue ! Peut-être finirez-vous par la retrouver – et constaterez-vous que vous l'aviez déjà eue cent fois et qu'elle n'avait rien donné. Sur le coup, vous ne l'avez pas reconnue, parce qu'elle a un peu changé de formulation.

De même que les éducateurs se font fort de transformer les enfants turbulents en adultes sages, il faudrait des dresseurs d'idées. Ils leur inculqueraient un minimum de savoir-vivre. Je me promène ? Elles s'abstiennent de venir m'importuner. Je me mets au travail ? Aussitôt, dix ou vingt idées, serviables et empressées, toutes de première qualité, s'offrent à moi. Je n'ai qu'à choisir celle qui convient le mieux à mon projet du moment.

EXPRESSION ABUSIVE

Qu'une grève éclate, et une formule immuable revient : les usagers sont pris en otages. Assimiler la galère de voyageurs bloqués dans une gare ou un aéroport à l'horreur que subissent des gens enlevés par un groupe prêt à tuer est choquant. Pourtant, il y a bien quelque chose de commun à ces situations. Le voyageur pris à l'improviste dans une grève était peut-être indifférent aux questions sociales, le visiteur d'un pays dangereux n'avait peut-être pas de curiosité pour les factions qui y sévissent. Et voilà qu'ils sont parties prenantes d'histoires qui n'étaient pas les leurs.

Être plongé de force dans une histoire qui lui est imposée et dont les enjeux le dépassent caractérise la situation d'un otage.

Mais, à ce compte-là, nous sommes tous otages : nous le sommes des circonstances de notre naissance. Nos parents nous ont fait naître pour leurs raisons, pas les nôtres, en un temps et un lieu qui ne nous auraient peut-être pas attirés si nous avions eu le choix, mais dans lesquels nous sommes contraints de nous insérer.

Ainsi, préciser ce qui fait le propre de la situation d'otage mène à appliquer ce terme à tous ! De tels retournements sont banals. Les mathématiciens connaissent souvent cette mésaventure. Par exemple, ils ont cerné avec soin la notion de « droite ». Bilan : dans certains contextes, un arc de cercle joue le rôle d'une droite. En découvrant ce qui caractérise une droite, ils ont vu que cela s'applique à d'autres objets que les droites…

Rechercher l'essence des choses est une démarche dont on ne se méfie jamais assez.

LA MEILLEURE DÉFENSE, C'EST L'ATTAQUE

Un procédé inusable pour disqualifier un argument dont on ne veut pas, mais qu'on ne voit pas comment réfuter, est de jeter la suspicion sur celui qui le soutient. Je ne sais quel scrupule retient l'université de recourir à ce procédé. Voici comment devraient se dérouler les séminaires. L'orateur expose. Ensuite, débat. Ses adversaires clament que ce n'est pas un hasard s'il a trouvé ses résultats au moment où le gouvernement dont il dépend en tant que fonctionnaire prenait telle mesure scandaleuse. Et les résultats, aussitôt, de devenir suspects. Peut-être l'orateur se défendra-t-il en disant qu'il est tombé dessus hors des horaires

de service. Ou lors d'un séjour à l'étranger. Un échange implacable, fait d'accusations réciproques, se développera au sujet des conditions dans lesquelles les résultats sont venus au jour. Si le chercheur a signé un contrat avec une entreprise privée, on les minera en vilipendant celle-ci. Le débat ne devra pas s'achever sur un vote, car la science n'est pas affaire de majorité. Il faudra attendre qu'un des camps se lasse. L'autre sera alors en droit d'affirmer que sa position fait l'unanimité de la profession.

FLUCTUATIONS

Un arbre est, par définition, un végétal de plus de six mètres de hauteur d'après François Couplan (*Les plantes et leurs noms*, Quæ, 2012). Voilà qui paraît sans appel. Pourtant, on trouve d'autres définitions du mot « arbre ». « Végétal vivace, ligneux, rameux, atteignant au moins sept mètres de hauteur et ne portant de branches durables qu'à une certaine distance du sol » (*Larousse* en ligne, septembre 2014). « Un arbre est une plante lignifiée terrestre capable de se développer par elle-même en hauteur, en général au-delà de sept mètres » (*Wikipédia*, septembre 2014). Ces définitions sont équivalentes puisqu'elles s'appliquent au même mot. En les comparant, on trouve que six est « en général » égal à sept.

L'article « tree » de *Wikipedia* (septembre 2014) signale, sans prendre parti, que la hauteur minimale requise va, selon les auteurs, de 0,5 mètre à 10 mètres. Est-on alors en droit de penser que le mot « tree » induit chez un Anglais la même représentation que le mot « arbre » chez un Français ? ■

Imprimé en France – Maury Imprimeur S.A. Malesherbes – Dépôt légal 563b – Novembre 2014 – N° d'édition MU220445-01 – Commission paritaire n° 0912 K 82029 – Distribution : Presstalis – ISSN 0 153-4092 – N° d'imprimeur 001193 084 – Directrice de la publication et gérante : Sylvie Marcé

STATA® fait plus pour vous

Obtenez une interface utilisateur conviviale avec la souplesse rêvée d'un codeur

L'interface nette de Stata est conçue pour simplifier votre travail. L'éditeur de données, l'éditeur de graphes et les boîtes de dialogues facilitent tout type d'analyse. Et il n'y a pas de restriction. Avec la syntaxe de commande intuitive de Stata et le langage de programmation matricielle, vous avez la liberté de personnaliser Stata pour répondre parfaitement à vos besoins.

Analyse de survie, modèles multi-niveaux, GLM, imputations multiples... Stata fait tout cà et plus encore!

Un seul et unique logiciel de statistique pour tous vos besoins en analyse.

SCIENTIFIC SOLUTIONS
YOUR RESEARCH STARTS WITH US

Distributeur officiel en Suisse

SCIENTIFIC SOLUTIONS SA
Rue du Midi 2, CH-1009 Pully-Lausanne, Suisse
+41 (0) 21 711 15 20 **www.scientific-solutions.ch**

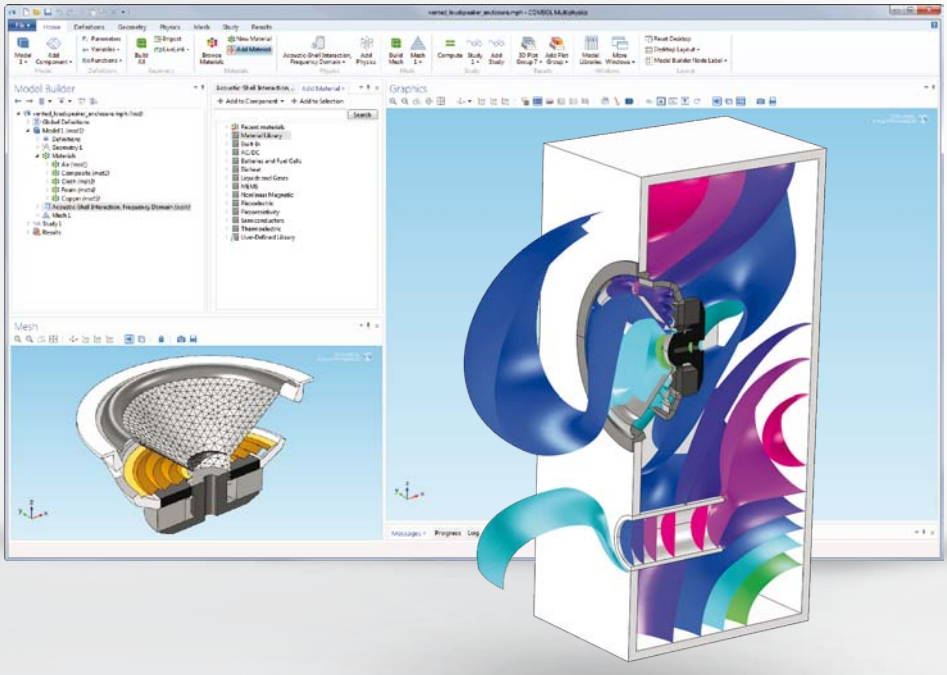
RITME
NOTRE MÉTIER : FACILITER LE VÔTRE

Distributeur officiel en France et en Belgique

RITME
34 Bd Haussmann, 75009 Paris, France
+33 (0) 1 42 46 00 42 **www.ritme.com**

Sauf indication contraire : logiciels et documentations en anglais. Livraison par téléchargement ou par CD-Rom.
© 2014 RITME - © 2014 SCIENTIFIC SOLUTIONS. Stata est une marque déposée de StataCorp. Toutes les marques déposées sont la propriété de leurs sociétés respectives.

ENCEINTE ACOUSTIQUE: Ondes de pression émises par un haut-parleur. Ce modèle couple l'électromagnétisme dans la bobine, la mécanique des structures dans la membrane ainsi que l'acoustique à l'intérieur et autour de l'enceinte.



TESTEZ ET OPTIMISEZ VOS DESIGNS AVEC

COMSOL MULTIPHYSICS®

Nos outils de simulation multiphysique intègrent tous les effets physiques du monde réel. De ce fait, ils reproduisent avec précision le comportement de vos designs. Pour en savoir plus sur COMSOL Multiphysics rendez-vous sur www.comsol.fr

Product Suite

COMSOL Multiphysics

ELECTRICAL
- AC/DC Module
- RF Module
- Wave Optics Module
- MEMS Module
- Plasma Module
- Semiconductor Module

FLUID
- CFD Module
- Mixer Module
- Microfluidics Module
- Subsurface Flow Module
- Pipe Flow Module
- Molecular Flow Module

MULTIPURPOSE
- Optimization Module
- Material Library
- Particle Tracing Module

INTERFACING
- LiveLink™ *for* MATLAB®
- LiveLink™ *for* Excel®
- CAD Import Module
- ECAD Import Module
- LiveLink™ *for* SolidWorks®
- LiveLink™ *for* Inventor®
- LiveLink™ *for* AutoCAD®
- LiveLink™ *for* Creo™ Parametric
- LiveLink™ *for* Pro/ENGINEER®
- LiveLink™ *for* Solid Edge®
- File Import *for* CATIA® V5

MECHANICAL
- Heat Transfer Module
- Structural Mechanics Module
- Nonlinear Structural Materials Module
- Geomechanics Module
- Fatigue Module
- Multibody Dynamics Module
- Acoustics Module

CHEMICAL
- Chemical Reaction Engineering Module
- Batteries & Fuel Cells Module
- Electrodeposition Module
- Corrosion Module
- Electrochemistry Module

COMSOL

© Copyright 2014 COMSOL. COMSOL, COMSOL Multiphysics, Capture the Concept, COMSOL Desktop, and LiveLink are either registered trademarks or trademarks of COMSOL AB. All other trademarks are the property of their respective owners, and COMSOL AB and its subsidiaries and products are not affiliated with, endorsed by, sponsored by, or supported by those trademark owners. For a list of such trademark owners, see www.comsol.com/trademarks.