pourlascience.com

POUR LA SCIENCE

Mars 2003

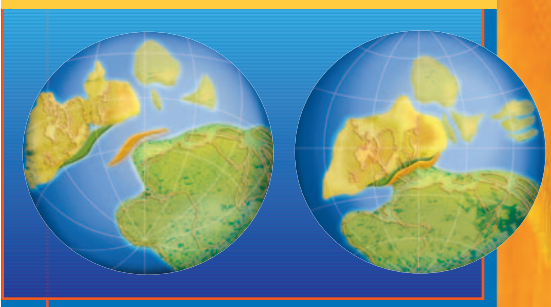
Édition française de Scientific American

La plume et le dinosaure

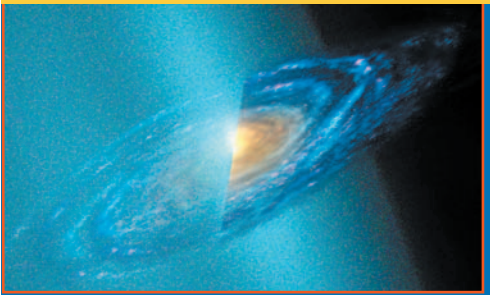
Vin et santé



La géologie de l'île de Groix



La matière noire



Quelles plumes avant les oiseaux ?

FRANCE METRO : 5,95 €, DOM : 7,13 €, BEL : 7,07 €,
CH : 11,2 FS, CAN : 8,95 $, LUX : 6,77 €, ESP : 8,71 €,
PORT. CONT. : 6,33 €, AND : 5,95 € MAY : 8,92 €, REU : 8,92 €

M 02687 - 305 - F: 5,95 €

TRIBUNE DES LECTEURS 4

BLOC-NOTES 5
de Didier Nordon

POINT DE VUE
L'ADN a 50 ans, et après ? 6
James Watson

SCIENCE ET GASTRONOMIE
Poète, prends ton lut 8
par Hervé This

SCIENCE ET ÉCONOMIE
La forme des villes... 10
par Ivar Ekeland

TRANCHES DE VIE 11
par Jean-Louis Hartenberger



PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES 12
■ Le langage des sifflements ■ Une éruption volcanique gravée dans le roc ■ Jasmin de jour, jasmin de nuit ■ Des spermatozoïdes sensibles à la température ■ La fondation de Samarkand ■ Un peu de Terre sur la Lune ■ Rosetta reportée *sine die* ■ Des vignes sans gènes ■ Odeur et grossesse ■ Chimie verte

PRÉSENCE DE L'HISTOIRE 22
Vaches malades et mesures sanitaires
Pascale Gramain-Kibleur

LOGIQUE ET CALCUL 98
L'ordinateur ultime
par Jean-Paul Delahaye



ART ET SCIENCE 104
Attraction fractale
par Richard Taylor



IDÉES DE PHYSIQUE 106
Blocages parfaits
par Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik



ANALYSES DE LIVRES 108
■ *Foi d'animal ! De la puce à l'éléphant*, de Catherine Vincent ■ *Aux origines de la monnaie*, sous la direction d'A. Testart, par J.-J. Glassner, B. Menu, A. Testart, F. Thierry ■ *Aurores, mirages, éclipses... Comprendre les phénomènes optiques de la nature*, de David Lynch et William Livingston ■ *Le chant d'amour des concombres de mer*, de Bertrand Jordan ■ *Fabre, le miroir aux insectes*, de Patrick Tort ■ *Des chimistes de A à Z*, de Éric Brown

Les plumes de dinosaures 24
Richard Prum et Alan Brush

L'étude biologique de la croissance des plumes et celle d'une série de nouveaux fossiles de dinosaures confortent une hypothèse selon laquelle la plume a évolué avant l'apparition des oiseaux.



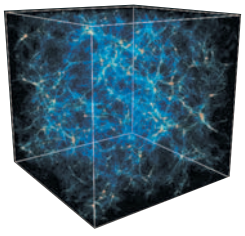
Le dialogue des sens 34
Arlette Streri

Un nouveau-né reconnaît, dès qu'il le regarde, un objet qu'il a manipulé sans le voir. Les sens semblent déjà connectés à la naissance, bien qu'ils se développent de façon échelonnée.



Le côté obscur de la matière 42
David Cline

La matière sombre s'est d'abord manifestée à l'échelle cosmique, mais nous ne comprendrons vraiment sa nature que lorsque nous réussirons à l'isoler dans nos laboratoires terrestres.



L'embolie des arbres 50
Pierre Cruiziat, Hervé Cochard et Thierry Améglio

Les arbres ont des mécanismes de transport de l'eau élaborés, mais quand de l'air s'infiltre dans leurs « veines », la sève ne circule plus, et leur survie est menacée.



2 encarts d'abonnement pages 16 et 17, encarts commande de livres et abonnement pages 96 et 97, un encart jeté CD-Rom Pour La Science uniquement sur les abonnés, un encart jeté Elsevier sur une partie des abonnés. En couverture : © *Royalty-Free/CORBIS*

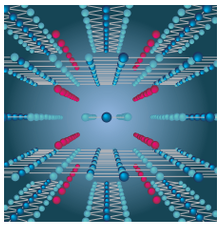
305_sommaire 12/02/03 11:43 Page 3 cla Maquettistes:cla (Celine Lapert) :305:p002_003_sommaire:

N° 305 – MARS 2003

Les échelles quantiques 58

Thierry Giamarchi, Edmond Orignac et Didier Poilblanc

Composés hybrides, à mi-chemin entre des fils unidimensionnels et des conducteurs à deux ou trois dimensions, les échelles quantiques ont des propriétés radicalement nouvelles.



Vin et santé 66

Arthur Klatsky

Les biologistes confirment que boire de l'alcool modérément est bénéfique pour le système cardio-vasculaire. Faut-il recommander à certains patients de boire avec modération ?



Groix : une île fossile 72

Michel Ballèvre, Valérie Bosse et Gilbert Féraud

L'étude des minéraux de cette île révèle un passé géologique vieux de 400 millions d'années, à une époque où l'île appartenait à un domaine océanique aujourd'hui disparu.



Les malformations des grenouilles 80

Andrew Blaustein et Pieter Johnson

Trois facteurs sont incriminés dans l'accroissement du nombre de malformations chez les amphibiens : les ultraviolets, la pollution des eaux et une épidémie due à un parasite.



Un nouveau site plus convivial

- pour chaque article un complément d'information
- un moteur de recherche intégré
- un annuaire des sites web scientifiques

www.pourlascience.com

© POUR LA SCIENCE – N° 305 MARS 2003

Klatou, barada, nictou

Ainsi l'héroïne du film culte de 1951, *Le jour où la terre s'arrêta*, commande, par l'injonction *Klatou, barada, nictou*, à Gort, le robot tout puissant de ne pas détruire la Terre. Plus que les capacités sensorielles des extraterrestres, l'extraordinaire du film n'est-il pas la faculté, du robot et de son maître Klatou, de conjuguer leurs sensations pour agir dans un environnement terrestre absolument inhabituel. Le robot voit, reconnaît, entend, touche et se déplace sur terre en sachant interpréter les informations issues de sens différents dans un environnement qui lui est inconnu.

Les psychologues étudient cette orchestration sensorielle chez l'enfant (voir *Le dialogue des sens, page 34*). Ils suivent, en fonction de l'évolution des capacités, les interactions du toucher, de l'audition et de la vue. Ces synergies permettent à l'enfant de reconnaître les objets environnants et, très précocement, de séparer le soi du non-soi, en distinguant par la vue et les impressions cutanées le contact du doigt d'autrui ou du sien propre.



L'artiste utilise sciemment cette conjugaison des sens. « Je traduis simplement en couleur ou en ombre les sensations que les choses font naître en moi comme s'il s'agissait déjà de composer de la musique symphonique », affirmait le peintre Francis Picabia. Ne dit-on pas – ce sont aujourd'hui des clichés – qu'un tableau ou un mets est une symphonie, qu'une musique est délectable, qu'un son est coloré ?

La famille de magazines de vulgarisation scientifique (*Pour la Science, Les dossiers, Les génies de la science*) s'élargit à partir du 7 mars d'un nouveau trimestriel, *Cerveau & Psycho* (logie), qui traitera notamment des progrès conjugués de la psychologie expérimentale et de l'imagerie cérébrale. En ce début du XXIe siècle les différentes disciplines – physique, chimie, mathématiques, biologie – se conjuguent pour décoder le fonctionnement du cerveau. Le mouvement est lancé et nous rendrons compte des avancées notables qui percent déjà.

Philippe BOULANGER

Tribune des lecteurs

L'échancrure de l'Univers

Dans son analyse de l'ouvrage de Roland Lehoucq *L'Univers a-t-il une forme*, publiée dans *Pour la Science* de janvier 2003, Michel Toulmonde explique que, selon Einstein, l'espace est «déformé, courbé par la gravitation due à la présence de la matière». Or, si une surface, bidimensionnelle, peut se déformer ou se courber que ce soit en une sphère comme la Terre, en un cylindre, ou en un tore, c'est parce qu'il existe une troisième dimension d'espace pouvant contenir le rayon de courbure de la surface. Si l'Univers, tridimensionnel cette fois, est courbe lui aussi, où se trouve son rayon de courbure? Faut-il supposer une quatrième dimension d'espace? Faut-il imaginer que l'espace tridimensionnel se courbe parce qu'il est contenu dans un hyperespace quadridimensionnel?

Patrice DELVA, Paris

Réponse de Roland Lehoucq

Il est vrai que, selon la théorie de la gravitation d'Einstein, la gravitation est la manifestation de la courbure de l'espace, elle-même résultant de la distribution de matière. Cette théorie relie donc la géométrie locale de l'espace (approximativement la façon dont on calcule la distance entre deux points voisins) à son contenu et ne dit rien sur ses propriétés globales, sa topologie (par exemple l'espace est-il fini ou infini?). Prenons un plan infini, de géométrie euclidienne, et changeons sa topologie. Pour cela, découpons dans ce plan une bande de longueur infinie dans une direction et de largeur finie dans l'autre. En collant les deux bords de la bande, nous obtenons un cylindre, tube de longueur infinie. Dans cette opération, la géométrie n'a pas changé : le théorème de Pythagore s'applique aussi à la surface du cylindre. La courbure du cylindre est donc nulle, comme celle du plan. Cela peut paraître surprenant, car on a l'impression qu'il existe une courbure non nulle, liée au rayon du cylindre. Cette vision met en jeu un espace extérieur au cylindre, celui dans lequel nous le représentons, qui lui donne une courbure «extrinsèque». Le mathématicien Gauss a montré que l'on peut caractériser complètement un espace sans faire appel à un espace «extérieur». Un être plat vivant à la surface du cylindre n'aurait accès ni à cet espace extérieur de dimension supérieure ni à cette courbure extrinsèque : pour lui, le cylindre est localement euclidien.

Tout n'est pas noir pour la cigogne blanche

Suite à l'article *Les migrations des cigognes* (voir *Pour la Science*, février 2003), j'aurais souhaité faire deux commentaires. Une erreur s'est glissée dans le texte page 58 : le pygargue de Steller est une espèce différente de l'aigle des steppes, et l'espèce qui migre d'Asie centrale en Afrique du Sud est l'aigle des steppes. Une erreur d'illustration est également à signaler page 61 où la photographie représente un pygargue à tête blanche d'Amérique du Nord et pas un pygargue de Steller.

Par ailleurs, si la reconstitution actuelle des populations des cigognes blanches d'Europe de l'Ouest reste fragile et est liée à une meilleure protection et aux opérations d'élevage en captivité, les populations espagnoles de cet oiseau affichent une dynamique particulière dont les auteurs ne parlent pas. En effet, sans aucun soutien à la population comme cela a été fait en Alsace, les cigognes blanches d'Espagne sont passées de 6 753 couples en 1984 à 7 821 en 1990, et 16 643 en 1994. Ces derniers chiffres sont supérieurs aux effectifs des années 1940, avant que les milieux favorables à l'espèce ne soient altérés par l'homme. Il semble que cette augmentation soit due à la sédentarité de certains oiseaux qui ne migrent plus ou presque plus vers l'Afrique, mais aussi à un changement de régime alimentaire avec l'utilisation des dépôts d'ordures ménagères et une consommation croissante des écrevisses américaines qui ont été introduites. Cette dynamique se retrouve pour les populations françaises de cigognes qui augmentent aussi de manière spectaculaire (520 couples en 1998, 650 en 2000, soit là aussi davantage que dans les années 1940) et sans doute pour les mêmes raisons (par exemple, le couple qui niche aux portes de Clermont-Ferrand se nourrit essentiellement sur la décharge de la ville). Ces oiseaux qui s'installent en France hors de l'Alsace correspondraient à des surplus de la population espagnole. Ils affichent d'ailleurs une productivité en jeunes supérieure à celle des couples alsaciens. L'opposition entre cigognes de l'Ouest et de l'Est en Europe, telle que les auteurs la présentent, est donc à relativiser.

Alex CLAMENS, Clermont-Ferrand

Réponse de D. Picamelot et S. Samtmann

Centre d'écologie et physiologie énergétiques, Université Louis Pasteur, Strasbourg

Il est clair que depuis de nombreuses années, les cigognes européennes trouvent dans les décharges publiques de nouvelles zones d'alimentation, qui peuvent avoir favorisé une sédentarisation des oiseaux. L'hypothèse que les cigognes espagnoles seraient à l'origine de l'augmentation du nombre de cigognes en France est très intéressante. Malheureusement, le seul élément publié en faveur de cette hypothèse est l'observation d'un unique individu bagué en Espagne et nichant en France, alors que de nombreux adultes issus de la sous-population locale sont régulièrement observés comme nicheurs. L'immigration étant généralement sous-estimée puisque tous les individus ne sont pas bagués, l'utilisation des outils de la génétique des populations permettrait d'étayer ou non l'hypothèse. Ce travail est actuellement en cours.

La tectonique à l'école

C'est avec la plus grande satisfaction que j'ai lu la lettre de Monsieur Mattauer dans la tribune des lecteurs de décembre 2002. Je dois ajouter que les géologues n'ont pas été les seuls à soutenir rapidement Wegener : les géographes ont accordé crédit à sa théorie, certes imparfaite, mais ingénieuse. Élève de seconde au lycée Corneille de Rouen en 1937, j'ai conservé mon ouvrage de géographie d'alors – «Géographie générale» de André Allix et André Leyritz, Hatier, 1934 –, qui expose en quelques lignes les travaux de Wegener :

(...) *Dans ces conditions, les continents ne sont nullement astreints à garder, à travers les milliers de siècles des époques géologiques, les mêmes positions. Ils peuvent se déplacer, ils peuvent même se déchirer; et A. Wegener, qui a mis en avant cette théorie, a fait remarquer que certains continents, comme l'Amérique du Sud et l'Afrique, ou les deux rives de la mer Rouge, ont des contours semblables et opposés comme les deux moitiés d'un journal déchiré par le milieu. Les continents, d'abord soudés, se seraient ainsi déchirés et séparés les uns les autres. Cette ingénieuse théorie a le mérite d'expliquer bien des points de géographie physique, notamment les contractions locales qui ont donné naissance aux plissements montagneux.*

Marcel DESBLED, Belbeuf

Écrivez à *Pour la Science* vos réactions, vos commentaires et vos réflexions sur l'actualité scientifique et vos relations avec la science. L'adresse de *Pour la Science* sur Internet est : tribune@pourlascience.fr. Découvrez d'autres contributions de lecteurs sur le site Web www.pourlascience.com.

Bloc-notes

DIDIER NORDON

Trop vite en besogne!

Notre enseignement est sinistré, entendons-nous souvent. Avant de répéter cette antienne, n'oublions pas que notre perspective est déformée, donc notre jugement faussé. Voici en quoi.

Depuis un siècle, sinon deux, l'accélération caractérise notre société. Les trains et les avions vont de plus en plus vite ; les techniques, la médecine, sont sans cesse plus efficaces ; notre espérance de vie ne fait qu'augmenter… Nous sommes si habitués à voir toutes les durées d'exécution être compressibles, toutes les puissances être extensibles, que nous en venons à penser que telle est la norme.

Mais, au milieu de nos paysages renouvelés à chaque instant, le rythme de l'enseignement demeure, immuable. Aujourd'hui comme jadis, l'élève doit, avant de parler une langue étrangère, apprendre, oublier, réapprendre dix fois, vingt fois, le vocabulaire nécessaire. Aujourd'hui comme jadis, l'élève ne comprend une théorie difficile qu'après l'avoir dix fois, vingt fois, appliquée à contresens. L'homme est ainsi fait : il apprend lentement, très lentement ; il comprend lentement, très lentement. Le progrès n'y change rien. Le moindre ordinateur héberge plus de savoir que la Bibliothèque d'Alexandrie, mais l'usager de cette Bibliothèque avait une mémoire ni plus ni moins vaste, une intelligence ni plus ni moins sûre, que l'utilisateur d'ordinateur.



Dans un monde de supersoniques et de TGV, l'enseignement progresse au même pas que dans un monde de bateaux à voiles et de chars à bœufs. Dans un monde où tout va plus vite, rien ne lui permet d'aller plus vite. Voilà ce dont nous devons tenir compte avant de «porter un regard critique sur les performances de notre système éducatif».

Le train des syllogismes

Affichés sur les trains en Île-de-France, les sigles RONI, VICK, CAPU, OLAF, RIPI, DAPI, MONA… (je n'ai pas vu LISA) indiquent la destination et le type du train. Dans VICK, par exemple, V signifie Versailles et I, partiellement direct. Dans MONA, M signifie Massy et O, omnibus. Et CK? Et NA? CK ne signifie rien, pas plus que NA ; ils ont été ajoutés pour obtenir un mot sonore. À la SNCF comme dans l'ADN, certaines séquences sont codantes, d'autres non.

Le Moyen Âge aussi a inventé des mots. L'un est encore connu de nos jours, le mot BARBARA, qui désigne un syllogisme du type de celui-ci : «les hommes sont mortels, or les logiciens sont des hommes, donc les logiciens sont mortels». D'autres, attachés à d'autres syllogismes, sont oubliés : FERIO, FELAPTON, BAMALIP, DATISI, DIMATIS… Fait remarquable, le Moyen Âge, plus performant que la SNCF sur ce point, savait donner un sens à toutes les lettres de ces mots, utilisés comme procédés mnémotechniques pour mémoriser les divers syllogismes. Les voyelles A, E, I et O codaient quatre types de propositions de base et les consonnes indiquaient quelles opérations étaient à effectuer entre elles.

Une synthèse entre chemin de fer et scolastique s'impose. À un syllogisme facile, comme celui en BARBARA, associons un trajet facile : Bourg-Arcueil-Robinson-Bourg-Arcueil-Robinson-Arcueil. À un trajet exigeant des correspondances difficiles – Bougival-Aubervilliers-Montigny-Arpajon-Liancourt-Ivry-Palaiseau – associons un syllogisme également difficile, celui en BAMALIP.

Le Moyen Âge connaissait 19 formes de syllogismes seulement. Ridicule! Le nombre d'itinéraires possibles en Île-de-France est bien plus élevé. Plutôt que rester à nous ennuyer pendant nos trajets en banlieue, inspirons-nous d'eux pour inventer de nouveaux syllogismes. Grâce au train, nous découvrirons des lois de la logique inconnues jusqu'à présent.

Homo laverait-il plus blanc?

Les manipulations génétiques, appliquées à l'homme, révoltent. La perspective de changer l'homme scandalise : c'est de la folie.

De la folie? Admettons. Songeons bien, toutefois, que porter *a priori* un tel jugement revient à manifester une étonnante indulgence à l'égard de l'homme. Depuis les voies romaines bordées d'esclaves crucifiés jusqu'à Hiroshima, depuis les pyramides de crânes élevées par Gengis Khan jusqu'à Auschwitz, sans oublier ce qui se passe de nos jours, l'homme écrit une histoire horrible. Je doute que la création d'un être pire que lui soit une performance à la portée de la science. Qui sait si le mutant obtenu par les savants fous ne se comportera pas de manière… humaine. Si bien que, comme souvent, les fous auront été sages.



Thésez-vous et lisez!

C'est par antiphrase qu'un administratif haut placé est dénommé un «responsable». L'individu a, en effet, trop de décisions à prendre pour s'informer en détail sur chaque dossier. Il fait donc confiance à ses collaborateurs et signe sans lire. Quelle responsabilité!

Cette conception toute administrative de la notion de responsabilité a, hélas, envahi la recherche scientifique. Celle-ci fourmille de gens qui participent à tellement de jurys de thèse et sont priés de donner leur avis sur tellement de projets d'articles, que le temps leur manque pour lire ce qu'ont écrit les impétrants. Alors, ils font confiance. Confiance à l'auteur de l'article, qui a l'air sérieux ; ou confiance à un collègue, qui dit que la thèse est valable. En outre, refuser exige plus de travail qu'accepter, car il faut justifier le refus : argument puissant en faveur du feu vert! Ainsi s'accroît la littérature des thèses et des articles – aussi grise, aussi peu lue, aussi énorme, aussi conformiste que celle des rapports administratifs. Mais feu vert ne veut pas dire caution. Si naît la moindre polémique – ce qui est une malchance rarissime, il faut au moins que ce soient les frères Bogdanov qui aient soutenu la thèse pour que cela se produise! – ils réagissent comme les administratifs surpris par un dossier brûlant : ils se renvoient la balle. Le professeur «responsable» du thésard dit qu'il pensait que la thèse était bonne, puisqu'une bonne revue avait accepté d'en publier des extraits ; le «responsable» de la revue tient le «raisonnement» inverse. Personne n'avait pris le temps de se faire un avis étayé.

Que nul ne participe à un jury de thèse s'il n'a lu, compris et apprécié toute la thèse! Que nul ne donne son aval à la publication d'un article s'il n'a lu, compris et apprécié tout l'article! Voilà deux revendications de bon sens, qui n'ont l'air de rien. De nos jours, pourtant, les mettre en œuvre créerait un bouleversement majeur au sein de la cité scientifique.



Musée de la Poste

L'ADN a 50 ans, et après ?

JAMES WATSON

L'un des découvreurs de la double hélice fait le bilan d'un demi-siècle de génétique.

Le 2 avril 1953, la revue britannique *Nature* publiait un article où James Watson, Francis Crick et Frederick Wilkins proposaient le modèle en double hélice de l'ADN. À l'occasion du 50e anniversaire de cette fameuse structure, John Rennie, rédacteur en chef de *Scientific American*, a rencontré l'un de ses pères, J. Watson, qui retrace l'histoire de sa découverte, et nous livre ses réflexions sur l'état actuel de la génétique et les controverses dont elle est l'objet.

John Rennie : *L'ADN s'est échappé de la sphère scientifique et est devenu un phénomène culturel, voire le symbole de la vie. Il fait partie de notre quotidien et inspire jusqu'aux artistes. Il y a 50 ans, dans les Laboratoires Cavendish de l'Université de Cambridge, pouviez-vous prévoir un tel engouement ?*

James Watson : Non, bien sûr, car personne ne savait séquencer ni même amplifier l'ADN (l'amplification consiste à produire de nombreuses copies d'un même ADN afin de l'étudier). En 1961 ou 1962, l'immunologiste australien Franck MacFarlane affirmait que l'ADN et la biologie moléculaire n'auraient jamais aucun effet sur la médecine. L'avenir lui a donné tort ! Cependant, ces applications ne sont devenues possibles qu'avec la mise au point de méthodes pour déchiffrer l'ADN. C'est pourquoi le *Projet Génome Humain* est si important.

En 1953, seuls nous importaient comment l'ADN code l'information et quels mécanismes cellulaires produisent les protéines, c'est tout. L'idée de thérapie génique n'est apparue que 15 ans plus tard, à la fin des années 1960, quand les enzymes de restriction (ces enzymes coupent l'ADN en des endroits donnés et connus) ont été découvertes, ainsi que, peu après, les méthodes de séquençage.

J. R. : *La concurrence pour établir la structure de l'ADN a été féroce et les traits de personnalité ont eu leur importance. Par ailleurs, cette découverte semblait quasiment « inéluctable » à cette époque. Beaucoup d'entre vous en étaient proches ; on pense à Frederick Wilkins (co-lauréat du prix Nobel de médecine en 1962 avec vous-même et F. Crick), à Linus Pauling (1901-1994, prix Nobel de chimie en 1954, et prix Nobel de la paix en… 1962), et enfin, à Rosalind Franklin (1920-1958).*

J. W. : C'était inéluctable… avec les données de diffraction des rayons X, et sans doute un petit quelque chose en plus. Toutefois, même s'il n'avait pas les clichés du *King's College*, à Londres, Pauling aurait pu penser à l'hélice *alpha*, (une structure hélicoïdale qu'adoptent certaines séquences protéiques. Cette structure est à l'origine d'une théorie de la diffraction par les molécules hélicoïdales qui a joué un rôle dans l'élaboration du modèle de la double hélice).

J. R. : *Donc, si vous n'aviez pas élucidé cette structure…*

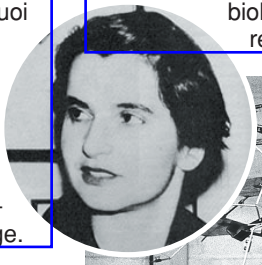
J. W. : …Je ne crois pas qu'une année se serait passée sans qu'elle ne le soit. Nous ne savions pas que Franklin, dès février, s'était intéressée à la forme B (la double hélice de l'ADN adopte trois formes : la forme B, la plus courante, et deux autres, plus denses, la forme A et la forme Z), car elle avait quitté le King's College ; découragée par la discrimination et la concurrence, elle aurait toutefois écrit un rapport où elle proposait le modèle de la double hélice, mais nous l'ignorions alors.

J. R. : *On a toujours soutenu que Wilkins vous avait montré les résultats cristallographiques de Franklin sans sa permission. Ces clichés auraient été décisifs.*

J. W. : Plusieurs personnes se sont demandées pourquoi nous n'avions pas parlé avec Rosalind plus tard, notamment pour la remercier de son aide. La difficulté est qu'elle ne voulait pas en discuter. Peu avant sa mort, elle a rencontré Francis, et cela aurait pu être l'occasion de régler ce différend, mais seul « l'avenir l'intéressait » disait-elle.

J. R. : *Aurait-il été plus approprié de partager le prix Nobel avec elle plutôt qu'avec Wilkins ?*

J. W. : Je ne crois pas. Wilkins nous a fourni les clichés de la forme A et elle, ceux de la forme B. Dans un monde idéal, ils auraient eu le prix Nobel de chimie, et nous celui de biologie. Cela aurait été une façon de nous honorer tous les quatre, mais personne n'y a pensé.

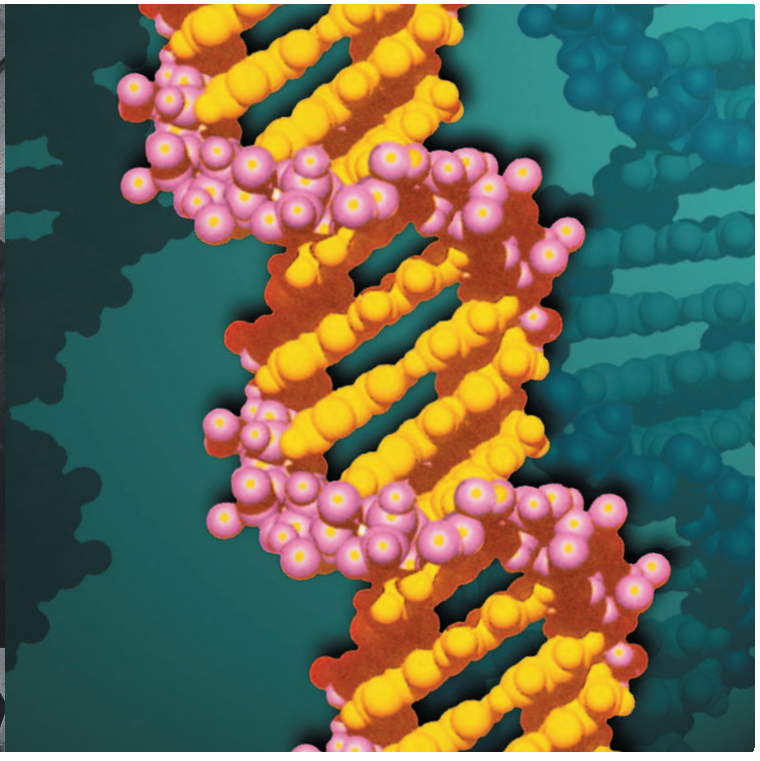



LFI

Ce samedi 28 février 1953, nous avons élaboré un modèle dont nous n'étions pas certains. Nous avons pensé que des données de diffraction des rayons X seraient une preuve supplémentaire. Toutefois le modèle reposait sur un mécanisme de copie auquel tous les biologistes voulaient croire, quelles que soient les données cristallographiques.

J. R. *: En effet, de la complémentarité des nucléotides résulte un mécanisme simple de copie de l'ADN.*
J. W. : Vous savez, nous ne pensions parcourir que la moitié du chemin ! Nous proposions une structure dont les cristallographes prouveraient la pertinence. Le problème de la copie se serait posé ensuite. Nous sommes célèbres parce que la molécule d'ADN est exceptionnelle. Si Rosalind avait parlé à Francis dès 1951 et partagé ses résultats, elle aurait découvert cette structure : elle serait célèbre à ma place !

J. R. *: En un siècle, nous sommes passés de la redécouverte des lois de Mendel et de l'identification des chromosomes en tant qu'agents de l'hérédité au séquençage quasiment complet du génome humain. Selon vous, en génétique, reste-t-il des découvertes majeures à faire, ou bien n'est-ce plus qu'une affaire de détails ?*
J. W. : Le problème majeur, à mon avis, est la chromatine, l'assemblage compact de l'ADN, dans les chromosomes, avec des protéines, nommées histones. Comment un fragment donné d'ADN enfoui dans un chromosome devient-il accessible ? Quels sont les mécanismes et les rôles de la méthylation et des phénomènes épigénétiques (qui modifient l'expression des gènes selon l'environnement) ? Vous héritez bien plus que d'un simple patrimoine génétique ! Ces questions sont les plus excitantes de la génétique d'aujourd'hui.
Et les progrès semblent particulièrement rapides. Sans vouloir jouer au devin, je pense que dans les dix prochaines années, ce champ sera bien « débroussaillé ». De nombreux scientifiques compétents travaillent sur ce sujet, et ils ont les outils nécessaires. Les principes fondamentaux du fonctionnement des gènes seront alors connus et nous serons capables d'aborder des questions, tel le fonctionnement du cerveau.



J. R. *: Les ARN (ces molécules sont, comme l'ADN, composées de nucléotides et porteuses d'information) sont sortis de l'ombre de l'ADN. Nous connaissons aujourd'hui des phénomènes d'interférences où des molécules d'ARN modifient l'expression des gènes. Saurons-nous percer les secrets de cet autre domaine ? Est-ce comparable aux problèmes des histones ?*
J. W. : Oui, c'est plus complexe que nous le pensions en 1953. À cette époque, il n'y avait qu'une sorte d'ARN, l'ARN messager, une copie d'un gène d'ADN qui est ensuite traduite en protéine dans les cellules. Toutefois, pour fabriquer cet ARN, les histones doivent s'éclipser. C'est à nouveau le problème de la chromatine.

J. R. *: Dans un numéro récent de la revue* Nature*, Walter Gilbert (prix Nobel en 1980) affirme que la « biologie moléculaire est morte », principalement car son objet, l'ADN, a envahi tous les autres domaines.*
J. W. : Je partage son avis, dans le sens où l'ADN est devenu un outil. Il y a encore un problème fondamental à résoudre : comment l'information est stockée et utilisée dans le cerveau. C'est un problème plus important que l'ADN, et plus complexe.

J. R. *: Si vous débutiez aujourd'hui…*
J. W. : Je travaillerais sur les relations entre les gènes et le comportement. Vous pouvez trouver des gènes qui participent au comportement, mais cela n'explique pas comment le cerveau fonctionne. Passionné par l'ornithologie depuis mon enfance, mes premiers centres d'intérêts scientifiques ont porté sur la migration des oiseaux. Sans savoir comment le cerveau d'un oiseau fonctionne, vous ne saurez pas comment les gènes « disent » où migrer, car les mères ne l'apprennent pas aux jeunes ! C'est donc hérité.
Il y a plusieurs comportements importants à élucider. Certains disent qu'ils ne comprennent pas que des hommes puissent aimer les hommes, mais je pense qu'il est aussi mystérieux que les hommes aiment les femmes ! Ces problèmes sont complexes. Francis affirme que les neurosciences ne sont pas fondées sur un équivalent de la molécule d'ADN.

J. R. *: À propos de politique, plusieurs thèmes de débats publics sont liés à l'ADN : les organismes génétiquement modifiés, le clonage… Quelle confiance accordez-vous à la gestion politique de ces dossiers ?*
J. W. : Je pense qu'ils sont si controversés que les États ne devraient pas intervenir. Les décisions sur la reproduction sont du ressort des femmes, pas des autorités. Aujourd'hui, le sujet est le clonage… en admettant qu'il soit possible. Cependant, le premier clone ne sera pas comme la première utilisation de la bombe atomique. Il n'y aura pas mort d'homme !
Si vous, votre femme et plusieurs membres de vos familles êtes porteurs d'une maladie, peut-être aimeriez-vous un enfant qui en soit dépourvu. Certains disent : « C'est la porte ouverte aux bébés sur mesure. » Toutefois, si vous pouvez vous assurer que votre enfant ne sera pas atteint par cette maladie, n'est-ce pas un progrès ? Qui serait lésé ?

J. R. *: Pensez-vous que le public en sait assez en matière de génétique pour prendre des décisions raisonnées ?*
J. W. : Si vous croyez qu'une plante n'existe que par la volonté de Dieu, vous pouvez dire qu'il ne faut pas y toucher. Cependant, l'Amérique n'est plus ce qu'elle était à l'arrivée des Pères pèlerins, ces puritains britanniques qui ont fui les persécutions religieuses en 1620 et ont débarqué en Amérique à bord du *Mayflower*. Ils sont les « fondateurs » des États-Unis. Nous avons tout changé. Nous n'avons pas respecté le passé, mais plutôt tenté de l'améliorer. Et je crois qu'interdire cette quête est contraire à l'esprit humain.



Poète, prends ton lut

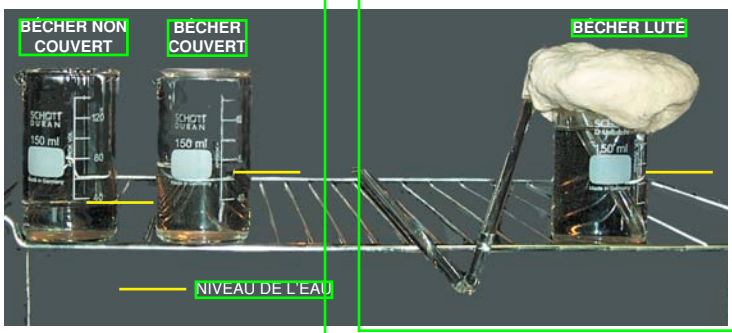
HERVÉ THIS

Le lutage des cocottes ne prévient l'évaporation et la «perte des arômes» que si la température du liquide est proche de celle de l'ébullition.

Poulettes pattes noires en cocotte lutée… Les poulettes sont préparées, mises en cocotte avec une garniture aromatique ; puis, le couvercle posé sur la cocotte est «hermétiquement» soudé à celle-ci par un cordon de pâte, faite de farine et d'eau. Les cuisiniers imaginent que les «arômes» sont recyclés dans l'espace clos de la cocotte, de sorte qu'ils viennent imprégner les chairs. Puis, lors du service, quand le maître d'hôtel casse le cordon de pâte durci, les convives sont inondés d'un flot d'odeurs. Il y a du spectacle, dans l'usage du lut, mais les molécules odorantes sont-elles véritablement piégées? Réservons la question de l'imprégnation des chairs pour une autre fois et déterminons, ce mois-ci, si le lutage retient effectivement les molécules odorantes.

«La sagesse, dit le philosophe Alain, remet en question des choses connues et reçues, et doute par principe en vue de s'assurer mieux.» Foin du rêve du cuisinier ou du gourmand, doutons de l'efficacité du lut, et expérimentons.

Le test le plus simple consiste à comparer deux cocottes identiques, lutées ou non. Au laboratoire, nous remplacerons les cocottes par des béchers en verre gradués, et les couvercles par des verres de montre ou par des soucoupes de tasse à café. Sur l'un des béchers, posons seulement le «couvercle» ; sur l'autre, lutons, c'est-à-dire soudons le couvercle au bécher par un lourd cordon de pâte, faite de farine travaillée avec de l'eau. Dans la même lancée, comparons ces deux béchers à un troisième bécher laissé ouvert. Dans les trois béchers, plaçons un même volume d'eau *(voir la photographie ci-contre)*. Puis introduisons les trois béchers dans un four à la température de 180 °C, par exemple (une température habituelle pour la cuisson des poules et poulets).



Suivons alors les variations du niveau de l'eau dans les béchers au cours du temps. On voit que l'eau s'évapore plus vite dans le bécher non couvert… mais aucune différence n'apparaît entre les béchers avec couvercle posé, et avec couvercle luté. Le lut serait-il une beauté culinaire inutile? Les cuisiniers confrontés aux résultats de cette expérience qui met leur savoir en question argumentent, critiquent l'expérience, reprochent aux béchers de ne pas être des cocottes… mais seuls les plus au fait des arcanes techniques font valoir que l'expérience réalisée ne vaut rien, parce que les conditions d'usage du lut n'ont pas été respectées : les livres de cuisine ne le disent pas, mais la transmission orale l'affirme, le lut n'est utile que pour les cuissons longues, à température modérée.

Modérée de combien? Donnons à la cuisine le bénéfice du doute, et reprenons l'expérience en plaçant les trois mêmes béchers à la température de 110 °C. Cette fois, l'eau s'évapore différemment dans le bécher simplement couvert et dans le bécher couvert et luté : ce dernier retient toute son eau, même après quatre heures de cuisson. La tradition culinaire est dans le vrai : si le lut retient la vapeur d'eau, il retient aussi les molécules odorantes que cette vapeur aurait entraînées.

Comment corroborer ces résultats? Si l'eau est retenue dans le bécher luté, alors qu'elle s'évapore, l'intérieur du bécher couvert et luté doit être sous pression. Mesurons la pression en modifiant un peu le système : n'importe quel chimiste amateur peut utiliser une petite lampe à alcool pour couder un tube de verre en Z : couché, ce tube est plongé dans l'eau d'un bécher, et le tube en U qui dépasse du bécher est alors empli d'un liquide (qui ne s'évapore pas : de l'huile, par exemple). Le couvercle est posé sur le bécher garni de son tube, puis luté. L'ensemble est placé dans un four réglé à la température de 110 °C. Le liquide dans le tube en U est alors poussé par la vapeur formée : ainsi mesure-t-on la pression dans le bécher luté et voit-on que la pression augmente progressivement, à mesure que la cuisson s'opère.

La science n'est pas accumulation de mesures, mais exploration des mécanismes. Comment le lut confine-t-il la vapeur d'eau? Il existe plusieurs sortes de lut, mais les plus couramment prescrits sont les plus rudimentaires : ils sont faits de farine et d'eau. Le travail de la pâte provoque la formation d'un réseau de protéines, le gluten, qui piège les grains d'amidon ; ainsi la pâte devient-elle «viscoélastique», c'est-à-dire un peu visqueuse (elle coule difficilement) et un peu élastique (en raison du réseau de gluten). Chauffée, cette pâte sèche en surface, tandis que l'amidon absorbe l'eau et s'empèse ; les grains d'amidon se soudent.

Quand la pâte sèche rapidement, comme dans la cuisson à la température de 180 °C, elle se contracte en surface (elle sèche), tandis que son cœur est encore humide. Des fissures apparaissent dans la croûte par où la vapeur d'eau formée dans le bécher s'échappe. En revanche, quand on chauffe doucement, le séchage est plus homogène, et l'ensemble du cordon de pâte se contracte, sans se fissurer. La vapeur est retenue.

La conclusion culinaire? Le lut est un bon moyen de retenir la vapeur et les molécules odorantes des mets, mais les livres de cuisine seraient avisés de n'en recommander l'usage qu'aux températures peu supérieures à celles de l'ébullition de l'eau, car la pression augmente vite avec la température interne T, comme la puissance quatrième du quotient T/100.

Rendez-vous de *France Info* et de *Pour la Science*, le 26 mars, avec la chronique *Info Sciences* de Marie-Odile Monchicourt.

© POUR LA SCIENCE - N° 305 MARS 2003



La forme des villes...

IVAR EKELAND

... résulte de l'économie. La transdisciplinarité, tant prônée, est efficace pour autant que les mathématiques s'appliquent à un bon modèle.

Chacun sait que dans les villes, il y a des quartiers d'affaires, des quartiers résidentiels, et des zones mixtes, où entreprises et habitations sont imbriquées. Dans les travaux d'économie urbaine, cette répartition était considérée comme une donnée, mais Robert Lucas, professeur à Chicago et prix Nobel d'économie, s'est demandé si cette structure était une conséquence logique du comportement des habitants.

Tout l'art du scientifique consiste à expliquer des structures compliquées par un petit nombre d'hypothèses simples et générales. R. Lucas, en grand scientifique, arrivera à son but avec un arsenal extrêmement réduit d'hypothèses élémentaires. Il propose un modèle comportant trois types d'acteurs : les habitants de la ville, les industriels et les propriétaires des terrains, chacun se comportant comme l'indique la théorie économique classique. Les propriétaires des terrains le louent au plus offrant, les industriels cherchent à maximiser leur profit, déduction faite des salaires et du loyer qu'ils doivent verser, les habitants consacrent leur revenu (c'est-à-dire leur salaire) à se loger et à consommer.

Il n'y a là rien qui incite au regroupement géographique. Au contraire, les habitants et les industriels ont intérêt à s'étaler le plus possible, de manière à réduire la densité d'occupation des sols et à bénéficier de loyers plus favorables. Les forces économiques sont centrifuges et on ne voit guère comment naîtrait une agglomération : l'habitat dispersé est la meilleure solution.

Pour expliquer la genèse des villes, il va donc falloir trouver des forces centripètes qui équilibrent les précédentes : elles résultent de deux hypothèses naturelles. La première est que, si deux travailleurs sont ensemble, chacun d'eux travaillera mieux que s'il était seul – le travail fourni sera plus que deux fois celui que chacun d'eux fournirait isolément : c'est ce qu'on appelle une externalité. La deuxième est que si un habitant vit à un endroit et travaille dans un autre, il subit des coûts de transport de nature diverse, le prix du trajet certes, mais aussi la fatigue ou le temps perdu, ces coûts étant d'autant plus importants que la distance est plus grande.

Ces forces économiques sont centripètes. Pour profiter au maximum de l'externalité, les industriels auraient intérêt à se regrouper dans un seul gratte-ciel, qui abriterait toutes les entreprises. Pour réduire les coûts de transport, les travailleurs auraient intérêt à loger près de leur lieu de travail, – dans ce même gratte-ciel – qui servira donc à la fois d'usine et de dortoir.

Nous voilà apparemment passés d'un extrême à l'autre : sans externalité de production ni de coûts de transport, il n'y pas de ville, avec eux, la ville s'écrase en un point. Tout doux, messieurs les urbanistes : le prix du terrain est là, qui empêche cet écrasement. Si tout le monde veut habiter et travailler au même endroit, la concurrence sera telle pour ce lopin de terre que son propriétaire le louera à un prix astronomique, les terrains immédiatement voisins ne vaudront rien. Mais dans ce cas, chacun individuellement, habitant ou industriel, a intérêt à quitter le gratte-ciel pour s'installer un peu plus loin. L'un devra marcher 50 mètres tous les jours pour aller à son travail, l'autre tirera de ses ouvriers un rendement moindre, mais tous deux gagneront énormément sur le loyer, si bien que l'opération sera bénéficiaire.

Aussi la configuration d'équilibre, où personne n'a intérêt à déménager se situe entre l'étalement total et l'écrasement complet. Dans un article extrêmement intéressant, R. Lucas et son élève Esteban Rossi-Hansberg ont montré que, si l'on suppose que la ville est circulaire, ainsi que tous ses quartiers, si bien que la structure interne est une succession d'anneaux concentriques, alors une (ou plusieurs, on ne sait pas) configuration d'équilibre existe (ou existent). Selon les cas, on peut avoir un unique quartier d'affaires autour du centre, entouré par un quartier résidentiel, ou des configurations plus compliquées, faisant alterner quartiers d'affaires, résidentiels ou mixtes.

DANGEREUX TRANSPORTS... EN COMMUN!

Cependant, toutes les villes ne sont pas circulaires, à commencer par Chicago qui est construite au bord du lac Michigan. L'année dernière à Chicago, Guillaume Carlier et moi-même avons passé du temps avec R. Lucas et E. Rossi-Hansberg pour éliminer cette hypothèse. Sans succès. Depuis, nous avons continué à réfléchir, et il nous est apparu que la structure purement mathématique de leur modèle n'était pas satisfaisante: elle était propre au cas considéré, et ne se prêtait pas à des généralisations pourtant naturelles. En continuant à réfléchir, nous avons localisé une faiblesse du modèle de Lucas–Rossi-Hansberg : chaque individu fournit huit heures de travail par jour, mais l'horloge pointeuse se déclenche à partir du moment où il part de chez lui et s'il passe deux heures en transport, il n'effectue que six heures de travail pour son employeur (mais celui-ci le paye pour huit).

Nous avons donc changé cette hypothèse. Dans le nouveau modèle, les coûts de transport sont monétaires : le revenu disponible de chacun est égal au salaire que lui paye son employeur diminué des coûts de transport. En revanche, chacun doit fournir huit heures de travail effectif. Cette modification apparemment mineure change complètement la structure mathématique du problème. En effet, on peut alors se raccrocher à une théorie mathématique qui connaît un grand essor à l'heure actuelle (mais que ni Robert ni Esteban, économistes l'un et l'autre, n'avaient aucune raison de connaître), la théorie du transport optimal. On arrive alors à résoudre tous les problèmes en suspens, notamment à montrer l'existence de configurations d'équilibre pour des villes de forme quelconque, et à traiter des questions nouvelles, comme l'influence du réseau de transport sur la structure interne des villes.

Voilà donc un exemple où une plus grande sophistication mathématique a permis de faire progresser la compréhension économique. L'intuition économique fondamentale reste celle de R. Lucas, mais seule la théorie mathématique du transport optimal permet de lui conférer toute sa dimension. Nous pensons appliquer la méthode à d'autres problèmes de structure, provenant par exemple du commerce international.



Tranches de vie

JEAN-LOUIS HARTENBERGER

L'éprouvette ou la ruche?

Par une habile manipulation génétique, les chercheurs de l'INSERM ont réussi à créer des souris mutantes dont la durée de vie est en moyenne un tiers plus longue que la normale, près de 900 jours. On crierait au miracle si l'évolution n'avait fait mieux : c'est le plus naturellement du monde que les rats-taupes d'Afrique du Sud battent largement ce record de longévité : ces petits rongeurs vivent plus de 20 ans. Une équipe américaine étudie pourquoi.

Restons modestes : la longévité chez les mammifères est un problème de taille. Les plus petits ne survivent guère plus d'une ou deux années, l'éléphant, si Nemrod l'ignore, passera aisément le siècle, tout comme *Homo sapiens* dont la survie maximale est de l'ordre de 120 ans. D'où le souhait de trouver les causes de la sénescence, ce processus physiologique de dégradation de nos cellules, et bien sûr d'y remédier. Tel est l'objectif des deux équipes : elles envisagent qu'à terme, les expériences et observations qu'elles réalisent l'une sur les souris, l'autre sur les rats-taupes, pourraient servir à prolonger notre séjour sur terre.

Est-il avantageux pour notre espèce d'accroître la durée de vie d'individus largement au-delà de l'andropause ou de la ménopause? Mais écartons la discussion «sociétale», et imaginons que les deux projets viennent sur la table de la même instance en quête de financement. Quel choix adopter? Quelle stratégie privilégier ? L'approche des généticiens qui fait appel à des techniques de laboratoire lourdes, ou celle des zoologistes qui semble plus naturaliste?

Les premiers se targueront de leurs avancées récentes : les cartes du génome humain et celui de la souris ont été dressées, et s'ils ont identifié les gènes du vieillissement de la souris, il leur sera facile de trouver ses homologues chez l'homme. Il n'empêche que cela signifie aussi qu'ils envisagent de transposer un jour ou l'autre des murins aux bipèdes pensant leurs expériences.

Dans l'autre cas de figure, les rats-taupes sont déjà des curiosités, mais pour d'autres raisons. La peau nue et ridée, ils ont l'aspect de saucisses à pattes d'où dépassent deux énormes incisives à la couleur jaunâtre. Au fond de leur terrier, dans les paysages désertiques qu'ils habitent, leurs colonies creusent des galeries kilométriques, avec pour seul but de mettre les dents sur une racine juteuse et savoureuse. Une matrone règne sur la colonie, et en est l'unique génitrice. Sa vie durant, elle met au monde des centaines de petits, servie par quelques mâles, et alors qu'une ribambelle d'individus asexués s'activent pour creuser, nourrir, prendre soin des jeunes, prévenir de l'arrivée inopportune d'un serpent affamé. Aussi on peut se demander si leur longévité exceptionnelle n'est pas la rançon de cette hygiène de vie monacale et codifiée. On s'interrogera : voulons-nous vivre ainsi?

Pour vaincre les siècles, nous avons le choix : l'éprouvette ou la ruche. Mais avant cela de très longues études, dans le cadre de programmes séculaires.

L'ennui naît-il de l'université?

S'il est un processus où l'originalité est bannie, c'est bien la défense de la thèse de docteur. Alors, que dans son principe…

Avec un bel ensemble, vers le mois de décembre, des centaines de postulants déposent leurs mémoires, composent leurs jurys, préparent leurs prestations orales. Ce comportement collectif est-il copié de celui des gnous? Les spécialistes nous disent dans leur langage aride que pour minimiser la pression de prédation des hyènes, toutes les femelles d'un troupeau, jusqu'à plusieurs dizaines de milliers, doivent mettre bas de concert. Les thésards craindraient-ils d'être dévorés par des jurys qui n'ont guère en commun avec les carnivores précités que la faculté de ricanement s'ils viennent à tomber en panne de glose? Que nenni. Mais le calendrier universitaire a gelé le temps de la nouvelle thèse à trois ans, et cet encadrement implique qu'au-delà du délai, on risque la forclusion.

Des règles assez strictes ont été érigées afin que le scientifiquement correct préside aux cérémonies de remise du grade universitaire le plus élevé. Dans la plupart des universités, des pré-rapporteurs de thèses doivent être choisis chez des «extérieurs à l'école doctorale». Pari difficile à tenir : spécialisation aidant, les disciplines, en même temps qu'elles se sont multipliées, ont vu fondre leurs effectifs. Pour pallier cette balkanisation de la science et de son enseignement, les directives ministérielles ont imposé le regroupement à l'échelle des universités des différentes filières disciplinaires en écoles doctorales. Bien évidemment, il y a eu sélection des plus compétents pour former ces corps d'élite. Et maintenant ce seraient donc les «extérieurs à l'école» qui, par la force des choses et de la réglementation, auraient à décider si les mémoires de thèse méritent d'être soutenus! Il y a heureusement un réservoir inépuisable de compétences : les autres pays d'Europe ou plus lointains. Et nos collègues étrangers sont tout heureux de venir faire un petit tour en France pour siéger le temps d'une demi-journée dans un jury et devant un public acquis d'avance.

Lors de la prestation finale, dont l'issue est prévisible, l'assistance est plongée dans le noir et voit défiler tableaux de données, courbes afférentes et images de synthèse sur un rythme soutenu par le pointeau lumineux brandi par un orateur qui connaît bien son texte. Parfois aussi certaines réponses aux questions de certains membres du jury!

Venons-en aux mentions. Pas d'originalité non plus. Pourtant les textes officiels donnent le choix de trois mentions pour qualifier un travail de thèse : honorable, très honorable, très honorable et félicitations. Mais les lauriers de la troisième étaient devenus si communs qu'il a été décidé de les couper, et l'on ne félicite plus les candidats qu'oralement. Autrement dit, un excellent travail de thèse, cela se rencontre, n'est plus distingué d'un franchement médiocre que par un petit superlatif. C'est peu, d'autant que son omission est rarissime.

À regarder de près les titres des mémoires, passé et traduit les néologismes amphigouriques qu'ils recèlent, on s'aperçoit souvent que les sujets sont très conventionnels. Comment pourrait-il en être autrement dans un système qui gère la recherche par contrat et a multiplié les contrôles. Ainsi tout sujet de thèse doit successivement recevoir l'aval de l'unité de recherche et du labo où il sera réalisé, de la filière doctorale, de l'école doctorale, des commissions d'attribution des bourses nationales et locales. Le tout dans un climat où l'insuffisance du nombre de bourses favorise les querelles entre disciplines et sous-disciplines, entre universités et laboratoires non universitaires qui accueillent des doctorants. Ne faudrait-il pas décider de primer l'originalité? Je suis candidat pour siéger dans la commission idoine.

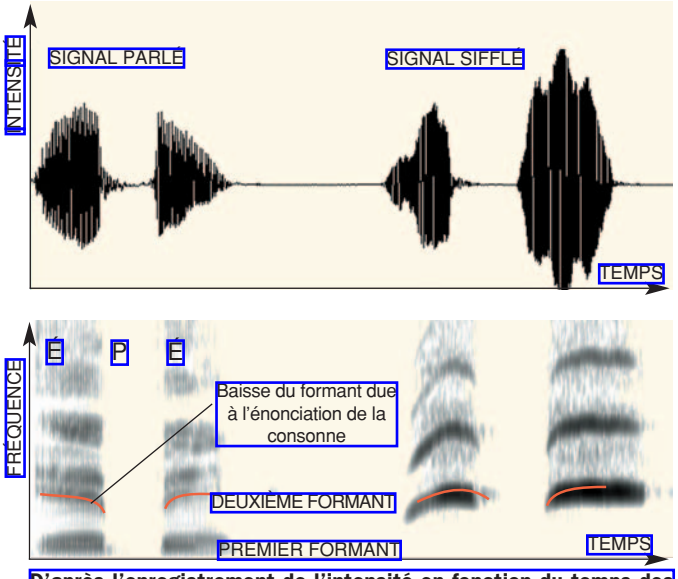
Jean-Louis HARTENBERGER, paléontologue, est directeur de recherche au CNRS.

Le langage des sifflements

Le sifflement, grâce auquel les habitants d'une île des Canaries communiquent, reproduit, en la simplifiant, la langue espagnole.

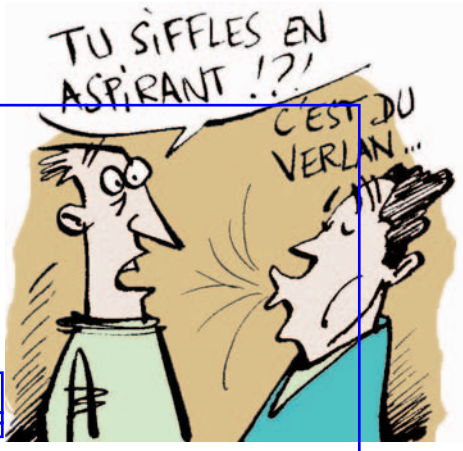
Tous les élèves d'une classe se mettent à siffler quand leur professeur entre : chahut ? Non, ils lui disent simplement *bonjour* en silbo (*sifflement* en espagnol), un langage sifflé de île de La Gomera, une des îles Canaries. Annie Rialland et Bernard Gautheron, de l'Institut de phonétique de Paris, viennent de montrer comment ce langage sifflé imite l'espagnol parlé dans l'archipel des Canaries. La Gomera est une île de 25 kilomètres sur 30, parcourue de profondes vallées. Le trajet d'une ferme à une autre nécessite parfois plusieurs heures. Les difficultés de communication seraient à l'origine de la naissance d'une langue sifflée, dont on retrouve les premiers témoignages dès le XV^{e} siècle. Elle était pratiquée par tous les habitants des zones montagneuses.

A. Rialland et B. Gautheron ont d'abord vérifié que les siffleurs de La Gomera pouvaient tenir de véritables discussions en silbo. Ils faisaient siffler des questions rédigées en espagnol à un Gomérien. Un second siffleur, situé à 20 mètres de distance, répondait en silbo, puis traduisait les messages en espagnol. Pas de doute : le silbo est bien une langue. Pourtant, le signal transmis par le sifflement est beaucoup plus pauvre en informations acoustiques que le signal parlé.



A. Rialland et B. Gautheron

D'après l'enregistrement de l'intensité en fonction du temps des signaux du son parlé *épé* et de son équivalent sifflé en silbo *(en haut)*, on construit des spectrogrammes *(en bas)* qui donnent les variations de la fréquence en fonction du temps. Des bandes de fréquences, nommées formants, apparaissent (en sombre) et caractérisent la voyelle /é/. La forme du deuxième formant (la fin) est modifiée (la fréquence baisse) par la présence de la consonne /p/. Le silbo reproduit rigoureusement le deuxième formant de la parole.



L. M. Tinnes

Ensuite, les linguistes ont analysé les signaux acoustiques du silbo et de leur traduction en espagnol. Le signal de la parole est complexe : les cordes vocales font vibrer l'air expulsé des poumons. Le nombre de vibrations des cordes vocales définit la fréquence fondamentale à laquelle se superposent d'autres vibrations, qui sont des harmoniques, c'est-à-dire des fréquences multiples de la fréquence fondamentale. Des organes dits modificateurs changent la conformation du conduit vocal et, selon leur position, renforcent certaines fréquences, nommées formants, lors du passage de l'air. Par exemple, plus la cavité est grande, plus le son prononcé est grave.

Chaque voyelle est caractérisée par un jeu de formants. Par exemple, pour la voyelle /i/, les trois premiers formants se situent en moyenne à 300, 2 100 et 3 000 hertz environ. Les consonnes modifient l'allure de ces formants : le /b/ par exemple entraîne un mouvement descendant des formants.

En comparant les signaux de la parole et ceux du silbo, les linguistes ont montré que le signal du silbo reproduit celui de la parole : il restitue les formes du deuxième formant, c'est-à-dire que l'on retrouve dans le signal du silbo les bandes de fréquences correspondant au deuxième formant dans le langage parlé. En outre, ils ont découvert que les modulations de l'amplitude du signal sifflé transposent certaines caractéristiques de l'énonciation des consonnes : par exemple, le silence qui suit l'énonciation de certaines consonnes, telles que /p/ ou /t /, la baisse de l'intensité propre à l'émission des consonnes, telles que /b/, /d/, /m/, /j/, /v/, et les fermetures brèves des /r/. Ainsi, tous les sons du silbo ont une signature spécifique, à part quelques-uns : on ne distingue pas un /b/ d'un /g/ et un /o/ d'un /ou/. Les siffleurs les devinent en fonction du contexte.

Par temps calme, un bon siffleur envoie un signal audible à plus de deux kilomètres. Toute l'énergie est concentrée dans une bande de fréquences relativement aiguë, de sorte que le signal émerge au-dessus des bruits plus graves de la nature. Il existe de nombreux autres langages sifflés à travers le monde, probablement des dizaines, mais très peu ont été enregistrés et analysés. Citons le moba, au Togo, un langage utilisé par la population locale afin que les missionnaires ne puissent le comprendre. Le moba est fondé sur un principe différent du silbo : il reproduit la mélodie de la voix. Dans les Pyrénées, il existait aussi un langage sifflé qui a disparu au XX^{e} siècle. Plusieurs ont été rapportés au Mexique, en Chine, en Turquie, en Nouvelle-Guinée…

Aujourd'hui, sur l'île de La Gomera, la population quitte les villages montagneux et les siffleurs sont de moins en moins nombreux. Seuls quelque 50 siffleurs sont encore capables de tenir une conversation. Depuis trois ans, le silbo est enseigné dans des écoles primaires de l'île. Les enfants vont-ils assurer la survie de cette langue ?

© POUR LA SCIENCE - N° 305 MARS 2003

Une éruption volcanique gravée dans le roc

Une gravure sur un bloc de basalte découvert dans la steppe arménienne constitue la plus ancienne représentation sur pierre d'un volcan en éruption.

Allongé par terre, un berger inquiet attend l'événement annoncé par les secousses qui font trembler la terre depuis quelques heures. Soudain, des grondements sourds retentissent et la nuit s'illumine : des roches incandescentes et du magma jaillissent au loin. Subjugué, l'homme saisit une pierre et fige la scène dans le roc. Sept millénaires plus tard, son dessin sera analysé et interprété comme la plus ancienne gravure d'une éruption volcanique.

Cette scène s'est déroulée en Arménie. Considérées comme le berceau des civilisations de pasteurs et d'agriculteurs du Néolithique, les régions du Sud du Caucase sont parsemées de nombreux sites archéologiques qui témoignent d'une occupation humaine ayant commencé il y a une dizaine de milliers d'années. Parmi les témoins archéologiques figurent de gros blocs de basalte gravés. Ces gravures sur pierres – des pétroglyphes – représentent le plus souvent des animaux (des cerfs, des bouquetins, des serpents…), des scènes de chasse avec des représentations humaines, mais aussi des signes énigmatiques dont certains pourraient être les symboles d'une écriture.

Sur place, afin d'étudier la sismicité et le volcanisme passés de la région, nous avons troqué pour un temps notre casquette de géologues pour celle d'archéologues. Au cours de nos recherches, nous avons découvert sur les hauts plateaux du Sud-Est, dans la province de Sunik, des gravures inhabituelles, comportant peu de scènes animalières. Plusieurs pétroglyphes ont attiré notre attention, car ces gravures évoquaient des fontaines jaillissantes. L'environnement géologique du site nous a éclairés sur la signification de ces gravures.

Quand on se déplace de quelques dizaines de mètres du site jusqu'au sommet d'une petite colline, on aperçoit vers le Nord-Ouest, à une dizaine de kilomètres de distance, le cône du volcan de Porak, dont l'activité est parmi les plus récentes d'Arménie ; située sur le front de la collision entre l'Arabie et l'Eurasie, la région est parcourue par de nombreuses failles actives et parsemée d'anciens volcans. Du sommet de cette petite colline, on distingue clairement les points d'émission des deux coulées les plus récentes qui sont situées au pied du cône. Le point d'émission le plus proche correspond à une fissure qui se superpose à la trace de la faille de Pambak-Sevan-Sunik, l'une des plus actives d'Arménie. Lors de la dernière éruption, les laves se sont épanchées de part et d'autre de la fissure. En regardant du sommet de la colline, la nuit, en direction du volcan, un contemporain de l'éruption voyait certainement une fontaine de lave incandescente s'échapper de la fissure, au milieu de projections de bombes volcaniques et dans un fracas terrifiant. On peut penser que l'observateur a été suffisamment impressionné par ce spectacle pour le fixer sur la pierre.

Seule une datation des laves et des pétroglyphes permettrait de confirmer une concomitance entre l'occupation du site



Ara Alvaryan, Arkadi Karakhanian et Hervé Piton

Sur cette pierre datant du Ve millénaire avant notre ère, on a mis en évidence les gravures au moyen de dentifrice.

BRÈVES

Disparition de la mer Morte

La mer Morte est apparue il y a des millions d'années à la suite d'un tremblement de terre. Elle pourrait disparaître d'ici 50 ans. Sa surface couvrait 1 000 kilomètres carrés en 1960, mais aujourd'hui, elle est inférieure à 670 kilomètres carrés. Jusque dans les années 1930, l'eau du Jourdain compensait l'évaporation, estimée à 1,3 milliard de mètres cubes par an. Aujourd'hui, 90 pour cent de l'eau du Jourdain est détournée pour irriguer les cultures et pour alimenter les populations, notamment, alors que l'évaporation a augmenté : elle est estimée à deux milliards de mètres cubes par an. Israël et la Jordanie se concertent pour évaluer l'intérêt d'un canal entre la mer Rouge et la mer Morte.

Chauve-souris aux grandes oreilles

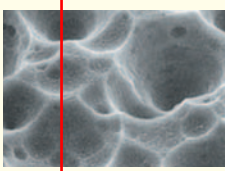
Deux nouvelles espèces d'oreillards ont été découvertes, l'une en Sardaigne et l'autre dans les Alpes. Comme leur nom l'indique, les oreillards sont un groupe de chauves-souris caractérisé par des pavillons auditifs très développés. Longtemps confuse, la phylogénie des chiroptères (les chauves-souris) européens progresse : c'est en comparant leur ADN à ceux d'autres oreillards, que des généticiens allemands ont montré que *Plecotus alpinus*, l'oreillard des alpes, et *Plecotus Sardus*, l'oreillard sarde, constituent bien de nouvelles espèces. Cette découverte porte à sept le nombre d'oreillards européens, alors qu'une quarantaine d'espèces de chiroptères sont répertoriées en Europe.



Mauro Mocarelli

Plus noir que noir

Des physiciens anglais ont annoncé avoir fabriqué la matière la plus noire jamais conçue par l'homme. La matière obscure réfléchit 25 fois moins la lumière qu'une peinture noire standard. Elle est faite d'un alliage de nickel et de phosphore. Au microscope, elle apparaît tapissée de cratères. Elle intéresserait pour l'instant deux domaines bien différents : les astronomes, car elle pourrait servir à atténuer les lumières qui parasitent les observations au télescope, et les artistes, car ses ténèbres seraient, dit-on, aussi profondes que celles du velours noir.



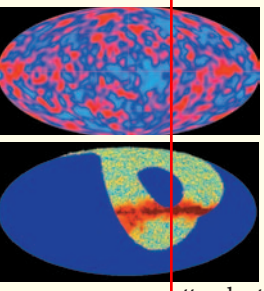
Trois mois au lit

Les scientifiques de l'Agence spatiale européenne ont étudié les effets de l'impesanteur sur le corps humain, en prévision des missions spatiales de longue durée : ils ont demandé à 25 personnes de rester allongées pendant 90 jours sur un lit incliné, la tête plus basse que les pieds, pour simuler la microgravité. Le bisphosphonate, un médicament destiné à prévenir l'ostéoporose, semble lutter efficacement contre la perte de la masse osseuse.

Le sari qui sauve

Le risque de contamination par le choléra diminue de moitié quand l'eau infectée est filtrée à travers une étoffe. La méthode s'est révélée efficace en Inde, où elle a été testée auprès de villageois qui, pendant 18 mois, ont filtré leur eau avec un vieux sari plié en quatre. L'étoffe protégerait de la maladie en débarrassant l'eau de son plancton, qui vit en symbiose avec la bactérie responsable de l'infection.

Pleins feux sur l'Univers primitif



Les fluctuations du plasma primordial qui emplissaient l'Univers moins de 300 000 ans après le Big Bang contiennent des informations sur les grumeaux de gaz d'où sont issues les galaxies et, de fait, toutes les structures de l'Univers. Elles nous informent aussi sur la géométrie de la tranche d'espace-temps qui nous sépare des lieux et des époques où leur image a été émise. En 1990, le satellite COBE avait déjà fourni une image de ces fluctuations. Désormais, on cherche à en établir la carte avec une résolution meilleure. Un ballon stratosphérique a produit la meilleure carte à ce jour (en attendant les résultats du satellite MAP) qui couvre 30 pour cent de la voûte céleste (la zone rouge est une partie de la Voie lactée).

Gène de prédisposition à la lèpre

Chaque année, 700 000 nouveaux cas de lèpre sont diagnostiqués dans le monde. Les symptômes associent des lésions cutanées, des atteintes neurologiques et des difformités, telles que la perte de doigts, voire d'une main ou d'un pied. L'équipe INSERM U 550 associée à des équipes canadienne et vietnamienne ont identifié un gène de prédisposition à la maladie, localisé sur le chromosome 6. Une détection précoce de la susceptibilité ou de la résistance des personnes exposées pourrait permettre d'adopter des stratégies plus efficaces de prévention et de lutte contre cette maladie que l'OMS veut éradiquer d'ici 2005.

et une éruption. Concernant le volcanisme, on ne dispose pas de datation précise. La datation par les méthodes radiochronologiques d'un échantillon prélevé sur l'une des coulées du volcan Porak a seulement indiqué que la dernière grande éruption avait eu lieu il y a moins de 20 000 ans. Cette limite d'âge est en accord avec la très faible érosion, la faible colonisation des coulées et des cônes par la végétation, et le fait que les coulées volcaniques ont emprunté les anciennes vallées creusées lors de la dernière glaciation, qui eut lieu il y a quelque 20 000 ans.

Quant aux pétroglyphes, les archéologues arméniens admettent qu'ils ont été gravés entre 7 000 et 3 000 avant notre ère. Dans un site proche, on a découvert une tombe datée entre –3647 et –3357 (d'après la méthode du carbone 14). Or la grande dalle qui recouvre la tombe provient de la coulée la plus récente : la dernière activité volcanique a donc eu lieu avant 3357. Par ailleurs, les obsidiennes taillées découvertes sur le site des pétroglyphes de Porak et la technique de gravure dateraient le site du Ve millénaire avant notre ère.

Par conséquent, l'éruption aurait eu lieu entre –7000 et –3357, vraisemblablement au Ve millénaire avant notre ère. Ces pétroglyphes sont les plus anciennes gravures sur pierres connues figurant une éruption volcanique, et plus généralement un phénomène géologique. La fresque peinte de Catal Höyök, au Sud-Est de la Turquie, exécutée vers 6500 avant notre ère, représente aussi une éruption volcanique. Elle disputera désormais le titre de plus ancienne représentation d'une éruption volcanique avec les pétroglyphes de Porak.

Ara AVAGYAN, Arkadi KARAKHANIAN, (Erevan) et Hervé PHILIP (Montpellier)

Jasmin de jour, jasmin de nuit

La palette des parfumeurs devrait s'enrichir de deux fleurs dont l'odeur rappelle celles du jasmin.

Les parfumeurs sont toujours à la recherche de nouvelles senteurs. Ils traquent à travers le monde des sources encore inexploitées. Les régions tropicales constituent une mine de trésors insoupçonnés. Jacqueline Smadja et Anne Gauvin, du Laboratoire de chimie des substances naturelles et des sciences des aliments, de l'Université de la Réunion, ont analysé deux jasmins qui pourraient élargir l'éventail des choix à la disposition des créateurs.

Les jasmins sont réputés pour leur parfum suave. Depuis longtemps, ils sont utilisés pour préparer des huiles parfumées. Ils appartiennent à la famille des oléacées (parmi lesquels l'olivier et le lilas). Un oléacée aromatise le thé dit au jasmin, que l'on devrait nommer thé à l'osmanthe, car les fleurs proviennent de l'*Osmanthus burkinais*, et non d'un jasmin.

À la Réunion, deux espèces de jasmins particulièrement odorantes ont été analysées : le jasmin de nuit (*Cestrum nocturnum* L.) et le jasmin de jour (*Brunfelsia hopeana* Benth). Le jasmin de nuit a des petites fleurs abondantes et blanches, tandis que celles du jasmin de jour sont violettes, lilas, puis blanches. Les fleurs de *Cestrum nocturnum* n'exhalent leur parfum que la nuit et celles de *Brunfelsia hopeana* seulement le jour. Ainsi, le jasmin de jour est pollinisé durant la journée, ce qui n'est pas le cas du jasmin de nuit. Le jour, les insectes voient mal les fleurs blanches du jasmin de nuit, aussi ne s'y posent-ils pas. En revanche, le parfum qu'elles exhalent la nuit attirerait de nombreux insectes nocturnes. La plupart des fleurs blanches sont pollinisées la nuit.

Le jasmin de jour et le jasmin de nuit sont deux faux jasmins qui appartiennent à la famille des Solanacées (qui comprend les pétunias), mais leur senteur rappelle celles des jasmins, très prisées. Les chimistes ont analysé leur composition par chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse : pour les deux jasmins, environ 90 pour cent des constituants ont été identifiés. Elles ont ensuite associé chaque molécule à une « note » qualifiée soit de fleurie, soit de boisée, sucrée, balsamique, etc. Dans le jasmin de



J. Smadja

Jasmin de jour *(ci-dessus)* et de nuit *(page 15)*.

jour, 11 constituants et 10 notes (notamment florale, sucrée et fruitée) ont été identifiés. Chaque note correspond à une combinaison particulière de molécules. Par exemple, la note florale est une combinaison de sept composés, dont le linalol et le nérolidol qui apportent une note fleurie boisée, tandis que l'anthranilate de méthyle a une odeur qui rappelle celle des fleurs d'oranger. La note sucrée repose sur l'association de quatre esters et d'un alcool. La note fruitée résulte d'une alliance entre le salicylate de méthyle et le benzoate de méthyle qui rappelle la prune et le cassis. Le jasmin de nuit présente un parfum plus voluptueux. Il résulte de la combinaison de 18 composés responsables de notes dominantes florale, sucrée, chaude et puissante, relevées par des notes âcre et épicée. Le parfum des fleurs du jasmin de nuit est caractéristique des senteurs nocturnes des tropiques. Le parfum des fleurs du jasmin de jour est séduisant par ses accords fleuris, sucrés, fruités.



V. Smadja

Des spermatozoïdes sensibles à la température

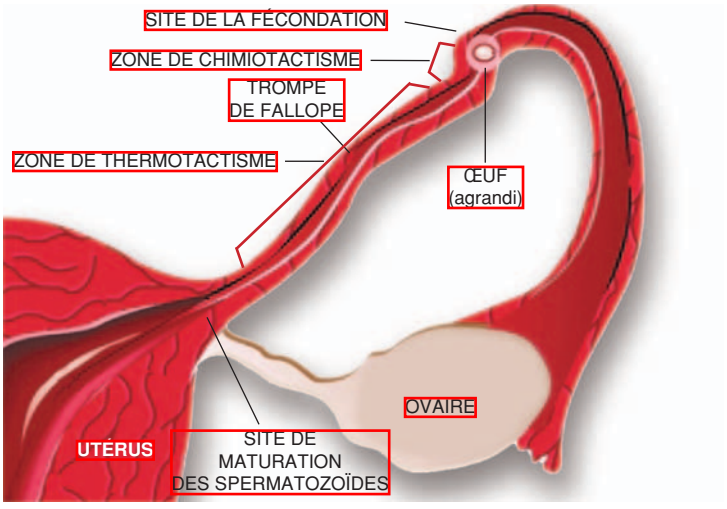
On a découvert que la température est un facteur déterminant pour le succès d'une fécondation.

Chez les mammifères, la rencontre d'un ovule et d'un spermatozoïde a généralement lieu dans les trompes de Fallope, des conduits reliant l'utérus à chacun des deux ovaires. En 1991, Michaël Eisenbach et ses collègues, de l'Institut Weizmann, en Israël, avaient découvert que les ovules (les œufs non fécondés) émettent des signaux chimiques à courte portée qui attirent les spermatozoïdes ; c'est un mécanisme de chimiotactisme. Aujourd'hui, ils ont montré que les spermatozoïdes se dirigent aussi vers l'ovule grâce à des variations de température.

On savait déjà que certains micro-organismes utilisent les variations de température pour se diriger ; c'est le thermotactisme, mais on ignorait qu'il avait un rôle chez les mammifères. Il apparaît aujourd'hui que le thermotactisme intervient dans la sélection des spermatozoïdes. Longtemps, on a pensé que seul le grand nombre des spermatozoïdes présents dans les trompes de Fallope rend possible un phénomène aussi improbable que la fécondation. Un millilitre de sperme contient environ 100 millions de spermatozoïdes, aussi croyait-on que des millions de spermatozoïdes atteignaient la zone où a lieu la fécondation. Or, les biologistes savent aujourd'hui que seuls 250 spermatozoïdes environ atteignent les trompes. La portée du chimiotactisme était trop courte pour expliquer l'efficacité des spermatozoïdes rescapés. Le thermotactisme lève le mystère. Quand ils parviennent dans les trompes de Fallope, les spermatozoïdes s'attachent à la paroi où ils subissent une maturation nécessaire à la pénétration dans l'œuf. Cette maturation achevée, ils se détachent de la paroi. Au bout de 20 minutes en moyenne, quelques-uns parviennent à l'ovule. Selon M. Eisenbach, ceux qui ont des chances de rencontrer l'ovule sont des spermatozoïdes sensibles à la chaleur.

Comment ces biologistes sont-ils parvenus à cette conclusion ? Constatant que la température du lieu de stockage sur les parois des trompes est inférieure de deux degrés à celle du lieu de la fécondation, ils ont supposé que cette différence jouait un rôle dans la sélection des spermatozoïdes. Pour le vérifier, ils ont construit un dispositif reproduisant l'appareil génital de la lapine, pourvu d'un site de maturation des spermatozoïdes, d'un site de fécondation, ainsi que d'une trompe les reliant. Puis, ils y ont observé le comportement de spermatozoïdes de lapin. Quittant la relative fraîcheur de la zone de maturation (37 °C), les spermatozoïdes sont attirés par la chaleur de la zone de fécondation (39 °C). Les biologistes ont constaté que les spermatozoïdes sont sensibles à une différence de température de un demi-degré seulement. Ils ont aussi établi que seuls les spermatozoïdes matures sont thermosensibles.

La découverte du thermotactisme apporte un éclairage nouveau pour l'étude de certaines stérilités masculines. Si le nombre de spermatozoïdes par unité de volume de sperme produit par un homme reste un des principaux critères de stérilité, leur sensibilité à la chaleur doit désormais être prise en compte. De surcroît, ce paramètre devrait aussi avoir des conséquences sur les techniques de fécondation *in vitro*. Aujourd'hui 100 000 spermatozoïdes sont utilisés pour chaque œuf, et, pourtant la fécondation ne réussit pas toujours. Or, le prélèvement des ovocytes chez la femme est difficile, de sorte que l'on cherche à améliorer le taux de réussite des fécondations *in vitro*. Grâce à une utilisation judicieuse de gradients de température, peut-être parviendra-t-on à concentrer les spermatozoïdes autour de l'ovule, et à mieux reproduire les conditions naturelles de la fécondation.



Pour qu'il y ait fécondation d'un œuf, les spermatozoïdes doivent remonter les trompes de Fallope après avoir séjourné un moment sur un site où ils achèvent leur maturation. On vient de montrer qu'ils se dirigent par thermotactisme (action à longue portée), attirés par une température supérieure à proximité de l'œuf, puis par chimiotactisme (action à courte portée), c'est-à-dire par des molécules libérées par l'œuf.

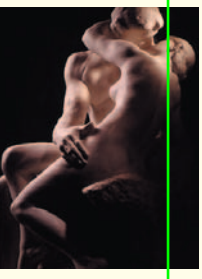
Espoir contre le SIDA

Les vaccins thérapeutiques contre le VIH visent à diminuer la quantité de virus dans le sang des personnes contaminées. Pour les fabriquer, on peut utiliser un virus rendu inoffensif, qui doit véhiculer des éléments activant le système immunitaire de l'hôte. L'ANRS a annoncé des résultats encourageants obtenus avec un virus *canarypox* contenant des gènes codant des enzymes qui dégradent les protéines du VIH. Un an et demi après l'administration de ce vaccin potentiel, 25 pour cent des personnes vaccinées, chez qui le virus semble « endormi », peuvent se passer de traitement antiviral.

Les insectes ont de l'inspiration

D'après des zoologistes allemands et américains, chez les insectes, l'entrée et la sortie de l'air ne sont pas des phénomènes passifs. Leur système respiratoire consiste en un réseau de minuscules conduits, les trachées, partant de la surface de l'insecte et alimentant directement en oxygène les organes. Les chercheurs ont observé ce système en action chez des insectes vivants – des fourmis, des criquets et des scarabées – grâce à des rayons X. Résultat : les trachées se dilatent et se compriment, selon les espèces, environ une à trois fois par seconde.

Le sens du baiser



Un psychologue allemand a observé 124 couples s'embrasser dans un aéroport, une gare, un parc ou sur la plage, aux États-Unis, en Allemagne et en Turquie. Pour embrasser son partenaire, chacun tourne la tête deux fois plus souvent vers la droite que vers la gauche. Rodin l'avait lui-même remarqué et reproduit dans *Le baiser*. On retrouve la prédominance de la droite (pied d'appel droit, main droite, œil dominant droit). La préférence pour la droite se manifeste déjà quelques semaines avant la naissance : les bébés tournent plus souvent la tête à droite qu'à gauche. Cette préférence influe-t-elle sur d'autres comportements asymétriques ?

Accros au doudou

Ours en peluche, poupée de chiffon ou vieux mouchoir, quand un bébé adopte un doudou, il ne peut plus s'en passer. Pourquoi un bébé sur deux seulement s'attache-t-il à ce que les psychologues nomment un objet transitionnel ? Un psychologue américain a mené une étude sur plus de 450 familles. Selon lui, l'absence des parents lors de l'endormissement du bébé favorise l'adoption d'un doudou.

Un peu de Terre sur la Lune

Les plus anciennes roches terrestres sont-elles présentes sur la Lune ?

Il y a six ans, un numéro abscons défrayait la chronique : ALH84001. C'était le matricule d'un caillou supposé contenir des bactéries martiennes fossiles. Si ces traces de vie sont, aujourd'hui, très controversées, l'origine martienne de la météorite est avérée. Il s'agirait d'une roche qui, éjectée lors d'un impact météoritique violent à la surface de Mars, a erré dans le Système solaire avant de choir sur la Terre. Or, si une telle aventure est possible dans ce sens, elle a dû l'être dans l'autre sens, c'est-à-dire que des morceaux de Terre, arrachés à notre planète, ont dû atteindre les mondes voisins. Se peut-il que de très anciennes roches terrestres se trouvent sur le plus proche de ces mondes, la Lune ?

Des échanges de matière ont pu se produire de façon relativement fréquente à l'époque dite du grand bombardement, il y a 3,8 à 4,5 milliards d'années, lorsque le jeune Système solaire, encore empli de ses blocs de construction primitifs, était le siège de collisions multiples. Les planétologues s'intéressent beaucoup à cette période, car, bien que le grand bombardement ait sans doute été peu propice à la vie, les premières traces de vie fossilisée ont été trouvées dans des roches terrestres qui datent de plus de 3,8 milliards d'années. Cela signifie que les premiers organismes sont apparus pendant la période du grand bombardement ou très peu de

La fondation de Samarkand

Les archéologues ont découvert un rempart antérieur à l'arrivée des Perses achéménides, censés avoir fondé la ville au VI^e^ siècle avant notre ère.

Samarkand, située entre l'Iran, l'Inde, les steppes de l'Asie centrale et la Chine, fut l'une des cités les plus célèbres sur la route de la soie. Prise par Alexandre le Grand en 329 avant notre ère, puis par la dynastie arabe des Omeyyades en 712, elle fut un important foyer culturel samanide au X^e^ siècle, avant d'être ravagée par l'empereur mongol Gengis Khan en 1220 et reconstruite un peu plus loin, sur son emplacement actuel. C'est au XV^e^ siècle qu'elle connut son apogée, sous Tamerlan, un conquérant tatar qui prétendit reconstituer l'empire de Gengis Khan. Depuis la fin des années 1980, les anciennes républiques soviétiques de l'Asie centrale sont à nouveau ouvertes aux archéologues étrangers. Frantz Grenet et ses collègues de la Mission franco-ouzbek, fouillent l'ancienne Samarkand, dont les ruines couvrent près de 220 hectares, sur le plateau d'Afrasiab.

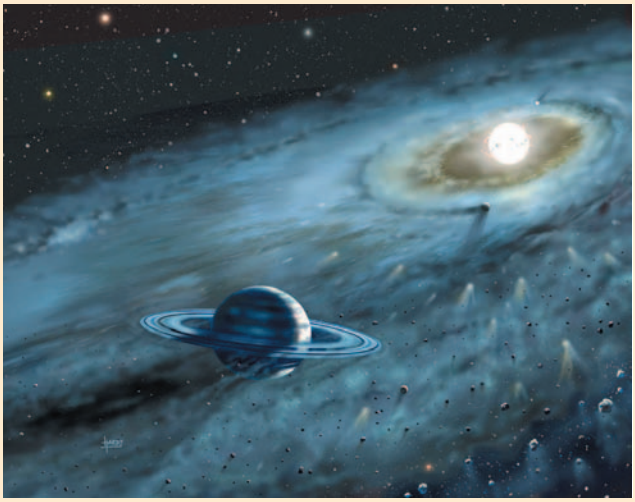
La ville prémongole, détruite par Gengis Khan, avait été fondée, croyait-on jusqu'à présent, par les Perses achéménides au V^e^ siècle avant notre ère : les plus vieux vestiges du site étaient des fortifications de cette époque, retrouvées sous le rempart hellénistique. En –550, les Achéménides avaient fondé un immense empire, qui s'étendait de l'Indus à l'Anatolie, et qui engloba même l'Égypte, sous Darius I^er^ (–522 à –486), comptant 40 millions d'habitants. Toutefois, la ville de Samarkand existait avant que cette grande puissance n'arrive dans la région, car F. Grenet et ses collègues ont découvert un mur de grosses briques au-dessous des vestiges achéménides. Les briques sont marquées d'un signe géométrique et ont été taillées dans le lœss (une sorte de limon) du plateau.

Les archéologues ont également retrouvé les restes d'un canal de 30 kilomètres de longueur amenant l'eau de la rivière la plus proche jusqu'à la ville, et ceux d'un système de puits, de canaux en éventail et de bassins qui distribuaient l'eau. Il a fallu faire des terrassements, des remblais, creuser et renforcer le talus avec des briques taillées dans le lœss déblayé. Ce scénario de fondation de la ville correspond à l'étymologie du nom de Samarkand, qui signifierait «creusée dans la terre».

Ces hypothèses ont été confirmées par les fouilles de la ville jumelle de Samarkand, Koktepe, située à 30 kilomètres plus au Nord, également perchée sur un plateau de lœss et alimentée par un canal partant de la même rivière. Toutefois, Koktepe fut abandonnée à la période grecque, de sorte que les niveaux anciens sont bien conservés. Sur ce site, les archéologues ont découvert une double enceinte fortifiée. Une première population sédentaire s'y était installée, au début du I^er^ millénaire, dans des huttes semi-enterrées. Puis vers le VII^e^ siècle avant notre ère

temps après, aussitôt que les conditions ont été favorables. Les géologues espèrent découvrir des roches terrestres, ne serait-ce qu'un peu plus anciennes… Malheureusement, ces précieuses archives ont été détruites depuis longtemps par l'activité climatique et tectonique de notre planète. Se pourrait-il que certaines de ces roches (éventuellement avec leur cargaison de bactéries terrestres ultra-primitives) aient été mises à l'abri sur la surface inerte de notre satellite naturel par le grand bombardement lui-même ? Oui, selon John Armstrong et Llyod Wells, de l'Université de Washington, et Guillermo Gonzalez, de l'Université de l'Iowa. Récemment, ils ont calculé qu'il pourrait y avoir jusqu'à 20 tonnes de matériau terrestre pour chaque élément de 100 kilomètres carrés de surface lunaire.

Reste à savoir comment reconnaître une roche terrestre d'une roche lunaire (la Lune étant elle-même un morceau de Terre arraché à notre planète à l'occasion d'un impact géant survenu il y a 4,5 milliards d'années). Peut-être la présence d'eau piégée dans les minéraux ou celle de carbonates constitueraient-elles un indice et ce type d'analyse pourrait éventuellement être réalisé par une sonde en orbite autour de la Lune. Toujours est-il que cette nouvelle idée ouvre un champ de recherche original.



David Hardy/AAU/ATC/NAS

A l'époque dite du grand bombardement, lorsque les collisions étaient fréquentes, des roches ont peut-être été arrachées de la Terre et mises à l'abri de l'érosion sur la Lune. Contiennent-elles des traces de vie primitive fossilisée ?

(avant la conquête achéménide du milieu du VI^e siècle) apparaissent dans l'enceinte intérieure des constructions monumentales édifiées avec les mêmes briques qu'à Samarkand (portant les mêmes marques), ce qui indique une quasi-simultanéité des constructions dans les deux villes.

Ainsi, la ville aurait été fondée plus tôt qu'on ne le pensait, aux alentours du VII^e siècle avant notre ère, par une puissance régionale dont les institutions politiques, militaires et religieuses (une citadelle, un palais et un sanctuaire ont été retrouvés) étaient situées à Koktepe. Bien qu'elle ait été capable de recruter localement une main d'œuvre importante et qu'elle ait contrôlé plusieurs villes fortifiées (au moins deux), cette puissance n'a laissé aucune trace écrite dans l'histoire. Les archéologues ont désormais un nouveau défi à relever : découvrir son identité.





Matou

Des briques marquées d'un signe géométrique constituent le premier mur d'enceinte de la ville antique de Samarkand fondée au VI^e siècle avant notre ère et située sur le plateau d'Afrasiab *(en haut)*.

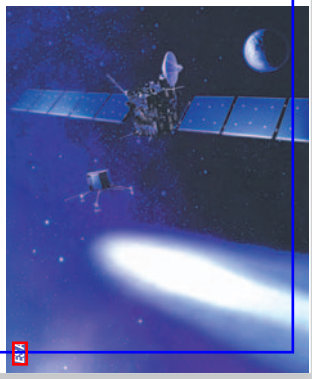
Rosetta reportée *sine die*

La sonde européenne ne partira pas avant un an.

Suite à l'échec d'Ariane 5 ECA, nouvelle version de la fusée Ariane 5, le lancement de la mission spatiale européenne *Rosetta*, initialement prévu pour le 11 janvier, a été annulé. Cette sonde devait partir sur une version plus classique du lanceur européen, mais les ingénieurs n'ayant pu exclure une défaillance similaire à celle qui a frappé le vol inaugural du modèle ECA, l'Agence spatiale européenne (ESA) a décidé de reporter le vol.

La mission *Rosetta* devait se porter à la rencontre de la comète Wirtanen et poser un engin à sa surface, en 2011, au terme d'un circuit au cours duquel elle aurait profité de l'attraction gravitationnelle de Mars et de Jupiter pour se propulser vers sa cible. Le rendez-vous avec la comète Wirtanen est désormais irrémédiablement manqué et l'ESA recherche de nouvelles comètes que *Rosetta* pourrait croiser.

Il existe des milliers de comètes dans le Système solaire, mais seules celles qui gravitent entre le Soleil et l'orbite de Jupiter sont accessibles à une telle mission. La liste de ces comètes, dressée par l'ESA, il y a dix ans, au moment où la mission avait été conçue, comprend les comètes Wild 2 (cible de la sonde américaine *Stardust*), Finlay, Churyumov-Gerasimenko, Howell et Schwassmann-Wachmann. Toutefois, l'organisation d'une rencontre en douceur entre ces bolides glacés et une sonde coûtant un milliard d'euros nécessite d'accumuler le maximum d'informations sur la comète visée. Ainsi, le choix de la nouvelle destination de *Rosetta* ne sera peut-être pas fixé avant la fin de l'année 2003 et le nouveau compte à rebours ne devrait pas commencer avant février 2004.



ESA

Des vignes sans gènes

Quatre vieilles vignes retrouvées en Allemagne ont un patrimoine génétique particulièrement riche.

Les viticulteurs du passé mélangeaient volontiers les cépages au sein de leurs parcelles. La disparition de ces paysans et la réglementation toujours plus sévère des pratiques viticoles ont réduit petit à petit le nombre de cépages du vignoble européen. Sur les quelque 6 000 variétés de vignes de culture répertoriées, nombreuses sont celles qui ne le sont plus que par les textes. Dans ce contexte, Andreas Jung et Erika Dettweiler, de l'Institut de recherche pour l'amélioration de la vigne de Geilweilerhof, viennent de retrouver d'anciennes vignes en Allemagne, qui contribueront à préserver le fond génétique du vignoble allemand.

Les grands pays viticoles tentent de préserver le patrimoine génétique menacé de leurs vignes. Après la destruction d'une grande partie du vignoble européen par le phylloxera à la fin du XIX^{e} siècle, l'usage de porte-greffes résistants sur lesquels on greffe une variété noble s'est généralisé. Aujourd'hui, les pépiniéristes n'utilisent plus que des greffons résistant aux principales maladies de la vigne, qu'ils obtiennent auprès de conservatoires nationaux. Si cette pratique protège le vignoble, elle appauvrit aussi son patrimoine génétique. Des zones immenses sont plantées d'une variété seulement, leurs parcelles ne comportant souvent qu'un seul et même génotype ! Face à ce problème, l'INRA préconise depuis 20 ans la création, à l'échelon local, de banques de clones, où l'on rassemblerait quelques centaines de types différents d'une même variété. En France, une centaine de variétés sont protégées de cette façon contre l'érosion génétique.

La même politique est appliquée en Allemagne, mais depuis moins longtemps. En outre, les viticulteurs allemands, confrontés depuis toujours à des conditions climatiques difficiles, ont poussé plus loin la sélection de cépages. Ainsi, alors que plus de 133 variétés sont toujours utilisées et autorisées en France, il n'y en a guère qu'une soixantaine en Allemagne dont 12 seulement donnent l'essentiel de la production. Cette situation rend la constitution d'un fond génétique préservé d'autant plus nécessaire. Pour tenter de découvrir un nouveau génotype, A. Jung et E. Dettweiler ont recherché des plantations anciennes sur les coteaux du pays de Bade. Les quatre parcelles qu'ils repérèrent étaient exploitées depuis 80 ans, certaines depuis 200 ans. Ils ont d'abord identifié à l'œil 50 variétés parmi les 1 500 ceps examinés. Puis, ils ont fait quelques études d'ADN.

L'observation a d'abord révélé de grandes variations morphologiques, signe d'une richesse génétique préservée. Les biologistes ont recueilli pour le conservatoire de Geilweilerhof le plus de pieds sains différents des variétés usuelles. La richesse génétique des vieilles vignes s'explique d'abord par leur âge, mais aussi par les pratiques des exploitants qui les entretiennent. Chaque fois qu'un cep meurt, il est remplacé par une pousse issue du même champ, de sorte que le patrimoine génétique est préservé.

La richesse génétique de ces vieilles vignes se traduit aussi par la présence de nombreux ceps de variétés anciennes quasi disparues en Allemagne, tels l'elbling noir, le putzscheere ou encore le seidentraube. Les biologistes ont surtout retrouvé trois rangées de gouais blanc. Très répandu au Moyen Âge, le gouais blanc présentait plusieurs avantages : la vigne était productive, robuste et quasi insensible à la pourriture, mais le vin était de qualité médiocre. Après que la nécessité de produire des vins de qualité s'est imposée, le gouais blanc a été abandonné, ne subsistant guère que sous certains climats difficiles, tel le Haut-Valais suisse. Pourtant, son importance passée fut notable, puisque 72 cépages européens en descendent, parmi lesquels l'auxerrois, le gamay ou encore le riesling. L'un d'entre eux, le chardonnay, est devenu le cépage le plus répandu dans le monde, ce qui montre l'intérêt de conserver les vieilles variétés de vigne, même médiocres.



Andreas Jung et Erika Dettweiler

Pied de gouais blanc.

Odeur et grossesse

Pendant la gestation, une hormone, la prolactine, favorise la naissance de neurones olfactifs, qui stimulent les comportements maternels, mais aussi paternels.

Chez les animaux, des insectes aux êtres humains, l'odorat est un sens particulièrement sollicité dans les relations entre, d'une part, les mâles et les femelles, par exemple dans le choix du partenaire, et, d'autre part, entre une mère et ses petits : une mère reconnaît ou repère ses petits grâce à leur odeur. Aussi, tout au long de la vie, des neurones sont créés dans le système olfactif. Cependant, les origines biologiques de cette neurogenèse sont longtemps restées inconnues. L'équipe de Tetsuro Shingo, de l'École médicale de l'Université de Okayama, au Japon, a montré que chez les souris, elle dépend d'une hormone, la prolactine.

L'importance de la mémoire olfactive dans le comportement maternel a guidé les biologistes vers l'étude de la neurogenèse pendant la grossesse. Cette période est-elle propice à ce phénomène ? Pour y répondre, ils ont injecté à des souris fécondées et à d'autres non fécondées un constituant de l'ADN marqué qui indique les zones de prolifération cellulaire. Au septième jour de gestation, le nombre de cellules marquées augmente de 65 pour cent dans une zone particulière du cerveau, tandis qu'il n'augmente pas chez les souris non fécondées. Puis, la concentration redevient normale au quatorzième jour pour augmenter à nouveau sept jours après l'accouchement.

La plupart des nouvelles cellules nées dans cette zone migrent vers le bulbe olfactif, où elles deviennent des interneurones (des neurones au rayon d'action limité) qui participent à la mémoire olfactive. Ainsi, la gestation et la période postparturiale sont

© POUR LA SCIENCE - N° 305 MARS 2003

propices à la prolifération neuronale et à l'augmentation du nombre de neurones olfactifs favorisant la mémoire olfactive.

Dans une deuxième étape, l'équipe de T. Shingo a tenté de distinguer le rôle des hormones maternelles de celui d'autres signaux émis lors de l'implantation des embryons. Pour ce faire, ils ont examiné des souris vierges qui se sont accouplées avec des mâles stériles. Là encore, le cerveau des femelles est le siège d'une neurogenèse notable. L'implantation d'embryons n'est donc pas nécessaire : des hormones seraient à l'origine de la neurogenèse. Des expériences ont écarté les œstrogènes et la progestérone. Restait la prolactine. Cette hormone est présente dans les tissus nerveux de tous les animaux. Chez les mammifères, la quantité de prolactine est maximale pendant la première partie de la gestation, puis diminue jusqu'au terme pour augmenter de nouveau pour la lactation. Ce profil correspond à celui de la neurogenèse olfactive et faisait de cette hormone un bon candidat pour entraîner la prolifération neuronale. L'injection de prolactine à des souris dépourvues d'ovaires a entraîné des effets similaires à ceux observés chez les souris gravides à la fois en ce qui concerne la prolifération des cellules progénitrices de neurones et l'augmentation du nombre de neurones dans le bulbe olfactif. La prolactine est bien l'hormone responsable des modifications neurologiques observées pendant la gestation.

Cependant, la prolactine et ses récepteurs sont aussi présents chez les mâles, chez qui l'injection de prolactine a les mêmes effets neurologiques. De plus, la neurogenèse olfactive augmente chez les souris qui s'accouplent sans être fécondées. Par ailleurs, les concentrations plasmatiques de prolactine augmentent notablement après l'orgasme chez l'homme et chez la femme. Selon une hypothèse compatible avec ces observations, la prolactine favoriserait chez le mâle une mémoire olfactive propice à le retenir près de la femelle. Au final, la neurogenèse olfactive stimulée par la prolactine favorise les comportements maternels, mais aussi paternels.

Chimie verte

Plus propres et plus efficaces, les liquides ioniques vont-ils remplacer les solvants organiques ?

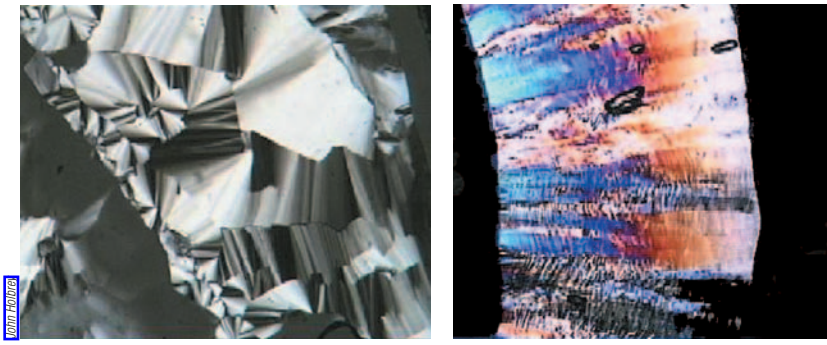
Benzène, toluène… Les solvants organiques sont sur la liste des produits les plus polluants. Pourtant, de nombreuses réactions chimiques industrielles ont lieu en phase liquide, dans de tels solvants organiques, qui sont souvent volatils, inflammables et cancérogènes. On pourrait les remplacer par des liquides ioniques, moins polluants et moins volatils. Les premiers liquides ioniques « prêts à l'emploi » viennent d'être commercialisés.

Les liquides ioniques sont des sels fondus, composés d'anions et de cations. Le plus souvent, à température ambiante, les ions existent sous forme cristalline. Dans le sel de table, par exemple, les ions chlorure (Cl^-) et sodium (Na^+) sont arrangés dans un réseau cubique. Un tel empilement est stable et ne fond qu'à 800 °C. Les premiers sels fondus, décrits au début du XX^e siècle, étaient composés d'ions inorganiques simples. Leur température de fusion étant souvent supérieure à 400 °C, ils sont inutilisables dans des réactions mettant en jeu des molécules organiques, qui se décomposent à des températures bien inférieures. Certains composés ioniques ont des températures de fusion inférieures, mais ils nécessitent souvent des atmosphères contrôlées contraignantes et sont finalement peu exploités dans l'industrie chimique hormis quelques cas rares.

Dans les années 1990, les premiers sels fondus, liquides à température ambiante, ont été synthétisés : on les nomme liquides ioniques. Les chimistes ont conservé les anions et remplacé les cations inorganiques simples des sels qui existaient déjà par des chaînes organiques (des composés aromatiques portant des chaînes plus ou moins longues). Les cations étant beaucoup plus volumineux que les anions, les ions s'empilent mal : l'édifice cristallin qu'ils forment est moins stable que celui des sels composés d'ions de taille similaire ; c'est pourquoi ces liquides ioniques ont une température de fusion inférieure à celle des sels fondus classiques.

Ces liquides ioniques dissolvent de nombreuses substances chimiques, tant ioniques que moléculaires du fait de leur structure particulière, à la fois organique et inorganique, et de leur polarité. Ils ont une faible tension de vapeur, de sorte qu'ils s'évaporent peu et ne sont pas inflammables ; ils sont faciles à stocker (sous forme de poudre) et à transporter. On peut y effectuer un grand nombre de réactions classiques de synthèse organique. Le rendement de nombreuses réactions est même supérieur, et les réactions sont souvent plus rapides. De surcroît, ils ne se décomposent qu'à haute température et certains restent liquides et stables sur des gammes de températures comprises entre –100 °C et 400 °C. À ce jour, aucune toxicité n'a été constatée. Les effets de solvatation mis en œuvre dans les liquides ioniques diffèrent de ceux mis en jeu dans l'eau ou dans les solvants organiques. On ignore encore les mécanismes intimes, mais on sait que les liquides ioniques stabilisent des composés intermédiaires et des degrés d'oxydation que l'on n'obtient pas dans les réactions chimiques connues. Toutefois, les chimistes ont déjà montré l'importance des cations organiques pour abaisser un point de fusion, alors que les anions semblent responsables de la majorité des autres propriétés, tels la conductivité, la viscosité et les effets de solvatation... Ainsi, en jouant sur la nature de l'anion et sur la longueur de la chaîne organique, on ajuste les propriétés des liquides ioniques. Des milliers de tels solvants peuvent être synthétisés en fonction des propriétés physico-chimiques recherchées.

Aujourd'hui, les liquides ioniques commencent à quitter le stade expérimental. Dix nouveaux liquides ioniques apparaissent chaque mois. D'importants groupes industriels mettent au point des liquides ioniques qu'ils substitueront aux solvants classiques… dès que les taxes sur les déchets organiques et sur les émissions de gaz à effet de serre les y contraindront et justifieront le coût des transformations visant à adapter les procédés industriels aux liquides ioniques.



Vinh Ho/Dib

Les liquides ioniques (ici, un chlorure1-hexadecyl-3-methylimidazolium), cristallisent *(à gauche)* à des températures inférieures à celles où cristallisent les cristaux ioniques « classiques », tel le sel de table. Ils présentent parfois une phase cristal liquide *(à droite)* (images obtenues en lumière polarisée ; le grossissement est environ égal à 100).

Vaches malades et mesures sanitaires

PASCALE GRAMAIN-KIBLEUR

L'épizootie de Bayonne, à la fin du XVIIIe siècle, suscite une surveillance sanitaire généralisée en France. Hélas, lors de la crise de la vache folle, qui a écouté le passé ?



La mise en place du contrôle sanitaire des bovins a été lente lors de la récente épidémie de la vache folle et les pouvoirs publics ont justifié cette lenteur par la nouveauté de ce type de contrôle. Or les épizooties bovines existent depuis l'Antiquité et, en France, une structure chargée de les gérer a été créée dès la fin du XVIIIe siècle, après l'épizootie qui a ravagé le Sud-Ouest de la France dans les années 1770. En examinant les archives municipales de Bayonne, les archives départementales de Pau, les archives nationales, celles de l'Académie de médecine et celles de l'Académie des sciences, nous avons reconstitué l'histoire de cette peste bovine.

La peste bovine, l'une des maladies animales les plus redoutées, est très contagieuse : elle diffuse rapidement et tue en moyenne 90 pour cent des bovins contaminés. En Europe, plusieurs vagues sont venues d'Asie centrale, souvent à l'occasion de guerres : dans les années 370 (invasion des Huns), 560 (invasion des Lombards), 800 (campagnes de Charlemagne), 1220 (invasion des Mongols). Après une accalmie de plusieurs siècles, la peste bovine envahit de nouveau l'Europe au XVIIIe siècle, provoquant une dizaine de grandes épizooties avant d'être progressivement maîtrisée par la prophylaxie sanitaire et la vaccination (son origine virale ainsi qu'un vaccin efficace furent découverts au début du XXe siècle). Aujourd'hui, elle persiste encore dans certains pays d'Afrique, d'Asie et du Moyen-Orient.

Les symptômes apparaissent 3 à 15 jours après la contamination. La maladie commence alors par de la fièvre, de l'anorexie et des troubles respiratoires, puis des larmoiements contenant du mucus et une salivation abondante. Ensuite interviennent des troubles de l'estomac et des intestins : diarrhée hémorragique, déshydratation, douleurs abdominales, fatigue générale et mort en 8 à 12 jours. Ces symptômes sont particulièrement variés, et dépendent de la forme prise par la maladie. De ce fait, elle a reçu diverses appellations : « diphtérie maligne, dysenterie contagieuse, fièvre contagieuse typhoïde, peste morveuse, variole du bœuf… » Elle se transmet par contact direct ou indirect étroit, notamment par des objets souillés, par les sécrétions des voies respiratoires (le sang et tous les tissus sont infectieux avant l'apparition des symptômes). Il n'existe pas de porteur sain. Toutefois, seuls les ruminants et les suidés (cochons, sangliers) sont sensibles à la maladie, l'homme étant épargné.

En 1772, une épizootie éclate dans les environs de Bayonne. Elle a probablement été introduite par des bestiaux importés de Hollande, où sévissait la maladie. Le peuple effrayé se prive de bœuf, reportant sa consommation sur d'autres viandes, en premier lieu le mouton, dont le prix grimpe. Le porc, lui aussi sensible à la maladie, se fait rare. La pénurie de viande de boucherie et de lait entraîne une hausse de la consommation de blé. La région est avant tout agricole, mais sans bœuf, pas de labours. Les récoltes diminuent et les paysans crient famine. Les commerces sont aussi atteints : en l'absence de chars à bœufs, le transport des marchandises est perturbé. Le foin destiné à nourrir les quelques bêtes restantes n'arrive plus jusqu'aux étables. Les moutons sont décimés : la fabrication de vêtements en laine, de première nécessité dans ces régions montagneuses, n'est plus assurée.

En 1774, l'épizootie s'est étendue à tout le Sud-Ouest du pays, jusqu'à Bordeaux. En 1775, on tente de repeupler les étables en important des vaches de Bretagne, mais elles meurent à leur tour. Louis XVI encourage l'importation de chevaux et de mulets pour les labours. Toutefois, ces animaux sont trop faibles, que ce soit pour tirer des charrues ou pour transporter des marchandises. Ils consomment plus de fourrage, leur harnachement est plus cher et ils donnent moins de fumier. Or, les terres ne produisent « qu'à force d'engrais ».

L'abattement est général : les conséquences de l'épizootie sont « accablantes pour les cultivateurs, pour le peuple, enfin pour toutes les classes d'habitants », qui fuient la région. Des maçons, charpentiers, charbonniers, bûcherons, tuiliers et autres ouvriers s'exilent en Espagne, laissant leurs femmes et leurs enfants sans ressources. En 1776, un tiers des laboureurs n'ont plus de bêtes à cornes et doivent cultiver leurs terres à bras d'homme. Finalement, grâce au plan de Félix Vicq d'Azyr, un jeune médecin anatomiste nommé en 1774 par l'Académie des sciences pour enrayer l'épizootie, la maladie disparaît progressivement de la région. La dernière récidive se produit fin 1776. Au total, 150 000 bovins auraient disparu de 1774 à 1776. Comment l'académicien a-t-il procédé ?

LES MESURES CONTRE L'ÉPIZOOTIE

En France, la peste bovine a déjà sévi en 1711, en 1743, et en 1770, mais pas dans le Sud-Ouest. Même si les autorités savent peu de choses de cette maladie, et notamment de la façon dont elle se transmet, le problème n'est pas nouveau. Un arrêt de 1746 impose la déclaration des animaux malades, l'isolement de la paroisse concernée (les foires et les marchés sont interdits) et la réglementation du commerce des bouchers. Un autre arrêt plus sévère, de 1771, défend aux bouchers d'acheter des bestiaux, même sains, dans la paroisse contaminée. Toutefois, ces textes ne seront appliqués qu'à partir de 1774. À Bayonne, au début de l'épizootie, la municipalité réagit en instaurant un examen obligatoire des bêtes destinées à la boucherie et en délivrant des certificats de bonne santé aux propriétaires de vaches laitières, qui doivent les présenter aux acheteurs pour vendre leur lait. Des experts scientifiques sont associés à ces mesures, pour garantir la sûreté sanitaire. En 1773, quelques individus sont réservés à la reproduction (il reste si peu de bêtes saines que l'on craint la disparition de l'es-

En haut : BNF-Bridgeman Giraudon ; page de droite : F.L.T. Verdonk



La peste bovine a sévi à Bayonne dans les années 1770. Elle a probablement été introduite par des bestiaux venant de Hollande, déjà touchée par la maladie *(sur cette lithographie d'époque)*.

pèce), mais les marchés aux bestiaux sont maintenus afin de ménager le commerce. Parallèlement, de nombreux charlatans, appelés pour guérir les troupeaux, pratiquent divers « traitements » qui favorisent la diffusion du mal en donnant aux paysans une fausse impression de sécurité.

Fin 1774, devant l'ampleur du désastre, Robert Turgot, contrôleur général des finances, s'adresse à l'Académie des sciences. Le directeur de l'école vétérinaire, appelé à la rescousse, confirme que la maladie est contagieuse et dresse un tableau de ses symptômes, afin de faciliter sa reconnaissance. Il prône l'abattage des bêtes atteintes, mais ses recommandations sont peu suivies dans un premier temps. Les représentants du pouvoir royal et les scientifiques unissent leurs efforts. Les premiers commencent à appliquer les arrêts existants. Un cordon sanitaire est mis en place à la frontière de la généralité de Bordeaux et des élèves de l'école vétérinaire sont envoyés sur le terrain. Dans le Béarn, les granges où des animaux sont malades font l'objet de mesures d'isolement : seuls les propriétaires sont autorisés à y pénétrer. Les foires et les marchés sont suspendus. Les intendants (qui représentent le pouvoir royal) échangent leurs expériences.

Rien n'y fait : la maladie progresse. Vicq d'Azyr est chargé par l'Académie des sciences d'étudier la transmission de la maladie, de tenter différents traitements et de mettre au point un plan d'éradication. Il part immédiatement sur le terrain et, après avoir expérimenté et observé les failles dans la manière dont s'organise la lutte, il élabore son plan. L'abattage devient obligatoire. Un réseau de communication est établi entre les membres du Conseil d'État du roi, de l'Académie des sciences et les hommes dépêchés sur le terrain. Un protocole de désinfection rigoureux est mis au point : les étables sont nettoyées avant d'être désinfectées par des personnes compétentes, c'est-à-dire des représentants de l'ordre ou des scientifiques.

Ces mesures sont impopulaires. L'interdiction de déplacer les bovins empêche de les faire travailler sur plusieurs parcelles cultivées au gré des besoins et de les utiliser pour le transport des marchandises. En 1775, des troupes sont envoyées par le roi pour établir des cordons sanitaires, vérifier l'état des animaux, désinfecter les étables. Comme les soldats sont susceptibles de véhiculer la maladie, ils ne doivent pas entrer dans les granges : pour lutter contre les fraudes, les bêtes sont marquées à la corne. Des conflits éclatent entre les troupes et les commissaires nommés localement pour veiller à l'exécution des réglements. Ces derniers sont contraints de suspendre leurs activités. Les soldats, dont les abus sont parfois difficiles à contenir, reçoivent des ordres de bonne conduite, ce qui témoigne du caractère explosif de la situation sociale. Les textes officiels sont publiés plusieurs fois : les réglements concernant les bovins ne sont donc guère suivis.

Même dans les rangs des élites, certains médisants critiquent vivement Vicq d'Azyr, prétendent que le mal ne s'arrête quand les bovins ont tous été abattus et que « cette opération aura fait essuyer mille vexations aux propriétaires de troupeaux et aura coûté plusieurs millions au gouvernement ». En effet, à partir de 1775, les troupeaux entiers sont abattus et, pour la première fois, la perte des bêtes saines est intégralement remboursée (auparavant, depuis 1774, seules les vaches malades étaient abattues et l'indemnisation couvrait le tiers de leur valeur).

LA SURVEILLANCE SANITAIRE

Non seulement Vicq d'Azyr réussit à arrêter l'épizootie, mais il est aussi à l'origine d'une surveillance sanitaire qui sera efficace. Lorsqu'il se rend à Bayonne, il est frappé par l'indigence des moyens d'évaluation de l'état de santé des bêtes. La France ne possède pas de structure de surveillance, ni de stratégie de coordination médicale ou vétérinaire.

Vicq d'Azyr crée, en avril 1776, avec Turgot et Lassone, premier médecin du roi, la Société de correspondance royale de médecine. Son but est de « tenir une correspondance avec les médecins de provinces pour tout ce qui peut être relatif aux maladies épidémiques et épizootiques ». Elle doit synthétiser les observations des médecins et référencer les maladies, leurs symptômes et leurs remèdes. Deux ans plus tard, cet organisme prend le nom de Société royale de médecine et ses missions sont élargies : la Société doit s'occuper de médecine théorique et pratique, et surtout de ce qui a trait aux épidémies et aux épizooties. Ses membres appliquent les grandes lignes de la méthode de Vicq d'Azyr : état des lieux, synthèse, diffusion de l'information, collaboration avec l'administration. Avec la création de cette structure, la médecine investit la politique : le partage des connaissances qu'elle organise fait émerger un savoir synthétique, qui lui donne un pouvoir administratif. Ce pouvoir engendre à son tour des connaissances nouvelles pour administrer le pays dans le domaine sanitaire. Vicq d'Azyr est nommé secrétaire de la Société royale de médecine jusqu'à sa dissolution sous la Révolution.

Selon les mots du rapport de l'Académie des sciences remis à Vicq d'Azyr avant son départ pour le Sud-Ouest, « si ses premières tentatives ne sont pas assez heureuses pour conduire à des découvertes importantes, elles serviront du moins à épargner à nos successeurs des travaux inutiles dans des routes déjà frayées, à diriger leurs vues d'un autre côté et à inventer peut-être de nouveaux moyens pour parvenir aux découvertes. Nous aurons du moins employé toutes les connaissances et tous les secours qu'on peut avoir à présent pour seconder les intentions du gouvernement et travailler au bien de l'humanité ». La leçon a été oubliée.

Pascale GRAMAIN-KIBLEUR est docteur en histoire des sciences.

Les plumes de dinosaures



RICHARD PRUM • ALAN BRUSH

L'étude biologique de la croissance des plumes et celle d'une série de nouveaux fossiles de dinosaures confortent une hypothèse : la plume a évolué avant l'apparition des oiseaux et du vol.

© POUR LA SCIENCE - N° 305 MARS 2003



Kazuhiko Sano

Poils, écailles, pelage… plumes. Comment la plume, appendice épidermique solide, léger et complexe s'est-elle développée ? Plusieurs résultats indiquent que l'apparition des plumes a précédé celle des oiseaux. L'énigme de l'origine de la plume a été longue à être résolue, car il a fallu surmonter plusieurs obstacles, notamment les fausses pistes paléontologiques. Ainsi, selon l'hypothèse qui prévalait jusqu'à présent, la plume est une écaille reptilienne qui s'est divisée, puis allongée. Par ailleurs, certains paléontologues pensent que cet appendice a évolué pour remplir la fonction du vol. Comme on a découvert très peu de « fossiles à plumes », les progrès ont été lents. *Archéoptéryx lithographica*, un oiseau qui vivait au Jurassique supérieur, il y a environ 148 millions d'années, est le plus vieux des fossiles à plumes connu, mais ses plumes n'apportent pas d'indices sur la façon dont elles ont évolué.

Plusieurs découvertes récentes ont permis aux paléontologues de progresser. Ainsi, l'idée ancienne que les mécanismes complexe du développement d'un organisme – ceux qui commandent la croissance de l'embryon jusqu'à sa forme finale – éclairent l'évolution de l'anatomie des espèces est confortée par de plus en plus d'indices biologiques. Fondée sur cette idée, la biologie évolutionniste du développement est utile aux paléontologues qui cherchent à comprendre l'origine des plumes. De surcroît, on a découvert en Chine plusieurs fossiles de dinosaures à plumes. Ce nouveau registre fossile a fourni une grande variété de plumes de dinosaures tant à des stades primitifs de développement, qu'à des stades aussi « modernes » que ceux que l'on observe chez les oiseaux d'aujourd'hui ou chez Archéoptéryx. Ces phanères seraient apparus dans un groupe de théropodes bipèdes et carnivores bien avant les oiseaux et bien avant le vol.

Cette conclusion résulte de l'étude morphologique des plumes et de la façon dont elles se développent chez les oiseaux modernes. Comme les cheveux, les ongles ou encore les écailles, les plumes sont des appendices tégumentaires, c'est-à-dire des tissus de surface qui se forment par prolifération contrôlée de cellules au sein de l'épiderme. Cette couche superficielle de la peau produit la protéine fibreuse nommée kératine, le principal constituant des phanères. Une plume présente un long tube central, le rachis (voir l'encadré de la page ci-contre), sur lequel sont fixées des « branches », nommées barbes. Ces barbes se ramifient à leur tour en une série de barbules attachées à l'axe des barbes, le ramus. Vers sa base, le rachis s'élargit et forme un tube creux, le calamus, inséré dans l'un des follicules de la peau. Pendant la vie d'un oiseau, chaque plume est remplacée périodiquement par une nouvelle plume qui pousse dans le même follicule après la chute de l'ancienne.

Plumes ou duvet

Il existe une grande variété de plumes, mais on les regroupe en deux grandes catégories : les pennes ou plumes de contour, et les plumes duveteuses. Les plumes de contour ont un important rachis et de solides barbes, reliées entre elles par des paires de barbules, les unes munies de crochets, les autres de sillons. Lorsque les crochets sont arrimés sur les sillons des barbules voisines, les barbes constituent, de part et d'autre du rachis, deux voilures planes, étanches et résistantes : les vexilles. Ces derniers confèrent leurs propriétés aérodynamiques aux ailes et à la queue. Contrairement aux plumes de contour, les plumes de duvet, ou plumules, ont un rachis rudimentaire et des barbes désordonnées dotées de longues barbules. Ce sont elles qui donnent au duvet ses propriétés isolantes et douillettes. Notons aussi que les plumes de contour peuvent avoir une base duveteuse.

En résumé, toutes les plumes sont des « variations sur un tube », c'est-à-dire des structures produites par des proliférations de cellules épidermiques nourries par un derme axial. Même si elles sont ramifiées comme des arbres, elles croissent à leur base comme les cheveux, c'est-à-dire dans un follicule. La croissance commence par l'épaississement d'une zone de l'épiderme, nommée placode, laquelle s'allonge pour former le germe (ou papille). La prolifération des cellules en un anneau qui entoure le germe crée, à sa base, une dépression tubulaire, le follicule. En se multipliant, les cellules cornées (ou kératinocytes) situées à la base du follicule expulsent les cellules plus anciennes, qui constituent progressivement la plume. Cette croissance cellulaire suit une chorégraphie précise.

L'anneau de cellules cornées (collier folliculaire) qui engendre la plume se divise en une série de crêtes barbaires. Dans les plumes de contour, les barbes croissent en hélices autour du germe tubulaire. Elles forment le rachis en fusionnant d'un côté du tube, tandis que de nouvelles ébauches de barbes apparaissent de l'autre côté. Dans une plume de duvet, les ébauches de barbes poussent sans s'enrouler en hélice autour du germe. Toutes les barbules poussent à partir d'une couche de cellules situées à la périphérie de chaque crête de barbe.

De l'évolution de la plume

Nous pensons que l'on peut déduire la structure des précurseurs des plumes de la façon dont les plumes modernes poussent. Nous supposons que les plumes ont évolué en une succession de stades et qu'à chaque étape, un nouveau mécanisme de croissance prolongeait le précédent, grâce à une nouvelle innovation. Ainsi, chacun des stades de l'évolution de la plume aurait constitué la base sur laquelle reposait l'innovation suivante.

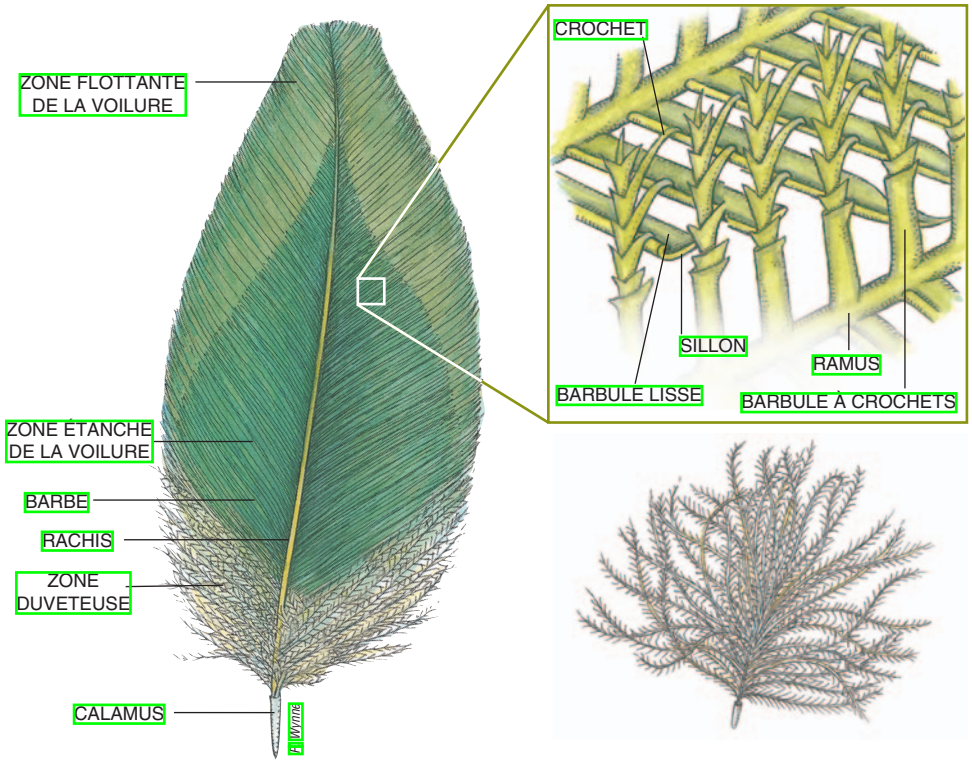
En 1999, nous avons proposé un modèle d'évolution de la plume. Durant le premier stade, la placode s'allonge en un tube, étape qui correspond aux plus primitives des plumes, qui n'étaient que de simples tubes creux non ramifiés. Au cours du deuxième stade, un anneau de cellules épidermiques situé à la base du follicule s'est différencié : tandis que sa couche interne se spécialisait pour donner les crêtes de barbes longitudinales, la couche externe devenait une gaine protectrice. À ce stade, une touffe de barbes dont une extrémité fusionnait avec le cylindre creux du calamus apparut, constituant une sorte de duvet primitif.

Nous proposons ensuite deux hypothèses pour le stade suivant : ou bien la croissance hélicoïdale des barbes est apparue en premier, ou bien ce sont les barbules qui se sont développées en premier. On ne peut guère trancher d'après la seule observation du développement d'une plume. Selon la première hypothèse, on obtient une plume comportant un rachis et une série de barbes simples. Selon la seconde, le follicule aurait produit une touffe de barbes avec des barbules. Quel qu'ait été le scénario, à la fin du troisième stade, les plumes avaient un rachis et une double implantation de barbes munies de barbules. Comme les barbules n'étaient pas encore

© POUR LA SCIENCE - N° 305 MARS 2003

Anatomie d'une plume

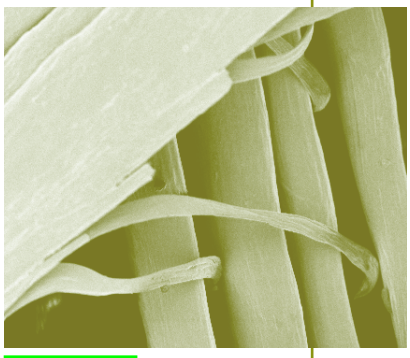
Les plumes sont d'une étonnante diversité de formes et de fonctions. Ainsi, elles servent aux oiseaux à voler, mais aussi à embellir leurs parades nuptiales, à se camoufler, à se protéger du froid, etc. Leur diversité provient des grandes variations de formes de leurs principales parties : le rachis, les barbes et les barbules. Toutefois, on peut ranger la plupart des plumes en deux grandes classes : les pennes, notamment celles qui servent au vol, et les plumes duveteuses qui protègent l'oiseau du froid.



Dans les plumes de contour, des paires de barbes qui se rejoignent sur le rachis médian forment une « voilure ». Dans la partie serrée, les barbules à crochets se fixent aux sillons des barbules lisses *(voir le détail)*. Dans la zone flottante de la voilure, les barbules ne se fixent pas les unes aux autres. Des touffes de barbes prolongées de longues barbules flottantes sont attachées sur un rachis rudimentaire.



Voilure lâche



Voilure serrée



T. Lee Dunn

Plume duveteuse



T. Wess

Plume duveteuse



Plume de contour



Rémige



G. Worth Aves Int

Les plumes des jeunes de ces deux espèces de cacatoès sont encore dans leurs fourreaux.

totalement différenciées, elles ne pouvaient resserrer le tissu des vexilles, qui restait ajouré. Les barbules ne se différencièrent complètement qu'au quatrième stade, donnant des barbules à crochets, qui s'accrochent aux sillons des barbules portées par les barbes voisines, formant la voilure de la plume. Le quatrième stade atteint, de nombreuses variations se produisirent ; elles sont à l'origine des nombreuses plumes actuelles, correspondant au cinquième stade.

Une constatation simple sous-tend notre théorie : les plumes se développent de façon ordonnée, stade après stade. Ainsi, nous avons fait l'hypothèse que les plumes tubulaires précédèrent les plumes ramifiées, parce que les barbes furent créées par la différenciation du tube en crêtes barbaires. De même, les touffes de barbes duveteuses sont apparues avant la plume pourvue d'un rachis puisque ce dernier résulte de la fusion des crêtes barbaires. Chacun des stades de développement que nous avons définis est fondé sur de tels raisonnements.

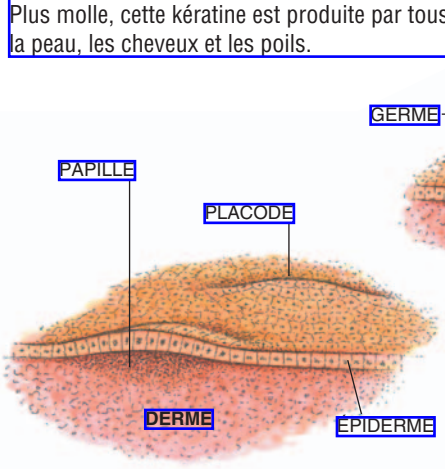
Des protéines maîtres d'œuvre

Notre théorie repose sur le fait que les plumages modernes comportent des plumes correspondant à tous les stades de développement. Les plumes modernes montrent que tous les stades que nous avons définis sont présents dans les schémas de développement des follicules des plumes. De surcroît, la biologie moléculaire a confirmé l'existence des trois premiers stades de développement de la plume. Grâce aux techniques dont on dispose aujourd'hui, on examine si tel ou tel gène est exprimé, c'est-à-dire si la protéine qu'il code a été produite. Plusieurs laboratoires ont combiné ces méthodes avec d'autres techniques expérimentales visant à étudier les protéines produites pendant le développement des plumes. Matthew Harris et John Fallon, de l'Université de Wisconsin-Madison et l'un d'entre nous (R. Prum) ont étudié deux gènes qui jouent un rôle important dans la formation des plumes : *Shh* (*sonic hedgehog*) et *Bmp2* (pour *Bone Morphogenetic Protein 2*, c'est-à-dire le gène de la protéine 2 de morphogenèse des os). Chez les vertébrés, ces gènes jouent un rôle crucial dans la croissance des membres, des doigts et des appendices tégumentaires, tels les poils, les écailles, les dents ou encore les ongles. Nous avons constaté que les protéines Shh et Bmp2 sont des molécules de signalisation sans cesse réutilisées au cours de la formation de la plume. Tandis que la protéine Shh déclenche la prolifération cellulaire, Bmp2 contrôle cette prolifération et stimule la différenciation des cellules.

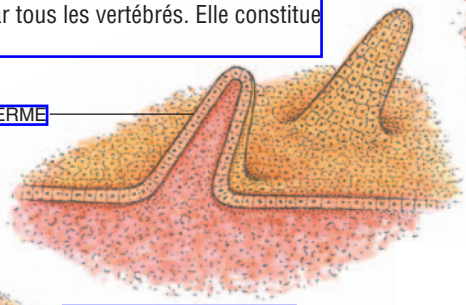
Les protéines Shh et Bmp2 sont d'abord produites dans la placode, selon un gradient de concentration antéro-postérieur. Ensuite, elles sont exprimées à la pointe du germe pendant son élongation initiale, puis dans l'épithélium qui sépare les crêtes barbaires en formation. Ainsi, elles établissent le motif que les crêtes suivront durant leur croissance. Dans les plumes de contour, ces protéines de signalisation dirigent la croissance hélicoïdale des crêtes barbaires et du rachis, tandis qu'elles dessinent un plan plus simple pour la croissance des barbes dans les plumes du duvet. Chacun des stades du modèle de développement évoqué est caractérisé par un plan de croissance dessiné par des concentrations particulières en protéines Shh et

La croissance des plumes

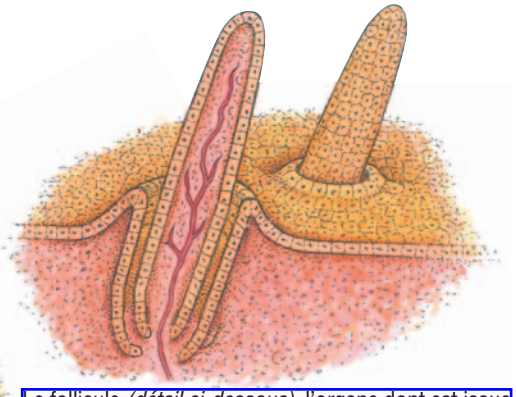
La croissance des plumes, comme celle des poils, des ongles et des écailles, résulte de la prolifération des cellules cornées ou kératinocytes. Quand elles meurent, ces cellules forment un dépôt de kératine. Les kératines sont des filaments protéiques qui polymérisent, formant une matrice solide. Les plumes sont constituées de kératine bêta, uniquement produite par les reptiles et par les oiseaux. La gaine externe d'une plume en croissance (le fourreau) est constituée de kératine alpha. Plus molle, cette kératine est produite par tous les vertébrés. Elle constitue la peau, les cheveux et les poils.



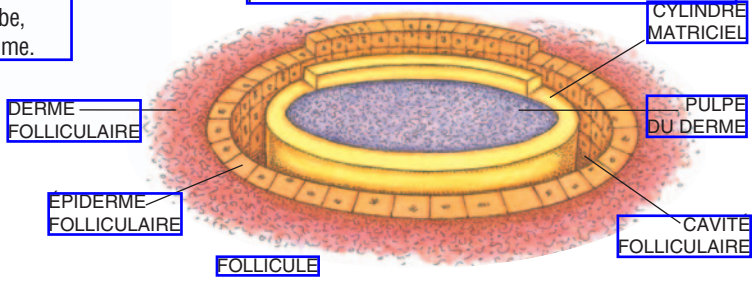
La croissance d'une plume commence par un épaississement local de l'épiderme, nommé placode, surmontant un amas de cellules du derme.



La placode donne ensuite naissance à un tube, le germe de la plume.



Le follicule *(détail ci-dessous)*, l'organe dont est issue la plume, est créé par une prolifération de cellules disposées en cercle autour du germe. La division incessante de cellules à la base du follicule repousse les anciennes cellules vers l'extérieur, constituant la plume tubulaire.



P. Wyrda

Bmp2. Sans arrêt, ces deux protéines contrôlent tous les stades qui se succèdent à mesure que se déploie la plume.

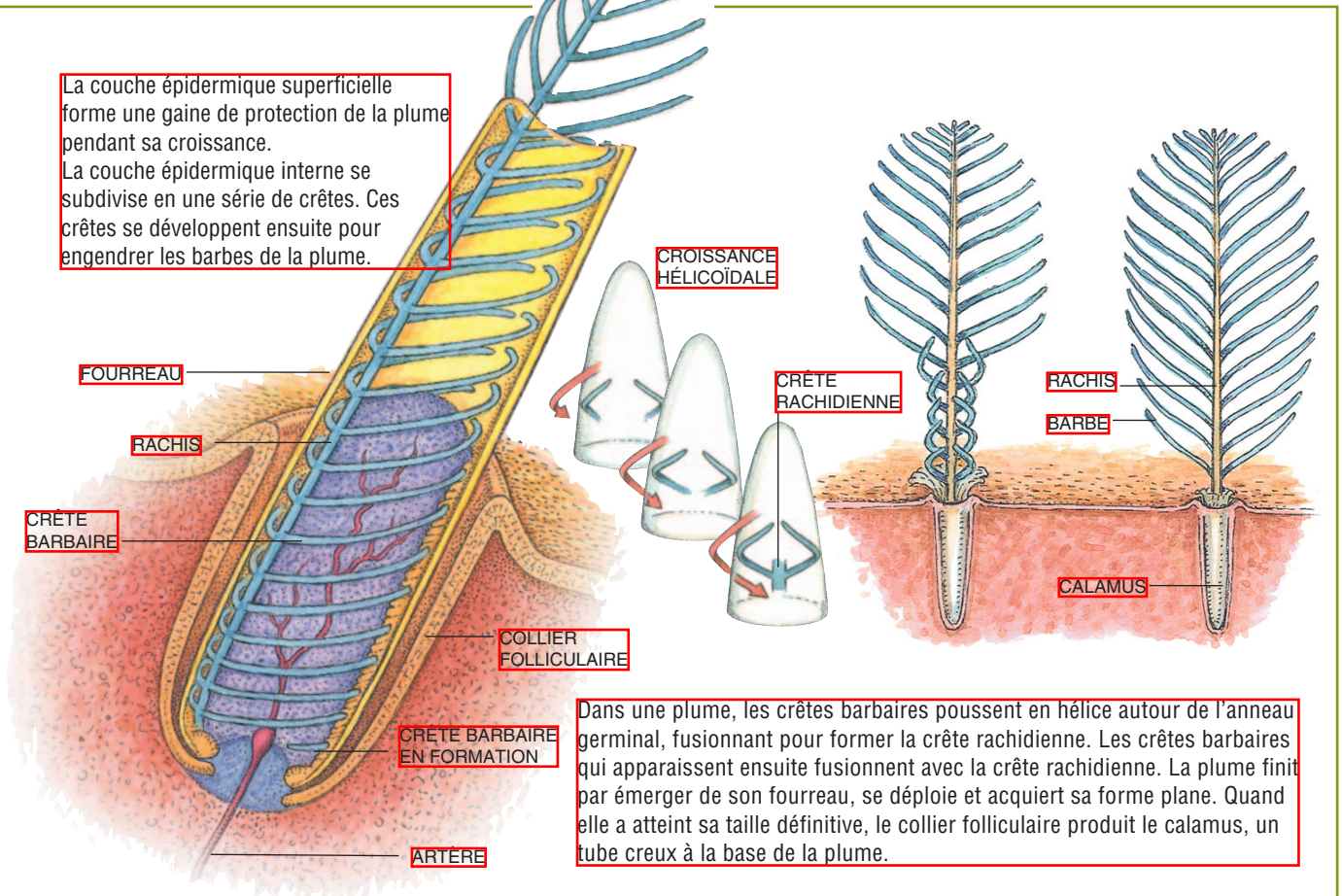
Ces résultats de biologie moléculaire confirment que le développement se décompose bien en une succession de stades, où chacun dépend du précédent. Ainsi, l'expression alternée des protéines Shh et Bmp2 n'a lieu qu'après le développement du germe des plumes tubulaires. De même, les variations des motifs d'expression de ces protéines pendant la croissance des plumes de contour ne sont possibles qu'après la formation des ébauches des barbes longitudinales. Ainsi, les résultats de l'étude moléculaire confortent notre modèle de développement des plumes, passant d'un long tube creux à une touffe duveteuse de barbes, pour acquérir la structure des plumes de contour.

Fossiles à plumes

Jusqu'à présent, nous n'avons évoqué que notre modèle de développement et les résultats fournis par la biologie moléculaire. Il nous reste à confronter ces résultats à l'observation des fossiles. Plusieurs sites du Nord de la Chine ont livré des fossiles de dinosaures à plumes dont les restes semblent valider notre théorie. Une équipe de paléontologues chinois a ainsi fouillé plusieurs gisements du Crétacé inférieur (datant de 128 à 124 millions d'années) dans la formation géologique Yixian. Des conditions favorables ont assuré une remarquable conservation de nombreux organismes, par exemple les premiers mammifères placentaires, des oiseaux anciens, les premières plantes à fleurs et de nombreux dinosaures théropodes, dont la fossilisation a préservé beaucoup de détails. Parmi ces dinosaures, certains portent des plumes primitives, mais d'autres ont des plumes tout à fait « modernes ». Nous en déduisons que les plumes sont apparues chez des dinosaures carnivores bipèdes et terrestres et ont acquis les caractéristiques des plumes modernes, bien avant que n'apparaissent les oiseaux et le vol.

Le premier fossile découvert dans cette formation est celui de *Sinosauropteryx*, mis au jour en 1997. Il s'agit d'un cœlurosaure de la taille d'un poulet dont l'épiderme portait de petites structures tubulaires, peut-être ramifiées. Puis on a découvert un oviraptor *Caudipteryx* de la taille d'une dinde. Il avait, à l'extrémité de ses membres antérieurs, des plumes de contour d'apparence moderne, qui sont bien conservées. Certains pensent que *Caudipteryx* était en fait un oiseau coureur et pas un dinosaure, mais les analyses phylogénétiques le placent parmi les théropodes. Les paléontologues ont aussi mis au jour des fossiles de dromaeosaures, des dinosaures que l'on suppose avoir été proches des oiseaux, mais qui à l'évidence n'en étaient pas. Ces théropodes portaient aussi des plumes de contour. Ainsi, plus d'une dizaine de dinosaures théropodes portant des plumes, mais qui n'étaient pas des oiseaux, ont été découverts, parmi lesquels, *Beipiaosaurus* de la taille d'une autruche et plusieurs dromaeosaures, dont *Microraptor* et *Sinornithosaurus*.

L'hétérogénéité des plumes portées par ces dinosaures conforte la théorie développementale. Les plumes les plus primitives connues – celles de *Sinosauropteryx* – sont des structures tubulaires simples, qui correspondent au premier stade de notre modèle. *Sinosauropteryx*, *Sinornithosaurus* et d'autres théropodes avaient des plumes de duvet lâches et



Dans une plume, les crêtes barbaires poussent en hélice autour de l'anneau germinal, fusionnant pour former la crête rachidienne. Les crêtes barbaires qui apparaissent ensuite fusionnent avec la crête rachidienne. La plume finit par émerger de son fourreau, se déploie et acquiert sa forme plane. Quand elle a atteint sa taille définitive, le collier folliculaire produit le calamus, un tube creux à la base de la plume.

dépourvues de rachis, correspondant parfaitement au deuxième stade de notre modèle. Les plumes de contour avaient des barbules différenciées constituant une surface plane, comme dans le quatrième stade. Notons aussi que *Caudipteryx*, *Protopteryx* et les dromaeosaures avaient un « éventail » de plumes à l'extrémité de leur queue, ce qui indique que certains aspects du plumage des oiseaux modernes étaient déjà présents chez les théropodes.

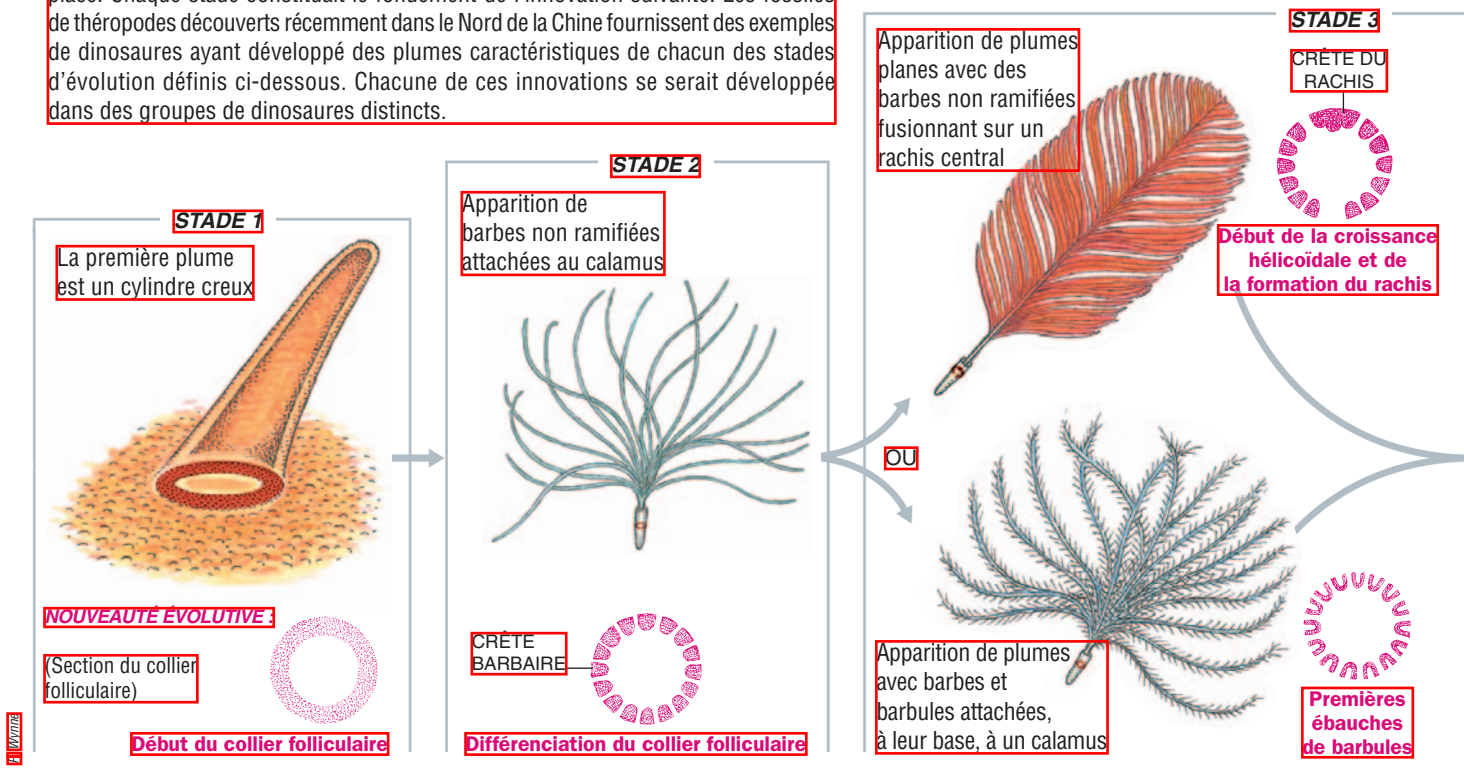
Une nouvelle histoire évolutive de la plume se dessine depuis la découverte de ces fossiles. Nous pensons que les plumes sont apparues dans un groupe de théropodes, puis s'y différencièrent jusqu'à atteindre une diversité comparable à celle des plumes contemporaines, tout cela bien avant l'apparition des oiseaux. Ensuite, un groupe particulier de ces dinosaures à plumes développa une aptitude au vol à l'aide des plumes de contour des membres antérieurs et de la queue, donnant les oiseaux.

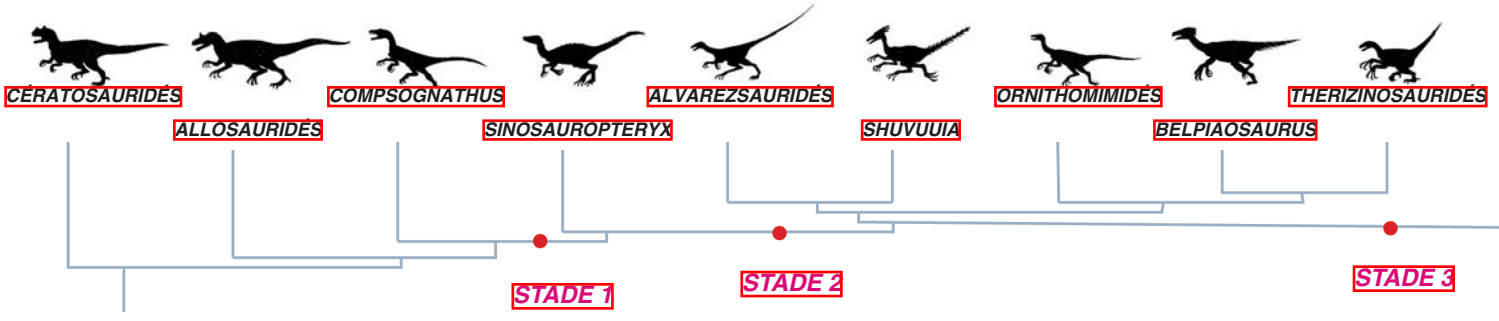
Le nouveau registre fossile chinois implique aussi qu'il faut redéfinir ce qu'est un oiseau, et il renouvelle notre approche de la biologie et du développement des théropodes. Les oiseaux, c'est-à-dire toutes les espèces qui descendent du plus récent ancêtre commun à Archéoptéryx et aux oiseaux modernes, étaient considérés comme des vertébrés à plumes et volants. Aujourd'hui, nous devons les considérer plutôt comme les descendants d'un groupe de théropodes à plumes qui ont acquis la capacité de voler. Ainsi, les nouveaux fossiles ont encore réduit la différence entre les oiseaux et les dinosaures : la définition des oiseaux est encore plus difficile à établir. Qui plus est, les plus célèbres des théropodes, *Tyrannosaurus* ou *Velociraptor*, étaient peut-être couverts de plumes, mais n'étaient pas des oiseaux !

Aujourd'hui, on peut revoir les anciennes hypothèses à la lumière des découvertes récentes. Qu'en est-il de

L'évolution des plumes

Ce modèle est fondé sur le fait que les mécanismes de développement d'un organisme reflètent la façon dont cet organisme a évolué. Ainsi, les plumes ont acquis leurs caractéristiques en passant par plusieurs stades au cours desquels une innovation évolutive s'est mise en place. Chaque stade constituait le fondement de l'innovation suivante. Les fossiles de théropodes découverts récemment dans le Nord de la Chine fournissent des exemples de dinosaures ayant développé des plumes caractéristiques de chacun des stades d'évolution définis ci-dessous. Chacune de ces innovations se serait développée dans des groupes de dinosaures distincts.



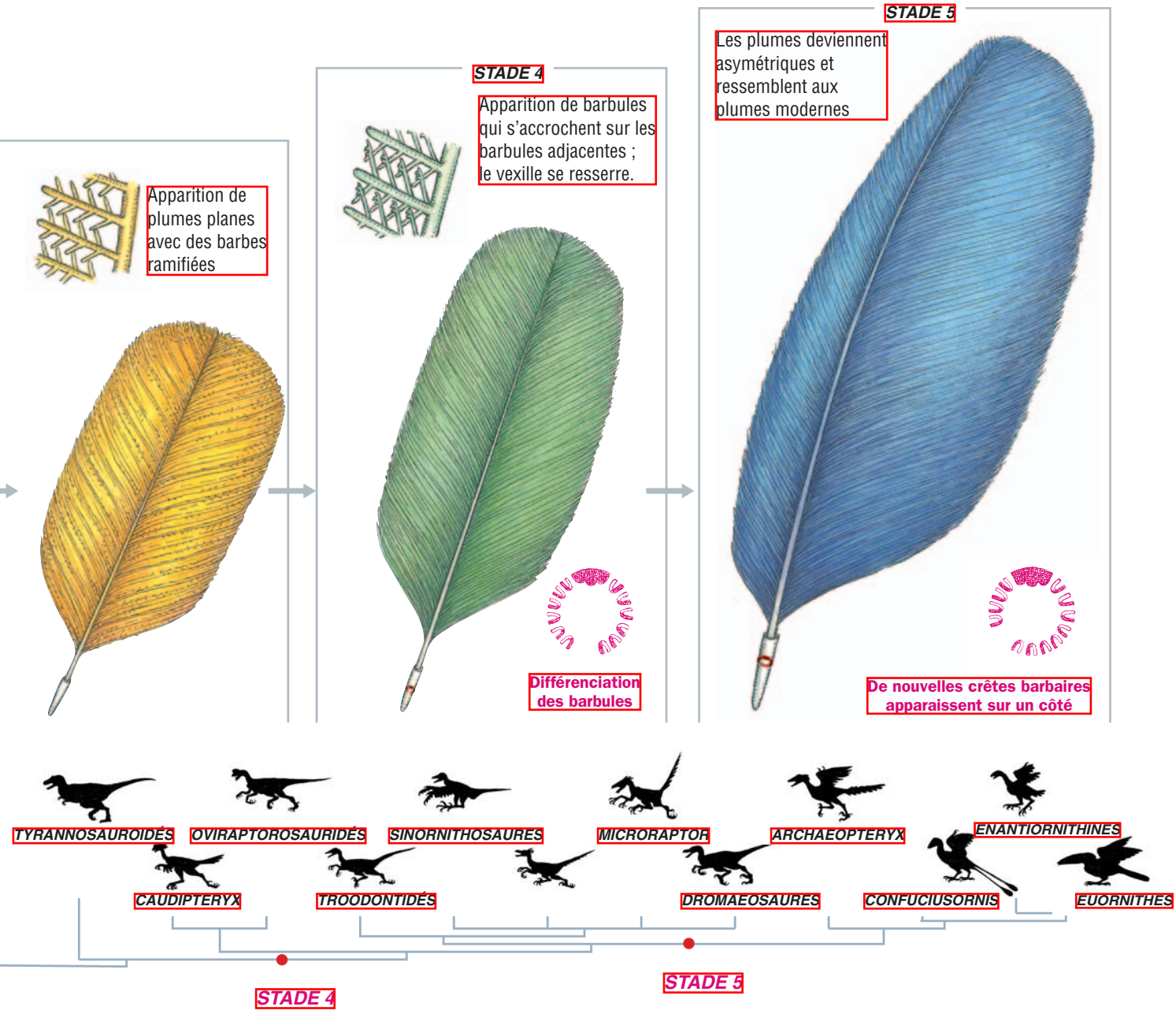


l'hypothèse selon laquelle les écailles des reptiles auraient évolué pour donner les plumes ? Les résultats de la biologie du développement la mettent à mal. Selon cette hypothèse, les écailles sont devenues des plumes en s'allongeant, puis en développant des bords dont les franges se subdivisèrent ensuite en barbules à sillon et à crochets. Or, comme nous l'avons évoqué, les plumes se forment à partir d'un tube et s'aplanissent seulement après être sorties du tube. En revanche, les deux faces planes d'une écaille se développent à partir du sommet et de la base de l'excroissance épidermique initiale qui forme cette écaille.

Les résultats que nous avons exposés mettent également à mal la théorie selon laquelle les plumes se développèrent pour permettre le vol. Seules les plumes très évoluées – c'est-à-dire les plumes asymétriques comportant une surface plane serrée (stade 5) – rendent le vol possible. En fait, prétendre que les plumes se sont développées pour le vol est un peu comme affirmer que les doigts de la main sont une invention de l'évolution pour rendre possible la pratique du piano. Les plumes ont plutôt été exploitées pour leurs propriétés aérodynamiques après l'apparition d'une grande variété de structures. Elles ont d'abord évolué pour remplir des objectifs qui n'étaient pas liés au vol, puis ont été utilisées à d'autres fins.

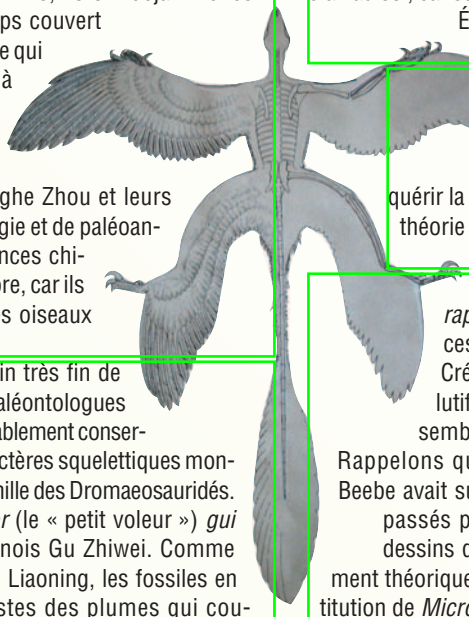
La fonction des plumes primitives

À quoi servaient les plumes avant le vol ? On a proposé que la fonction originelle du plumage a été l'isolation thermique, la protection contre la pluie, un atout pour la parade nuptiale, ou encore un camouflage pour se défendre. Malgré la richesse du nouveau registre fossile de théropodes à plumes, on ne saura sans doute jamais laquelle de ces hypothèses est la bonne. Pour notre part, nous pensons que les



Un dinosaure chinois à quatre ailes

Les gisements fossilifères du Crétacé inférieur (il y a 120 millions d'années) de la province du Liaoning (Nord-Est de la Chine) n'ont pas fini d'étonner le monde paléontologique. Outre des centaines de spécimens d'oiseaux primitifs, ils ont déjà livré les restes de divers dinosaures au corps couvert de plumes plus ou moins évoluées, ce qui apporte une confirmation éclatante à la thèse de l'origine dinosaurienne des oiseaux. De nouveaux spécimens qui viennent d'être décrits dans la revue *Nature* par Xing Xu, Zhonghe Zhou et leurs collègues, de l'Institut de paléontologie et de paléoanthropologie de l'Académie des sciences chinoise, sont plus extraordinaires encore, car ils indiquent comment les ancêtres des oiseaux commencèrent à voler.



Les sédiments lacustres au grain très fin de la formation Jiufotang ont livré aux paléontologues chinois plusieurs spécimens remarquablement conservés d'un petit dinosaure dont les caractères squelettiques montrent qu'il s'agit d'un membre de la famille des Dromaeosauridés. L'animal a reçu nom de *Microraptor* (le « petit voleur ») *gui* en l'honneur du paléontologue chinois Gu Zhiwei. Comme d'autres dinosaures de ces sites du Liaoning, les fossiles en question comportent aussi les restes des plumes qui couvraient le corps de l'animal. Toutefois, leur disposition est étonnante. Similaires aux rémiges (grandes plumes rigides) des oiseaux actuels, de longues plumes sont attachées non seulement aux membres antérieurs, mais aussi aux membres postérieurs et le long de la queue ; cette dernière est très allongée, comme chez l'oiseau primitif *Archéoptéryx*. La présence de rémiges sur les membres postérieurs, et cela jusqu'au niveau du métatarse, est surprenante, car elle indique que les pattes arrière formaient aussi des ailes. Il faut se représenter un dinosaure à quatre ailes… ou à cinq en comptant la queue !

Aujourd'hui, une telle conformation n'existe plus. Les oiseaux ont certes des ailes qui ressemblent à celles de *Microraptor gui*, et qui leur servent à pratiquer le vol battu, mais leurs pattes arrière ne sont pas équipées de rémiges. Comment ce dinosaure ailé pouvait-il se déplacer ? Xing Xu et ses collègues supposent, de façon tout à fait vraisemblable, qu'il devait planer, en utilisant les vastes surfaces portantes constituées par ses quatre ailes et sa queue. Sans doute pouvait-il se lancer de branche en branche comme le font aujourd'hui les écureuils volants grâce aux membranes tendues entre leurs pattes. Il est peu probable qu'il ait couru rapidement lorsqu'il était au sol, car ses longues plumes postérieures devaient le gêner. Était-il capable de battre des ailes ? Il faudra étudier ses articulations pour en juger.

La découverte d'un tel dinosaure renforce l'hypothèse suivant laquelle les ancêtres des oiseaux sont passés par un stade arboricole et planeur, avant d'acquérir la maîtrise du vol battu. Elle affaiblit au contraire la théorie de l'acquisition du vol par des animaux coureurs s'aidant de leurs bras pour accélérer.

Quelle que soit la bonne hypothèse, *Microraptor gui* n'est pas un ancêtre des oiseaux puisque ces animaux existaient déjà depuis longtemps au Crétacé inférieur. En revanche, il illustre un stade évolutif par lequel les ancêtres des oiseaux sont très vraisemblablement passés à une époque plus lointaine. Rappelons que, dès 1915, le zoologue américain William Beebe avait suggéré que les précurseurs des oiseaux étaient passés par un stade qu'il nomma « tétraptéryx » ; les dessins qu'il proposa pour illustrer ce stade, alors purement théorique, ressemblaient de façon étonnante à la reconstitution de *Microraptor gui*. La paléontologie peut être aussi une science prédictive.

Eric BUFFETAUT, CNRS



NATURE

Fossile de *Microraptor gui*, qui vient d'être découvert en Chine. Au centre, une reconstitution.

plumes ont évolué à la suite d'une série d'innovations développementales, qui remplissaient parfois une fonction initiale différente. Quoi qu'il en soit, toutes ces innovations se sont maintenues uniquement parce qu'elles représentaient un avantage en termes de survie.

Les créationnistes et d'autres sceptiques ont longtemps fait des plumes un argument pour remettre en cause la théorie de l'évolution. Désormais, la plume peut servir de cas d'école dans l'étude des innovations évolutives. Son histoire nous apprend que les chercheurs doivent d'abord déterminer les caractères réellement nouveaux, puis examiner comment ils apparaissent au cours du développement, dans les organismes modernes. Grâce à ce nouvel exemple emblématique de la biologie évolutive, les paléontologues résoudront certainement d'autres énigmes.

Richard PRUM, professeur d'écologie et de biologie évolutive à l'Université du Kansas, est le conservateur du Muséum d'histoire naturelle et du Centre de recherche sur la biodiversité de cette université. Alan BRUSH est professeur émérite d'écologie et de biologie évolutive de l'Université du Connecticut.

M. HARRIS, J. FALLON et R. PRUM, *Rapid Communicaion : Shh-Bmp2 signaling Module and the Evolutionary Origin and Diversification of Feahters*, in *Journal of Experimental Zoology*, vol. 294, n° 2, pp. 160 – 176, août, 2002.

R. PRUM et A. BRUSH, *The Evolutionary Origin and Diversification of Feathers*, in *Quarterly Review of Biology*, vol. 77, n° 3, pp. 61 – 295, septembre 2002.

A. BRUSH, *Evolving a Protfeather and Feather diversity*, in *American Zoologist*, vol. 40, n° 4, pp. 631-639, 2000.

© POUR LA SCIENCE - N° 305 MARS 2003

Le dialogue des sens

ARLETTE STRERI

Un nouveau-né reconnaît, dès qu'il le regarde, un objet qu'il a manipulé sans le voir. Les sens, bien qu'ils ne se développent pas tous en même temps, semblent déjà connectés à la naissance.



Rechercher ses clés d'appartement dans un sac à main, tourner la tête vers un son insolite, prendre ses repas, conduire une voiture, sont des exemples de comportements qui mobilisent plusieurs sens. Bien que nous n'y prêtions pas attention, ou qu'il nous semble souvent que nous sollicitions de préférence un seul sens, toutes les activités de la vie quotidienne stimulent plusieurs sens. Les échanges entre l'individu et son environnement sont dits multimodaux.

Comment nos sens se coordonnent-ils ? Certains ont accès aux mêmes propriétés des objets ; par exemple, la vision et le toucher renseignent sur la forme, sur la texture ou sur le volume des objets. D'autres, telles la vision et l'audition, concernent l'espace lointain. Toutefois, dans la plupart des cas, une modalité sensorielle ne peut se substituer à une autre, car chacune d'elles traite des informations qui lui sont propres. La vision n'est sensible qu'aux ondes électromagnétiques (la lumière), le toucher ne réagit qu'à la pression et à la température, l'ouïe ne détecte que les ondes sonores et, enfin, le goût et l'odorat réagissent seulement à des molécules chimiques. Cette polyvalence sensorielle caractérise les ressources de l'être humain indispensables pour percevoir la complexité du monde physique et social. Pourtant, cette pluralité des récepteurs ne nous fait pas percevoir un environnement morcelé et multiple, selon le sens mobilisé : pourquoi nous semble-t-il, au contraire, cohérent et unifié ?

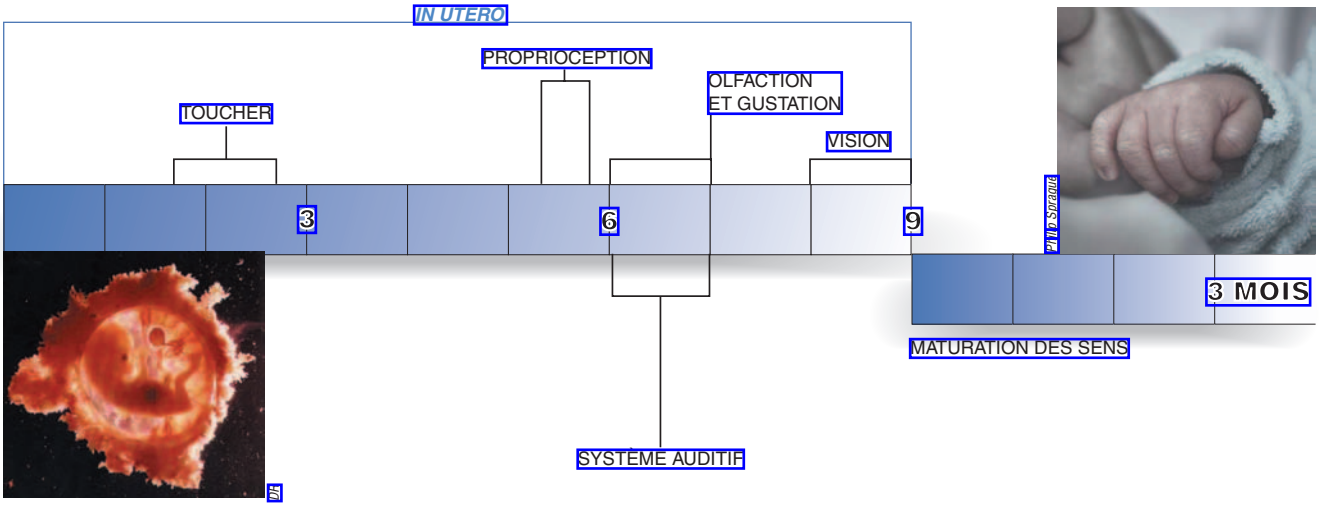
La mosaïque d'informations recueillies doit s'accorder pour que l'organisme puisse répondre correctement à une situation. La question est de savoir comment cette harmonisation est possible avec des sens qui fonctionnent comme des modules apparemment étanches. Comment pouvons-nous attribuer à l'environnement une unité et une stabilité, sachant que, de surcroît, les systèmes sensoriels ne captent que des aspects partiels et spécifiques des objets et des événements ? Comment savoir que l'objet d'art que je tiens dans la main et que je regarde avec admiration est un seul et même objet ? Toutes ces conduites paraissent banales chez l'adulte humain, pourtant, elles supposent l'existence de mécanismes (dits intermodaux) qui rendent les informations cohérentes, et dont il nous faudra comprendre le fonctionnement.

Les psychologues ont surtout étudié la perception, sens par sens, alors que nos comportements supposent l'intégration d'informations provenant de différents systèmes sensoriels. Cette option est sans doute due à la complexité de cette intégration, qui ne s'exprime pas par de simples phénomènes additifs ou soustractifs. Quand nous regardons un objet tout en le manipulant, nous ne le percevons pas mieux que lorsque nous l'observons sans le toucher. De même, nous comprenons aussi bien les paroles d'une chanson quand nous l'écoutons à la radio que



quand elle est chantée à la télévision. Cette démarche modulaire ou « isolationniste » a l'avantage d'insister sur les spécificités de chaque sens et de son organe. Pourtant, elle occulte la question des propriétés traitées par plusieurs sens : le mouvement, la taille, le nombre, etc. Cette question des correspondances entre les différents sens avait déjà été posée par Aristote dans son traité *De l'âme* ; les réponses commencent seulement aujourd'hui à se dessiner.

L'existence même des interactions sensorielles chez le bébé humain a fait l'objet d'un long débat. Aux problèmes déjà soulevés des particularités anatomiques, physiologiques et fonctionnelles de chaque modalité, se superpose celui de leur développement chez l'homme. En effet, nos sens n'émergent et ne se développent pas de façon synchrone. La majorité d'entre eux fonctionnent déjà *in utero (voir la figure 1)*. Le sens du toucher est le premier à réagir à une stimulation sensorielle, par exemple une caresse, dès la septième semaine de vie fœtale. Toutefois, ce sens ne devient pleinement efficace qu'à l'âge de un an. Durant le dernier trimestre de la grossesse, l'audition, le goût et l'odorat imprègnent déjà le fœtus d'événements extérieurs : des sons lui parviennent à travers la paroi utérine ; des goûts et des odeurs via l'alimentation de sa mère. En revanche, la vision ne devient vraiment opérationnelle qu'à la naissance de l'enfant et se développe rapidement pour devenir la modalité privilégiée et dominante chez l'homme dès le sixième mois. Cela signifie-t-il que le bébé vit dans un monde chaotique, morcelé, instable au cours des premiers mois de sa vie ?



1. LES SENS ne se développent pas de façon synchrone : les récepteurs du toucher apparaissent au cours des tout premiers mois chez le fœtus, tandis que le système tactile n'est mature qu'à l'âge de 12 mois. Le fœtus réagit à de fortes luminosités avant la naissance, mais la vision n'est vraiment mature qu'à un an, même si le bébé voit déjà bien avant cet âge.

Les sens sont modulaires et, pourtant, l'environnement nous semble unifié. Pour résoudre ce paradoxe, des arguments extrêmes ont d'abord été avancés avant de faire place, aujourd'hui, à un point de vue plus nuancé. D'après la conception empiriste, la coordination de nos sens ne repose que sur l'expérience et sur l'apprentissage que nous faisons des associations entre sensations différentes. Par exemple, un bébé voit une clochette qu'il peut manipuler et qui émet un son : les trois sensations (visuelle, tactile, auditive) lui parvenant de façon rapprochée et fréquente, le jeune enfant apprendrait à les associer et à donner au même objet son unité malgré trois expériences sensorielles différentes. Cette unité serait ensuite améliorée et cimentée par le langage (dans notre exemple, le mot « clochette »), acquis plus tardivement, et considéré comme un médiateur puissant.

Cette approche, qui a dominé du XVIII^{e} à la première moitié du XX^{e} siècle, est symbolisée par la question de l'Irlandais William Molyneux à son ami britannique John Locke en 1689 : Molyneux demandait si un aveugle de naissance qui, une fois adulte, recouvrerait la vue, différencierait d'emblée – et seulement en les regardant – une sphère d'un cube (l'aveugle sachant évidemment distinguer ces deux formes par le toucher). La réponse à cette question est négative : en général, les aveugles de naissance recouvrant la vue ne reconnaissent pas immédiatement par la vue des objets qu'ils connaissent bien tactilement. Ainsi, l'idée que les sens se coordonnent grâce à un apprentissage associatif dès la petite enfance s'était-elle imposée.

Opposée à la position empiriste, la conception nativiste, dont les racines philosophiques sont aussi très anciennes puisqu'elles remontent à Démocrite, défend l'idée d'une unité primitive des sens, ou d'une perception dite amodale, qui transcenderait tous nos sens. En résumé, les connexions entre les sens seraient innées, et non acquises par le bébé au cours de son apprentissage. Cette position s'est propagée à partir des années 1960, surtout quand les neuroscientifiques américains Barry Stein et Alex Meredith ont mis en évidence, chez le chat, l'existence de neurones dans le colliculus supérieur (zone sous-corticale) qui ne réagissent qu'à une stimulation bimodale (par exemple, tactile et visuelle). Ils ont ainsi prouvé l'existence de bases neuronales de l'intégration intermodale. Des travaux sur les nourrissons, que nous décrirons, ont étayé l'hypothèse de liens innés entre les sens.

Ces deux conceptions, empiriste et nativiste (ou innéiste), paraissent aujourd'hui trop radicales. Nous illustrerons notre propos par deux formes de relations intermodales chez le bébé : la première concerne le transfert entre la vision et le toucher, c'est-à-dire, par exemple, la capacité du cerveau à reconnaître visuellement un objet manipulé ; la seconde a trait à l'appariement entre l'audition et la vision, soit la capacité à relier un son à une scène.

Transfert entre la vision et le toucher

Dans le transfert intermodal, une information prélevée par un sens est utilisée par un autre. Par exemple, un objet palpé dans l'obscurité peut être reconnu visuellement une fois la lumière revenue. Au quotidien, la perception est multimodale (plusieurs sens sont activés en même temps). Alors, deux cas se présentent : soit les sens accèdent à des propriétés distinctes d'un même objet et les différentes informations doivent se coordonner pour préserver l'unité de l'objet (c'était le cas dans l'exemple du bébé et de la clochette). Soit les sens perçoivent la même propriété de l'objet : les informations sont alors redondantes, et le cerveau doit assigner la même valeur à cette propriété bien que les stimulations reçues soient différentes. Par exemple, un objet manipulé et regardé doit conserver sa forme, sa taille et sa texture indépendamment du système sensoriel qui l'explore.

Le transfert entre la vision et le toucher chez le bébé représente, en quelque sorte, une réponse à la question de Molyneux. Un nourrisson est-il capable de reconnaître visuellement un objet qu'il a auparavant exploré avec les mains ? Pour répondre à cette question, nous avons mené plusieurs expériences avec des bébés. Afin de tester ses capacités perceptives, nous utilisons deux comportements naturels du nourrisson : il se familiarise peu à peu avec une situation (phase d'habituation), c'est-à-dire qu'il porte de moins en moins d'intérêt aux objets qu'il connaît ; en revanche, il réagit à ce qui est nouveau en explorant plus longuement ce qu'il découvre.

© POUR LA SCIENCE - N° 305 MARS 2003

Dans notre expérience, le bébé est semi-allongé dans un siège et un grand écran de tissu l'empêche de voir ses mains *(voir la figure 2)*. Il explore librement les objets avec ses mains, mais ne les voit pas. L'expérience se déroule en deux étapes : dans la première, le bébé explore l'objet avec les mains. Pendant cette phase dite d'encodage, il doit prélever des informations sur les propriétés de l'objet et les garder en mémoire. On s'attend à ce que le bébé tienne l'objet de moins en moins longtemps à mesure qu'on le lui donne (habituation). Dans la seconde étape, dite de reconnaissance, on montre au bébé l'objet manipulé et un objet nouveau. Le transfert intermodal a lieu quand le bébé regarde plus longtemps l'objet nouveau que celui qui lui est tactilement familier : reconnaissant l'objet familier, il s'en désintéresse au profit du nouveau qu'il découvre. Le déroulement de ce scénario paraît simple. En réalité, il repose sur des mécanismes psychologiques complexes qui exigent du bébé une attention, une mémoire, ainsi qu'un traitement perceptif et cognitif importants.

Le bébé prélève avec sa main des informations sur la forme, la taille, le volume, la texture, le poids et la température de l'objet, mais il n'en extrait aucune sur la couleur, traitée spécifiquement par la vision. Une fois qu'il voit les objets, il doit opérer un choix : lequel est nouveau ? Le bébé découvre la couleur de l'objet, mais elle est peu pertinente pour le choix qu'il doit effectuer. Le poids et la température, auparavant perçus par la main, ne sont pas pertinents non plus. En revanche, il se sert des propriétés communes aux deux modalités, comme la forme, la taille et le volume et, dans une moindre mesure, la texture, pour déterminer si l'objet présenté est identique ou non à l'objet palpé. Au final, le bébé écarte les spécificités modales, retient les informations redondantes et apparie l'objet tactile et l'objet visuel qui partagent des caractéristiques communes. Ainsi, un mécanisme de catégorisation se met en place : le bébé classe, en objet familier ou inconnu, au lieu d'entamer un nouvel apprentissage systématique des deux objets, qui lui ferait perdre du temps.

L'attrait de la nouveauté

Pour répondre aux propositions de la philosophie empiriste, nous devions mener des expériences avec des bébés dès leur naissance et, en tout cas, avant l'âge de cinq ou six mois. Après cet âge commence l'étape de la coordination entre la préhension et la vision : le bébé saisit les objets qu'il voit et porte à sa vue les objets qu'il tient dans la main. Une exploration bimodale s'exerce alors. Nous avons réalisé des expériences avec des nouveau-nés âgés de trois jours en moyenne (le plus jeune avait 16 heures). Le bébé est semi-allongé sur un siège, et on dépose un petit cylindre dans sa main *(voir la figure 3)*. On s'assure que le bébé ne voit jamais l'objet au cours de l'étape d'encodage. Lorsque le bébé lâche de plus en plus souvent l'objet, on arrête de le déposer dans sa main : l'étape de reconnaissance visuelle commence. Un écran est retiré et laisse apparaître deux objets de grande taille, dont la reproduction du cylindre, dix fois plus volumineux que le cylindre manipulé. On enregistre le nombre de fois où le bébé fixe chaque objet des yeux, ainsi que la durée de chaque fixation. Un second groupe de bébés (de contrôle) suit seulement cette étape, afin de vérifier que, dès la naissance, les bébés ne préfèrent pas l'un ou l'autre des objets.

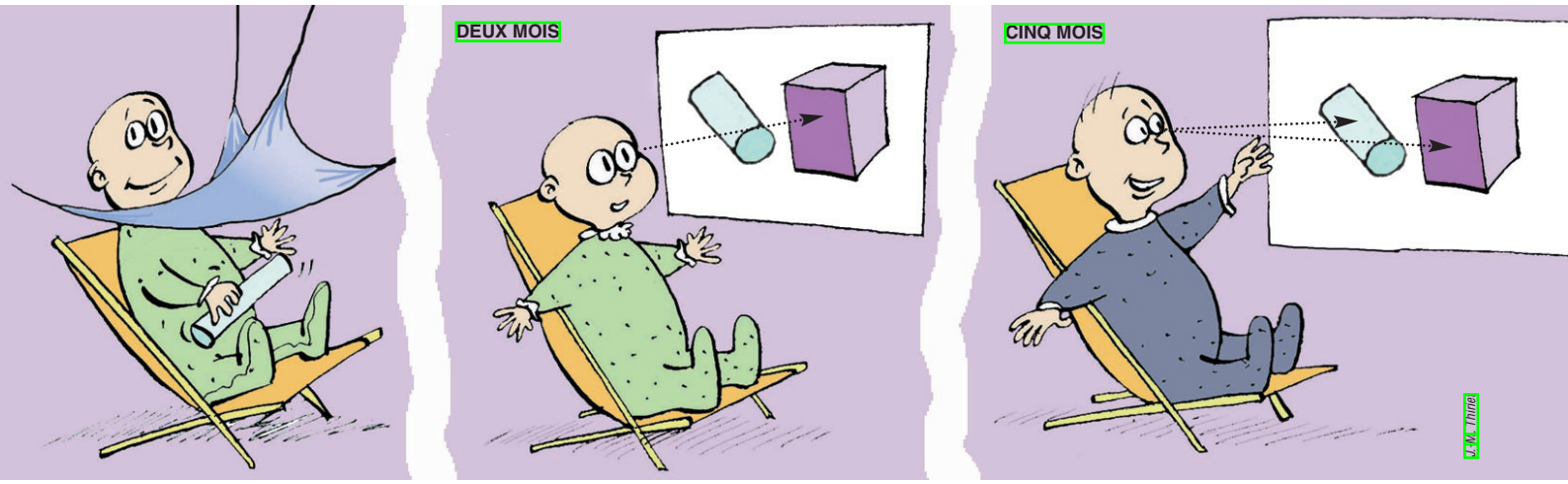
D'après nos résultats, les nouveau-nés qui ont manipulé le petit cylindre s'orientent préférentiellement vers l'objet nouveau, alors que les bébés du groupe de contrôle ne marquent aucune préférence. Dans les deux groupes, le regard des bébés change souvent d'objet. Cependant, les saccades sont plus fréquentes chez les bébés du premier groupe. Ainsi, nous avons établi que le nouveau-né est capable de reconnaître un objet, en le voyant, alors qu'il l'a seulement manipulé sans le voir auparavant. Un transfert intermodal entre le toucher et la vision semble donc exister dès la naissance. À la question de Molyneux, la réponse du bébé est positive.

D'après des études réalisées par le psychologue américain Andrew Meltzoff, de l'Université de Seattle, le nourrisson âgé de un mois est encore capable de reconnaître visuellement, d'après la texture, et non la forme, comme dans notre expérience, un objet qu'il a préalablement exploré oralement (une tétine qui présente ou non des aspérités). À ce jour, les réplications de cette expérience n'ont pas permis de retrouver ce résultat, mais une expérience réalisée dans des conditions similaires par la psychologue américaine Eleanor Gibson, de l'Université de Cornell, chez des bébés du même âge, montre l'existence d'un transfert d'informations sur la substance : on donne à des bébés une tétine dure ou molle ; puis on leur montre une grande tétine qui bouge de manière rigide ou flexible. Les bébés regardent de préférence le type de tétine qu'ils n'ont pas eu en bouche.



A. Stern

2. LE BEBE découvre un objet en le manipulant, mais, dans cette expérience, il ne le voit à aucun instant, car un écran blanc dissimule ses mains. À mesure qu'il explore l'objet, il s'en désintéresse et le lâche de plus en plus fréquemment jusqu'à refuser de le prendre : c'est la phase d'habituation.



3. LE BEBE PALPE UN PETIT CYLINDRE sans le voir. Après la phase d'habituation, on lui montre deux objets, le même cylindre et un cube. Le nouveau-né et le bébé de deux mois regardent de préférence l'objet nouveau (le cube), ce qui signifie qu'ils reconnaissent visuellement le cylindre qu'ils ont manipulé, et s'en désintéressent au profit du nouveau : le transfert intermodal a eu lieu. En revanche, le bébé de cinq mois ne manifeste aucune préférence : il fixe aussi souvent et aussi longtemps le cylindre que le cube.

Une question se pose néanmoins. Si les échanges d'informations du toucher à la vision sont possibles, l'inverse se vérifie-t-il, c'est-à-dire le transfert de la vision au toucher ? Si oui, le statut d'une unité primitive des sens serait définitivement établi, sorte de fusion ou confusion entre les sens à la naissance d'où chaque modalité émergerait et acquerrait sa spécificité. Afin de tester cette hypothèse, nous avons étudié le transfert entre le toucher (dans son mode manuel) et la vision, et réciproquement. Le bébé devait reconnaître visuellement un objet exploré tactilement, et à l'inverse, il devait reconnaître en le touchant un objet précédemment regardé. Nos expériences ont révélé que les bébés âgés de deux mois sont capables de reconnaître la forme d'un objet préalablement manipulé, mais qu'ils sont incapables de reconnaître avec leur main un objet déjà vu. À cinq mois, le résultat s'inverse : les bébés sont capables de reconnaître par la seule palpation un objet déjà vu, mais ils ne sont plus capables de reconnaître visuellement un objet tactilement familier. L'absence d'un transfert réversible est attestée à ces deux âges, mais également au cours du développement, tant chez le bébé que chez l'enfant, voire chez l'adulte.

L'explication de ces phénomènes varie avec l'âge des bébés. À l'âge de deux mois, cette non-réversibilité est essentiellement imputable à l'immaturité du mode manuel de l'enfant, encore incapable d'explorer un objet de manière efficace en peu de temps. À cet âge, la vision est plus efficace pour extraire les informations sur les propriétés des objets. La tenue des objets se révèle juste suffisante pour servir de base à un transfert du toucher à la vision, mais non l'inverse. La relation de transfert s'établit à partir de la modalité la plus primitive, c'est-à-dire le toucher.

À cinq mois, le bébé dispose d'une perception manuelle plus développée qu'à deux mois, mais perd provisoirement cette fonction, lorsque la main devient surtout un outil de transport des objets dans l'espace. Le bébé de cinq mois reconnaît un objet qu'il regarde mais, dès qu'il le tient, c'est pour le déplacer et non pour l'explorer manuellement. À partir de cet âge, la main entre sous contrôle visuel. D'ailleurs, le bébé n'accepte plus l'écran et cherche à l'écarter, car il l'empêche de voir ce qu'il tient. Le système épaule-bras-main prédomine et le bébé s'en sert tel un instrument pour élargir l'exploration de son environnement. Lorsque vers six mois, le bébé découvre les objets à la fois par la vue et par le toucher, l'unité des sens n'est pas détruite, mais se trouve renforcée. La modalité tactile partage son activité exploratoire entre le mode oral et le mode manuel, provisoirement en compétition, pour extraire toutes les propriétés de l'objet que le bébé regarde.

Au final, la réponse des bébés à la question de Molyneux est positive : les bébés reconnaissent visuellement un objet qu'ils ont manipulé sans le voir. L'hypothèse empiriste (apprentissage associatif) est infirmée puisqu'une relation entre la vision et le toucher se trouve très précocement mise en évidence. L'hypothèse d'une unité primitive des sens est également invalidée puisque les transferts ne sont pas réversibles.

Des spectateurs perspicaces

Contrairement au toucher, l'ouïe et la vision explorent l'espace lointain. Ces deux sens apparaissent interchangeables : les défaillances visuelles sont d'ailleurs, en partie, compensées par l'écoute. Le monde est ponctué d'événements à la fois visuels et sonores, et beaucoup de nos objets familiers émettent des bruits : un robinet qui fuit, une voiture qui passe… Le langage parlé, où des sons articulés accompagnent le mouvement des lèvres, les arabesques de la danse, les mouvements du chef d'orchestre durant un concert, en sont des exemples. L'impact entre deux surfaces produit un son qui, s'il se faisait entendre avant ou après le choc, donnerait à la situation un caractère incongru. Quand l'événement visuel devance l'événement sonore, par exemple, au cours d'un orage, la relation entre l'éclair et le tonnerre doit être expliquée à l'enfant.

La méthode la plus fréquemment utilisée pour établir les capacités d'appariement intermodal entre des événements visuels et auditifs chez le bébé est celle du « choix préférentiel ». Le bébé voit deux films présentés en même temps. Une bande sonore est associée à l'un des films. La source sonore est située entre les deux écrans de sorte que le bébé ne puisse établir un lien entre l'image et le son, en se fiant à la localisation de la source sonore. On enregistre l'orientation du regard et les fixations visuelles du bébé pour savoir à quelle séquence visuelle il apparie la séquence

© POUR LA SCIENCE - N° 305 MARS 2003

sonore. On s'attend à ce que le bébé préfère regarder la scène qui correspond à la bande son plutôt que l'autre (contrairement aux expériences précédentes, où le bébé préfère l'objet nouveau et différent). Ainsi, il rétablit la congruence entre les événements sonore et visuel simultanés.

D'après les études, les capacités des bébés à apparier des scènes visuelles et des sons s'améliorent avec l'âge, à mesure qu'ils progressent à la fois dans la perception de la synchronie et dans la compréhension de la structure d'un objet, composé d'un ou de plusieurs éléments. Le bébé détecte des événements simultanés avant d'être capable de saisir la structure des objets. Ainsi, quand on montre à un bébé de trois mois une balle qui heurte une surface, il se montre déjà surpris si le son n'est pas émis au moment de l'impact. En revanche, seuls les bébés âgés d'au moins six mois associent correctement différents sons aux hochets de constitution distincte qui les ont émis. Ainsi, dans une expérience, on montre à des bébés deux hochets en forme de cylindre transparent. L'un contient une grosse bille, l'autre plusieurs petites billes. Ces hochets agités de bas en haut émettent des sons qui dépendent de leur contenu. On enregistre ces sons. Les bébés âgés de six mois, ceux de quatre mois dans certaines conditions, mais pas les plus jeunes, regardent préférentiellement le hochet auquel correspond la bande son conforme à sa structure.

La capacité d'apparier deux événements émerge donc entre quatre et six mois. Cependant, en 1999, Alan Slater, et ses collègues de l'Université d'Exeter, en Grande-Bretagne, ont révélé que les nouveau-nés sont déjà capables de relier des informations visuelles et auditives arbitraires, après quelques essais au cours desquels on leur fait entendre un son à chaque fois qu'on leur montre une figure géométrique colorée. Ces expériences révèlent une relation intermodale précoce guidée par la simultanéité des informations présentées.

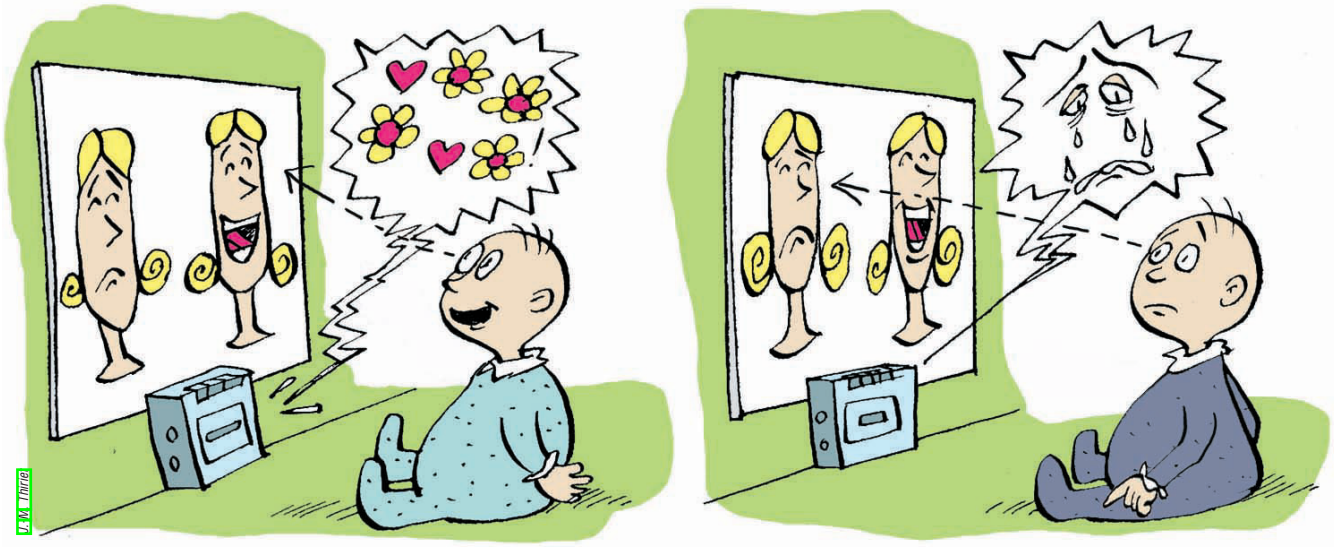
Les émotions sont aussi perceptibles à la fois visuellement et auditivement. Elles informent sur l'état mental de celui qui les exprime. Il est donc important de savoir si, dans les relations sociales et affectives, le bébé peut détecter et comprendre cet appariement. L'expérience est fondée sur la méthode du choix préférentiel. On projette deux films à des bébés âgés de cinq et sept mois *(voir la figure 4)*. Le premier montre une femme d'apparence gaie, tandis que l'autre semble triste. Une bande son produit tantôt un discours joyeux, tantôt un discours triste. Les bébés préfèrent regarder le visage en adéquation avec le discours, et ce, dès cinq mois ! Lorsque le visage est partiellement masqué, les bébés réussissent le mieux les appariements quand ils voient les yeux. Par ailleurs, les jeunes bébés ne réagissent plus quand les visages sont renversés.

Doublage et ventriloque

La perception du discours est un processus essentiellement auditif. On n'est certes pas obligé de regarder la personne qui parle, et le bébé dans son berceau entend souvent des flux de paroles sans voir qui les exprime. Néanmoins, pour suivre une conversation dans un endroit bruyant, l'adulte s'aide de la vision des lèvres de celui qui parle. Parfois, l'information visuelle perçue en appui du discours modifie la perception auditive. Par exemple, dans l'effet McGurk, du nom du psychologue anglais Harry McGurk, on voit sur un écran une personne qui prononce « ba », mais on envoie le son « da » aux oreilles du spectateur. Son cerveau est confronté à un conflit entre les informations visuelles et auditives. Il trouve un compromis : quand on interroge le spectateur, il dit qu'il entend « ga ». Les doublages des films étrangers doivent prendre en compte cet effet dans la traduction des dialogues.

Les ventriloques exploitent un autre phénomène, dit de capture visuelle : la marionnette remue la bouche et les lèvres, tandis que le ventriloque parle sans bouger les lèvres. Le spectateur a l'impression que la marionnette parle : son attention est « capturée » par les mouvements de la marionnette et la voix du ventriloque semble provenir de la bouche de la marionnette.

L'acquisition du langage repose en partie sur des événements simultanés visuels et auditifs qui font appel à des mécanismes fonctionnels intermodaux. Les expériences conduites par Patricia Kuhl, de l'Université de Washington, ont montré que les bébés réalisent des appariements entre la forme des lèvres et les sons émis par un locuteur. Des



4. DEUX VISAGES, l'un joyeux, l'autre triste, sont présentés à un bébé. Une bande sonore diffuse un discours tantôt gai, tantôt triste. Quand le discours est enjoué, le bébé, dès cinq mois, regarde spontanément le visage qui exprime la joie. Quand le message est triste, il tourne son regard vers le visage maussade. Dès cet âge, il relie des informations visuelles et auditives.



5. DÈS LA NAISSANCE, le bébé imite des mimiques des adultes, par exemple, quand on lui tire la langue. À partir d'une information visuelle, il envoie l'ordre correct pour imiter la grimace qu'il voit : il établit une relation entre des informations proprioceptives (qui lui indiquent par exemple qu'il tire la langue) et des informations visuelles.

bébés âgés de 18 à 20 semaines voient deux visages. Les lèvres de l'un prononcent le son /i/ (lèvres serrées, position élevée de la langue) ; les autres lèvres prononcent le son /a/ (bouche ouverte, position basse de la langue). Les sons sont émis par un haut-parleur situé entre les deux visages. Les bébés regardent plus longtemps le visage dont les lèvres paraissent prononcer le son émis par le haut-parleur que l'autre visage. Cette correspondance auditivo-visuelle se généralise à d'autres oppositions de voyelles, voire de syllabes.

Les fondements de la connaissance de soi

Nous avons jusqu'ici développé des exemples où la perception sensorielle sert à découvrir le monde extérieur, mais elle sert aussi à se découvrir. Comment le bébé apprend-il à se connaître, à établir un schéma de son corps pour se percevoir différent des autres ? Cette compétence est-elle présente très précocement ? Ces questions sont fondamentales : pendant près d'un siècle, les théories classiques du développement menées par Piaget, par Wallon ou par Freud ont considéré le nouveau-né comme un prolongement de sa mère, confiné dans une relation fusionnelle ou confusionnelle, dans laquelle aucune dissociation n'était possible. Ces théories sont désormais remises en cause, notamment par les deux observations suivantes : le nouveau-né porte souvent ses mains au contact de son visage et de sa bouche. Il acquiert ainsi une expérience perceptive et sensori-motrice qui lui permet d'identifier son corps. Elle met en jeu plusieurs sens et provient du double contact tactile entre le visage, qui reçoit une stimulation, la main qui la donne, et dans l'information extraite du mouvement du bras. Quand le bébé touche sa bouche avec sa main, cette stimulation de soi n'est jamais précédée du réflexe de fouissement (orientation de la bouche vers la stimulation), tandis que ce réflexe apparaît toujours lors d'une stimulation externe. Très jeune, le bébé est donc capable de différencier une stimulation externe d'une stimulation qu'il commande.

La deuxième observation porte sur sa capacité d'imitation. Quand un adulte se place face à un bébé, qu'il lui tire la langue ou qu'il cligne des yeux, le bébé, dès la naissance, reproduit ces grimaces *(voir la figure 5)*. Cette imitation suggère que le nouveau-né a une connaissance précâblée de son visage, bien qu'il ne soit pas encore visible de lui, et qu'il peut sélectionner, parmi un ensemble de réponses possibles, la mimique analogue à celle d'un congénère. Ainsi, le bébé possède une richesse d'expériences tactiles et proprioceptives qui lui fournissent des informations suffisantes pour se distinguer de l'autre, lorsqu'il est touché, lorsqu'il se touche et lorsqu'il touche autrui.

En conclusion, les relations intermodales ne constituent pas une somme de compétences de chaque sens. Il s'agit de phénomènes très complexes qui dépendent non seulement du couple de modalités concernées (toucher/vision ou vision/audition), des contraintes imposées par le développement de chaque système, mais également des informations que chaque sens peut prélever dans l'environnement. Dès la naissance, le bébé est capable de discriminer différents stimulus, de détecter des changements dans son environnement, quel que soit le sens qui est sollicité par ce changement. Son oreille détecte différents sons, sa main différencie des objets de forme et de texture différentes, ses yeux préfèrent regarder des cibles hétérogènes (tapissées de papier journal par exemple) que des cibles homogènes, même colorées. Il préfère l'odeur de sa mère à celle d'une autre mère, etc. Ces compétences de discrimination constituent la base des relations intersensorielles. En outre, le bébé a une structure neuronale qui lui permet d'établir des appariements. Les signaux biologiquement importants pour répondre de façon efficace et rapide aux problèmes posés par l'environnement sont, dès le début de la vie, organisés de façon intermodale, et jouent un rôle dans l'apprentissage.

Arlette STRERI est professeur de psychologie de l'enfant à l'Institut de psychologie de l'Université René Descartes, à Boulogne-Billancourt.

A. STRERI et E. GENTAZ, *Cross-modal recognition of shape from hand to eyes in human newborns*, in *Somatosensory and Motor Research*, vol. 20, pp. 11-16, 2003.

Y. HATWELL, A. STRERI et E. GENTAZ, *Toucher pour connaître. Psychologie cognitive de la perception tactile manuelle*, Éditions Presses Universitaires de France, 2000.

D. LEWKOWICZ, *The development of intersensory temporal perception : an Epigenetic Systems/limitations View*, in *Psychological Bulletin*, vol. 126, pp. 281-308, 2000.

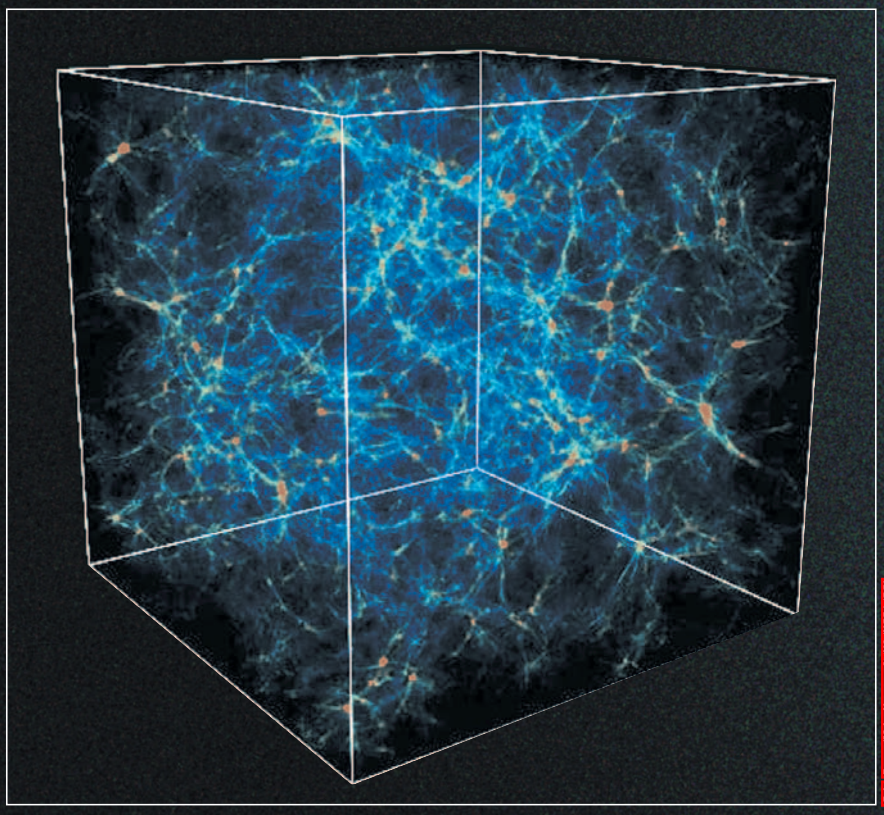
A. STRERI, *Les réponses du bébé à Molyneux*, in *Le problème de Molyneux aujourd'hui : Essais de philosophie de la perception*, Éditions Presses Universitaires de France, pp. 161-178, 1997.

© POUR LA SCIENCE - N° 305 MARS 2003

Le côté obscur

DAVID CLINE

La matière sombre s'est d'abord manifestée à l'échelle cosmique, mais nous ne comprendrons vraiment sa nature que lorsque nous réussirons à l'isoler dans nos laboratoires terrestres.

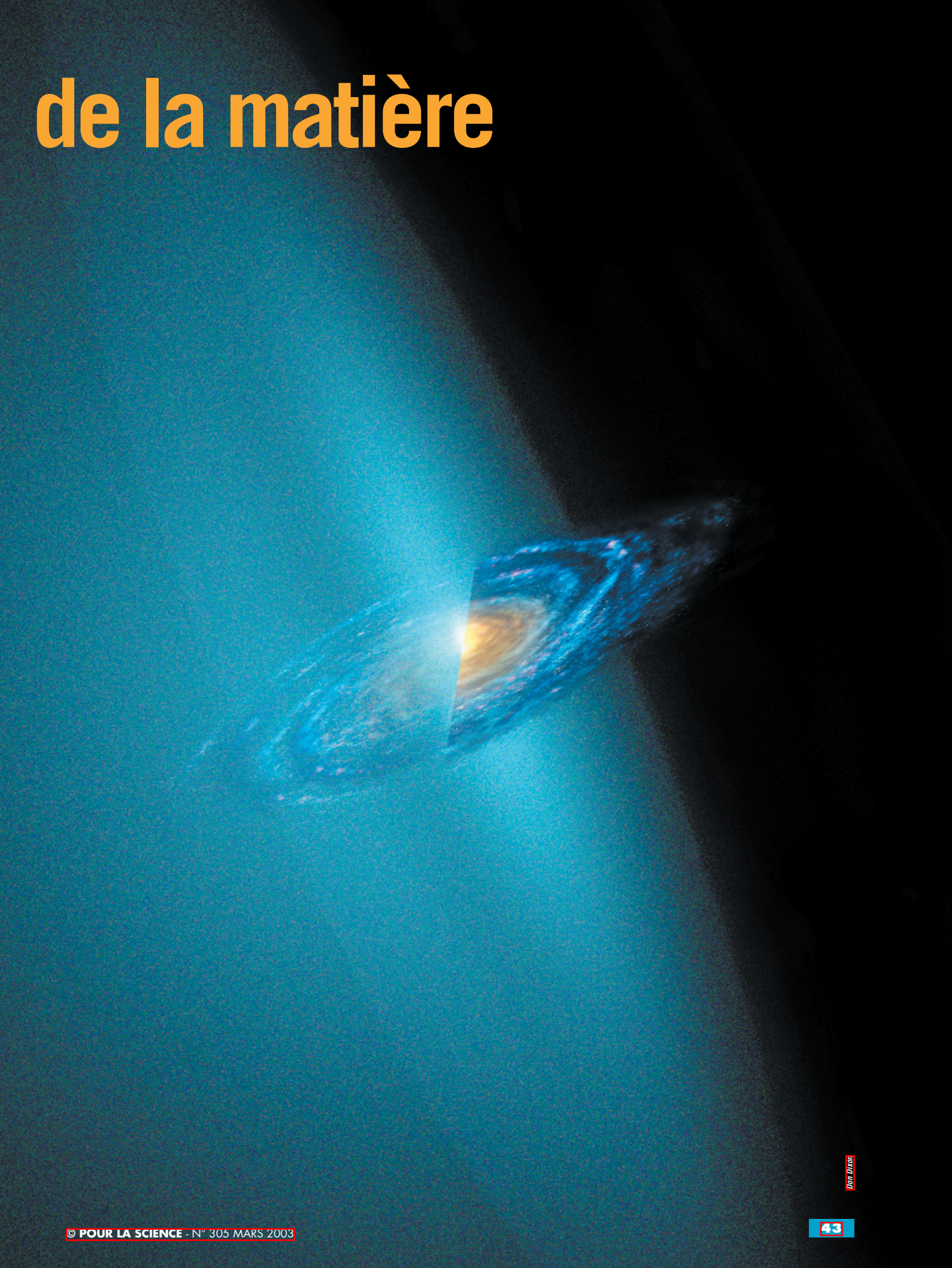


G.L. Bryan/M.L. Norman/U. IL/NCSA; GC3

1. SI NOUS POUVIONS VOIR LA MATIERE NOIRE, nous ne reconnaîtrions pas la Voie lactée *(page de droite)*. Le disque spiralé qui nous est familier et qui contient la plupart des étoiles est, en réalité, enveloppé d'un épais brouillard de particules de matière noire. Les astronomes pensent que ce brouillard dense est dix fois plus massif que le disque, et presque dix fois plus grand. Toutefois, leurs mesures sont assez peu précises. Nous sommes cependant convaincus que la matière noire existe, à la fois parce qu'elle se manifeste dans le mouvement des étoiles de la galaxie, et parce que sa présence est déduite des simulations *(ci-dessus)* de formation des galaxies à partir des fluctuations de densité du plasma primordial.

© POUR LA SCIENCE - N° 305 MARS 2003

de la matière



Don Dixon

Tels les navigateurs de l'Antiquité découvrant que la Terre est ronde, notre génération s'aperçoit que le monde n'est pas une simple extrapolation de l'image familière que nous en donne notre voisinage. À l'échelle cosmique, l'Univers est dominé par une substance étrange et invisible. Ce que nous voyons, les étoiles, les nuages de gaz et de poussières et toute la matière ordinaire représentent moins de cinq pour cent de sa masse totale : étoiles et galaxies ne sont que des débris ballottés par les flots d'une mer invisible. Nous savons très peu de choses sur ce mystérieux océan. De surcroît, il y a quatre ans, on a découvert que cette nouvelle substance ne constitue qu'un tiers de la masse totale du cosmos, les deux autres tiers étant faits d'une nouvelle forme d'énergie. Les termes que nous employons pour désigner ces deux constituants principaux de l'Univers, la matière noire et l'énergie sombre, reflètent hélas notre ignorance de leur nature exacte.

Depuis 70 ans, les astronomes accumulent des preuves de l'existence de la matière noire, notamment en analysant le mouvement des étoiles dans les galaxies spirales ou celui des galaxies dans les amas et les superamas. Cependant, ces preuves sont indirectes et ne permettent pas de rejeter définitivement les autres hypothèses, telles que la modification des lois de la physique aux échelles cosmiques, par exemple. Par ailleurs, les observations ne nous renseignent pas beaucoup sur les propriétés de l'hypothétique matière noire. Tout ce que nous savons, c'est que la matière noire forme des grumeaux où s'ancrent les galaxies et autres grandes structures du cosmos (les amas et les superamas de galaxies), mais qu'elle ne saurait se condenser en astres plus compacts, étoiles ou planètes. Elle est vraisemblablement constituée de particules élémentaires d'un type encore inconnu. Quant à l'énergie sombre, substance distincte ajoutée au tableau en 1998, elle serait uniformément répartie dans l'espace et expliquerait l'accélération de l'expansion universelle. Désormais, il revient à la physique des particules, et non plus seulement à l'astronomie, d'établir dans le détail la vraie nature de ces substances étranges. Depuis huit ans, les deux disciplines ont mis en commun leurs ressources afin d'inventer et de mettre en œuvre de nouveaux outils capables de détecter et d'étudier la matière noire en s'inspirant des techniques qui se sont révélées si fructueuses pour l'analyse de particules ordinaires. Plutôt que d'étudier indirectement la matière noire en observant des objets lointains, nous voulons désormais la traquer sur Terre.

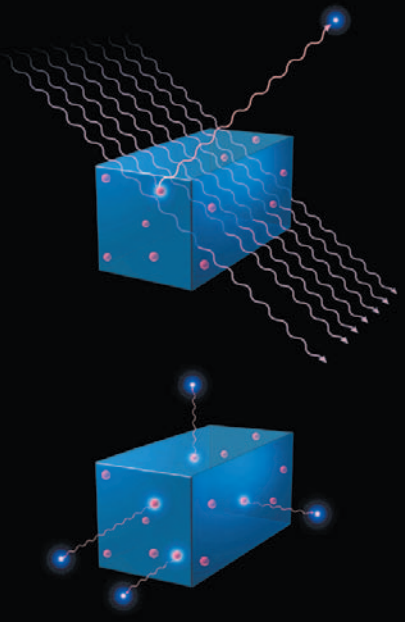
La recherche des particules de matière noire est l'une des expériences de physique les plus difficiles jamais entreprises (la recherche des particules d'énergie sombre est encore moins envisageable, et les chercheurs y ont renoncé, du moins pour l'instant). Pourtant, de notables progrès ont été réalisés. En 1994, lors du premier symposium sur ce sujet, physiciens et astrophysiciens exprimaient leur incrédulité quant à la possibilité d'observer un jour de la matière noire grâce à un détecteur de particules installé sur la Terre. Aujourd'hui, la sensibilité des détecteurs a été multipliée par 1 000 et un nouveau facteur 1 000 sera peut-être bientôt atteint par les constructeurs d'instruments. Ces détecteurs ont franchi le seuil minimal de sensibilité à partir duquel la détection des particules pressenties pour constituer la matière sombre devient envisageable. Nous saurons alors si elle existe vraiment, ou si, au contraire, nous devons bouleverser les théories sur lesquelles repose la physique moderne.

De l'autre côté du miroir

Que savons-nous pour le moment des particules qui constituent la matière noire ? Les observations astronomiques nous donnent quelques pistes. Il ne peut s'agir de matière « baryonique », c'est-à-dire de protons, de neutrons, ni de quoi que ce soit qui ait été autrefois constitué de protons ou de neutrons, telles des étoiles massives qui seraient devenues des trous noirs. En effet, la théorie du Big Bang établit de façon assez précise la quantité de matière baryonique qui était présente dans les premières minutes de l'histoire cosmique : cette matière participa à la « nucléosynthèse primordiale », c'est-à-dire aux réactions de fusion nucléaire qui, avant même l'existence des étoiles, produisirent les premiers éléments chimiques du tableau périodique. Or, les quantités d'hélium, de deutérium et de lithium qui ont été produites de cette façon sont connues assez précisément et elles indiquent qu'il n'y a jamais eu assez de matière baryonique pour constituer toute la masse de l'Univers. Par ailleurs, les particules de matière sombre doivent être électriquement neutres, sinon, elles seraient sensibles à la force électrique, elles interagiraient fortement avec les protons et les électrons dans la matière ordinaire, elles pourraient rayonner des ondes électromagnétiques (de la lumière) : bref, elles perdraient leur proverbiale discrétion.

Les neutrinos, distincts des baryons, électriquement neutres et peu enclins à interagir avec la matière ordinaire ont longtemps constitué des candidats de choix. Malheureusement, la masse qu'on leur attribue depuis peu est trop faible pour qu'ils constituent une fraction significative de la matière noire. On estime que la contribution des neutrinos est du même ordre de grandeur que celle des étoiles. De plus, précisément à cause de leur faible masse, la vitesse moyenne des neutrinos était très élevée aux premiers temps de l'Univers. On les qualifie

Peut-on voir l'invisible ?



Selon les théories invoquées par les physiciens pour expliquer leur existence (théories dites de supersymétrie), les particules de matière noire, bien que peu enclines à interagir avec les atomes ordinaires, sont néanmoins sensibles à l'interaction nucléaire faible. De ce fait, elles ont une probabilité non nulle quoi que très faible d'interagir avec les noyaux de matière ordinaire.

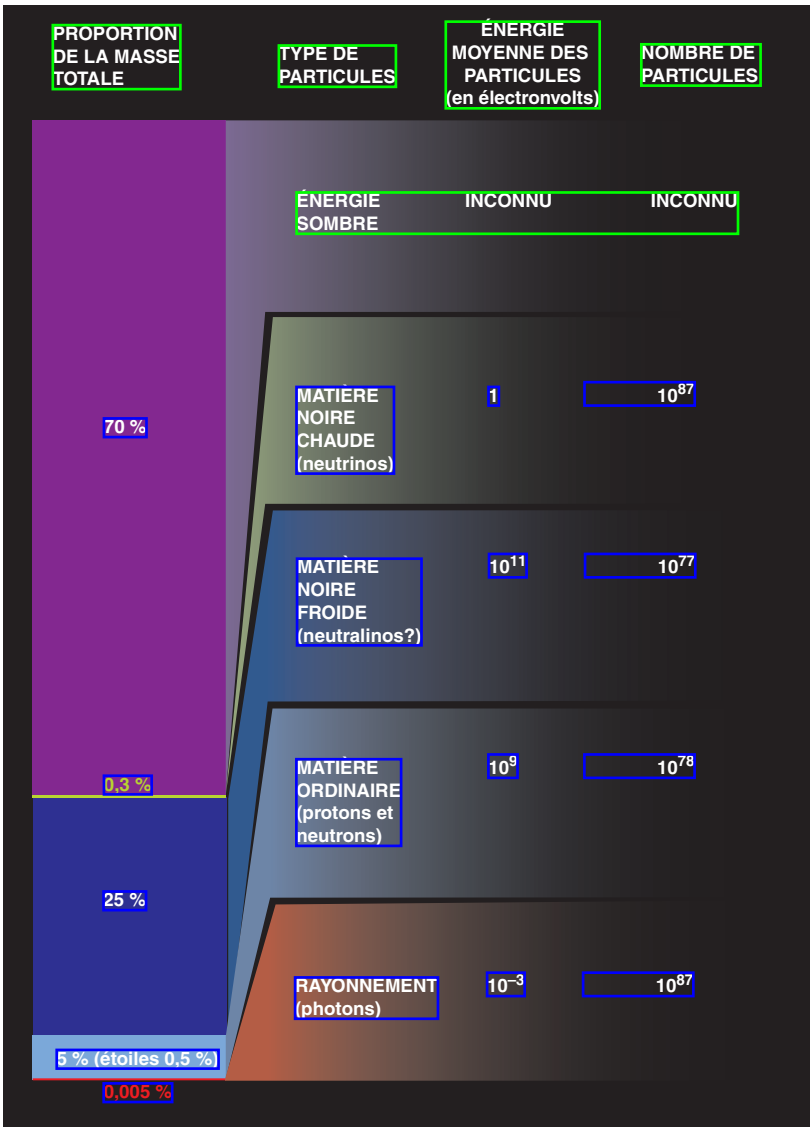
Quand l'une de ces particules interagit avec un noyau atomique, ce dernier recule, bouscule les atomes voisins qui libèrent de l'énergie sous forme de chaleur ou de lumière. La véritable difficulté est de distinguer cette libération d'énergie de processus plus banals, telles les désintégrations radioactives.

pour cela de « matière noire chaude ». Or, si l'essentiel de la matière noire avait été chaud, il aurait dispersé les grumeaux du plasma primordial qui ont, depuis, formé les galaxies et les amas de galaxies. Il faut donc que la majeure partie de la matière noire soit « froide » (c'est-à-dire que la vitesse moyenne des particules de matière noire ait été notablement inférieure à celle de la lumière aux premiers temps de l'histoire cosmique).

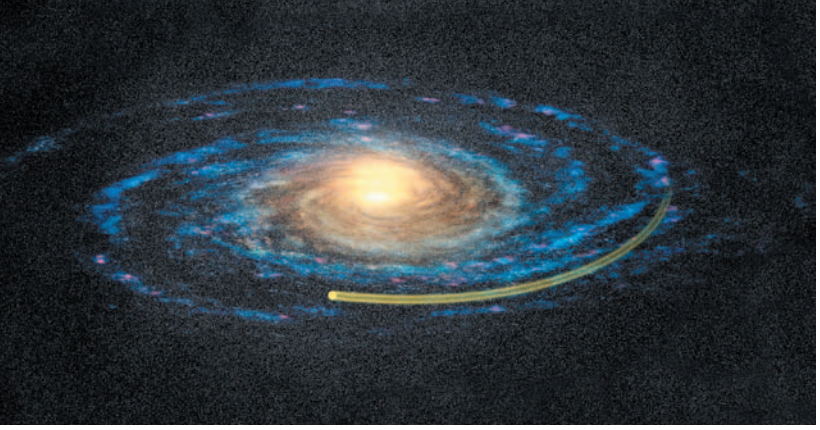
Ainsi, physiciens et astrophysiciens recherchent une particule non baryonique, électriquement neutre, c'est-à-dire ressemblant un peu au neutrino, mais beaucoup plus lente et massive. Leur problème est que le modèle standard de la physique des particules élémentaires ne prévoit rien de ce genre. Heureusement, certaines extensions du modèle standard, développées pour des raisons tout à fait indépendantes des besoins de l'astronomie, offrent, elles, de nombreux candidats plausibles. Parmi ces extensions, la plus étudiée étant, de loin, la supersymétrie, nous allons l'examiner de plus près.

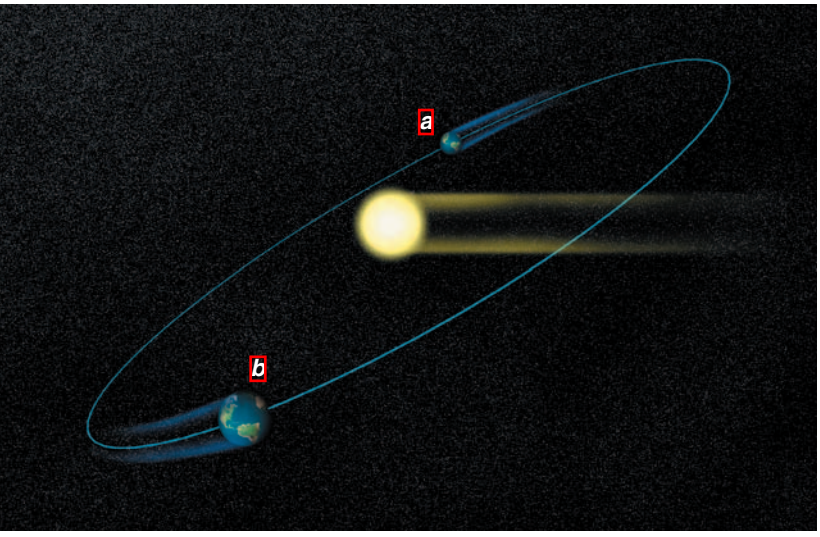
Les physiciens des particules postulent l'existence d'une nouvelle symétrie dans la nature, la supersymétrie, qui associe à chaque particule de spin entier (ou boson) une particule de spin demi-entier (ou fermion), et réciproquement. Chaque particule connue étant ainsi dotée d'une « superpartenaire », la supersymétrie postule l'existence de particules entièrement nouvelles, ce qui la rend particulièrement attrayante pour les chasseurs de matière noire. De plus, d'après la théorie, les superpartenaires sont toutes plus lourdes que les particules connues et plusieurs rassemblent les caractéristiques que l'on attribue à la matière noire froide. Celle qui retient le plus l'attention est le neutralino, un fermion superpartenaire à la fois du photon (boson qui transmet la force électromagnétique) et du boson Z° (qui transmet une interaction nucléaire dite « faible »). Remarquons que le nom de neutralino est assez malheureux, car il ressemble à « neutrino », bien que ces deux particules n'aient aucun lien de parenté (même si elles partagent superficiellement quelques propriétés). Le neutralino est plus lourd que toutes les particules connues, mais c'est la plus légère des particules supersymétriques. Pour cette raison, le neutralino est nécessairement stable : une superparticule instable se désintègre en deux superparticules plus légères, ce qui est impossible pour le neutralino. Outre sa masse importante et sa charge électrique nulle, cette stabilité est une raison supplémentaire pour en faire la cible privilégiée des chasseurs de matière noire.

Dans le cadre du modèle du Big Bang, on sait estimer le nombre de neutralinos qui ont été créés à l'intérieur du plasma primordial, au tout début de l'histoire cosmique. Ce plasma était une soupe brûlante constituée de tous les types de particules. Aucune particule n'y survivait longtemps : elle entrait en collision avec une autre particule et produisait de nouvelles entités, elles-mêmes vouées à de très brèves existences. Ainsi, par exemple, la collision de deux photons pouvait produire un électron et un positon, qui, chacun, n'allaient pas tarder à rencontrer dans la foule leur antiparticule, restituant alors leur énergie de masse sous la forme de photons semblables à ceux qui leur avaient donné naissance. À un instant donné, ces destructions et ces créations s'équilibraient et le nombre moyen de particules de chaque espèce était fixé. Toutefois, tandis que le plasma se diluait et se refroidissait, la probabilité des collisions et leur énergie diminuaient. Ainsi, par exemple, il vint un moment où l'énergie moyenne des photons n'était plus suffisante pour produire des paires électrons-positons : les créations ne compensaient plus les destructions et ces paires se sont annihilées mutuellement. Les électrons que nous connaissons aujourd'hui sont les rares survivants de l'hécatombe qui a suivi ce « découplage » des électrons vis-à-vis du plasma primordial. Les neutralinos étant beaucoup plus massifs que les électrons et leur probabilité d'interaction avec d'autres particules étant beaucoup plus faible,



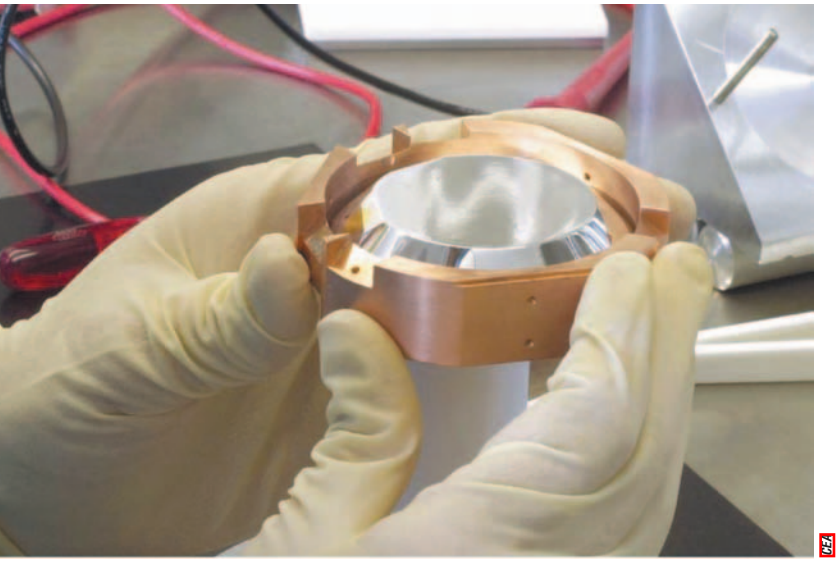
2. COMPOSITION DE LA MASSE totale de l'Univers, telle qu'elle apparaît aujourd'hui aux astrophysiciens. Les étoiles et la matière visible ne constituent que 0,5 pour cent du total. Le nombre de baryons (les protons et les neutrons) de l'Univers peut être déduit des abondances relatives des éléments légers (deutérium, hélium, lithium) synthétisés au cours des premières minutes de l'histoire cosmique : ces calculs montrent que la matière ordinaire (baryonique) ne représente que cinq pour cent de la masse totale du cosmos. Quant aux neutrinos *(en vert)*, leur faible masse limite leur contribution à quelques dixièmes de pourcent. On en déduit qu'il existe d'énormes quantités de matière noire (dite froide), ce qui est confirmé par les modèles de formation des galaxies. Récemment, les astrophysiciens ont découvert que l'expansion universelle accélère, et que la géométrie de l'espace est quasi euclidienne : ils en déduisent une densité de masse-énergie telle qu'elle nécessite, en plus de la matière noire, la présence de 70 pour cent d'une substance encore plus mystérieuse, l'énergie sombre.





Don Dixon

3. UN VENT DE PARTICULES de matière noire devrait résulter du déplacement de la Terre dans l'espace. La matière noire est essentiellement un gaz stagnant (les particules ont un mouvement aléatoire, sans aucune organisation), et notre Système solaire se rue au travers de ce gaz à une vitesse de 220 kilomètres par seconde *(en haut)*. À l'intérieur du Système solaire *(en bas)*, la Terre gravite à la vitesse de 15 kilomètres par seconde, de telle sorte que ce vent contraire, dans l'hémisphère Nord, a une vitesse nette de 235 kilomètres par seconde en été *(a)* et de 205 kilomètres par seconde en hiver *(b)*. Cette variation peut nous aider à distinguer la matière noire d'un bruit parasite.



CEA

4. DÉTECTEUR AU GERMANIUM utilisé dans l'expérience *Edelweiss*. Les physiciens espèrent que l'interaction d'un neutralino avec un noyau du détecteur provoquera une élévation de température et une ionisation caractéristiques détectables. Ce cristal de 320 grammes est très pur de façon à réduire le bruit dû à la radioactivité naturelle du matériau. De plus, l'expérience est placée au Laboratoire souterrain de Modane, sous le mont Fréjus, afin de limiter le flux de rayons cosmiques.

leur propre découplage s'est produit lorsque l'Univers était encore très chaud et très dense, à un stade bien plus précoce. C'est la raison pour laquelle on pense que ces particules ont été créées en très grand nombre (l'énergie moyenne disponible étant très élevée à cette époque). En fait, d'après les caractéristiques calculées du neutralino, on estime que la masse totale de ces particules correspond assez bien à celle de la matière noire dans l'Univers actuel. Cette adéquation est un nouvel argument en faveur d'une matière noire froide constituée essentiellement de neutralinos.

Discret, mais pas invisible

Pour détecter directement la matière noire, les physiciens des particules doivent faire quelques suppositions sur la manière dont elle interagit avec la matière ordinaire qui constitue leurs instruments. Du point de vue des astronomes, la matière noire ne se manifeste que par son influence gravitationnelle, la plus faible de toutes les interactions fondamentales : si tel est le cas, les physiciens n'ont aucun espoir de la détecter. Toutefois, cette hypothèse n'est probablement qu'une approximation pratique permettant aux astronomes de décrire les structures cosmiques sans se préoccuper du détail des propriétés des particules. Les théories supersymétriques, quant à elles, prédisent que les neutralinos sont sensibles à une interaction autre que la gravitation : l'interaction nucléaire faible (interaction qui a déjà « trahi » le neutrino). Ainsi, l'écrasante majorité des neutralinos qui frapperaient un mur de plomb de milliers de kilomètres d'épaisseur le traverserait sans encombre. Toutefois, à l'occasion, l'une de ces particules – extraordinairement malchanceuse – interagirait avec un noyau dans le mur de plomb et lui transférerait une petite partie de son énergie.

Bien que de tels événements aient des effets très faibles et soient très improbables, les physiciens ont bon espoir de les observer grâce au nombre gigantesque de neutralinos qui sont peut-être présents autour de nous. N'oubliez pas qu'ils sont censés constituer l'essentiel de la masse de la Voie lactée. Par ailleurs, la matière noire étant… noire, elle ne peut perdre son énergie en rayonnant, ce qui lui interdit de se condenser en grumeaux plus petits que la galaxie, telles des étoiles ou des planètes. Par conséquent, la matière noire doit constituer un gaz qui imprègne tout l'espace autour de nous. Notre Système solaire, par exemple, en orbite autour du centre de la galaxie, se déplace à la vitesse de 230 kilomètres par seconde et se fraye un chemin à travers ce gaz noir *(voir la figure 3)*. Les astronomes prédisent qu'un milliard de particules de matière noire traversent chaque mètre carré toutes les secondes.

On peut établir des limites à la probabilité d'interaction des neutralinos avec la matière ordinaire à l'aide des données issues des détecteurs déjà construits et des accélérateurs de particules : puisque les neutralinos ne s'y sont jamais manifestés, ils ne sauraient interagir à un rythme supérieur à un événement par jour et par kilogramme de matière ordinaire. Leszek Roszkowski et ses collègues de l'Université de Lancaster, en Angleterre, ont récemment effectué des calculs complets fondés sur différents modèles théoriques. Leurs résultats varient entre 0,1 et 0,0001 événement par kilogramme et par jour. La sensibilité des détecteurs actuels vient de franchir la borne supérieure (0,1) de cet encadrement.

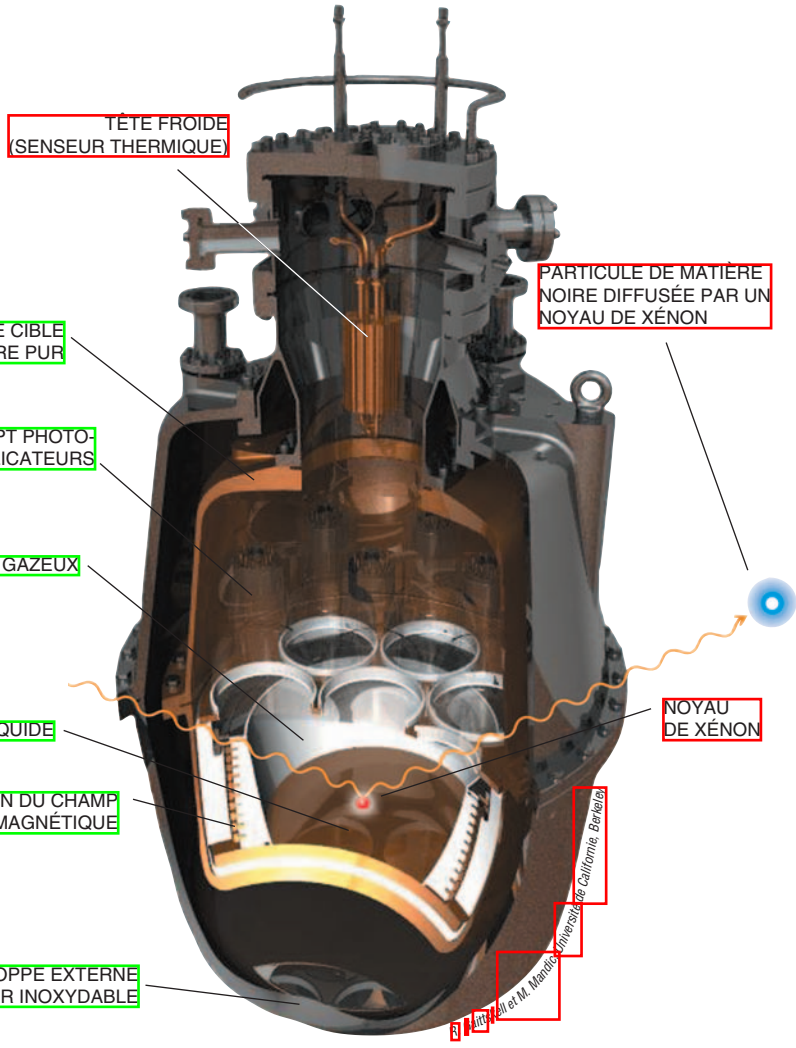
À ce stade, la difficulté principale ne concerne plus la sensibilité des détecteurs, mais leur pureté. Tous les matériaux qui constituent la Terre (y compris ceux utilisés pour construire les détecteurs), contiennent des traces d'éléments radioactifs, tels l'uranium ou le thorium. La désintégration de ces éléments produit des particules dont la signature pourrait être prise pour celle de particules de matière noire. En fait, la radioactivité naturelle terrestre est environ dix fois supérieure au signal que l'on attend de la part des neutralinos. De plus, si les détecteurs sont situés à la surface de la Terre, les rayons cosmiques produisent un signal encore dix fois plus puissant. Pour identifier des particules de matière noire, les chercheurs doivent impérativement diviser ce bruit de fond par un million.

La traque a commencé

Les physiciens sont donc confrontés à deux défis : détecter une interaction, par définition très faible, et supprimer le bruit assourdissant susceptible d'en masquer la signature. En ce qui concerne le premier défi, plusieurs propriétés de la matière peuvent être utilisées pour enregistrer le recul d'un noyau qui vient d'être frappé par un neutralino. Parmi toutes les méthodes envisageables, la plus simple est de mesurer l'échauffement qui se produit lorsqu'en reculant le noyau se fraye un chemin dans la matière qui l'entoure et lui cède de l'énergie cinétique, élevant ainsi légèrement la température du détecteur. Pour mesurer cet échauffement, il est d'abord nécessaire que le matériau soit à très basse température, de l'ordre de quelques millikelvins : c'est la température de fonctionnement des détecteurs cryogéniques. Les détecteurs cryogéniques utilisés par deux des principaux programmes de recherche, le CDMS (sigle de *Cryogenic Dark Matter Search*, recherche cryogénique de matière noire) et l'expérience française *Edelweiss* sont conçus pour mesurer des phonons isolés, ou quanta de chaleur, déposés dans une certaine quantité de matériau. Ils fonctionnent à une température d'environ 25 millikelvins et utilisent des thermistors pour enregistrer les augmentations de température dans les différentes parties du dispositif avec une précision de l'ordre de un millionième de kelvin. Les détecteurs individuels ont une masse de quelques centaines de grammes, et les chercheurs peuvent en empiler un assez grand nombre, jusqu'à atteindre une masse totale de plusieurs kilogrammes, ce qui augmente la probabilité d'enregistrer un événement.

L'autre méthode consiste à déceler l'ionisation de la matière sur le chemin du noyau propulsé par l'effet de recul après l'interaction avec un neutralino. Le noyau en mouvement arrache quelques électrons aux atomes environnants, ce qui produit des ions excités que l'on nomme « excimers » (acronyme anglais pour *excitation dimmers*, variateurs d'excitation). Par la suite, ces ions capturent un nouvel électron et retrouvent leur état normal. On cherche à mesurer les petits courants électriques (de quelques centaines d'électrons) provoqués par ces événements ou à détecter la faible lumière dite de scintillation qu'ils produisent dans certains matériaux, essentiellement des gaz rares à l'état liquide. Dans le xénon liquide, par exemple, la lumière est très intense et dure environ dix nanosecondes, de sorte qu'un photomultiplicateur peut l'amplifier jusqu'à des niveaux détectables.

Au début des années 1990, l'équipe que je dirigeais avec Hanguo Wang à l'Université de Californie, ainsi que celle de Pio Picchi à l'Université de Turin, ont développé des détecteurs à xénon dans le cadre du projet ZEPLIN. Ces instruments amplifient la lumière en introduisant une couche de gaz traversée par un champ électrique ; le champ accélère les électrons repoussés par le noyau lors de son recul, et ces électrons ionisant d'autres atomes du gaz créent une avalanche de particules plus aisément détectable. À terme, il devrait être possible de construire un détecteur à xénon liquide de dix tonnes, qui serait sensible aux neutralinos, même si leur probabilité d'interaction est très faible.



5. LE DÉTECTEUR ZEPLIN Il contiendra 30 kilogrammes de xénon liquide dans une enceinte maintenue à basse température. Lors d'une collision entre une particule de matière noire et un noyau de xénon, des charges seront produites par le noyau reculant sous le choc ; ces charges seront accélérées et focalisées par un champ électromagnétique. Elles provoqueront dans le xénon gazeux qui le surplombe une cascade comparable à celle d'un tube au néon. Cette scintillation sera enregistrée par sept photomultiplicateurs situés au-dessus du xénon. L'étude de la forme de l'impulsion enregistrée et la mesure de l'ionisation produite par le recul du noyau devraient permettre de distinguer un événement provoqué par une authentique particule de matière noire d'événements plus banals, tels une désintégration radioactive ou un rayon cosmique.

Il n'est pas indispensable que le xénon soit liquide. Certains détecteurs l'utilisent à l'état gazeux. Bien qu'un gaz ait une densité plus faible qu'un liquide, il révèle plus facilement les traces laissées par le recul du noyau. La trajectoire indique le point d'entrée de la particule, ce qui permet d'identifier la région du ciel d'où elle est venue et de vérifier si le responsable est un neutralino galactique. Des détecteurs de ce type sont en cours de développement dans les laboratoires souterrains de Boulby, en Grande-Bretagne.

L'emploi du xénon est commode parce que cet élément ne possède pas d'isotope radioactif naturel à longue durée de vie (ce qui réduit le bruit de fond) et qu'on le trouve facilement dans l'atmosphère terrestre (après purification, c'est-à-dire élimination du krypton radioactif introduit dans l'air par les essais nucléaires). Toutefois, ce n'est pas le seul matériau capable de scintiller au passage de particules. Le détecteur italien DAMA utilise un autre matériau, l'iodure de sodium. Avec une masse de 100 kilogrammes, DAMA est, aujourd'hui, le plus grand détecteur du monde.

Un peu de discernement

Le second grand défi est l'atténuation du bruit de fond dû à la radioactivité naturelle et aux rayons cosmiques. On prend en général trois mesures pour y répondre. Tout d'abord, les physiciens filtrent les rayons cosmiques en enterrant profondément leurs détecteurs sous plusieurs centaines de mètres de roche, et en les enfermant dans des boucliers spéciaux. Le dernier-né des détecteurs du programme CDMS, qui a commencé à fonctionner à la fin 2002, est situé dans la mine de Soudan, dans le Minnesota. L'expérience *Edelweiss*, est installée depuis 1994 sous le mont Fréjus, en France. Quant au DAMA, ses instruments sont installés sous le Gran Sasso, dans le Parc national des monts de la Laga, près de Rome. La seconde mesure consiste à purifier le matériau du détecteur afin de réduire au maximum les signaux provoqués par la désintégration des noyaux radioactifs tapis au sein même du détecteur.

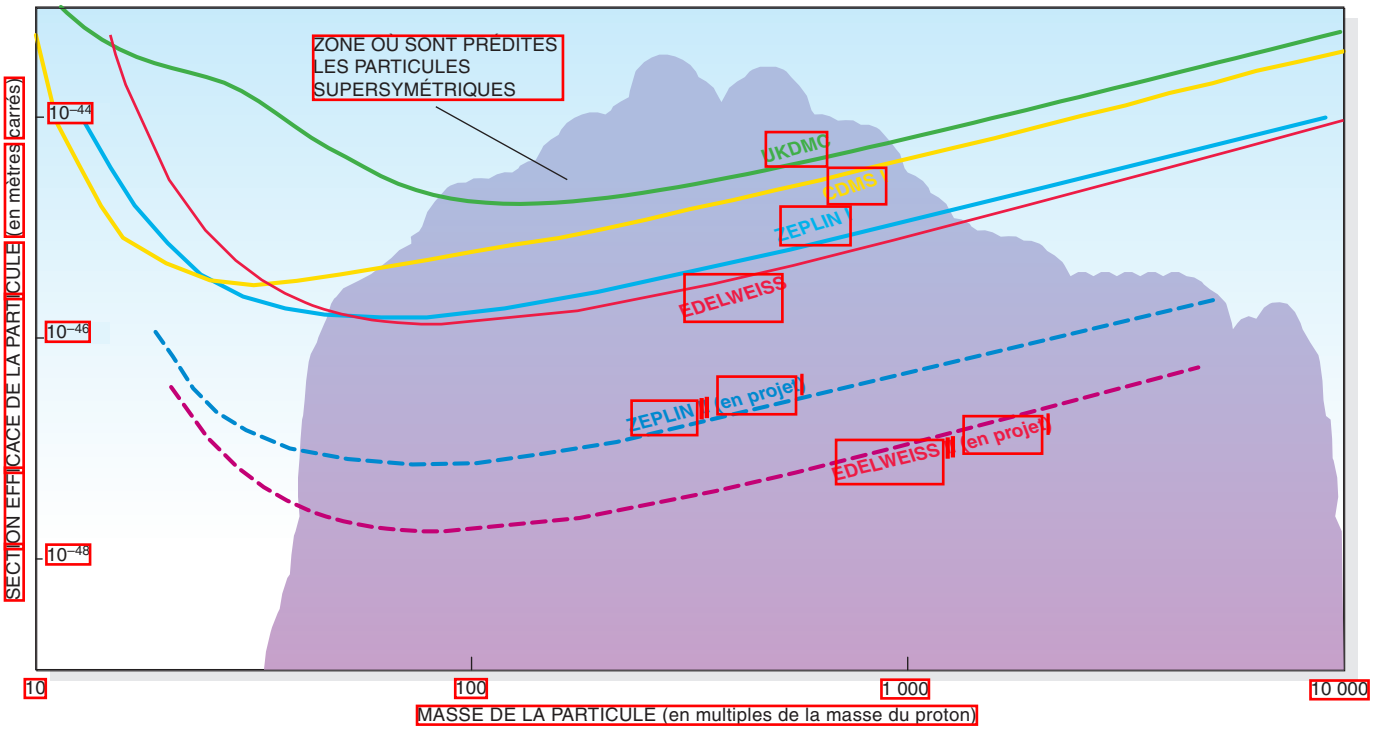
Toutefois, ces deux premières mesures ne suffisent pas à éliminer le bruit et la nouvelle génération de détecteurs utilise également des techniques de discrimination des événements afin de discerner les particules de matière noire des particules ordinaires. On peut, par exemple, mettre en évidence une variation annuelle du signal reçu. En effet, le flux de matière noire dans l'hémisphère Nord devrait être plus important l'été, lorsque le mouvement orbital de la Terre s'ajoute au mouvement du Système solaire à travers la galaxie, et moins important pendant l'hiver, quand le mouvement de la Terre va à l'encontre de celui du Système solaire *(voir la figure 3)*. L'amplitude de cette oscillation annuelle du signal pourrait atteindre quelques pour cent.

Par ailleurs, les projets les plus avancés ajoutent au détecteur principal une ligne de détection secondaire construite sur un principe différent et qui réagit de manière distincte à des types de particules distincts. Ainsi, par exemple, les particules ordinaires (qui constituent le bruit

L'état de l'art de la chasse à la matière noire

PROJET	LOCALISATION	DATE DE MISE EN ROUTE	DÉTECTEUR PRIMAIRE	MATÉRIAU CONSTITUANT LE DÉTECTEUR PRIMAIRE	MASSE (en kilogrammes)	MÉTHODE DE DISCRIMINATION
UKDMC	Boulby, Grande-Bretagne	1997	SCINTILLATION	IODURE DE SODIUM	5	AUCUNE
DAMA	Gran Sasso, Italie	1998	SCINTILLATION	IODURE DE SODIUM	100	AUCUNE
Rosebud	Rosebud	1998	CRYOGÉNIQUE	OXYDE DE BISMUTH ET DE GERMANIUM	0,02	THERMIQUE, SCINTILLATION
PICASSO	Sudbury, Canada	2000	GOUTTES LIQUIDES	FRÉON	0,001	AUCUNE
SIMPLE	Rustrel, France	2001	GOUTTES LIQUIDES	FRÉON	0,001	AUCUNE
DRIFT	Boulby, Grande-Bretagne	2001	IONISATION	XÉNON (GAZEUX)	0,003	TRAJECTOIRE
Edelweiss	Fréjus, France	1994	CRYOGÉNIQUE	GERMANIUM	1,3	IONISATION, THERMIQUE
ZEPLIN I	Boulby, Grande-Bretagne	2001	SCINTILLATION	XÉNON (LIQUIDE)	5	ÉVOLUTION TEMPORELLE
CDMS II	Soudan, Minnesota, USA	2003	CRYOGÉNIQUE	SILICE ET GERMANIUM	10	IONISATION, THERMIQUE
ZEPLIN II	Boulby, Grande-Bretagne	2003	SCINTILLATION	XÉNON (LIQUIDE)	30	IONISATION
CRESST II	Gran Sasso, Italie	2004	CRYOGÉNIQUE	OXYDE DE CALCIUM ET TUNGSTÈNE	10	SCINTILLATION
Edelweiss II	Fréjus, France	2004	CRYOGÉNIQUE	GERMANIUM	30	IONISATION, THERMIQUE

6. LES PROGRAMMES DE DÉTECTION en fonctionnement ou en projet *(en gris, en bas)* utilisent différentes techniques pour détecter l'énergie déposée dans la matière ordinaire lorsqu'une particule de matière noire percute un noyau atomique. Certains instruments enregistrent les impulsions lumineuses émises par les atomes excités lors du recul du noyau (scintillation). D'autres mesurent la très faible élévation de température qui s'ensuit (méthode thermique dans les détecteurs cryogéniques). Les systèmes à gouttes liquides sont maintenus en état de surfusion et visent à observer le passage du liquide à l'état gazeux sous l'effet de la très faible perturbation induite par la matière noire. Les détecteurs modernes disposent également de méthodes de discrimination grâce auxquelles ils éliminent les événements provoqués par des rayons cosmiques ordinaires. Ils peuvent, par exemple, étudier l'évolution du signal au cours de l'année, la direction d'où proviennent les particules ou comparer leur signature thermique à l'ionisation ou à la scintillation qu'elles induisent dans la matière.



7. LA SENSIBILITÉ des détecteurs ne cesse de s'améliorer. Cette sensibilité varie avec la masse de la particule recherchée : la plupart des détecteurs ont une sensibilité maximale pour des particules ayant une masse comprise entre 50 et 100 fois celle du proton. Au-delà de cette masse, plus une particule est lourde, plus elle doit avoir une section efficace (la probabilité d'interaction avec un noyau du détecteur, par exemple) élevée pour pouvoir être décelée. On a représenté les courbes de sensibilité de différents projets : ces projets CDMS, ZEPLIN et *Edelweiss* sont déjà susceptibles d'explorer une portion notable du domaine *(en mauve)* où les théoriciens prédisent l'existence de particules supersymétriques. Dans les années qui viennent, les différentes expériences devraient couvrir presque tout cet éventail.

de fond) produisent plus d'ionisation que les particules de matière noire : en effet, elles ionisent la matière du détecteur lors de leur passage, puis lorsqu'elles mettent en mouvement le noyau qu'elles percutent (alors qu'un neutralino n'ionise le détecteur qu'indirectement, en interagissant avec un noyau). Ainsi, *Edelweiss* combine cette mesure d'ionisation à la méthode cryogénique, ce qui, permet dès à présent d'éliminer 99,9 pour cent du bruit de fond et de distinguer un simple photon gamma d'une particule de matière noire.

Pour le moment, aucune particule de matière noire n'a été observée. Il y a deux ans, les chercheurs du DAMA ont signalé la possible détection d'une particule 60 fois plus massive que le proton, mais le CDMS n'a pu la découvrir et les premières mesures d'*Edelweiss* indiquent avec un très haut niveau de confiance que cette particule n'existe pas (du moins, si elle existait, elle n'entrerait pas dans le cadre de la supersymétrie, ce que l'on considère comme très improbable). Toutefois, nous ne devrions pas attendre très longtemps avant que les prochaines générations de détecteurs ne tranchent la question et ne concluent à la présence ou à l'absence de neutralinos dans notre environnement. En effet, de nouveaux détecteurs seront bientôt mis en service au CDMS, et *Edelweiss* devrait voir sa sensibilité multipliée par 100 dans les prochaines années. L'ensemble de ces instruments permettra de couvrir l'essentiel du domaine théorique à l'intérieur duquel les physiciens des particules prédisent l'existence du neutralino *(voir la figure 7)*.

Et si les détecteurs ne trouvent rien ? Il faudra en conclure que la supersymétrie ne permet pas de régler le problème de la matière noire et que la nature a prévu autre chose. Les théoriciens devront envisager d'autres voies, même si cela leur répugne. Au contraire, si nous trouvons le neutralino, cela serait l'une des plus grandes découvertes du XXIe siècle. La découverte de ce qui constitue un tiers de la masse de l'Univers (c'est-à-dire presque tout, sauf l'énergie sombre) serait une révélation spectaculaire qui aurait de multiples conséquences. Si les détecteurs peuvent repérer les particules de matière noire, les accélérateurs de particules, tel le grand collisionneur hadronique du CERN (le LHC), pourraient peut-être créer ces particules, c'est-à-dire fabriquer de la matière noire dans des conditions expérimentales contrôlées ! La confirmation de la supersymétrie impliquerait, par ailleurs, l'existence d'un grand nombre de particules nouvelles attendant d'être dévoilées et conforterait la théorie des supercordes d'où les physiciens ont tiré l'idée de supersymétrie. Finalement, le plus grand des mystères de l'astronomie moderne n'en serait plus un.

David CLINE est professeur de physique à l'Université de Los Angeles, et travaille au détecteur CDMS du CERN de Genève.

GERARD JUNGMAN, MARC KAMIONKOWSKI et KIM GRIEST, *Supersymmetric Dark Matter*, in *Physics Reports*, vol. 267, n° TK, pp. 195 – 373, 1996.

DAVID CLINE, *Sources and Detection of Dark Matter and Dark Energy in the Universe*, Springer, 2001.

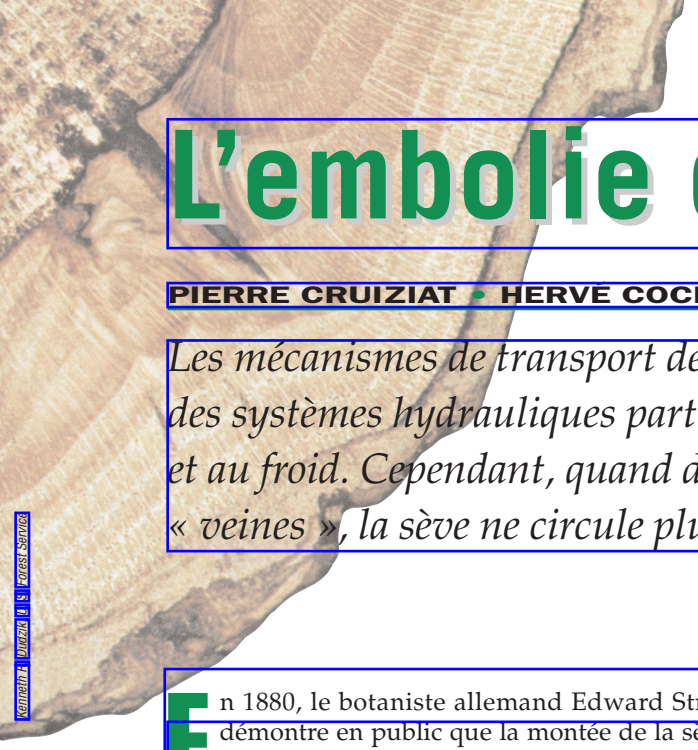
Y. RAMACHERS, *WIMP Direct Detection Overview*, Invited review at NEUTRINO 2002, Munich, Allemagne 25 au 25 mai 2002.

MARC LACHIÈZE-REY, *La masse cachée de l'Univers*, in *Pour la Science*, n° 300, octobre 2002.

L'embolie des arbres

PIERRE CRUIZIAT • HERVÉ COCHARD • THIERRY AMÉGLIO

Les mécanismes de transport de l'eau dans les arbres en font des systèmes hydrauliques particulièrement bien adaptés à la sécheresse et au froid. Cependant, quand de l'air réussit à se glisser dans leurs « veines », la sève ne circule plus, et la survie de l'arbre est menacée.



Kenneth F. Ulmaza U.S. Forest Service

En 1880, le botaniste allemand Edward Strasburger démontre en public que la montée de la sève est un processus essentiellement physique qui ne doit rien aux propriétés des cellules vivantes : pour les besoins de la démonstration, il coupe un chêne centenaire et l'immerge dans une solution de picrate qui tue les cellules. Pourtant, pendant des semaines, les feuilles restent vertes et le niveau de la solution diminue. Si elle orientait les recherches dans la bonne direction, cette expérience spectaculaire n'expliquait pas comment la sève parvient au faîte des arbres parfois à plus de 100 mètres dans le cas des séquoias californiens, semblant « défier » les lois de la physique. Cette sève, dite « brute » ou xylémienne, est une solution très diluée, sauf pour certaines espèces vivant en milieu salé ou désertique. Une autre sève, dont il ne sera pas question ici, la sève élaborée, ou phloémienne, transporte, sous pression, dans des cellules vivantes, les sucres issus de la photosynthèse.

L'étude de l'« architecture hydraulique » des arbres – une expression due à Martin Zimmermann, alors directeur du Laboratoire d'études forestières de l'Université de Harvard – a tout récemment livré le secret du transport de la sève brute. La comparaison d'un arbre et de ses composants qui véhiculent l'eau des racines jusqu'aux feuilles avec un système hydraulique doté d'un générateur d'énergie, d'un système de contrôle, de réservoirs et de tuyaux a été féconde. Elle a permis d'élucider de nombreuses propriétés des végétaux vasculaires, notamment leurs capacités de résistance à la sécheresse et au froid. Cette étude a aussi précisé les connaissances que l'on a de la physiologie des arbres et d'un phénomène important pour leur croissance, voire pour leur survie : les embolies, dues aux bulles d'air qui se forment dans les éléments conducteurs de la sève et en perturbent la circulation. Aujourd'hui, on sait quantifier les caractéristiques hydrauliques de différentes essences et on peut les comparer. Enfin, ces études éclairent d'une façon nouvelle les relations entre le climat et la croissance des arbres.

Nous examinerons l'anatomie du système vasculaire d'un arbre et détaillerons les contraintes auxquelles il obéit pour assurer le transport de la sève. Puis, nous décrirons les mécanismes de l'embolie végétale, comment l'arbre y résiste et les conséquences de l'état hydrique sur sa croissance.

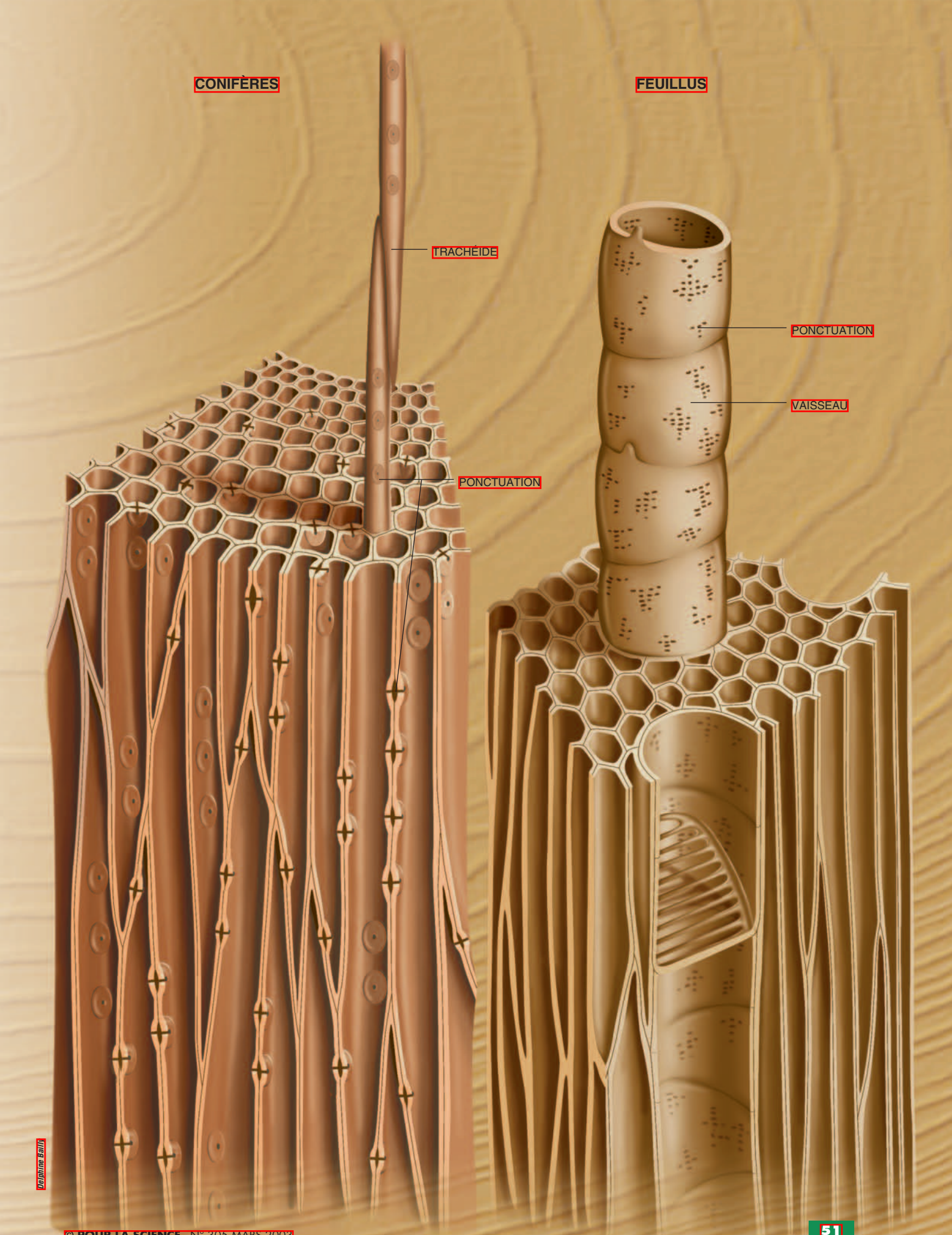
Pour les plantes vasculaires, et notamment pour les arbres, l'énergie nécessaire au transport de la sève brute est fournie par le Soleil dont la chaleur vaporise l'eau liquide qui arrive dans les feuilles. La vapeur d'eau s'échappe par de petites ouvertures, nommées stomates, présentes à la surface des feuilles *(voir la figure 2)*. Cette transpiration crée un gradient d'état de l'eau, on parle de potentiel hydrique entre les feuilles et le sol (ce potentiel est voisin du potentiel chimique créé par deux concentrations différentes d'un composé présent dans deux compartiments séparés par une membrane imperméable à ce composé). Durant la transpiration, le transport de l'eau à travers l'arbre est un processus passif constitué d'un flux en phase liquide – du sol vers les feuilles – et d'un flux en phase gazeuse – des feuilles vers l'atmosphère.

Dans les vaisseaux coule la sève

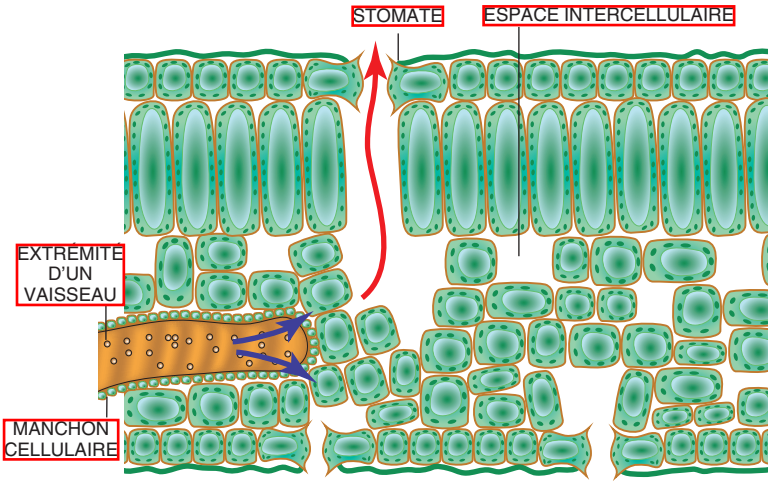
La transpiration foliaire dépend des conditions climatiques et de l'ouverture des stomates, qui jouent ainsi le rôle de régulateurs du système : par exemple, un fort ensoleillement, une faible humidité de l'air et un vent soutenu entraînent des transpirations notables quand les stomates sont ouverts. Un arbre isolé transpire quelques dizaines à quelques centaines de litres par jour. Les réservoirs du « système hydraulique » de l'arbre ont un rôle mineur vis-à-vis de la transpiration. Ils sont constitués par les cellules vivantes du végétal, qui se déshydratent ou se réhydratent en fonction des besoins.

Un arbre est un système de canalisations en série que parcourent des colonnes d'eau continues, des racines jusqu'aux feuilles. Par analogie, on compare le flux d'eau à travers un arbre à un courant électrique le long d'un circuit de résistances en série : dans chaque partie du circuit (le tronc, une branche…), le flux transpiratoire est quasiment égal à la différence de potentiel hydrique

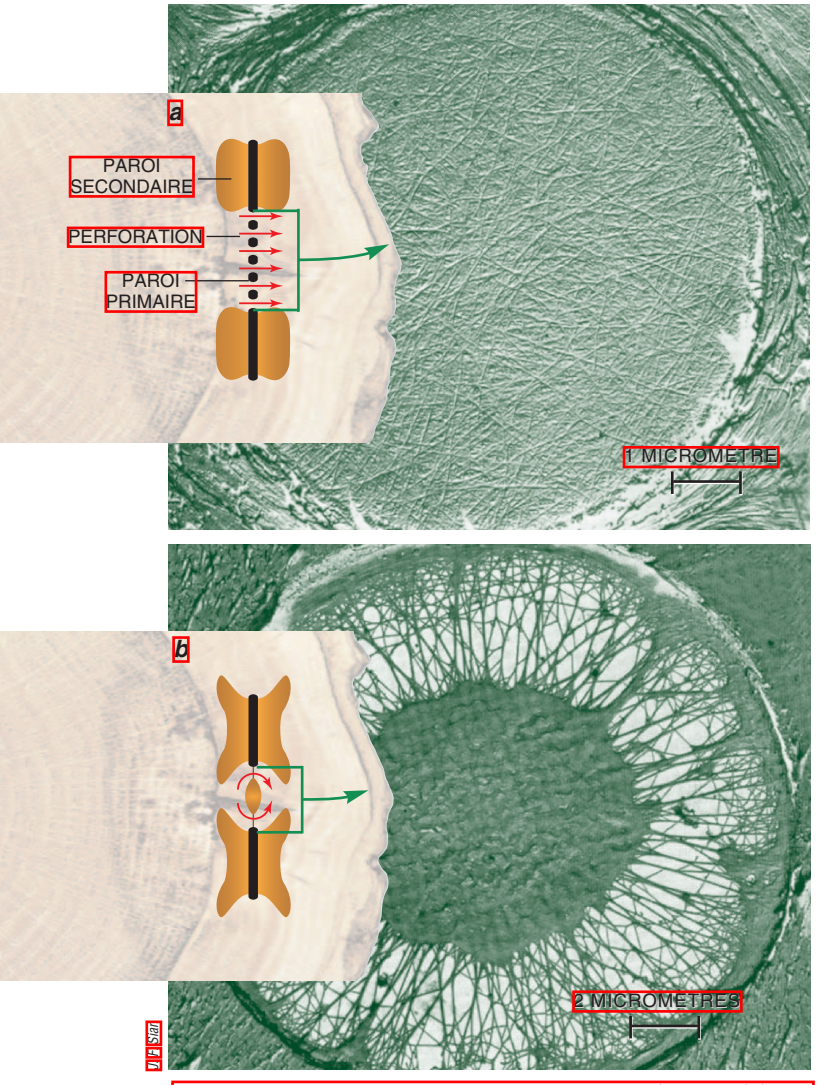
1. LES ÉLÉMENTS CONDUCTEURS du bois acheminent la sève brute des racines aux feuilles. Ils sont de deux types, tous deux constitués de cellules mortes. Les conifères sont principalement dotés de trachéides *(à gauche)* : des cellules uniques, de quelques micromètres de diamètre et quelques millimètres de longueur, reliées par des perforations nommées ponctuations. Le bois des arbres feuillus *(à droite)* est composé de vaisseaux, c'est-à-dire d'empilements de plusieurs cellules vides dont les parois transversales ont disparu (sauf celles de l'extrémité des vaisseaux). Les vaisseaux mesurent entre 0,1 et 0,6 millimètre de diamètre et parfois plusieurs mètres de longueur.



Delphine Bailly



2. LA FEUILLE est le siège de l'évaporation de la sève brute. Cette dernière est transportée dans des vaisseaux *(en marron)*. Dans les feuilles, elle s'échappe des vaisseaux en traversant un manchon de cellules *(flèches bleues)*. Puis, à la surface de ces cellules, elle se transforme en vapeur d'eau et s'échappe vers l'extérieur *(flèche rouge)* par les stomates.



3. LES PONCTUATIONS permettent le passage de la sève d'un élément conducteur à un autre adjacent *(a, celle d'un arbre feuillu ; b, celle d'un conifère. Les schémas sont des coupes transversales)*. Elles résultent de modifications de la paroi des cellules végétales. Cette paroi est d'ordinaire constituée d'une paroi primaire *(en noir)* et d'une paroi secondaire *(en marron)*, riche en lignine. Dans les ponctuations, la paroi secondaire est éliminée et seule reste la paroi primaire perforée.

divisée par la résistance de cette partie à l'écoulement de la sève. La continuité des colonnes d'eau du sol jusqu'aux feuilles et le petit volume des réservoirs ont pour conséquence que, dans des conditions normales, la transpiration est égale à l'absorption racinaire.

Des racines aux stomates, la sève emprunte deux types de voies : une voie cellulaire, ou extra-vasculaire, et une voie vasculaire. À l'entrée, dans les racines, et à la sortie, dans les feuilles, la sève traverse des cellules vivantes, c'est la voie extra-vasculaire. Entre les deux, sur la quasi-totalité du trajet dans la plante, l'eau emprunte la voie vasculaire, formée d'un réseau de petits tuyaux qui parcourent tous les organes du végétal.

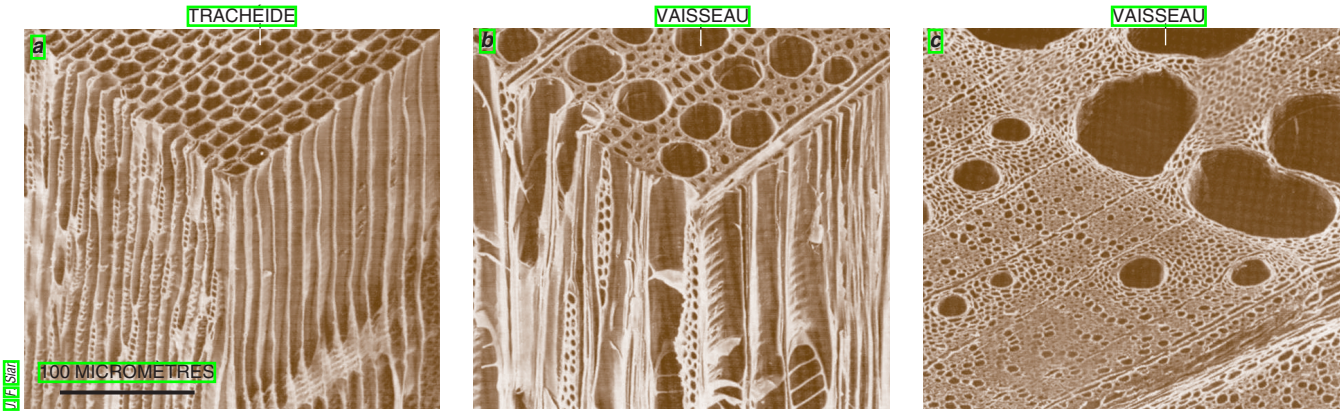
Ce réseau d'irrigation est constitué de deux types d'éléments *(voir la figure 1)* : les vaisseaux, formés de plusieurs cellules mortes aux parois rigides, et les trachéides, constitués d'une seule de ces cellules. Dans ces deux types d'éléments, les cellules ont subi d'importantes transformations : elles ont été vidées de leur contenu et ont perdu leurs parois transversales à l'exception de celles des extrémités des vaisseaux. Par ailleurs, les parois longitudinales sont recouvertes de lignine, un revêtement imperméable, sauf en certains points, nommés ponctuations, où passe l'eau. Les cellules végétales sont d'ordinaire enveloppées de deux parois : l'une, dite primaire, est mince, élastique, l'autre, dite secondaire, est épaisse, rigide et riche en cellulose. Les ponctuations *(voir la figure 3)* forment de minuscules plages de la paroi primaire, parsemées de pores d'une dimension inférieure à un dixième de micromètre.

Les trachéides n'ont que quelques micromètres de diamètre et quelques millimètres de longueur : elles sont caractéristiques du bois des conifères. En revanche, les vaisseaux mesurent entre 0,1 et 0,6 millimètre de diamètre, et de quelques centimètres à plusieurs mètres de longueur ! Ils sont visibles à l'œil nu dans le bois des feuillus *(voir la figure 4)*. Dans les feuilles, l'extrémité des vaisseaux est enveloppée dans un manchon de cellules que l'eau traverse avant de s'évaporer dans les espaces intercellulaires et de rejoindre l'atmosphère par les stomates.

Des pressions négatives

Puisque la sève est tirée vers le haut par l'action de l'évaporation de l'eau au niveau des feuilles, elle est sous tension, c'est-à-dire que sa pression est inférieure à la pression atmosphérique, voire négative. Comment est-ce possible ? Grâce à la capillarité *(voir l'encadré page 54)*, la sève est maintenue jusqu'à plusieurs dizaines de mètres de hauteur. Dans de telles colonnes, les forces qui s'exercent sur l'eau sont la pression atmosphérique et le poids. La tension qui maintient l'eau dans les éléments conducteurs est égale, approximativement, à la pression atmosphérique diminuée de la pression exercée par une colonne d'eau dont la hauteur serait celle de l'arbre. Or, la hauteur d'une colonne d'eau correspondant à la pression atmosphérique est égale à dix mètres. Aussi, dans la plupart des arbres, qui mesurent plus de dix mètres, cette différence de pression – la tension de la sève – est négative. Cet état de tension, nous le verrons, cause parfois des phénomènes de cavitation, c'est-à-dire que la colonne de sève se rompt et que des poches de gaz apparaissent par endroits ou sur toute la hauteur des vaisseaux, produisant une embolie : la circulation de la sève est interrompue ou, du moins, perturbée.

© POUR LA SCIENCE - N° 305 MARS 2003



4. LES ELEMENTS CONDUCTEURS diffèrent selon le type d'arbre. Ceux des conifères sont de fines trachéides *(a, un mélèze)*. Ceux des arbres feuillus sont des vaisseaux. Selon qu'ils sont fins *(b, un tulipier)* ou larges *(c, un chêne rouge)*, on parle de bois diffus ou de bois poreux.

Pour mener à bien sa fonction, le système hydraulique d'un arbre est doté de trois grandes propriétés : l'intégration, la compartimentation et la redondance. L'intégration signifie que le système vasculaire d'un arbre forme un réseau unique, dans lequel chaque racine est connectée à toutes les branches et non à une seule. Une expérience convaincante consiste à placer une partie des racines d'un jeune arbre, déterré avec précaution, dans un récipient contenant de l'eau, les autres étant laissées à l'air : dans de telles conditions, l'ensemble du feuillage est alimenté.

La deuxième propriété est l'inverse de la précédente, mais à une autre échelle : il s'agit de la compartimentation. En effet, le système conducteur d'un arbre est constitué de centaines de milliers, voire de millions d'éléments, les trachéides ou les vaisseaux. Chacun est une unité de conduction, en communication avec les autres par les ponctuations. Grâce à cette compartimentation, en cas d'embolie, l'air reste confiné à un ou quelques éléments. Une telle propriété est le nécessaire complément de la précédente, car ainsi, le système vasculaire fonctionne sous les deux contraintes auxquelles il est confronté : laisser passer l'eau, mais pas l'air.

Un réseau de communication performant

La longueur des éléments conducteurs influe sur le transport de la sève de deux façons opposées. Des vaisseaux longs et larges favorisent la conduction en diminuant la résistance qu'opposent les ponctuations au passage de l'eau d'un vaisseau à l'autre. En revanche, en cas d'embolie, la conduction est affaiblie. À l'inverse, pour un même trajet, les petits vaisseaux offrent une résistance supérieure à l'écoulement de la sève, mais une embolie a peu de conséquences, car la sève continue à s'écouler dans les autres vaisseaux.

Enfin, la redondance signifie, d'une part, que dans chaque axe d'un arbre, plusieurs colonnes d'éléments conducteurs fonctionnent en parallèle et, d'autre part, que le passage latéral de la sève entre ces colonnes est autorisé par les ponctuations. Cet agencement est une sorte de protection passive, anatomique, contre les effets de l'embolie, car la sève passe même quand un vaisseau de chaque colonne contient une bulle d'air.

La conductivité hydraulique et la vulnérabilité à la cavitation des différents axes d'un arbre sont deux caractéristiques qui résultent de ces trois propriétés. La conductivité hydraulique rend compte de l'aptitude d'un axe à conduire la sève. Les botanistes savent la mesurer depuis quelques années et ils construisent ainsi des cartes hydrauliques des arbres *(voir la figure 6)* qui mettent en évidence plusieurs propriétés. D'abord, on constate que le diamètre des éléments conducteurs a une influence notable. Selon la loi de Poiseuille, le flux varie avec la puissance quatrième du diamètre du conduit : en d'autres termes, sous une même différence de pression, le flux traversant un élément conducteur de diamètre d est identique à celui parcourant 16 éléments de diamètre égal à $d/2$ ou 256 éléments de diamètre égal à $d/4$. Selon le type de bois, la vitesse de la sève varie et, pour assurer une même transpiration, le nombre de vaisseaux requis varie. Un vaisseau de chêne de trois mètres de longueur et de 300 micromètres de diamètre est, théoriquement, équivalent à 7 680 vaisseaux d'érable de 10 centimètres de longueur et de 75 micromètres de diamètre ! Ainsi, l'embolie ou l'obstruction fongique d'un vaisseau chez le chêne a des conséquences plus graves que celles de plusieurs dizaines de vaisseaux chez l'érable.

Par ailleurs, les cartes hydrauliques révèlent la répartition de la résistance de l'ensemble du système vasculaire dans les différentes parties de l'arbre : par exemple, sur des branches jeunes, quelle que soit l'espèce, les feuilles représentent plus de 60 pour cent de cette résistance. En effet, c'est la partie extra-cellulaire du circuit de l'eau, entre les vaisseaux et la surface d'évaporation, qui est la principale résistance au passage de la sève.

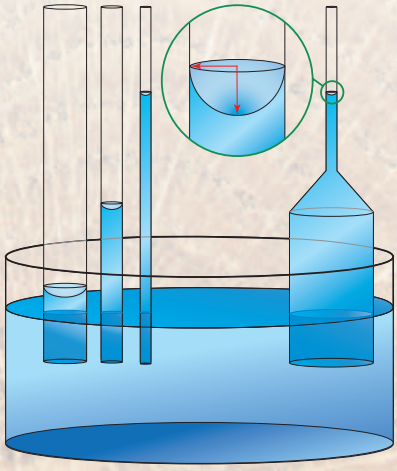
À partir des valeurs de résistance hydraulique et de celle des flux qui traversent les différentes parties de l'arbre, on trace le profil des tensions, c'est-à-dire la variation de ce paramètre en fonction de la distance à la base de l'arbre. On observe que maintes espèces ont une hydraulique « en balai » : plus les éléments sont jeunes (par ordre d'ancienneté, le tronc, les branches charpentières, les petites branches, les rameaux, les tiges, nommées pétioles, des feuilles), plus la variation de la tension par unité de longueur croît. On en déduit que, pour un arbre donné, plus on se rapproche des feuilles, plus la résistance au passage de la sève augmente. Par ailleurs, le plus grand facteur de variation de tension n'est pas la hauteur ni la distance au sol, mais plutôt la résistance des rameaux feuillés, à l'extrémité du circuit de l'eau. Enfin, quand on procède, sur un frêne, à ces mesures durant plusieurs années consécutives, les profils de tension révèlent que non seulement la résistance absolue des branches augmente à mesure qu'elles vieillissent, mais surtout l'importance de cette résistance par rapport à celle des feuilles ne cesse de s'accroître. En d'autres termes,

L'ascension de la sève expliquée par la capillarité

Lorsque l'on plonge l'extrémité inférieure de trois capillaires en verre de diamètres différents dans un récipient d'eau, on observe quatre propriétés. Premièrement, le niveau de l'eau dans chaque capillaire est supérieur à celui de l'eau dans le récipient. Deuxièmement, plus le capillaire est fin, plus le niveau de l'eau, à l'intérieur, est élevé. Troisièmement, le rayon de courbure du ménisque est d'autant plus petit que la hauteur d'eau dans le capillaire est élevée. Seul le rayon du capillaire au niveau du ménisque importe.

En 1718, à partir de telles observations, le médecin et physicien britannique James Jurin (1684-1750) a établi la loi qui porte son nom et qui donne la relation entre la hauteur maximale d'eau dans un capillaire et le rayon de ce dernier. Sous forme simplifiée et pour un matériau mouillant, elle stipule que le produit du diamètre du ménisque (en micromètres) par la hauteur d'eau maximale (en mètres) est égal à 30.

Par exemple, la hauteur d'eau maximale dans un capillaire de 0,1 millimètre de diamètre est égale à 30/100, soit 0,3 mètre ou 30 centimètres. Lorsque l'on tente de faire monter encore le ménisque, le capillaire se vide d'un seul coup.



Le diamètre du plus petit des vaisseaux d'un arbre mesure cinq micromètres : la loi indique que la hauteur maximale est de six mètres. On est loin des hauteurs que peuvent atteindre les arbres ! En réalité, dans les feuilles, le sommet des colonnes d'eau n'est pas dans les vaisseaux, mais au niveau des parois des cellules qui entourent l'extrémité des vaisseaux. Là, le diamètre à prendre en compte est de 15 nanomètres, aussi les colonnes d'eau peuvent atteindre, en théorie, 200 mètres de hauteur !

Enfin, quatrièmement, la pression dans ces capillaires est inférieure à la pression atmosphérique. Avec un capillaire de un micromètre de rayon, la hauteur d'eau maximale est environ égale à 30 mètres. Puisque la hauteur d'eau qui correspond à la pression atmosphérique est d'environ dix mètres, au-dessus de cette limite, la tension de l'eau (la différence entre la pression atmosphérique et le poids de la colonne d'eau) est négative.

la résistance des branches, d'abord notablement inférieure à celle des feuilles, devient, au fil des ans, supérieure.

L'embolie végétale

L'état de tension de la sève brute est physiquement instable et entraîne parfois des phénomènes de cavitation, c'est-à-dire l'apparition de bulles de gaz dans la phase liquide. Cette cavitation emplit d'air une partie ou la totalité des vaisseaux, produisant ainsi une embolie qui perturbe, voire empêche le transport de la sève. On avait envisagé l'existence de tels processus dès la fin du XIX^{e} siècle, mais ce n'est que depuis une dizaine d'années que l'on comprend les mécanismes de l'embolie végétale qui diffèrent selon les saisons et selon les essences.

L'explication physique de l'embolie estivale, dite hypothèse du germe d'air, a été proposée en 1983 par M. Zimmermann, et a été depuis confirmée expérimentalement. Durant l'été, lorsque le sol se dessèche, la tension de la sève diminue notablement et atteint parfois -40×10^5 pascals. Parmi les nombreux vaisseaux d'une branche, certains, blessés, âgés ou victimes d'insectes, sont emplis d'air. Ainsi, quelques ponctuations de la paroi commune à deux vaisseaux adjacents font office de barrière contre l'entrée d'air d'un conduit vide vers un conduit plein de sève. Dans le conduit vide, la pression est la pression atmosphérique, dans l'autre, c'est la tension de la sève. Cette situation est analogue à ce qui se passe dans un capillaire. La courbure des ménisques dépend de la différence de pression de part et d'autre de ces ménisques : plus cet écart augmente, plus le rayon de courbure du ménisque diminue, jusqu'à un point critique où ce rayon est inférieur à celui du plus gros pore des ponctuations. Dès lors, le ménisque se rompt, une bulle d'air et de vapeur d'eau s'introduit dans l'élément conducteur et l'envahit *(voir la figure 5)*. La colonne d'eau est rompue : c'est l'embolie.

Le paramètre déterminant est la différence de pression de part et d'autre du ménisque au niveau des pores de la ponctuation. Aussi, on évalue l'influence de cette embolie sur le transport de la sève en mesurant la conductivité hydraulique d'une partie de l'arbre placée dans une chambre de pression : la pression de l'atmosphère autour de l'axe étudié est augmentée par paliers, tandis que la tension de la sève est constante ; la différence de pression de part et d'autre augmente. On obtient de la sorte une courbe de vulnérabilité qui exprime la perte de conductivité en fonction de l'écart entre la pression atmosphérique et la tension de la sève. Cette courbe est une propriété du tissu conducteur qui ne varie pas à court terme.

L'embolie dite hivernale est un phénomène annuel, qui touche la plupart des espèces d'arbres feuillus des régions tempérées. L'embolie automnale, hivernale ou printanière est plus fréquente que l'embolie estivale et résulte de l'alternance de gel et de dégel quand l'arbre est dépourvu de feuilles. Quand la sève gèle (à des températures un peu inférieures à 0 °C), les gaz dissous qu'elle contient sont expulsés, car ils sont très peu solubles dans la glace. Au moment du dégel, ces bulles, soit se dissolvent à nouveau dans la sève, soit obstruent un vaisseau. Plus les bulles d'air sont volumineuses, moins elles se dissolvent. À la différence de l'embolie estivale qui dépend du diamètre des pores des ponctuations, l'embolie hivernale est influencée par le diamètre des éléments conducteurs : plus ils sont larges, plus les bulles qui s'y forment au hasard ont des chances d'être volumineuses et plus l'embolie est probable. Ainsi, les conifères, dotés surtout de fines trachéides, résistent mieux à cette embolie, et sont bien adaptés aux hautes latitudes et altitudes.

Le suivi de l'embolie, mesurée par la perte relative de conductivité dans les axes d'un arbre, montre qu'elle varie durant l'année, différemment selon les espèces. Ainsi, pour les chênes et pour les hêtres, pendant un été sans

© POUR LA SCIENCE - N° 305 MARS 2003

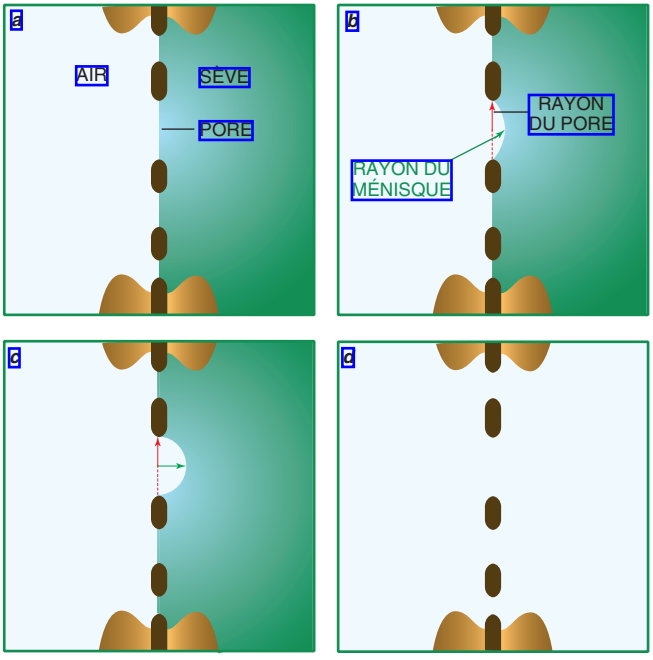
canicule, le taux d'embolie dans les pousses de l'année est faible, alors qu'il est plus élevé dans les pousses des années antérieures. Lors d'une forte sécheresse durable, l'embolie vasculaire s'installe progressivement et reste importante. Enfin, dès les premiers gels d'automne, l'embolie hivernale se développe de façon spectaculaire, notamment dans les pétioles entraînant rapidement la mort des feuilles. Ainsi, les années à été sec et à hiver froid sont éprouvantes pour les vaisseaux. Dans ces conditions, comment l'appareil vasculaire continue-t-il d'assurer ses fonctions ?

La réparation de l'embolie

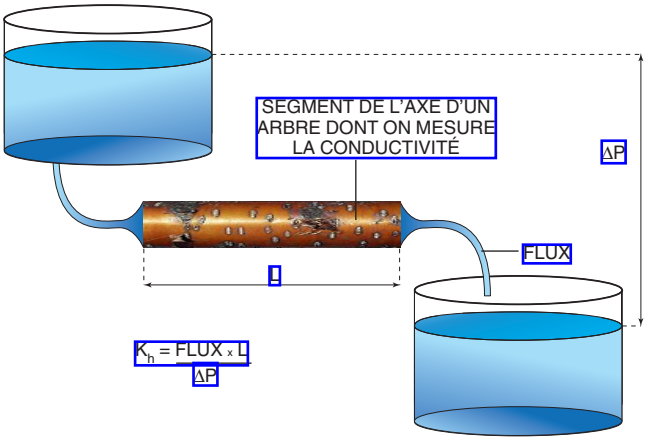
Des études ont montré qu'une augmentation de la pression de la sève est indispensable à la résorption de l'embolie, car l'augmentation de la pression favorise la dissolution des bulles. Une telle augmentation n'est possible qu'en l'absence des feuilles, quand la sève n'est pas tirée par le haut. L'origine de la mise sous pression de la sève dépend de la saison : au printemps et en automne, elle résulte de la pression racinaire, née de la différence de pression osmotique entre la solution du sol, peu concentrée, et celle de la sève brute qui ne l'est plus (l'eau est attirée vers le compartiment où la concentration en éléments non diffusibles est élevée). En l'absence de transpiration, un flux d'eau du sol vers les racines repousse l'eau dans l'appareil vasculaire, jusqu'aux branches (la pression est de l'ordre de quelques bars).

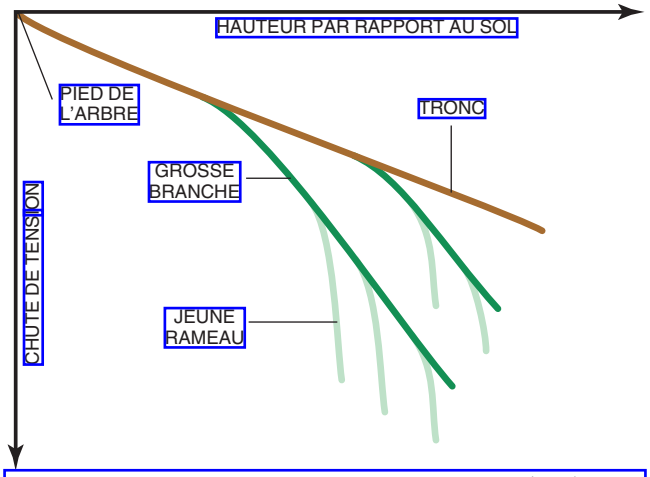
En hiver, le phénomène, étudié depuis une dizaine d'années sur le noyer, est tout autre. Dans cette essence, la sève des branches est en alternance sous pression ou sous tension, selon la température de l'air : lorsqu'elle est supérieure à 5 °C, la sève est sous tension ; quand elle est inférieure, la sève est sous pression. Cette pression hivernale résulte de l'hydrolyse des réserves d'amidon des branches en sucres solubles. Ces derniers passent dans la sève brute et créent un appel d'eau des tissus voisins vers les vaisseaux où la sève est alors mise sous pression, entraînant une dissolution au moins partielle de l'air des vaisseaux embolisés *(voir la figure 7)*. Ainsi, chez le noyer, en l'absence de feuilles, la sève est le plus souvent sous une pression due soit à la poussée racinaire, soit à l'hydrolyse de l'amidon des branches.

À l'inverse de l'embolie hivernale, l'embolie estivale n'est généralement pas résorbée. Quand la transpiration augmente, la tension dans les vaisseaux diminue. Lorsque cette augmentation est trop intense, la tension atteint le seuil de la cavitation. La perte de conduction, c'est-à-dire l'augmentation de résistance à la propagation de la sève, qui en résulte impose à la tension de diminuer encore pour maintenir la même transpiration : la cavitation s'emballe jusqu'à une embolie générale et donc, la mort de l'arbre ! Cependant, les arbres sont dotés de mécanismes qui empêchent ce scénario catastrophique : ils maintiennent la tension à des valeurs inférieures à celle du seuil de la cavitation. On a montré récemment que le seuil de tension pour lequel les stomates se ferment (la transpiration diminue) est relié au seuil de tension où commence la

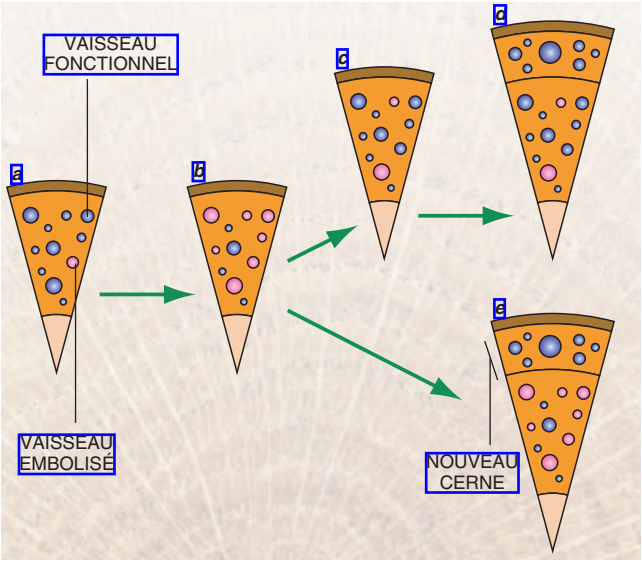


5. L'EMBOLIE ESTIVALE résulte de la différence de pression entre l'air d'un vaisseau vide et la sève d'un vaisseau adjacent *(a)*. Plus cet écart augmente, plus le rayon de courbure du ménisque au niveau des pores croît *(b)*. Quand il est supérieur à celui du plus grand pore de la ponctuation *(c)*, le ménisque se rompt et l'air envahit le vaisseau *(d)*.





6. LA CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE K_h *(à gauche)* est une caractéristique des différents axes d'un arbre (tronc, branche…). Elle se mesure à l'aide d'un dispositif où l'on détermine le flux d'eau (en masse par unité de temps) passant par une partie d'un axe de longueur *L* selon une pression *ΔP* (le poids de la colonne d'eau). Grâce à cette méthode, on trace le profil des tensions d'un arbre *(à droite)* qui révèle que plus ses axes sont jeunes, plus leur résistance au passage de la sève est grande (la chute de tension par unité de hauteur s'accroît).



7. L'EMBOLIE HIVERNALE résulte de la succession de périodes de gel et de dégel qui rendent des vaisseaux fonctionnels *(a, en bleu)* impropres au passage de la sève *(b, en rose)*. Elle se résorbe de deux façons selon les essences. Chez le hêtre et le noyer, la sève est mise sous pression soit grâce à l'hydrolyse de l'amidon des branches, soit grâce à la poussée racinaire : les bulles se résorbent *(c, le nombre de vaisseaux fonctionnels a augmenté)* peu à peu avant la croissance d'un nouveau cerne *(d)* qui peut se former après l'apparition des feuilles. En revanche, chez le chêne, il n'y a pas de résorption de l'embolie, aussi, c'est surtout la croissance qui permet d'alimenter les nouvelles pousses.

cavitation. Ainsi, les stomates sont les garants de l'intégrité de l'appareil vasculaire des arbres.

Les courbes de vulnérabilité indiquent les gammes de tensions pour lesquelles les échanges gazeux sont assurés. Aujourd'hui, on dispose de telles courbes pour plusieurs dizaines d'espèces et on constate des disparités en fonction des zones d'habitat de ces essences. Certaines sont très vulnérables, tels les peupliers, les saules et les noyers, avec des seuils de cavitation compris entre 0 et -20×10^5 pascals. D'autres sont résistantes, tels les chênes méditerranéens, les cèdres et un pin corse, avec des seuils de cavitation inférieurs à -40×10^5 pascals. Entre les deux, on trouve un grand nombre d'espèces vivant en régions tempérées, tels le hêtre, le frêne et des conifères, tel le pin sylvestre.

De l'importance de l'architecture

Par ailleurs, la vulnérabilité varie selon les différents axes d'un même arbre, en fonction de leur diamètre ou de leur nature. Enfin, une autre source de sensibilité à l'embolie est liée aux conditions de croissance : chez le hêtre, les branches qui se développent à la lumière sont notablement moins vulnérables que celles qui poussent à l'ombre, sans doute parce que leurs vaisseaux sont soit plus nombreux, soit plus larges, soit plus longs ; chez le frêne, la sensibilité des pétioles varie selon leur position dans le houppier (le sommet de l'arbre) ou selon l'âge des branches.

La croissance du diamètre participe également au contrôle de l'embolie *(voir la figure 7)*. À chaque printemps, un tissu périphérique, nommé cambium, ajoute un cerne et, par conséquent, de nouveaux vaisseaux alimentant les pousses de l'année. Chez les espèces qui ne réparent pas l'embolie estivale, cette croissance n'est efficace que lorsqu'elle a lieu avant le débourrement, c'est-à-dire l'éclosion des bourgeons. Dans ces conditions, les nouvelles feuilles sont correctement alimentées une fois la période de gel révolue. Les conduits embolisés le restent et sont parfois envahis par des thylles, des excroissances cellulaires des vaisseaux qui les bouchent définitivement.

L'étude de l'architecture hydraulique a aussi mis en évidence les relations entre l'état hydrique d'un arbre, mesuré par la tension de la sève brute, et sa croissance. L'enjeu est d'importance, car il concerne le déterminisme de la ramification et donc l'acquisition de la forme de la partie aérienne de l'arbre. Le fonctionnement physiologique des plantes vasculaires est perturbé dès que l'état hydrique diminue de plus de 15 à 25 pour cent de sa valeur optimale : bien plus que la photosynthèse, c'est la croissance, c'est-à-dire l'augmentation des dimensions d'un organe, qui est sensible au dessèchement.

Chez le hêtre, on a montré que plus la résistance des éléments conducteurs qui alimentent les bourgeons est faible (la conductivité est grande), plus le nombre d'ébauches foliaires dans les bourgeons est élevé. Les variations de la résistance hydraulique résultent des différences de diamètre des vaisseaux et de leur nombre. Or, chez le hêtre, le nombre d'ébauches dans le bourgeon détermine non seulement le nombre de feuilles de la pousse, mais également sa morphologie : lorsqu'il y a moins de quatre ébauches, la pousse est courte et ne se ramifie pas l'année suivante ; quand il y a plus de quatre ébauches, la pousse est longue et se ramifie. Au cours d'une année, la mise en place des ébauches foliaires est fonction du diamètre des pousses : plus il est grand, plus il y a d'ébauches. L'année suivante, la croissance en longueur et la ramification des pousses dépendent du nombre d'ébauches. Ainsi, en partie grâce à ses effets sur l'appareil vasculaire alimentant les bourgeons, les pousses et le nombre de feuilles mises en place une année dépendent des conditions de croissance de l'année précédente.

Les arbres ont une architecture hydraulique fondée sur deux propriétés de l'appareil conducteur : d'une part, sa vulnérabilité à l'embolie et sa conductivité hydraulique, d'autre part, la répartition de ces conductivités dans l'arbre. Leur étude a élucidé nombre de mécanismes, jusqu'alors inconnus, grâce auxquels on comprendra mieux l'évolution des caractéristiques au cours du vieillissement des arbres. Enfin, les botanistes mesurent désormais l'importance des périodes automnale et hivernale pendant lesquelles les arbres n'ont pas de feuilles et, par conséquent, ne transpirent pas. Bien qu'il ne se passe rien de visible, les nombreuses relations entre l'état de l'eau dans le système vasculaire, la physiologie et le développement de l'arbre font de cette période une étape clef indispensable au bon développement de la végétation quand la belle saison est venue.

Pierre CRUIZIAT, Hervé COCHARD et Thierry AMÉGLIO travaillent à l'unité mixte de recherches INRA-Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand « Physiologie intégrée de l'arbre fruitier et forestier ».

Pierre CRUIZIAT et al, *Hydraulic architecture of trees : main concepts and results*, in *Annals of forest science*, 2002.

De la graine à la plante, Bibliothèque scientifique *Belin-Pour la Science*, 2002.

M. TYREE et M. ZIMMERMANN, *Xylem structure and the ascent of sap*, Springer series in wood science, 2002.

Les échelles quantiques

THIERRY GIAMARCHI • EDMOND ORIGNAC • DIDIER POILBLANC

Composés hybrides, à mi-chemin entre les fils unidimensionnels et les conducteurs à deux ou trois dimensions, les échelles quantiques ont des propriétés électriques radicalement nouvelles.

La physique quantique s'est révélée indispensable non seulement pour comprendre les phénomènes atomiques ou subatomiques, mais aussi pour expliquer nombre de phénomènes macroscopiques, tels le ferromagnétisme, la supraconductivité ou l'effet Hall quantique. Tous ces phénomènes résultent d'une combinaison entre, d'une part, les interactions électriques des électrons et des ions chargés qui constituent les solides, et, d'autre part, des effets purement quantiques irréductibles à une description classique.

La description complète d'un objet sur la base de ces interactions est, *a priori*, inenvisageable, car le nombre de particules dans un échantillon macroscopique est gigantesque (de l'ordre de 10^{23}) et, même si les équations de base qui régissent le système étudié sont bien connues, le temps nécessaire pour les résoudre sur un ordinateur excède de plusieurs ordres de grandeur l'âge de l'Univers. Lorsque la mécanique quantique s'en mêle, la complexité du problème est encore augmentée par l'impossibilité de connaître en même temps la vitesse et la position de chaque particule (principe d'indétermination de Heisenberg). Enfin, le comportement collectif d'un très grand nombre d'électrons donne lieu, comme nous allons le voir, à des phénomènes radicalement nouveaux, qui ne peuvent être déduits de l'étude d'un petit nombre de particules en interaction.

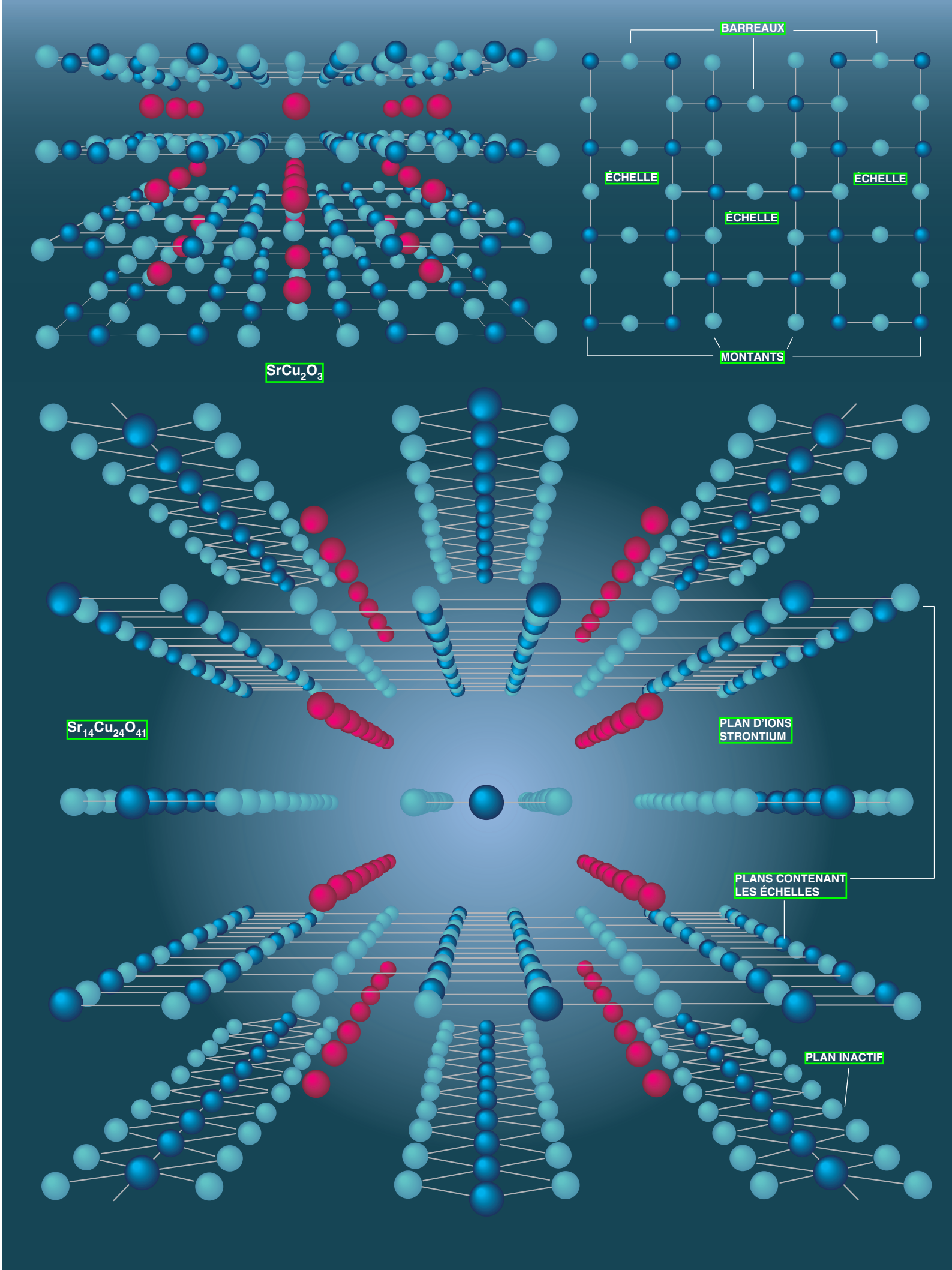
Heureusement, une description aussi complète n'est généralement pas nécessaire pour connaître les propriétés d'un corps à l'équilibre thermodynamique. Ainsi, à la fin du XIXe siècle, Ludwig Boltzmann décrivit de façon satisfaisante la physique des gaz parfaits ou dilués en introduisant l'usage des probabilités en physique, notamment pour décrire la position et la vitesse des particules. Par la suite, cette approche statistique a été généralisée par Josiah Gibbs qui exprima, pour un corps à la température T, la probabilité d'occupation de la configuration d'énergie E (proportionnelle à $\exp(E/kT)$ où k est une constante) sous une forme aisément transposable à la mécanique quantique. En physique des solides, il existe une simplification supplémentaire due au fait que l'on étudie des systèmes à basse température, et par conséquent, que l'on peut se contenter de considérer leur état fondamental (l'état de plus basse énergie) et les premiers états excités au-dessus du fondamental.

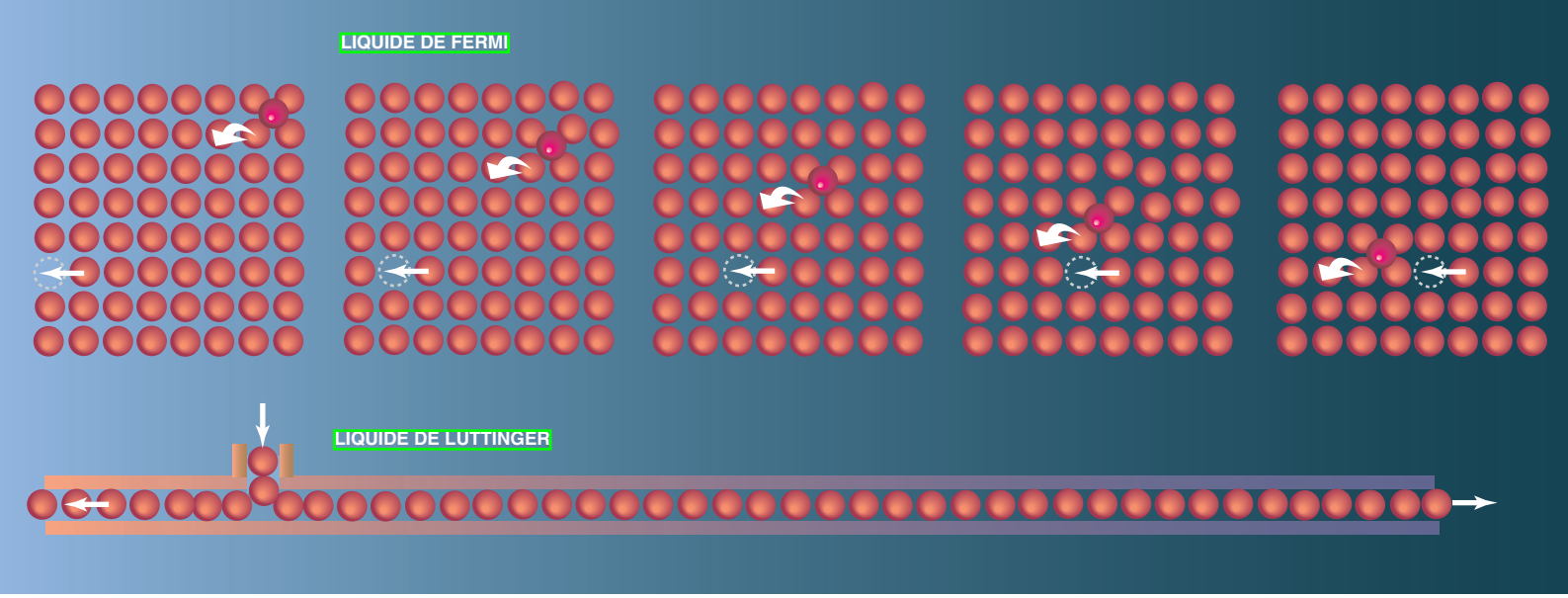
Comme nous le verrons, il résulte de ces méthodes que le comportement des électrons dans un conducteur de dimension égale à deux ou trois est très différent de celui des électrons contraints à se déplacer le long d'une direction unique. Au cours des dernières années les chimistes ont su synthétiser des matériaux constitués d'un petit nombre de chaînes d'atomes reliées par des ponts, les échelles, qui permettaient, pensaient les théoriciens, d'appréhender la structure des conducteurs bi ou tridimensionnels en partant de la limite unidimensionnelle qu'ils comprenaient bien. Or, de façon tout à fait inattendue, ces échelles quantiques se sont révélées dotées de propriétés très originales.

Gaz et liquides d'électrons

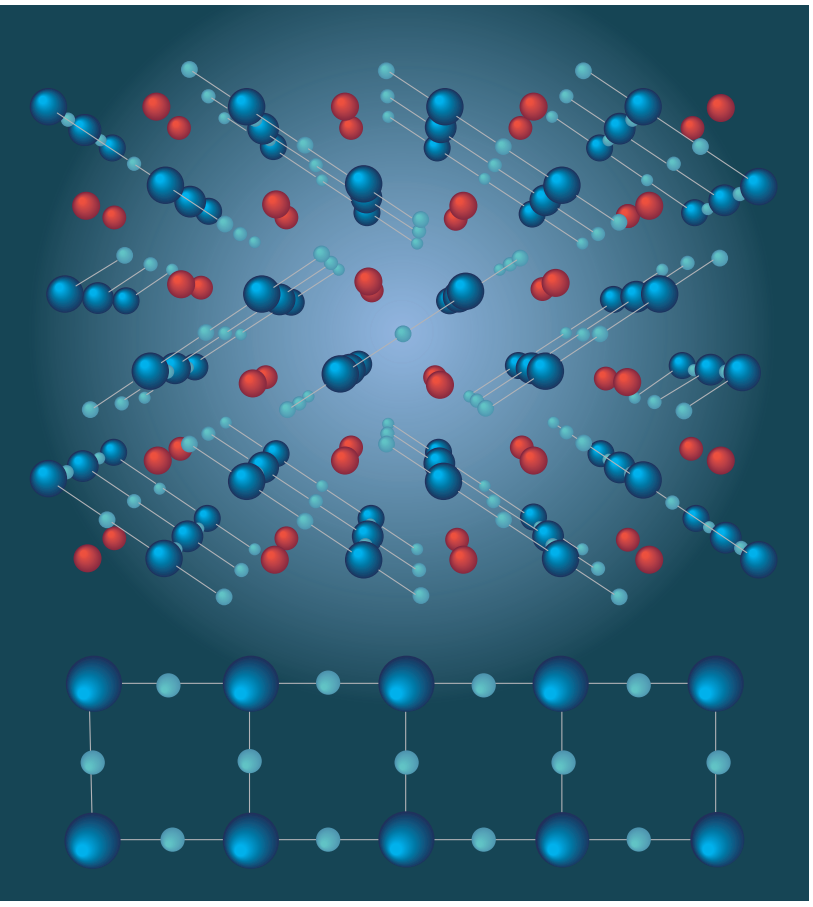
Dans un échantillon solide, les électrons se comportent comme un gaz ou une « mer » de particules chargées dont la structure détermine les propriétés de conduction du solide. Pour l'étudier plus en détail, rappelons qu'en mécanique quantique, on distingue deux classes de particules : les bosons (par exemple, les photons) et les fermions (par exemple, les électrons). Les bosons sont de véritables moutons de Panurge : la probabilité qu'un boson aille dans un état donné est proportionnelle au nombre de bosons qui l'occupent déjà. Au contraire, les fermions font figure de misanthropes : il est impossible de placer deux fermions dans le même état quantique (c'est le principe d'exclusion de Pauli). Les électrons, les protons et les neutrons ainsi que toute particule formée d'un nombre

1. LES ÉCHELLES QUANTIQUES sont des composés constitués de chaînes d'atomes – « les montants » – reliées par des ponts – « les barreaux ». Elles sont dotées de propriétés originales. Le composé de formule $SrCu_2O_3$ *(en haut)*, un réseau cristallin constitué d'ions strontium Sr^{2+} *(en rouge)*, cuivre Cu^{2+} *(en bleu)* et oxygène O^{2-} *(en turquoise)*, est formé de plans d'ions strontium séparant les plans d'ions cuivre et oxygène (Cu_2O_3) qui contiennent les échelles *(en haut et à droite)*. Ces échelles sont isolantes. Au contraire, les échelles du composé $Sr_{14}Cu_{24}O_{41}$ *(en bas)*, sont supraconductrices sous certaines conditions. Cette fois, il y a trois types de plans : les plans d'ions strontium, des plans d'ions cuivre et oxygène, mais aussi des plans constitués de chaînes d'oxyde de cuivre (inactives pour le transport électronique). On sait synthétiser des échelles à un nombre n quelconque de montants, des composés de formule générale $Sr_nCu_{n+1}O_{2n+1}$.


BARREAUX
ÉCHELLE
ÉCHELLE
ÉCHELLE
MONTANTS
$SrCu_2O_3$
$Sr_{14}Cu_{24}O_{41}$
PLAN D'IONS STRONTIUM
PLANS CONTENANT LES ÉCHELLES
PLAN INACTIF



2. LA CONDUCTION électrique dans un solide relève de descriptions différentes selon que les électrons se meuvent dans une dimension ou dans plusieurs. Le niveau de Fermi d'un solide peut être considéré comme la surface de sa « mer d'électrons ». Les transports de courant sont des excitations à la surface de cette mer, c'est-à-dire des particules ajoutées au niveau de Fermi *(en rouge)* ou des trous ôtés dans ce même niveau *(en pointillés)*. Ici, un jeu de taquin formé de billes symbolise les interactions entre les électrons qui ont pour résultat global que ces excitations se propagent comme des particules isolées formant un gaz dilué. Un tel système est qualifié de liquide de Fermi. Au contraire, dans un système unidimensionnel, une particule n'avance qu'en poussant celle qui précède, entraînant un mouvement collectif. Il n'existe pas d'excitations ressemblant à des fermions libres. Dans le cas de ces conducteurs à une dimension, on parle de liquide de Luttinger.



3. LE COMPOSE $LaCuO_{2,5}$ formé d'atomes de lantane *(en rouge)*, de cuivre *(en bleu)* et d'oxygène *(en bleu turquoise)* est constitué de chaînes d'atomes unidimensionnelles dont certaines sont reliées par des ponts transverses, ce qui leur confère une structure en échelle. Les physiciens pensaient que ces conducteurs présenteraient des propriétés intermédiaires entre celles des systèmes à une dimension (liquides de Luttinger) et celles des systèmes à deux dimensions (liquides de Fermi). En réalité, les échelles présentent des propriétés complètement nouvelles, et constituent peut-être un modèle réduit qui nous conduira à la compréhension de la supraconductivité à haute température critique.

impair de fermions (par exemple, les atomes d'hélium 3) sont des fermions. En revanche, les particules formées d'un nombre pair de fermions (les atomes d'hélium 4) sont des bosons. À condition de négliger les possibles interactions entre les particules, il est facile de calculer (par la méthode de Gibbs) les propriétés thermodynamiques d'un gaz de bosons, nommé gaz de Bose, ou d'un gaz de fermions, nommé gaz de Fermi. Ainsi, par exemple, on s'est aperçu que, dans le cas des bosons, un phénomène remarquable se produit : la condensation de Bose-Einstein où tous les atomes adoptent le même état quantique. Dans le cas des fermions, il ne peut y avoir de condensation puisqu'il est impossible de placer deux fermions dans le même état quantique : ces particules « s'empilent » sur des niveaux d'énergie de plus en plus élevés. Le niveau de plus grande énergie occupé à l'état fondamental est qualifié de niveau ou d'énergie de Fermi.

Le modèle du gaz de Fermi suffit souvent à expliquer un grand nombre de propriétés de la « mer d'électrons » qui constitue les métaux, en particulier les métaux dits simples, tel le sodium. Or, ceci est paradoxal. Le modèle de Fermi, comme on l'a déjà signalé, est bâti en négligeant totalement les interactions coulombiennes électrostatiques entre les électrons, de la même façon que l'on néglige les interactions entre les atomes pour construire le modèle du gaz parfait en mécanique statistique classique. Pourtant, dans la réalité, ces interactions ne sont nullement négligeables.

Pour éclairer ce paradoxe, évoquons la théorie dite du « liquide de Fermi », proposée en 1958 par le physicien russe Lev Landau. Landau postula qu'en l'absence d'interactions coulombiennes, les électrons formeraient effectivement un gaz parfait quantique – un gaz de Fermi – dont la description théorique est connue depuis les années 1930. En mécanique classique, pour passer de la description du gaz parfait à celle du liquide, il suffit d'augmenter la force des interactions. Ce passage se fait continûment, de sorte qu'il n'existe aucun moyen de distinguer nettement un gaz d'un liquide (on parle de continuité de l'état fluide). Selon Landau, le même phénomène devait se produire lorsqu'on ajoute des interactions

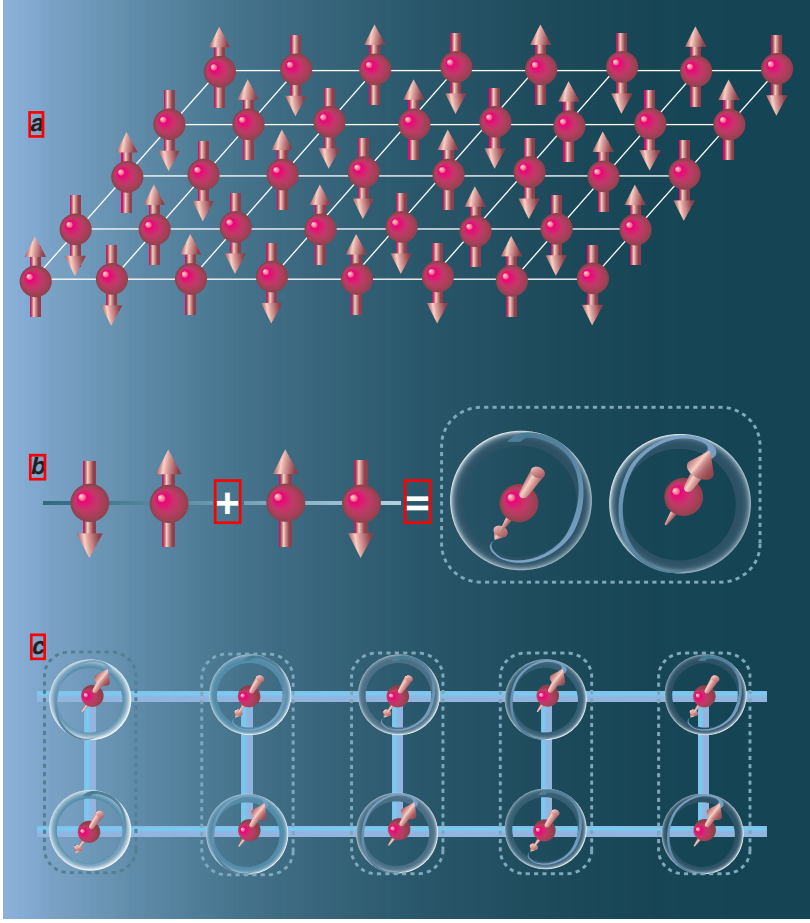
© POUR LA SCIENCE - N° 305 MARS 2003

de plus en plus intenses au modèle du gaz parfait quantique. Dès lors, la structure de l'état fondamental et des états excités du gaz est identique à celle des états correspondants dans le liquide.

Les états excités du liquide de Fermi sont des quasi-particules (des particules ajoutées au-dessus du niveau de Fermi) ou bien des quasi-trous (particules enlevées au niveau de Fermi) constituant un gaz de fermions *(voir la figure 2)*. On dit que ces particules sont « habillées », car leurs propriétés dépendent de l'action collective de l'ensemble des particules qui les entoure : on peut les comparer à des personnes dans une foule (un quasi-trou serait l'équivalent de l'espace libéré lorsqu'on enlève une personne dans une foule compacte). Quel que soit son désir d'avancer, une personne dans une foule dense ne peut progresser aussi vite qu'elle le pourrait au milieu d'une place déserte. Pour les particules, cela se traduit par le fait que l'inertie, c'est-à-dire la masse de la quasi-particule ou du quasi-trou, augmente avec l'intensité des interactions. Les électrons de conduction dans un solide sont dotés d'une masse effective différente de celle de l'électron dans le vide, et, quand les interactions sont fortes, ce changement est spectaculaire : on connaît, par exemple, des alliages dits de « fermions lourds », à base d'uranium, pour lesquels la masse effective des particules est une centaine de fois celle de l'électron. Ainsi, le liquide de Fermi ne se distingue du gaz parfait que par une redéfinition des paramètres des quasi-particules élémentaires qui le constituent. Autrement dit, la complexité introduite par les nombreuses interactions entre les électrons et les ions est, pour ainsi dire, balayée à l'intérieur d'une boîte noire : la masse effective des particules. Ceci explique que beaucoup de systèmes connus en physique des solides puissent être décrits au moyen de ces gaz ou de ces liquides de fermions interagissant faiblement.

Liquide à une dimension

Il existe cependant des matériaux où les effets des interactions sont tels qu'une description de leurs électrons de conduction en termes de liquide de Fermi est impossible. Au cours des années 1970, les physiciens du solide ont commencé à s'intéresser à des conducteurs organiques, tel le Tétrathiatulvalène-Tétracyanoquinone (TTF-TCNQ), où les électrons ne peuvent se déplacer facilement que suivant une seule des dimensions du solide (nous verrons comment réaliser de tels conducteurs un peu plus loin). Dans ce cas, il est facile de comprendre que les effets des interactions sont cruciaux : cette fois, il ne faut plus imaginer une foule, mais une file d'attente où le mouvement d'une personne implique celui de toutes les autres *(voir la figure 2)*. Le mouvement des individus devient immédiatement un mouvement collectif du système et les excitations des électrons de conduction ne peuvent plus être traitées comme les particules individuelles du liquide de Fermi. C'est pourquoi la théorie de Landau est inapplicable à des électrons dans des systèmes unidimensionnels. Une autre propriété de ces conducteurs unidimensionnels a été démontrée, en 1960, par David Mermin et Herbert Wagner : du fait de ces mouvements nécessairement collectifs et de l'existence des fluctuations quantiques même à très basse température, ces systèmes ne peuvent jamais s'ordonner sur de grandes distances (comme c'est le cas dans un solide).



4. L'INTERACTION D'ÉCHANGE QUANTIQUE pousse les spins des électrons (leur moment magnétique qui leur confère des propriétés comparables à celles d'une aiguille aimantée) à s'aligner de manière antiparallèle. Dans un réseau de dimension deux *(a)* ou trois chaque spin est gelé dans une position particulière. Le système est alors essentiellement classique et on peut le considérer comme un « solide » de spin. Il est qualifié d'antiferromagnétique. Un système de deux spins *(b)* se place, quant à lui, dans la configuration d'énergie la plus basse qui est une superposition quantique des deux états antiparallèles possibles et que l'on nomme état singulet. Le moment magnétique total de l'état singulet est nul en permanence, mais il est impossible de dire quelle est la direction du moment magnétique d'un des deux électrons. Dans une échelle isolante à deux montants *(c)*, les spins se verrouillent deux à deux dans des états singulets. L'aimantation du composé s'annule totalement en même temps que l'orientation de chaque spin est inconnue : on parle de « liquide de spins ».

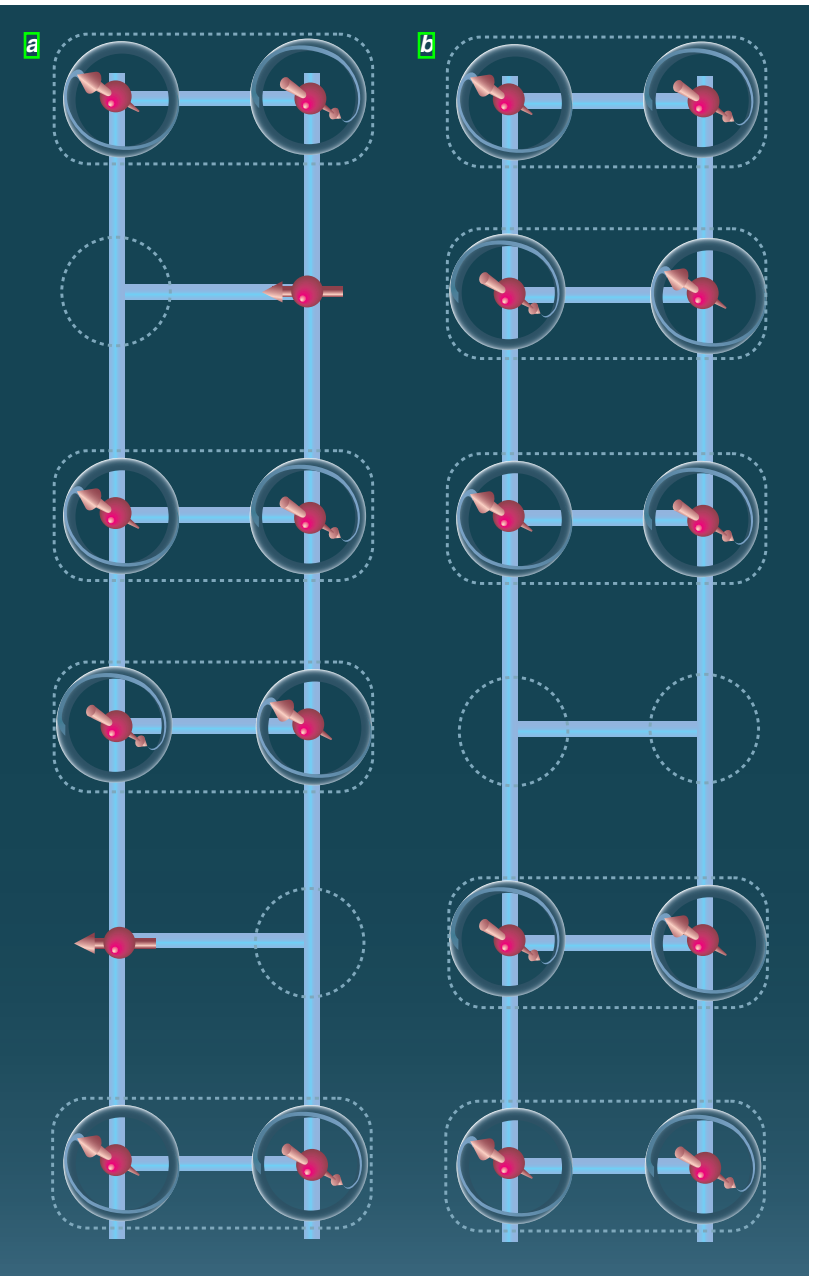
Au cours des années 1970 et 1980, des théoriciens, tels Alan Luther, Victor Emery et Duncan Haldane ont mis au point une description théorique des électrons en interaction dans un système à une dimension : le modèle des liquides de Luttinger (du nom du physicien Jim Luttinger qui a accompli des travaux précurseurs dans ce domaine). Contrairement à un liquide de Fermi, où, rappelons-le, les excitations ressemblent à de vrais électrons avec leur charge, leur spin et leur masse effective (en général différente de celle de l'électron dans le vide), les excitations (par exemple les transports de charge) sont très différentes dans les liquides de Luttinger. Elles correspondent à des mouvements globaux soit de la charge, soit du moment magnétique du système. Ainsi, dans un liquide de Luttinger, un électron de conduction peut se scinder en deux excitations indépendantes, l'une transportant de la charge, mais pas de moment magnétique, l'autre ayant les propriétés complémentaires !

Aujourd'hui, grâce aux progrès de la chimie et de la nanotechnologie, on réalise toutes sortes de systèmes d'électrons unidimensionnels, aussi l'étude du liquide de Luttinger est-elle particulièrement importante. Citons par exemple,

outre les conducteurs organiques, les fils quantiques (gravés dans un substrat semi-conducteur qui confine les électrons transversalement à l'aide d'un « puits quantique »), les nanotubes de carbone et les échelles quantiques.

Malheureusement, l'analyse de ces matériaux est compliquée par le fait qu'on peut très rarement décrire un matériau réel à l'aide d'un modèle purement unidimensionnel. Ainsi, par exemple, les conducteurs organiques sont composés d'empilements de chaînes atomiques le long desquelles les électrons peuvent se mouvoir plus facilement que dans les autres directions, mais où le mouvement transverse reste possible. Un tel système est, par conséquent, susceptible de présenter un mélange de propriétés propres aux liquides de Luttinger et aux liquides de Fermi. La manière dont se fait la transition entre un liquide de Luttinger et un liquide de Fermi, en fonction de la dimension du système considéré ou de l'intensité des interactions, reste une question théorique sans réponse satisfaisante pour le moment.

Stimulée par ces problèmes, une intense activité tant théorique qu'expérimentale s'est développée récemment autour de composés intermédiaires entre une simple structure unidimensionnelle et un ensemble de chaînes unidimensionnelles couplées : les composés en échelle. La surprise est que ces échelles présentent un ensemble de propriétés tout à fait nouvelles.



5. SI L'ON INTRODUIT DES TROUS dans une échelle, on détruit des états singulets qui sont les états d'énergie minimale. Par conséquent, l'opération exige de fournir de l'énergie : il en coûte plus de le faire sur deux barreaux distincts *(a)*, ce qui casse deux singulets, que de mettre les deux trous sur le même barreau *(b)*. Il existe, par conséquent, une attraction résultante entre les trous dans une échelle. Cette attraction permet la formation de paires de trous et conduit à la supraconductivité.

Les échelles isolantes

Intéressons-nous plus en détail à la structure cristalline d'un de ces matériaux en échelle : un cristal de strontium et d'oxyde de cuivre de formule $SrCu_2O_3$. La structure de ce composé est proche de celle des supraconducteurs à haute température. Cependant, alors que les plans d'oxyde de cuivre des pérovskites supraconductrices sont invariants par une rotation de 90 degrés autour d'un axe perpendiculaire à leur plan, dans $SrCu_2O_3$, ces plans sont formés de doubles chaînes d'atomes de cuivre et d'oxygène appelées « échelles » *(voir la figure 1)*. Le recouvrement des orbitales atomiques impose aux électrons de suivre les chaînes. En l'absence des ponts « horizontaux » Cu-O-Cu, les électrons devraient suivre un chemin unidimensionnel « vertical » ; la présence de ces ponts – les « barreaux » de l'échelle – permet aux électrons de se déplacer le long des chemins transverses. Cette structure a la forme d'une échelle à deux montants, d'où son nom. En fait, il existe une classe entière de composés, synthétisés pour la première fois en 1991 par Zenji Hiroi, à l'Université de Kyoto, dont la formule chimique générale est $Sr_nCu_{n+1}O_{2n+1}$, et qui constituent des échelles à n montants.

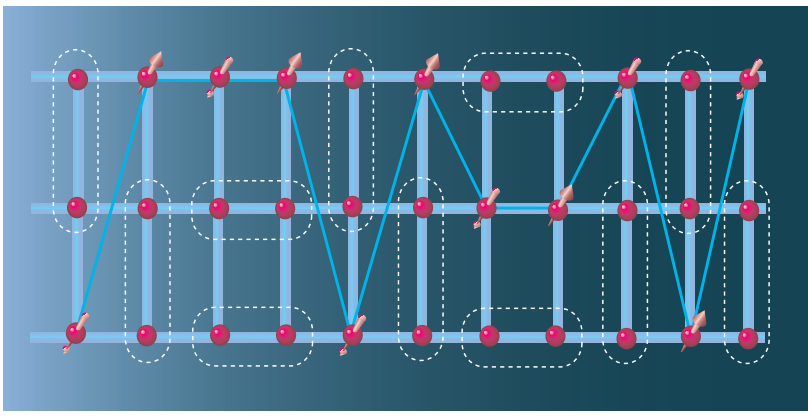
Pourquoi les composés en échelle sont-ils si particuliers ? Considérons d'abord une échelle simple ayant exactement un électron libre par site, c'est-à-dire par atome de cuivre. C'est la structure électronique normale d'une échelle en l'absence de dopage. En plus de sa position le long de l'échelle, l'état quantique de l'électron est défini par son spin (un moment magnétique quantifié qui lui confère des propriétés analogues à celles d'une petite aiguille aimantée). Si l'on néglige la répulsion coulombienne, rien n'empêche deux électrons de se trouver sur le même site, pourvu que leurs spins soient opposés, puisque leurs états ne sont alors pas identiques. Cela permet aux électrons de se déplacer le long de l'échelle, d'atome de cuivre en atome de cuivre, et l'on a un état conducteur. Si, au contraire, la répulsion coulombienne est très forte, il y aura exactement un électron sur chaque site pour minimiser la répulsion entre les électrons : toute autre configuration est un état excité de haute énergie. Dans ce cas, la position des électrons est gelée et le système est un isolant dit de Mott (du nom du prix Nobel Sir Nevil Mott qui en a le premier compris le mécanisme). Dans le matériau isolant, le spin joue un rôle essentiel. En effet, les électrons dont la position est gelée se comportent comme de petits « aimants » individuels. Nous devons donc comprendre comment interagissent les moments magnétiques de deux électrons situés sur deux sites différents.

© POUR LA SCIENCE - N° 305 MARS 2003

Bien sûr, il existe une interaction directe, d'origine magnétique et identique à l'interaction de deux aimants, mais elle n'est pas, et de loin, la plus importante. L'interaction la plus forte est d'origine purement quantique : on la nomme interaction de superéchange. En effet, la mécanique quantique permet aux particules d'explorer des états qui seraient interdits en mécanique classique, car l'accession à ces états coûte une quantité d'énergie dont les particules ne disposent pas. En mécanique quantique, un système peut toutefois « emprunter » au vide une quantité d'énergie ΔE à condition de le faire pendant un temps très court ΔT, tel que le produit de ΔE par ΔT soit égal à la constante de Planck réduite h (c'est le principe d'indétermination de Heisenberg). Les électrons peuvent donc faire des « sauts virtuels » chez leurs voisins, puis revenir sur leur site. En se délocalisant de la sorte, les électrons abaissent leur énergie (d'ailleurs, sans les interactions répulsives, ils s'étaleraient sur tous les sites possibles). Ce phénomène est un peu comparable à la formation d'une liaison chimique, lorsque la délocalisation des électrons mis en commun par deux atomes abaisse leur énergie totale. Dans le cas qui nous occupe, à cause du principe de Pauli, on ne peut pas mettre deux électrons dans le même état de spin au même endroit et, par conséquent, l'abaissement de l'énergie grâce aux sauts virtuels n'est possible que si le spin d'un électron est opposé à celui de ses voisins. Il en résulte une interaction effective dite de superéchange (découverte par le prix Nobel Philip Anderson), bien plus intense que l'interaction magnétique et qui tend à aligner dans la même direction, mais en sens contraire le spin de deux électrons voisins.

À quel état cela nous conduit-il ? Plusieurs solutions sont possibles. Dans les systèmes tridimensionnels, la présence de cette interaction gèle le moment magnétique de chaque électron dans une direction précise. Le système devient ce que l'on nomme un antiferromagnétique. On peut considérer les antiferromagnétiques comme étant constitués de deux sous-réseaux d'aimantations opposées imbriqués de sorte que le système ne présente pas d'aimantation globale (toutefois l'aimantation de chaque sous-réseau peut être mise en évidence par diverses méthodes, telle la diffraction des neutrons). Notons au passage que, bien que l'électron soit une particule quantique, l'antiferromagnétisme admet une description purement classique due au prix Nobel français Louis Néel. De façon générale, on peut considérer un système antiferromagnétique comme un « solide » de spins où chaque spin a une orientation bien précise. Un tel système possède une susceptibilité magnétique non nulle (c'est-à-dire qu'il acquiert une certaine aimantation en présence d'un champ magnétique).

Que se passe-t-il dans un système unidimensionnel ? À cause du théorème de D. Mermin et H. Wagner que nous avons cité, l'état de Néel ordonné à longue distance ne peut pas exister : le système de spins n'admet, en fait, aucune description classique. La fonction d'onde de l'état fondamental du système de spins unidimensionnel a été obtenue, dès 1931, par Hans Bethe, mais elle est tellement compliquée que l'état du système de spin correspondant n'a pu être élucidé qu'après les travaux de V. Emery, A. Luther et D. Haldane dans les années 1970 et 1980. Il s'avère que la chaîne de spins possède un « quasi-ordre » à longue portée et forme une sorte de liquide de Luttinger de spins (ce qui montre la surprenante universalité du liquide de Luttinger dans les systèmes à une dimension).



6. UNE ECHELLE A UN NOMBRE IMPAIR DE MONTANTS. Dans une telle échelle, lors de l'appariement des spins en états singulets, il reste un spin libre sur chaque colonne et le système est alors équivalent à une chaîne *(en bleu)* de spins antiparallèles qui possède un quasi-ordre antiferromagnétique.

Dans une échelle, état intermédiaire entre les systèmes à une et à deux dimensions, la physique obtenue est encore différente. Considérons tout d'abord un système de deux spins couplés. Il existe deux configurations antiparallèles possibles de ces spins *(voir la figure 4)* qui sont mélangées par l'interaction d'échange. La configuration de plus basse énergie est une superposition quantique de ces deux états et le système résonne entre les deux configurations possibles. Il est impossible de savoir dans quelle direction pointe le spin d'un des deux électrons, mais cette superposition est en permanence telle que les deux moments magnétiques se compensent mutuellement de manière parfaite. Cet état est dénommé singulet, et il est caractérisé par un moment magnétique total nul.

Désordre complet

Lorsque l'on passe de cette « échelle à un barreau » à une véritable échelle quantique, c'est-à-dire lorsque l'on introduit un couplage magnétique dans la direction des montants, chaque paire de spins reste dans l'état singulet. Le système, qui s'apparente à un alignement d'états singulets de moment magnétique nul, est donc dans un état non magnétique. De plus, fait remarquable, il n'existe ni ordre ni quasi-ordre à longue portée : les spins à l'intérieur de deux états singulets différents ne s'influencent pas, les paires de spins couplés évoluent de façon totalement indépendante. L'échelle de spin a donc une manière radicalement différente de satisfaire les contraintes imposées par le théorème de Mermin-Wagner : au lieu de s'ordonner le plus possible comme la chaîne, l'échelle à deux montants se désordonne complètement.

Les états excités de l'échelle à deux montants sont obtenus en alignant parallèlement des spins sur un même barreau : on parle d'un état triplet. Former un état triplet, c'est-à-dire une paire de singulets dont les spins d'un même barreau évoluent parallèlement, coûte une énergie finie, nommée le seuil, ou « gap », de l'échelle. Ces triplets – qui sont des bosons – forment les excitations élémentaires de l'échelle et, telles les quasi-particules dans les conducteurs ordinaires, se comportent comme un gaz de particules dilué, la principale différence réside ici dans le fait que ces quasi-particules interagissant faiblement sont, cette fois, des bosons. Ce gaz de bosons est susceptible d'acquérir une

aimantation lorsqu'on lui applique un champ magnétique. Ainsi, ces matériaux ont une certaine susceptibilité au-dessus du seuil d'énergie de l'échelle, susceptibilité qui tombe à zéro au-dessous de ce seuil, car alors les spins se verrouillent deux à deux en états singulets et le système n'a aucune réponse magnétique.

La parité des montants

Que se passe-t-il lorsque le nombre de montants de l'échelle devient supérieur à deux ? De façon surprenante, le résultat ne dépend que de la parité du nombre de montants. Dans le cas d'un nombre pair, tout se passe comme dans l'échelle à deux montants que nous venons de décrire. En revanche, si le nombre de montants est impair, il reste toujours un spin non apparié par colonne (voir la figue 6). L'état de plus basse énergie est comparable à celui d'un spin unique et l'échelle se comporte comme une chaîne (en zig zag) de spins quantiques qui possède une réponse magnétique, même à très basse température (il n'existe pas de seuil au-dessous duquel la susceptibilité magnétique s'annule).

En fait, pour les échelles à nombre pair de montants, la physique est légèrement plus complexe que la description que nous en avons donnée ci-dessus. Les spins se verrouillent bien en singulets, mais plusieurs choix d'appariement sont possibles pour former le singulet (deux spins voisins sur un même barreau ou sur un même montant). Dès lors, la mécanique quantique nous dit que les appariements vont résonner entre des états différents (l'état de plus basse énergie sera une superposition des différents modes d'appariement). On parle d'état RVB *(Resonating Valence Bond)*. Contrairement à un antiferromagnétique où chaque électron a son spin pointant dans une direction précise, dans le cas présent le spin de chaque électron résonne. On peut donc voir l'état magnétique de l'échelle comme un « liquide » de spin où l'état de chaque point dans le matériau change constamment au cours du temps. Un tel état liquide de spin est radicalement nouveau et une controverse a existé pour savoir si, dans un système à deux dimensions, des spins placés sur un réseau carré pouvaient posséder un état liquide de spin (une question importante pour la théorie de la supraconductivité à haute température). Cette controverse est maintenant résolue : l'état fondamental du système de spins sur un réseau carré en dimension deux est l'état de Néel (le solide de spin). Cependant, il existe des réseaux plus complexes, tels le réseau Kagomé ou le réseau pyrochlore, sur lesquels un liquide de spin bidimensionnel, peut en principe exister. Cette question fait l'objet de recherches actives en particulier à cause de l'intérêt qu'elle présente pour des systèmes comme CaV_4O_9.

Les propriétés des échelles à deux montants offrent l'opportunité d'étudier un autre phénomène physique important. En appliquant un champ magnétique, il est possible d'abaisser l'énergie des triplets au-dessous de celle de l'état singulet ! Les triplets étant des bosons, il devient possible d'obtenir leur condensation de Bose. En réalité, toujours à cause du théorème de Mermin-Wagner, on n'obtient pas un véritable condensat, mais plutôt un liquide de Luttinger de triplets.

Ce changement de comportement collectif s'apparente à une transition de phase dans un système classique. La différence est ici que la transition de phase n'est plus contrôlée par un changement de température, mais par un changement d'un des paramètres du système (en l'occurrence le champ magnétique ambiant) et peut donc se produire même au zéro absolu. Le rôle qui, dans une transition de phase classique est joué par l'agitation thermique (qui, rappelons-le, a disparu au zéro absolu) est joué ici par les fluctuations quantiques. On parle de phénomène critique quantique. Ces phénomènes critiques quantiques sont importants pour de nombreux matériaux. Ils ont été proposés comme origine possible de la supraconductivité dans les alliages « fermions lourds » ou dans les supraconducteurs à haute température. Cependant, cette question reste ouverte tant du point de vue théorique que du point de vue expérimental.

Les échelles dopées

Jusqu'ici nous avons considéré des composés à un électron par site, et qui, par conséquent, sont des isolants (de Mott) du fait des interactions coulombiennes. Supposons maintenant qu'en changeant la composition chimique du matériau, on puisse extraire certains électrons de l'échelle, ces électrons étant capturés par des atomes situés dans une autre partie du matériau. C'est ce qui se passe, par exemple, dans le composé strontium, calcium, oxyde de cuivre de formule $Sr_2Ca_{12}Cu_{24}O_{41}$ *(voir la figure 1)*. On obtient alors une échelle dopée, où certains sites sont vides (on dit que l'on a injecté des trous dans l'échelle). Contrairement au cas de l'isolant de Mott, la présence de trous rend la conduction électrique à nouveau possible, le trou pouvant sauter d'un site au site voisin comme dans un jeu de taquin. Toutefois, ils empêchent la formation des singulets de spin, coûtant de ce fait de l'énergie. De plus, deux trous éloignés cassent deux singulets et coûtent plus d'énergie que deux trous voisins *(voir la figure 5)*. Il devient alors préférable de positionner deux trous sur le même barreau pour ne casser qu'un seul singulet. Autrement dit, il existe une attraction entre les trous… et ceci alors même que toutes les particules considérées ont la même charge et que leurs interactions sont, au départ, purement, répulsives !

L'existence d'une telle attraction entre trous a des conséquences spectaculaires, signalées par Maurice Rice, de l'Institut fédéral de technologie de Zurich. Depuis la théorie de John Bardeen, Leon Cooper et Robert Schrieffer, les physiciens savent qu'une attraction entre les électrons d'un solide conduit à la formation de paires d'électrons. Ces paires d'électrons – dites de Cooper – sont des bosons et sont susceptibles de se condenser en donnant lieu à un état superfluide qui produit la supraconductivité, c'est-à-dire le transport de courant sans résistance dans le matériau. Dans les solides usuels, l'attraction est due au couplage des électrons avec les vibrations du réseau et provient, *in fine*, de l'attraction entre les électrons et les ions positifs du réseau cristallin. Au contraire, dans une échelle, une attraction effective se manifeste directement qui n'implique que les électrons, et n'a pas recours aux vibrations du réseau. Or, les énergies des interactions entre électrons sont bien plus élevées que celles des vibrations des ions, et, par conséquent, on conçoit facilement que l'attraction entre trous dans une échelle sera beaucoup plus forte que celle qui est provoquée par l'interaction avec les ions du réseau : ainsi, cette nouvelle

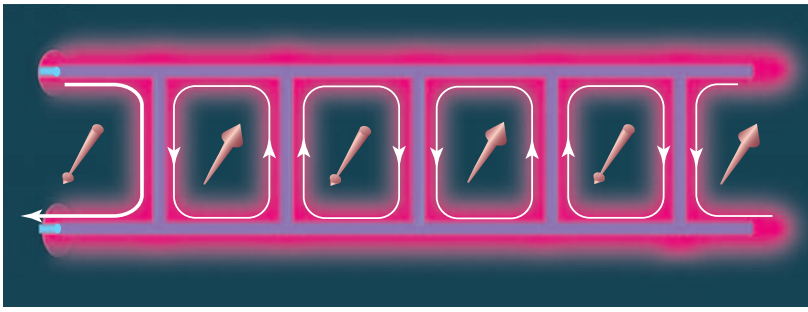
© POUR LA SCIENCE - N° 305 MARS 2003

supraconductivité pourrait apparaître à une température bien supérieure à celle induite par le mécanisme de Bardeen, Cooper et Schrieffer. Certes, dans le cas unidimensionnel, le théorème de Mermin et Wagner empêche la formation d'un ordre supraconducteur à longue distance, mais l'analyse théorique permet de prédire une forte tendance supraconductrice. Dans le cas des échelles couplées où certains mouvements transverses sont possibles et où le théorème de Mermin et Wagner ne s'applique plus, il est possible que la phase supraconductrice soit stabilisée. Il existe de nombreuses analogies entre la supraconductivité prédite dans les échelles et celle qui a été mise en évidence expérimentalement dans les supraconducteurs à haute température critique, et dont on ne comprend toujours pas le mécanisme. Les échelles sont-elles une sorte de modèle réduit des supraconducteurs à haute température critique ? Il est trop tôt pour l'affirmer, mais l'hypothèse est séduisante. En attendant, cette prédiction théorique a conduit à une recherche expérimentale pour observer cette supraconductivité dans les échelles.

Une nouvelle phase

Les premières expériences de dopages se sont révélées infructueuses, les composés restant des isolants. Cependant, ces résultats ne sont pas surprenants. En effet, il est difficile de bénéficier des avantages du monde unidimensionnel sans souffrir de ses inconvénients : dans les systèmes unidimensionnels, les porteurs de charge ne peuvent plus contourner les obstacles et leurs propriétés conductrices sont extrêmement sensibles à la présence d'impuretés. Néanmoins, en 1996, Jun Akimitsu et ses collègues de l'Université Aoyama-Gakuin, à Tokyo, ont montré que le composé $Sr_2Ca_{12}Cu_{24}O_{41}$ sous forte pression présente une transition supraconductrice à la température critique de 12 kelvins.

En modifiant légèrement les interactions dans l'échelle, nous avons montré qu'on obtient une autre phase extrêmement étonnante. On empêche alors les charges de s'apparier et donc une supraconductivité « conventionnelle » d'apparaître. Cependant au lieu de rester immobiles les charges se mettent alors à tourner en formant des boucles de courant microscopiques *(voir la figure 7)*. Il est important de noter que ce courant circule sans dissipation. Cette délocalisation de la charge est un peu analogue à celle qui se produit pour les électrons sur certaines molécules, tel le benzène, par exemple. La différence importante est qu'ici, le système brise spontanément la symétrie droite-gauche et, par conséquent, qu'un courant microscopique circule. Ces courants de charge changent de sens d'une « plaquette » à l'autre, ce qui fait qu'aucun courant macroscopique ne traverse l'échantillon. Cependant, au niveau macroscopique, ces boucles de courant ont des conséquences observables. Exactement comme une petite spire de courant produit un champ magnétique, chacune de ces boucles de courant va donner lieu à un petit moment magnétique. Ces moments alternent de plaquette en plaquette et l'on obtient un système antiferromagnétique, où, toutefois, les moments magnétiques ne sont pas des spins d'électrons, mais sont dus aux courants orbitaux circulant dans le système. Cette phase, qualifiée d'antiferromagnétique orbitale ou de phase de flux, est un nouvel état de la matière et possède des propriétés encore



7. UNE PHASE ETRANGE apparaît dans les échelles sous certaines conditions. Comme dans une molécule de benzène, les électrons *(en rose)* sont délocalisés sur l'édifice atomique et des courants électroniques microscopiques circulent sur les motifs de l'échelle. Ces courants, telles de petites spires, engendrent des moments magnétiques opposés. Il s'agit d'un antiferromagnétisme particulier qui n'est pas dû au spin des électrons (ces spins sont, quant à eux, verrouillés deux à deux en états singulets). C'est l'antiferromagnétique orbital.

mal comprises. En plus de son intérêt théorique, nous avons montré qu'elle présente une propriété de transport surprenante : elle ne n'est pas supraconductrice, mais elle est capable de transporter du courant sans dissipation, même en présence de désordre (impuretés) dans le système. Une telle phase pourrait donc être une nouvelle forme de supraconduction. En fait, dès 1988, Ian Affleck et Brad Marston d'une part, et indépendamment, Alexander Nersesyan de l'autre ont postulé que des phases de flux analogues étaient à l'origine des propriétés des supraconducteurs à haute température critique. Récemment, des expériences de photoémission sur les supraconducteurs à haute température, réalisées par Juan-Carlos Campuzano à l'Université d'Urbana-Champaign, ont relancé l'intérêt pour ces phases de flux, car elles ont mis en évidence de tels courants.

Les composés en échelles sont des matériaux surprenants par la richesse de leur physique, tant dans leur phase isolante que dans leur phase métallique. Leur comportement peut aller du liquide de spin au supraconducteur inhabituel. De plus, ils se prêtent remarquablement bien à l'étude de transitions critiques quantiques et de passage dimensionnel. Aussi bien d'un point de vue expérimental que théorique, nous sommes encore très loin d'avoir épuisé leur richesse.

Thierry GIAMARCHI est professeur à l'Université de Genève et chercheur CNRS au Laboratoire de physique des solides de l'Université de Paris-Sud. Edmond ORIGNAC est chercheur CNRS au Laboratoire de physique théorique de l'École normale supérieure de Paris. Didier POILBLANC est chercheur CNRS au Laboratoire de physique théorique de l'Université Paul Sabatier de Toulouse.

E. DAGOTTO et T. RICE, *Surprises on the Way from 1D to 2D Quantum Magnets*, in *Science*, vol. 271, p. 618, 1996.

M. UEHARA *et al.*, *Superconductivity in the Ladder Material* $Sr_{0.4}Ca_{13.6}Cu_{24}O_{41.84}$, in *J. Phys. Soc. Japan*, vol. 65, p. 2764, 1996.

C. HAYWARD et D. POILBLANC, *Luttinger Liquid Behavior and Superconducting Correlations in Ladders*, in *Phys. Rev. B*, vol. 53, p. 11721, 1996.

E. ORIGNAC et T. GIAMARCHI, *Effect of disorder on two strongly correlated coupled chains*, in *Phys. Rev. B*, vol. 56, p. 7167, 1997.

T. GIAMARCHI, E. ORIGNAC, D. POILBLANC et H. SCHULZ, *Les échelles quantiques*, in *Images de la Physique*, CNRS, 1999.

Vin et santé

ARTHUR KLATSKY

Depuis 30 ans, les biologistes découvrent que boire de l'alcool modérément est bénéfique pour le système cardio-vasculaire. Les médecins sont face à un dilemme : faut-il recommander à certains patients de boire avec modération ?

En 1842, s'adressant à une société de tempérance, le futur président Abraham Lincoln laissa pantois son auditoire en affirmant qu'« il est vrai que beaucoup de gens souffrent des suites d'une intoxication due à la boisson. Cependant, il n'est venu à l'esprit de personne que le mal ne provient pas de l'usage d'une chose mauvaise, mais plutôt de l'abus d'une bonne chose ».

L'alcool a toujours été un sujet tabou et son sort est sans cesse discuté. Entre 1912 et 1933, la prohibition et ses bars clandestins succèdent à une période où les réclames recommandaient la bière pour les jeunes enfants ! Aujourd'hui, même accompagné de la mention « à consommer avec modération » un flot continu de publicité vantant les alcools nous assaille. Parallèlement, la sobriété, voire l'abstinence, sont régulièrement recommandées. Que doit-on en penser ?

L'alcoolisme et la surconsommation d'alcool sont des fléaux reconnus. Toutefois, s'alarmer des dangers de l'abus d'alcool dissimule tout le bénéfice d'une consommation modérée. En effet, depuis quelques années, des preuves s'accumulent pour montrer qu'une prise modérée d'alcool prévient certaines maladies cardio-vasculaires, tels les infarctus, quand certains tissus ne sont plus alimentés en oxygène à cause de l'obstruction d'un vaisseau sanguin. Par ailleurs, d'autres études ont mis en évidence les bienfaits de l'alcool contre les démences et certaines maladies neurodégénératives.

Comment peut-on définir une consommation « légère », « modérée » et « abusive » ? Bien que les définitions soient souvent arbitraires, un consensus médical situe la limite supérieure d'une consommation modérée à deux boissons de taille standard par jour *(voir la figure 1)*. Boire des quantités supérieures à cette limite entraîne des dommages pour la santé qui varient selon le sexe et l'âge notamment.

Boire ne nuit pas à la santé

Le principal bénéfice d'une consommation modérée d'alcool semble être la diminution du risque de maladies cardio-vasculaires et notamment coronariennes (le réseau des coronaires est dévolu à l'alimentation en oxygène du cœur). Ces maladies résultent de l'athérosclérose, c'est-à-dire du



1. UN VERRE DE VIN ROUGE, qui contient dix grammes d'alcool, est, en France, un étalon pour la notion de taille standard des boissons. Ainsi, puisque les quantités d'alcool sont équivalentes, 25 centilitres de bière ou un verre de trois centilitres d'alcool distillé, tels la vodka et le whisky, sont des boissons de taille standard.

© POUR LA SCIENCE - N° 305 MARS 2003

dépôt de plaques de graisses, nommées athérome, dans les artères qui se rigidifient et se sclérosent, avant de se boucher. Le mot « athérosclérose » est l'association de deux mots grecs : *athera*, signifiant « brouet », et *sclera*, « dur ».

L'athérosclérose diminue le débit sanguin vers le cœur et favorise la formation de caillots qui risquent d'obstruer les vaisseaux, créant ainsi des angines de poitrine ou des infarctus parfois mortels. Les conditions qui aboutissent à une maladie chez le sujet âgé se mettent en place progressivement chez le sujet jeune. Dans les pays développés, les maladies coronariennes causent environ 60 pour cent des décès liés à des troubles cardio-vasculaires et environ 25 pour cent de la mortalité totale.

Au début des années 1900, des médecins observèrent que les larges artères des individus morts de cirrhose du foie étaient « propres », c'est-à-dire exemptes de plaques d'athérome. Selon une première hypothèse, l'alcool dissolvait les graisses des artères ; une autre, plus pessimiste, soutenait que les buveurs invétérés mouraient avant le développement de leur athérosclérose. Aucun de ces deux points de vue n'était convaincant.

Un pas de plus a été accompli en faveur de l'alcool à la fin des années 1960, quand Gary Friedman, du Centre médical d'Oakland, en Californie, mit en évidence, grâce à des ordinateurs, les premiers facteurs de risque d'infarctus chez les individus en bonne santé : le tabagisme, l'hypertension, le diabète, les quantités élevées de lipoprotéines de faible densité (ces LDL transportent le cholestérol du foie où il est stocké vers les autres organes), les faibles quantités de lipoprotéines à haute densité (les HDL effectuent le trajet inverse des LDL), le sexe masculin et les antécédents familiaux de maladies cardio-vasculaires. Ensuite, il a recherché d'autres éléments prédictifs des infarctus en comparant les habitudes sportives et diététiques ainsi que la composition sanguine de malades et d'individus sains. Les statistiques étaient formelles : s'abstenir d'alcool est associé à une augmentation du risque de crise cardiaque !

La plupart des études précédentes n'avaient pas établi ce lien, car elles n'examinaient pas la consommation d'alcool de façon indépendante de celle du tabac. Or, les buveurs sont souvent des fumeurs : l'impact négatif du tabac masquait l'effet bénéfique de l'alcool. En 1974, nous avons étudié la consommation modérée d'alcool en l'absence de tabagisme et mis en évidence un lien entre cette consommation et un risque moindre d'avoir un infarctus. Depuis, des dizaines d'enquêtes ont confirmé que les individus sobres ont plus souvent des maladies cardio-vasculaires, fatales ou non, que ceux qui boivent modérément.

Quelques grammes d'alcool dans le sang

En 2000, les équipes de Giovanni Corrao, de l'Université de Milan, et de Kari Poikolainen, de l'Hôpital Järvenpää, en Finlande, ont analysé les résultats de 28 études et montré que le risque de maladie cardio-vasculaire diminue lorsque la consommation quotidienne d'alcool augmente de 0 à 25 grammes, soit la quantité d'alcool de deux verres standards. Avec une telle ration, le risque d'un infarctus ou d'un décès est inférieur de 20 pour cent à celui encouru par un individu qui ne boit pas.

Plus récemment, nous avons analysé les bilans de santé actualisés, effectués entre 1978 et 1985, de 128 934 malades : 16 539 (environ 13 pour cent) sont morts entre 1978 et 1998, dont 3 001 (environ deux pour cent) d'une maladie cardio-vasculaire. Ceux qui consommaient un ou deux verres d'alcool par jour avaient un risque de maladie cardio-vasculaire fatale inférieur de 32 pour cent à celui des malades qui s'étaient abstenus de boire.

L'alcool améliore l'état cardio-vasculaire *(voir la figure 2)* en optimisant le métabolisme les lipides, dont le cholestérol, et en réduisant les risques de coagulation du sang. Les buveurs modérés ont des quantités de HDL, protecteurs, supérieures de 10 à 20 pour cent à celles des non-buveurs.

Cette différence tient au rôle des HDL qui véhiculent le cholestérol vers le foie où il est recyclé ou éliminé : il s'accumule donc moins sur les parois des vaisseaux sanguins et, en conséquence, entraîne moins de plaques d'athérome. L'alcool influerait surtout sur une sous-espèce de HDL, les HDL3, différente des HDL2 que l'exercice physique fait croître. Toutefois, ces deux types de HDL sont protecteurs. On connaît mal les mécanismes biochimiques par lesquels, dans le foie, l'alcool augmente les quantités de HDL. Cependant, trois études indépendantes indiquent que les quantités élevées de HDL chez les buveurs d'alcool expliqueraient la moitié environ de la réduction du risque.

L'alcool modifierait aussi les mécanismes de la coagulation du sang qui favorisent parfois les crises cardiaques. En présence d'alcool, les plaquettes sanguines seraient moins

Alcool et santé

Effet de l'alcool	Action probable	Fiabilité
Augmente les quantités de HDL dans le sang.	Détache les LDL des parois des vaisseaux sanguins.	Expliquerait au moins la moitié des bénéfices de l'alcool.
Diminue les quantités de LDL dans le sang.	Diminue l'un des principaux risques de maladie cardio-vasculaire.	L'effet dépend probablement du régime.
Diminue l'oxydation des LDL.	Prévient la formation des plaques d'athérome associées à l'oxydation du LDL.	Très hypothétique, bien que le vin rouge soit riche en antioxydants.
Diminue la concentration sanguine de fibrinogène dans le sang.	Diminue le risque de formation de caillots sur les plaques d'athérome.	Peu de données disponibles.
Exerce d'autres actions anticoagulantes : diminue l'agrégation des plaquettes ; augmente la quantité de prostacycline ; abaisse celle de thromboxane.	Diminue le risque de formation de caillots sur les plaques d'athérome.	Peu de données.
Augmente l'efficacité de l'insuline.	Diminue le risque de diabètes de l'adulte et d'athérosclérose.	Peu de preuves.
Améliore l'état du muscle cardiaque.	Meilleure résistance aux lésions associées au manque d'oxygène.	Preuves préliminaires.

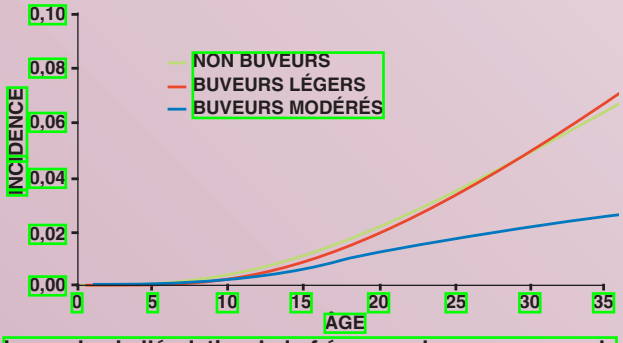
L'alcool et la maladie d'Alzheimer

L'alcool est connu pour ses effets sur le système nerveux, mais les changements de comportement varient selon la dose ingérée : il est stimulant quand l'alcoolémie est inférieure à 0,5 gramme par litre, et sédatif au-delà. L'effet stimulant s'accompagne d'une désinhibition : les tâches cognitives sont exécutées plus rapidement, avec une sensation de facilité, mais avec un risque d'erreur accru et une augmentation de la prise de risque. Chez les consommateurs excessifs, l'alcool entraîne des troubles cognitifs, notamment de la mémoire, de l'abstraction ou des capacités d'élaboration.

Avec le vieillissement de la population, certaines pathologies, telles les démences, deviennent des enjeux de santé publique. Certaines démences sont dues à une consommation excessive d'alcool, mais la démence la plus répandue – qui n'est pas due à une surconsommation d'alcool – est la maladie d'Alzheimer qui représente environ deux tiers des démences. Cette démence dégénérative se traduit par un affaiblissement progressif des fonctions cognitives, telle la mémoire. Son étiologie est inconnue, et la recherche de facteurs de risque reste d'actualité. La consommation d'alcool est un des facteurs de risque étudié, notamment chez les individus de plus de 65 ans.

Dans ce cadre, en 1987, le programme de recherche épidémiologique PAQUID (pour Personnes Âgées Quid) avait pour objectif l'étude du vieillissement cérébral normal et pathologique. Dans les départements de la Gironde et de la Dordogne, 3 777 individus de plus de 65 ans ont accepté de participer. Une enquêtrice a dressé leur profil psychologique et les a classés selon leur consommation de vin : non-buveurs, buveurs légers (entre un et deux verres par jour), buveurs modérés (trois à quatre verres par jour) et gros buveurs (plus de quatre verres par jour). Leurs performances cognitives ont été évaluées par des tests psychométriques. Enfin, en cas d'altérations cognitives, un neurologue établissait le diagnostic de démence et précisait son étiologie. Les individus ont été consultés un, trois, cinq, huit et dix ans après la visite initiale. Une première analyse des résultats a montré que la consommation modérée de vin est associée à une réduction de plus de la moitié du risque de démence ou de maladie d'Alzheimer trois ans après la visite initiale.

Ces résultats ont depuis été confirmés par d'autres études. Par exemple, en Suède, 402 individus âgés de plus de 75 ans ont été suivis durant six ans. Là encore, par rapport aux non-buveurs, une diminution de moitié du risque de démence ou de maladie d'Alzheimer a été observée chez les consommateurs légers ou modérés d'alcool. Par ailleurs, en 1990, aux Pays-Bas, les facteurs de risque de démence de 7 983 sujets de plus de 55 ans ont été étudiés. De nouveau, le risque de démence était significativement plus faible chez les consommateurs de un à trois verres par jour. Le risque était réduit, mais non significativement, chez les faibles consommateurs, et, chez les consommateurs de plus de quatre verres par jour, le risque était similaire à celui des non-buveurs.



La courbe de l'évolution de la fréquence de nouveaux cas de démences en fonction de l'âge montre qu'une consommation modérée d'alcool réduit le risque de ces pathologies par rapport à une consommation légère ou l'abstinence.

En outre, l'effet de la consommation d'alcool varie selon le génome de l'individu. En effet, l'allèle *epsilon* 4 de l'apolipoprotéine E (une protéine qui transporte le cholestérol dans le sang) est un facteur de risque de la maladie d'Alzheimer. L'étude a montré qu'une consommation légère ou modérée d'alcool réduit plus le risque de maladie d'Alzheimer chez les individus porteurs de l'allèle *epsilon* 4, c'est-à-dire ceux qui ont le risque le plus élevé, que chez les individus non-porteurs.

La qualité de l'alcool a également été étudiée, mais aucune différence notable n'a été trouvée entre le vin, la bière et les spiritueux. Toutefois, selon une étude canadienne, la réduction du risque de démence chez les consommateurs d'alcool par rapport aux non-buveurs est significativement plus importante chez les buveurs de vin que chez les consommateurs de bière ou d'alcools forts.

Ainsi, toutes ces études convergent vers un même constat : la consommation modérée d'alcool, voire plus spécifiquement de vin, est associée à une réduction du risque de démence ou d'une maladie d'Alzheimer. Toutefois, observer une association ne signifie pas qu'il existe une relation de cause à effet. C'est pourquoi, dans la plupart de ces études, l'analyse de la mortalité a été effectuée, afin de déterminer si les décès prématurés dus à la consommation d'alcool diminuaient le nombre de nouveaux cas de démence. Ce n'est pas le cas : dans les tranches d'âge étudiées, le risque de mortalité est plus faible chez les consommateurs d'alcool !

D'autres facteurs, tels le sexe, l'éducation, le statut marital, le revenu, qui influent parfois sur la maladie et sur la consommation d'alcool, n'expliquent pas totalement ces résultats. Cependant, des travaux supplémentaires sont nécessaires pour éliminer d'autres facteurs non encore étudiés, tels un régime alimentaire particulier ou une sociabilité développée, qui pourraient expliquer les résultats observés.

Quels seraient les mécanismes de la diminution du risque de démence ou de maladie d'Alzheimer ? Plusieurs hypothèses ont été proposées, mais aucune n'a été confirmée. Selon la première, décrite par Arthur Klatsky, la consommation d'alcool diminuerait le risque cardio-vasculaire soit en inhibant l'agrégation des plaquettes, soit en modifiant la composition lipidique du sang. À ce titre, l'effet de l'alcool chez les porteurs de l'allèle *epsilon* 4 de l'apolipoprotéine E serait expliqué par l'augmentation des quantités de HDL chez ces individus. Par ailleurs, l'alcool influe peut-être sur la cognition via la libération d'acétylcholine, dans l'hippocampe, où elle participe à l'apprentissage et à la mémoire, deux phénomènes altérés dans la maladie d'Alzheimer.

Au final, doit-on conseiller de boire modérément pour prévenir l'apparition de certaines pathologies du système nerveux ? Les études ont montré que les bénéfices éventuels de l'alcool sur la santé n'apparaissent qu'à partir de 40 ans chez les hommes, et à partir de 50 ans chez les femmes. Avant cet âge, les conséquences de la consommation d'alcool sont parfois graves : accidents, dépendance, cirrhose, cancers… En revanche, au-delà de 50 ans, et notamment chez les individus âgés qui n'ont plus d'activité professionnelle, une consommation modérée d'alcool ne devrait pas être déconseillée. Cependant, il est prématuré de conseiller à des personnes qui ne consomment pas d'alcool de commencer à boire quelques verres d'alcool par semaine, car le risque de dépendance n'est pas négligeable.

Luc LETENNEUR et Jean-François DARTIGUES, Unité INSERM U330, Université Victor Segalen, Bordeaux.

© POUR LA SCIENCE - N° 305 MARS 2003

« adhésives » et, en conséquence, moins enclines à s'agglutiner. En 1984, Raffaele Landolfi et Manfred Steiner, de l'Hôpital universitaire de Rhode Island, ont révélé que l'alcool, d'une part, augmente la concentration sanguine en prostacycline, une molécule fabriquée dans la paroi des vaisseaux sanguins qui inhibe l'agrégation des plaquettes, et, d'autre part, diminue la quantité de thromboxane, une molécule produite par les plaquettes qui favorise la formation des caillots. Par ailleurs, on a montré que l'alcool augmente les quantités de plasminogène, une enzyme qui dissout les caillots. Enfin, plusieurs études indiquent que l'alcool diminue les quantités d'un autre promoteur des caillots sanguins, le fibrinogène.

Les propriétés anticoagulantes de l'alcool ne sont pas aussi bien établies que ses effets sur les HDL. Par ailleurs, certaines d'entre elles s'inversent avec une consommation accrue d'alcool. Toutefois, elles semblent, au moins partiellement, participer à la diminution du risque de maladie cardio-vasculaire chez les individus qui boivent modérément.

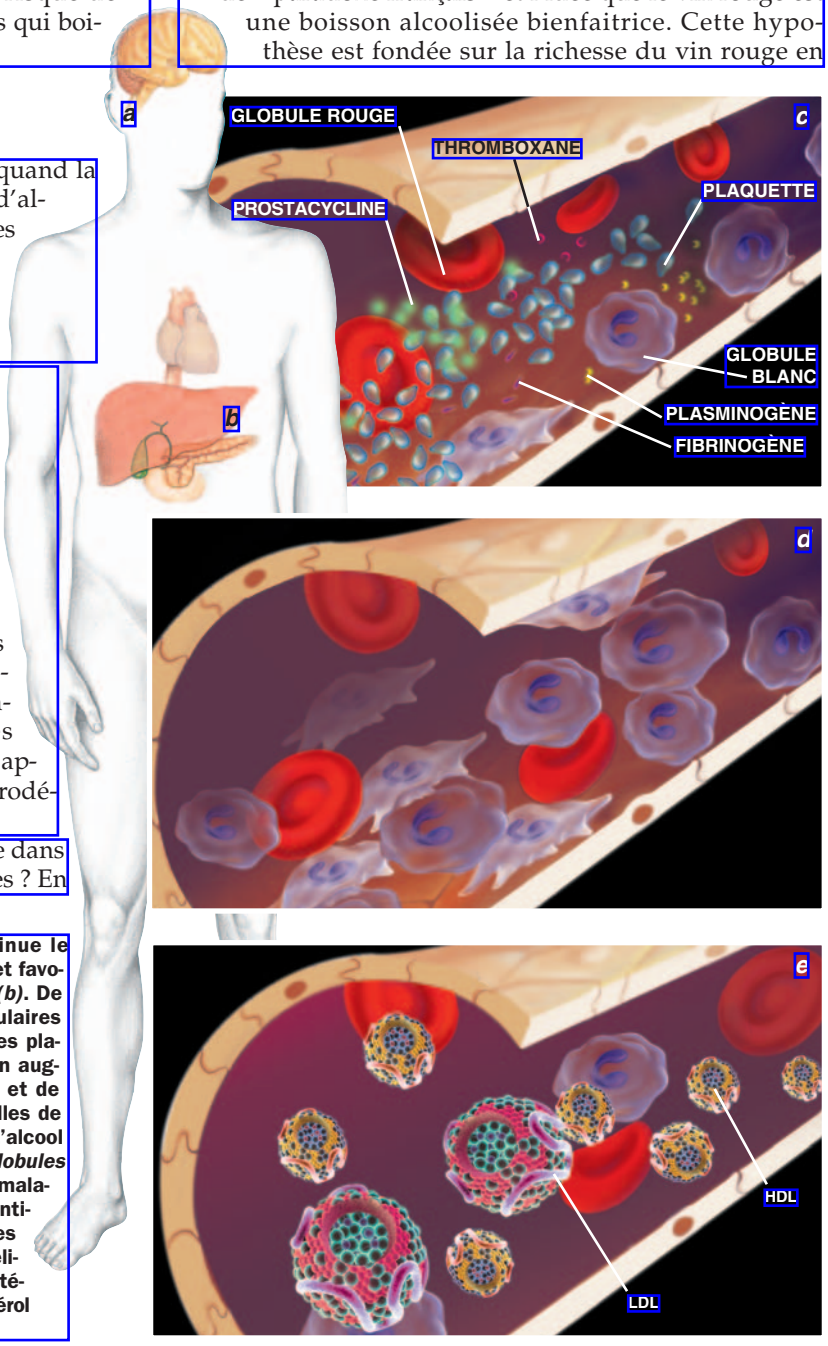
L'alcool et rien que l'alcool ?

Les effets bénéfiques de l'alcool persistent quand la consommation est inférieure à deux verres d'alcool par jour, par exemple, trois ou quatre verres par semaine. Les propriétés anticoagulantes seraient alors la principale source de protection, car ces faibles quantités sont insuffisantes pour modifier les quantités de HDL.

Outre l'augmentation de la quantité de HDL et la diminution de la formation de caillots, la consommation modérée d'alcool influerait également sur la prévalence des maladies cardio-vasculaires par d'autres mécanismes plus discrets. Ainsi, l'alcool préviendrait le diabète de type 2 en favorisant l'action de l'insuline, une hormone qui diminue la quantité de sucre dans le sang. Par ailleurs, on a montré que les inflammations contribueraient aux maladies cardio-vasculaires, et l'alcool aurait une action anti-inflammatoire dans les tissus qui tapissent les vaisseaux sanguins. Enfin, l'alcool ralentirait l'apparition des démences et des maladies neurodégénératives *(voir l'encadré de la page 68)*

L'alcool est-il bien le seul facteur en cause dans la diminution des maladies cardio-vasculaires ? En d'autres termes, les individus qui s'abstiennent de boire tout au long de leur vie différeraient-ils des buveurs par des traits de caractère, des habitudes diététiques ou sportives qui expliqueraient leur risque plus élevé de maladies cardio-vasculaires ? De tels paramètres devraient être présents dans les deux sexes, dans différents pays et dans divers groupes : ce n'est pas le cas. Même si l'on devra mener un essai clinique à grande échelle et en double aveugle pour valider les résultats préliminaires, les données obtenues plaident en faveur des bienfaits d'une consommation faible ou modérée d'alcool sur la santé. Un type de boisson alcoolisée est-il meilleur que les autres ? Le débat n'est pas tranché.

En France, où la consommation de vin rouge est fréquente, la mortalité liée aux maladies cardio-vasculaires est la moitié de celle enregistrée aux États-Unis, et ce, malgré des consommations de matières grasses et des styles de vie similaires. De cette observation sont nées la notion de « paradoxe français » et l'idée que le vin rouge est une boisson alcoolisée bienfaitrice. Cette hypothèse est fondée sur la richesse du vin rouge en



2. L'ALCOOL, consommé avec modération, diminue le risque de démences et de maladie d'Alzheimer *(a)* et favorise l'action de l'insuline sécrétée par le pancréas *(b)*. De plus, il réduit les risques de maladies cardio-vasculaires par divers mécanismes. Il empêche l'agrégation des plaquettes *(c, en bleu)* et la formation des caillots en augmentant les quantités de prostacycline *(en vert)* et de plasminogène *(en jaune)*, ainsi qu'en diminuant celles de thromboxane *(en rose)* et de fibrinogène *(en violet)*. L'alcool diminuerait également les inflammations *(d, les globules blancs se regroupent)* qui contribuent parfois aux maladies cardio-vasculaires. Enfin, il augmente les quantités de HDL – le « bon cholestérol » –, des molécules qui transportent le cholestérol vers le foie où il est éliminé, et diminue celles de LDL – le « mauvais cholestérol » –, des molécules qui favorisent le dépôt de cholestérol dans les vaisseaux sanguins.

substances anti-oxydantes et en molécules actives contre l'athérosclérose.

En 1995, une étude danoise, où 13 000 personnes ont été suivies pendant 12 ans, a confirmé cette hypothèse. De notre côté, en 1990, puis en 1997, nous avons montré que les buveurs de vin et de bière ont des risques de maladie cardio-vasculaire plus faibles que les amateurs de liqueurs. Puis, en 2002, lors d'une mise à jour de l'étude de 1990, nous avons révélé que, pour une même consommation d'alcool, ceux qui boivent du vin tous les jours ont un risque de mourir de maladie cardio-vasculaire environ 25 pour cent inférieur à celui des buveurs de bière. De plus, chez les buveurs de vin (rouge ou blanc), le risque d'un décès consécutif à une maladie cardio-vasculaire est environ 35 pour cent inférieur à celui des buveurs légers et modérés d'alcools forts.

Toutefois, les habitudes des buveurs de vin, de bière ou de liqueurs perturbent peut-être les résultats de ces études. Par exemple, au Danemark, la consommation de vin va de paire, d'une part, avec un régime « sain » riche en fruits, en légumes et en poissons et, d'autre part, avec un statut socio-économique et un quotient intellectuel plus élevés souvent associés à une meilleure santé. Dans nos études, ceux qui préfèrent le vin fument moins, ont fait plus d'études supérieures et sont plus modérés dans leur consommation d'alcool que les adeptes de la bière ou des alcools forts. Ainsi, les styles de vie compliquent la tâche des épidémiologistes qui cherchent à déterminer si les différences observées dans les effets sur la santé sont liées au type de boisson lui-même, aux habitudes de consommation ou à d'autres facteurs.

La plupart des individus boivent pour des raisons autres que les bienfaits de l'alcool sur la santé, et beaucoup en consomment des quantités qui semblent favoriser l'état cardio-vasculaire. Toutefois, la mise au jour des effets positifs de l'alcool représente un défi pour les médecins. Certes, chez certaines personnes, une consommation légère à modérée d'alcool semble meilleure pour le cœur que l'abstinence. Cependant, une grande consommation d'alcool est indéniablement dangereuse et entraîne des pathologies, tels la cirrhose du foie, la pancréatite, certains cancers et des troubles neurodégénératifs. De plus, elle joue un rôle dans un grand nombre d'accidents, d'homicides et de suicides, et peut avoir de graves conséquences sur le développement du fœtus.

Une consommation abusive d'alcool contribue aussi aux maladies cardio-vasculaires, telles la cardiomyopathie alcoolique (le cœur est trop faible pour pomper efficacement), les hémorragies cérébrales et l'hypertension, source de maladies cardio-vasculaires et d'insuffisance cardiaque ou rénale.

Face aux dangers de l'alcool, comment « prescrire » des boissons alcoolisées et dans quelles proportions ? Connaître les risques de chacun et les conséquences possibles d'une consommation modérée d'alcool serait un atout. L'histoire familiale et personnelle d'un individu renseignent sur ces risques, mais ils ne tiennent pas compte d'événements imprévus pouvant, par la suite, rendre délétères des effets supposés bénéfiques auparavant.

Ces dangers – connus ou inconnus – ont focalisé les responsables de la santé publique sur les conséquences sociales et médicales de l'excès d'alcool et ont justifié les pressions en faveur de l'abstinence. Pourtant, un message plus complexe s'impose : il est inapproprié de recommander l'abstinence à des consommateurs modérés qui ont un risque élevé de maladies cardio-vasculaires et dont le terrain physique et psychique n'interdit pas la consommation d'alcool. Bien sûr, pour ces individus, il convient surtout de suivre un régime approprié, de pratiquer un sport, d'éviter de fumer et de lutter contre l'obésité, le diabète, l'hypertension et l'hypercholestérolémie. Toutefois, une faible consommation d'alcool a une place dans cette liste.

Au cas par cas

Les individus qui boivent peu ou modérément ont tout intérêt à continuer. À l'inverse, les individus sobres doivent-ils commencer à boire pour leur santé ? La réponse est négative pour la plupart d'entre eux, mais il y des exceptions. Par exemple, ceux qui, atteints d'une maladie cardio-vasculaire, décident de se « prendre en main » et arrêtent de fumer, adoptent un régime sévère, font du sport et, avec les meilleures intentions, abandonnent la bouteille de bière ou le verre de vin quotidien. Cette prohibition auto-imposée n'est pas la meilleure solution. De plus, certains buveurs occasionnels – les hommes de plus de 40 ans et les femmes de plus de 50 ans qui ont de forts risques de maladies cardio-vasculaires et de faibles risques liés à la consommation d'alcool – ont intérêt à augmenter leur consommation d'alcool jusqu'à un verre par jour.

Les femmes ont un risque supplémentaire : plusieurs études indiquent que la consommation d'alcool augmente le risque de cancer du sein. Pour les femmes jeunes, qui ont souvent un risque faible de maladie cardio-vasculaire à court terme, le cancer du sein est une menace plus grande que les effets positifs de l'alcool sur le cœur.

Au final, les buveurs invétérés et les individus qui ont un risque vis-à-vis de l'alcool doivent réduire leur consommation, voire s'abstenir de boire. Face à la multitude des facteurs à prendre en compte, les risques et les bienfaits de l'alcool doivent être évalués au cas par cas. Dans cette optique, nous avons élaboré un algorithme qui aiderait les médecins à décider de la quantité d'alcool adaptée à un individu donné. Ainsi, il en va de l'alcool comme de toute chose : la modération est de rigueur !

Arthur KLATSKY est cardiologue au Centre médical de Oakland, en Californie.

Arthur KLATSKY, *Epidemiology of Coronary Heart Disease-Influence of Alcohol*, i n *Alcoholism Clinical and Experimental Research*, vol. 18, n° 1, pp. 88-96, janvier 1994.

S. LEMESHOW, L. LETENNEUR, J.-F. DARTIGUES, S. LAFONT, J.-M. ORGOGOZO et D. COMMENGES, *Illustration of analysis taking into account complex survey considerations : The association between wine consumption and dementia in the PAQUID study*, in *Am. J. Epidemiol.*, vol. 148, pp. 298-306, 1998.

Luc LETENNEUR et al., *Education and the risk for Alzheimer's disease : Sex makes a difference. EURODEM pooled analyses*, in *Am. J. Epidemiol.*, vol. 151, pp. 1064-1071, 2000.

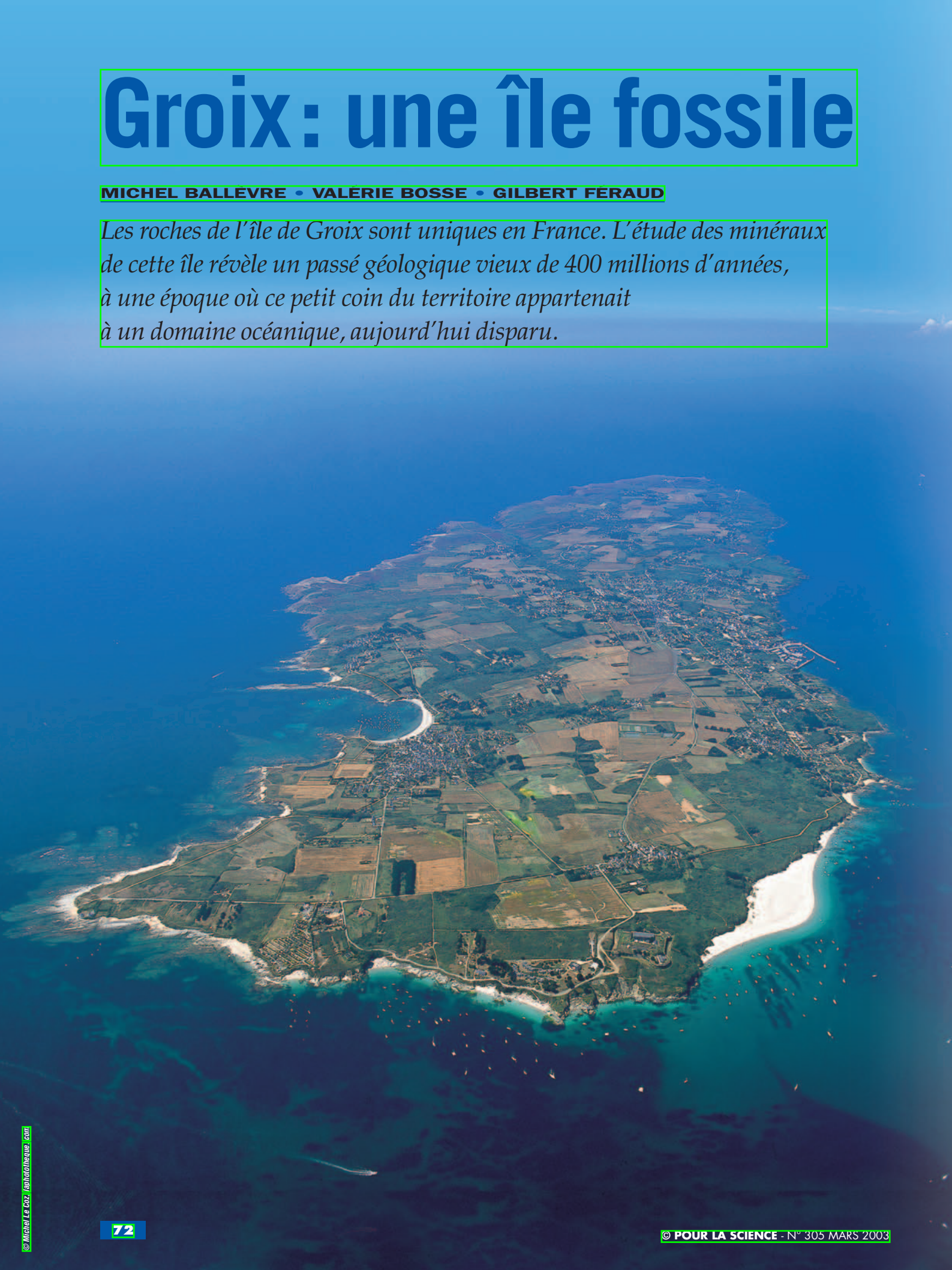
Giovanni CORRAO, Luca RUBBIATI, Vincenzo BAGNARDI, Antonella ZAMBON et Kari POIKOLAINEN, *Alcohol and Coronary Heart Disease*, in *Addiction*, vol. 95, n° 10, pp. 1505-1523, octobre 2000.

Alcohol in Health and Disease, sous la direction de Dharam Agarwal et Helmut Seitz, Marcel Dekker, 2001.

Groix : une île fossile

MICHEL BALLÈVRE • VALÉRIE BOSSE • GILBERT FÉRAUD

Les roches de l'île de Groix sont uniques en France. L'étude des minéraux de cette île révèle un passé géologique vieux de 400 millions d'années, à une époque où ce petit coin du territoire appartenait à un domaine océanique, aujourd'hui disparu.



© Michel Le Coz / aphotothèque .com

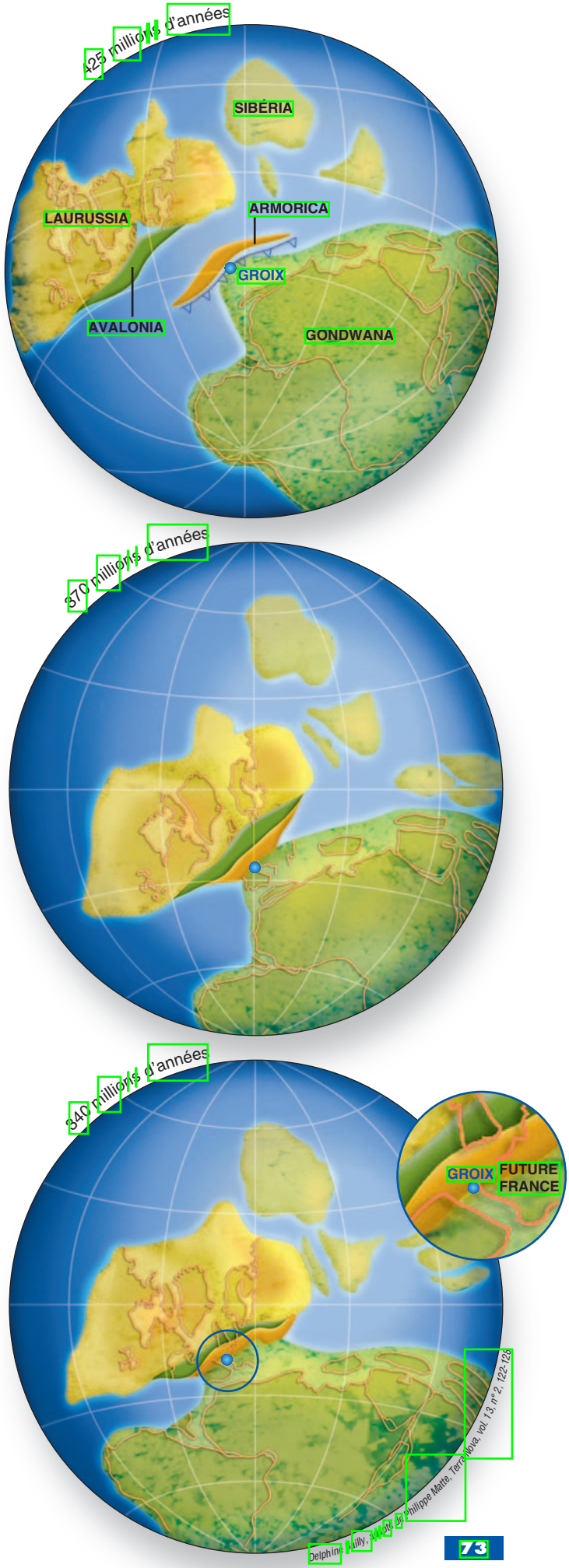
Du port de Lorient, sur la côte méridionale de la Bretagne, à l'île de Groix, la traversée ne dure que 45 minutes, mais les passagers changent de monde. Sur le continent abonde le granite, une roche qui résulte de la cristallisation lente en profondeur de magma. Utilisé dans nombre de constructions, des menhirs et des dolmens jusqu'aux habitations rurales, le granit symbolise la Bretagne. À Groix, il est absent : les visiteurs de l'île entrent dans un monde de minéraux et de roches qui sont inconnus sur le continent, et qui ont valu à Groix son surnom d'île aux grenats, et la création, en 1982, d'une réserve naturelle ayant pour objet la protection du patrimoine géologique. D'où vient ce contraste géologique entre l'île et le continent distants de quelque six kilomètres ?

Les prospections sous-marines réalisées dans les années 1970 par Jean-Pierre Lefort et Claude Audren, du Laboratoire géosciences Rennes, ont montré que des roches identiques à celles de l'île s'étendent sur la plate-forme littorale, sur une distance d'environ 50 kilomètres. En outre, des roches analogues existent en Vendée, au Bois-de-Cené, mais elles affleurent rarement, ce qui en rend l'étude difficile. Ces données montrent que l'île n'est pas en elle-même une exception, mais un témoin émergé d'un vaste ensemble partiellement érodé et submergé.

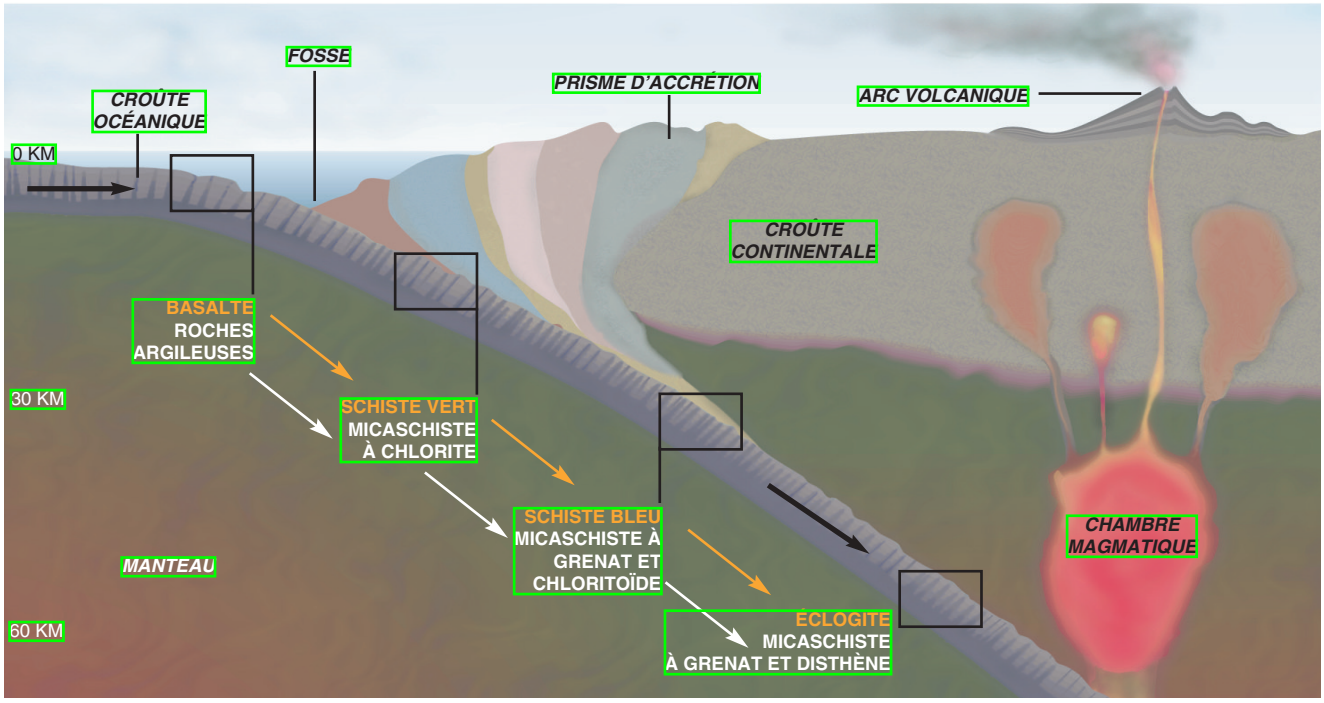
Quel était ce large territoire ? Pas à pas, durant ces 30 dernières années, les géologues ont fait parler les roches, qui ont livré une partie de leur histoire : les roches de Groix appartenaient, il y a plus de 400 millions d'années, au plancher d'un océan aujourd'hui disparu, qui séparait un supercontinent, le Gondwana, d'un continent englobant notamment les actuelles Bretagne et Galice, l'Armorica. Puis les continents se sont percutés et les roches ont été enfouies à plusieurs dizaines de kilomètres de profondeur, avant de remonter à la surface, près de ce qui sera plus tard la France. Les roches de Groix sont les ultimes témoins de ce passé géologique.

Une histoire de subduction

La surface de la planète est découpée en un petit nombre de plaques, minces et rigides, qui se déplacent les unes par rapport aux autres. Ces plaques comprennent une partie profonde, constituée de péridotites (une roche essentiellement formée d'olivine, un silicate contenant du fer et du magnésium), et une partie superficielle, la croûte terrestre, de composition différente selon qu'elle est continentale ou océanique. La croûte continentale contient en abondance du granite. Au contraire, la croûte océanique est constituée en surface de laves basaltiques et de leur équivalent cristallisé en profondeur, le gabbro. Les plaques océaniques sont issues



1. À QUELQUES ENCABLURES de la côte méridionale de la Bretagne, l'île de Groix surprend par la spécificité de ses minéraux et de ses roches. Ceux-ci témoignent de l'existence d'une ancienne zone de subduction dans cette région. Il y a 425 millions d'années *(en haut)*, Groix *(le point bleu)* était encore une portion du plancher océanique séparant le supercontinent Gondwana de la microplaque Armorica. La future île disparut bientôt sous la plaque Armorica par subduction, il y a 370 millions d'années *(au milieu)*. Plus tard, quand la collision entre les deux continents majeurs, Gondwana et Laurussia, créa une immense chaîne de montagnes, la chaîne hercynienne, Groix fut exhumée et arbora au grand jour les minéraux formés lors de l'enfouissement *(en bas)*.



2. DANS LA ZONE DE SUBDUCTION, le basalte de la plaque océanique se transforme en différentes roches à mesure qu'il plonge sous la plaque continentale et parallèlement s'appauvrit en eau : en schistes verts (qui contiennent de l'albite et de la chlorite, cette dernière comportant une fraction importante d'eau), puis en schistes bleus (quand apparaît la glaucophane, un minéral contenant deux pour cent d'eau), et enfin en éclogites (quand le grenat et le pyroxène, deux minéraux anhydres, se développent). Les roches argileuses de la plaque se métamorphisent en micaschiste à chlorite, en micaschiste à grenat et en chloritoïde, puis en micaschiste à grenat et disthène.

des dorsales médio-océaniques, gigantesques chaînes de montagnes sous-marines. À mesure de leur formation, le plancher océanique s'éloigne de l'axe de la dorsale, et se refroidit. Dans les zones de subduction, les plaques océaniques s'enfoncent dans les profondeurs, en plongeant soit sous une autre plaque océanique (telle la plaque pacifique sous les Mariannes) ou sous une plaque continentale (telle la plaque Nazca sous les Andes).

Après plusieurs décennies d'explorations géophysiques et d'observations directes avec des submersibles océanographiques, le fonctionnement des zones de subduction est maintenant bien connu. La plongée d'une plaque océanique engendre une fosse, profonde, étroite et allongée, qui marque la limite entre les deux plaques en convergence. L'enfoncement de cette plaque dans le manteau est repérable par les nombreux séismes provoqués par l'avancée de la plaque. Au-dessus de la plaque qui s'enfonce se dresse en général un arc volcanique, c'est-à-dire un alignement de volcans dont les éruptions souvent explosives peuvent causer de redoutables dommages. Dans ces volcans, les magmas sont issus de la fusion partielle du coin de manteau situé au-dessus de la plaque plongeante. Enfin, entre l'arc volcanique et la fosse océanique se forme souvent un prisme d'accrétion, empilement de matériaux sédimentaires et parfois volcaniques arrachés à la plaque océanique plongeante.

Qu'advient-il à la plaque océanique quand elle plonge ? Pour le savoir, on recourt à des modélisations numériques, puis on compare les prévisions des modèles avec les phénomènes effectivement observés dans les zones de subduction actives. Quand une plaque s'enfonce dans le manteau, elle pénètre dans un milieu de plus en plus chaud. La conduction de la chaleur dans les roches étant extrêmement lente, la température de la plaque met du temps à s'équilibrer avec celle du manteau : la plaque constitue une lame relativement froide au sein d'un milieu chaud. La carte des températures dans une plaque qui s'enfonce dépend de plusieurs facteurs, notamment l'âge de la plaque et la vitesse de subduction. Même s'il persiste des désaccords sur les détails de la diffusion de la chaleur dans les plaques, tous les modèles thermiques montrent que, dans les zones de subduction, la température reste relativement faible, même à de grandes profondeurs, c'est-à-dire à forte pression.

Des dorsales océaniques aux zones de subduction, la croûte océanique rencontre donc tout au long de son histoire des variations de pression et de température. Ces variations modifient la composition de la roche. Durant la phase où la croûte océanique constitue le plancher océanique, de l'eau de mer s'infiltre par des fractures jusqu'à quelques kilomètres de profondeur, et entraîne une altération hydrothermale des basaltes et des gabbros : les minéraux présents à haute température et anhydres (tels l'olivine et le pyroxène) sont remplacés par des minéraux hydratés stables à plus basse température (la chlorite, l'albite et l'épidote). Cet hydrothermalisme s'accompagne sur le plancher océanique du jaillissement de saumures chaudes et riches en éléments dissous (cuivre, fer et manganèse par exemple), qui forment les fumeurs noirs, des sources chaudes autour desquelles se développent des oasis de vie. Quand la croûte océanique parvient dans la zone de subduction, les roches magmatiques plus ou moins altérées par l'eau et par la chaleur se métamorphisent, c'est-à-dire qu'elles subissent des transformations, notamment des recristallisations *(voir la figure 2)*. La nature exacte des minéraux formés dépend des conditions de pression et de température. À faible pression (de 4 à 8×10^8 pascals environ) et très faible température (de 300 à 400 °C), les basaltes se transforment en schistes verts. Avec l'augmentation de la pression (entre 8 et 12×10^8 pascals)

© POUR LA SCIENCE - N° 305 MARS 2003

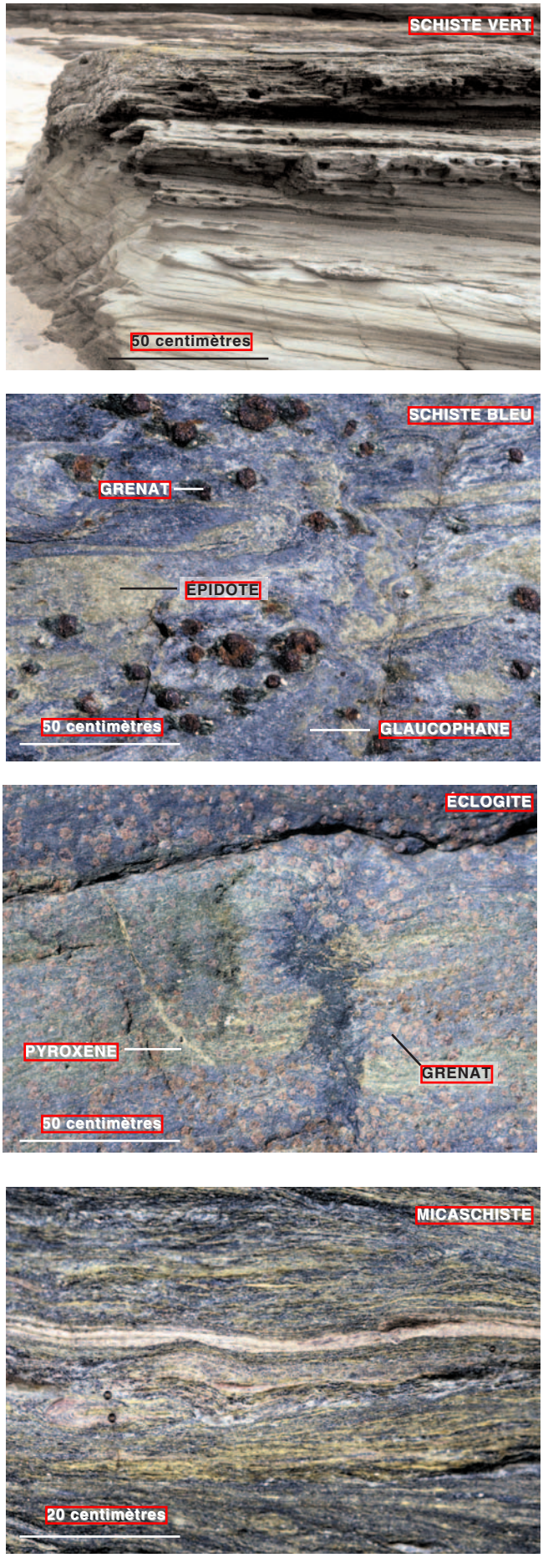
apparaît un nouveau minéral, la glaucophane, facilement identifiable en raison de sa couleur bleu violacée : d'où le nom de schistes bleus donné aux roches contenant ce minéral en abondance. À des pressions encore plus élevées (vers 15 ou 20×10^8 pascals), se développent du pyroxène vert et du grenat rouge, et le basalte se transforme en éclogite. L'identification de telles roches est un excellent moyen de reconstruire l'histoire lointaine des zones de subduction.

Fille des océans

À Groix, où, comme partout en Bretagne, les affleurements se situent essentiellement sur les côtes, le promeneur ne peut manquer de reconnaître trois groupes de roches. Les micaschistes forment l'essentiel des falaises côtières, et sont structurés en minces feuillets. Dans les micaschistes, des minéraux métamorphiques se sont développés : la muscovite, un mica blanc qui leur confère un aspect satiné ou luisant, des lamelles vertes de chlorite ou noires de chloritoïde, et souvent du grenat rouge. Au sein des micaschistes, on observe des roches en forme de lentilles, ou disposées en couches, et dont la couleur dominante est soit verte, soit bleue à bleu-noir : il s'agit, dans le premier cas, de schistes verts, dans le second de schistes bleus. Ces derniers contiennent souvent, eux aussi, des grenats *(voir la figure 3)*.

Quelle était la nature de ces roches avant leur transformation métamorphique ? Basaltique ou sédimentaire ? Une analyse de leur aspect n'apporte pas de réponse, car les roches métamorphiques de Groix sont en général très déformées. Il faut donc avoir recours à des analyses chimiques pour déterminer l'origine des roches. Les micaschistes dérivent de sédiments argileux, qui contenaient éventuellement des organismes en décomposition, que le métamorphisme a transformés en graphite (carbone cristallisé). Les micaschistes graphiteux sont particulièrement répandus dans la moitié occidentale de l'île. La composition des schistes verts et des schistes bleus est celle de basaltes, certains étant comparables aux basaltes des rides médio-océaniques, d'autres aux basaltes des îles océaniques (formées par solidification de panaches de magma venant des entrailles de la Terre). Le domaine océanique était-il immense comme aujourd'hui le Pacifique ou l'Atlantique, ou au contraire étroit comme le golfe de Californie, la mer Rouge ou la mer du Japon ? Comme nous le verrons plus loin, l'océan était probablement étroit.

D'autres roches, beaucoup plus rares, existent également à Groix. Certaines, en forme de ruban et disposées par couches, sont essentiellement constituées de quartz et de minuscules grains de grenat, invisibles à l'œil nu, mais donnant à la roche une couleur rosée. Il s'agit de cherts, anciennes radiolarites (roche sédimentaire formée par l'accumulation des coquilles des radiolaires, organismes unicellulaires du plancton) qui ont été soumises à de fortes pressions. Des couches au sein des basaltes ou des sédiments contiennent



Micha Bellevrat

3. LES QUATRE ROCHES ORIGINALES DE GROIX. Le schiste vert, le schiste bleu, l'éclogite se sont formées les unes après les autres à mesure que la plaque océanique mère descendait dans le manteau terrestre. Le micaschiste provient de sédiments, qui ont été également effouis à grande profondeur. Les roches ne sont pas homogènes du point de vue de la composition. Le schiste bleu contient du glaucophane, un minéral bleu qui lui confère sa couleur dominante, de l'épidote *(les zones jaunes)* et des grenats *(les inclusions rouges sombres)*. L'éclogite comporte du grenat *(les points rouges)* et du pyroxène *(en vert clair)*.

en abondance du fer et surtout du manganèse, et pourraient provenir de minéralisations hydrothermales associées au volcanisme sous-marin. Il ne fait donc aucun doute que les roches de l'île de Groix reflètent dans leur diversité les processus volcaniques et sédimentaires ayant lieu dans l'océan à quelques milliers de mètres de profondeur.

Pour autant, il est impossible de reconnaître à Groix une section complète de plaque océanique, telle qu'elle est observée dans les Alpes ou en Oman par exemple. On n'y trouve ni péridotite ni gabbro. En outre, on n'a identifié aucune lave sous-marine solidifiée, dont la coulée aurait une forme caractéristique de coussins. Les basaltes métamorphisés de Groix dérivent plus probablement de filons recoupant ou s'insinuant au sein des sédiments. En outre, les roches de l'île de Groix sont constituées à plus de 90 pour cent de sédiments, dans lesquels sont intercalées les roches d'origine volcanique.

Quelles péripéties géologiques ont-elles abouti à cette situation hors du commun ? Dans une première hypothèse, il pourrait s'agir d'un bassin océanique étroit, qui aurait reçu en abondance des sédiments détritiques en provenance de l'érosion des continents adjacents. Dans ce bassin, les laves basaltiques se seraient épanchées à la surface des sédiments ou insinuées entre les couches sédimentaires. Le golfe de Californie est un exemple actuel de ce type de processus. Dans une seconde hypothèse, l'île de Groix représenterait un fragment d'un prisme d'accrétion dans lequel sont incorporés des morceaux de plaque océanique ainsi que des sédiments détritiques d'origine continentale. Un analogue actuel de l'île de Groix serait alors la bordure pacifique des îles de l'archipel japonais, où se forme depuis une centaine de millions d'années un prisme d'accrétion lié à la subduction de l'océan Pacifique sous le Japon.

La composition raconte l'histoire

À quelle profondeur ont recristallisé les micaschistes et les schistes bleus ? Quelle était la température à cette profondeur ? Quels minéraux étaient à l'équilibre à un moment donné dans la roche, et quels minéraux se sont succédé dans le temps ? Pour répondre à ces questions, les géologues procèdent en trois étapes. Tout d'abord, ils examinent les roches au microscope optique, ce qui permet d'identifier les minéraux (tous ne sont pas visibles à l'œil nu), et de savoir dans quel ordre ils sont apparus au cours du temps dans la roche. Dans le cas de roches déformées, on détermine ainsi si les minéraux qu'elles contiennent sont antérieurs ou non à la déformation. Par exemple, le grenat et la glaucophane sont des minéraux précoces, contemporains des déformations qu'ont subies les roches où ils sont emprisonnés, car ils sont eux aussi déformés. On en déduit que ces minéraux ont été en partie remplacés par de la chlorite et de l'albite seulement après que la roche a cessé de se déformer.

La deuxième étape est celle de la détermination de la composition chimique des minéraux, car celle-ci varie également en fonction de la pression et de la température. La microsonde électronique (avec laquelle on étudie le rayonnement émis après bombardement d'électrons) permet une analyse de la composition, et fournit une image de la répartition des constituants des grains *(voir la figure 5)*. Dans le grenat par exemple, la teneur en manganèse est élevée au cœur des grains, puis s'appauvrit progressivement du cœur vers la périphérie. Dans le grenat également, les concentrations en fer et en magnésium augmentent du cœur vers la périphérie, tandis que les teneurs en calcium diminuent. Ces variations résultent de la combinaison de deux mécanismes. Quand un germe cristallin se forme, certains éléments,

4. EVOLUTION DES ROCHES présentes dans la plaque océanique lors de leur enfouissement dans la zone de subduction. On distingue trois types de roche au départ : le basalte, l'argilite et la radiolarite. À mesure que la pression augmente, des minéraux différents apparaissent.

PRESSION	ROCHES ORIGINELLES		
	LAVE	SÉDIMENTS	
	BASALTE (OLIVINE ET PYROXÈNE DANS UNE PÂTE VITREUSE)	ARGILITE (CRISTAUX MICROSCOPIQUES D'ARGILE ET GRAINS DE SABLE)	RADIOLARITE (COQUILLES DE RADIOLAIRES)
	ROCHES MÉTAMORPHIQUES		
4 à 8 × 10^8 pascals	SCHISTE VERT ACTINOTE : $Ca(Fe, Mg)_5Si_8O_{22}(OH)_2$ CHLORITE : $(Fe,Mg)_{10}Al_4Si_6O_{20}(OH)_{16}$ ÉPIDOTE : $Ca_2FeAl_2Si_3O_{12}(OH)$ ALBITE $NaAlSi_3O_8$	MICASCHISTE MUSCOVITE $Al_3Si_3O_{10}(OH)_2$ CHLORITE	MÉTACHERT ROCHE ESSENTIELLEMENT CONSTITUÉE DE QUARTZ
8 à 12 × 10^8 pascals 16 à 18 × 10^8 pascals	SCHISTE BLEU GRENAT : $(Fe, Mg)_3Al_2Si_3O_{12}$ GLAUCOPHANE $Na_2(Fe, Mg)_3Al_2Si_8O_{22}(OH)_2$ ET ÉPIDOTE	MICASCHISTE MUSCOVITE GRENAT CHLORITOÏDE : $(Fe,Mg)_2Al_4Si_2O_{10}(OH)_4$	
>15 à 20 × 10^8 pascals	ÉCLOGITE GRENAT PYROXÈNE $NaAlSi_2O_6$	MICASCHISTE MUSCOVITE GRENAT DISTHÈNE : Al_2SiO_5	

© POUR LA SCIENCE - N° 305 MARS 2003

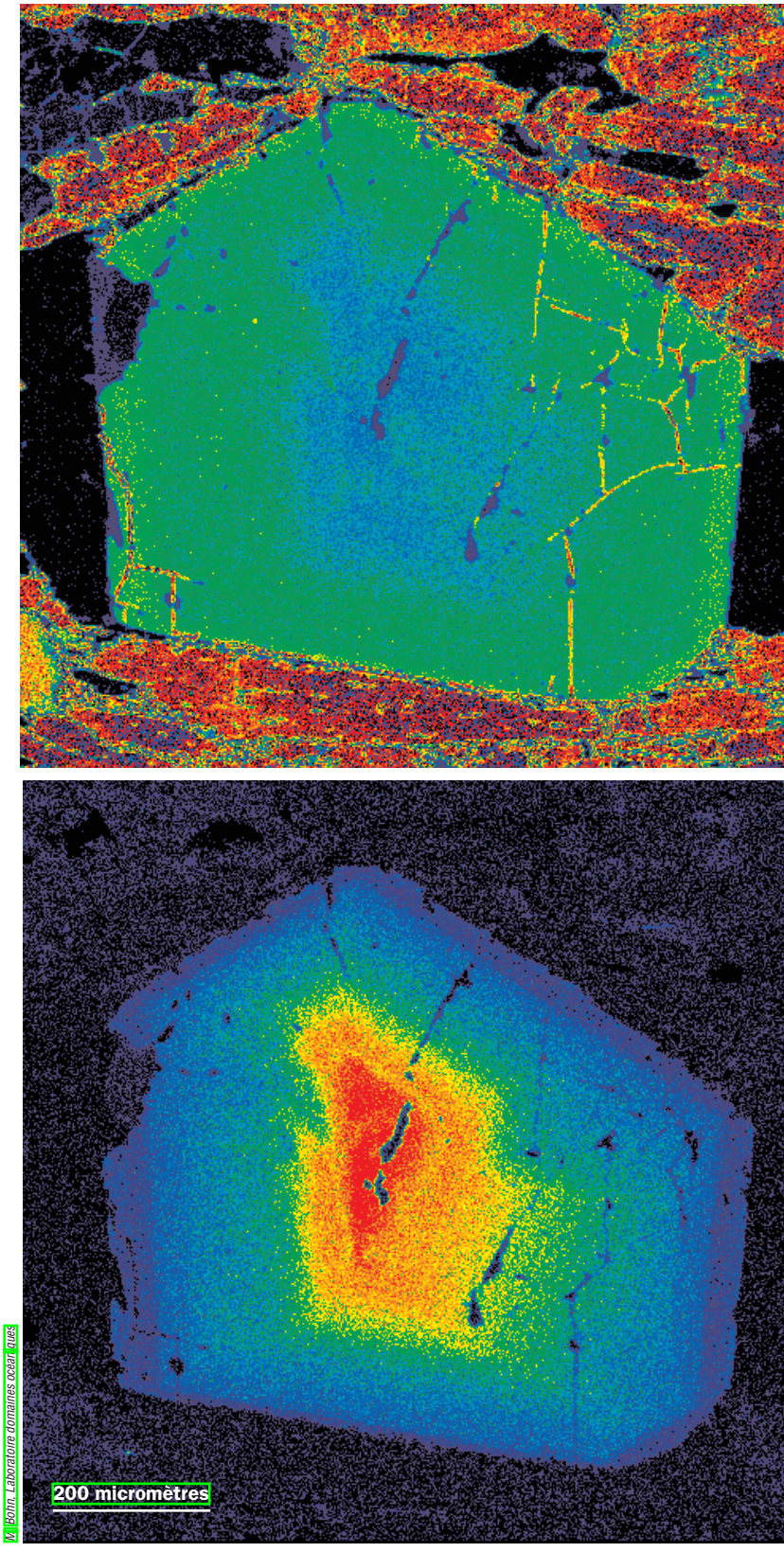
tel le manganèse, s'y concentrent, et la matrice s'appauvrit en ces éléments. Le grenat doit en outre partager la quantité de fer et de magnésium disponible dans la roche avec d'autres minéraux, par exemple la glaucophane. La quantité relative de fer et de magnésium dans chaque espèce minérale dépend de la pression et de la température. Comme ces deux paramètres varient au cours du temps – puisque la roche est enfouie dans la zone de subduction à des profondeurs de plus en plus importantes –, l'évolution de la quantité relative de fer et de magnésium du cœur vers la périphérie du grenat constitue un enregistrement de l'histoire de la subduction.

Lors de la troisième étape, on calcule, d'après les propriétés thermodynamiques des minéraux, déterminées expérimentalement, à quelles conditions de pression et de température ces minéraux ont cristallisé. Dans le cas présenté ci-dessus, on a montré que le début de la croissance du grenat a eu lieu entre 8 et 10×10^8 pascals et à 400 °C, tandis que sa croissance s'est achevée vers 18×10^8 pascals et 500 °C. Autrement dit, les roches de l'île de Groix sont passées de quelque 25-30 kilomètres à 55-60 kilomètres alors que leur température augmentait seulement de 100 °C. Ce gradient thermique, extrêmement faible (environ 3 à 5 °C par kilomètre), doit être comparé au gradient normal, observé par exemple aujourd'hui dans le Bassin parisien, qui est de l'ordre de 30 °C par kilomètre. C'est justement ce faible gradient qui est – nous l'avons vu – caractéristique des zones de subduction, là où une plaque froide s'enfonce dans le manteau chaud.

Que se passe-t-il quand ces roches reviennent vers la surface, où nous les observons aujourd'hui ? En théorie, les roches devraient tendre vers un nouvel équilibre cristallographique. Par exemple, le grenat devrait disparaître, remplacé par des minéraux stables à des pressions et à des températures inférieures, tel la chlorite. Dans certaines roches, on observe bien le remplacement du grenat par la chlorite, mais cette transformation est souvent incomplète. Deux interprétations sont possibles. La première tient à la vitesse des réactions : si la remontée des roches vers la surface est rapide, les réactions n'ont pas le temps de se développer, et la composition des minéraux sous haute pression est figée par le refroidissement. Selon la seconde interprétation : contrairement au grenat, la chlorite est un minéral hydraté, contenant environ 12 pour cent d'eau, de sorte que sa croissance nécessite un apport d'eau, celle que contiennent les pores microscopiques de la roche ne suffisant pas. Or les roches ont été déshydratées durant leur enfouissement. En l'absence d'eau, le réajustement minéralogique ne peut avoir lieu durant l'exhumation des roches enfouies. Pour ces deux raisons (vitesse de refroidissement et absence d'eau), les schistes bleus sont encore visibles à Groix.

L'énigmatique exhumation

Si l'on comprend à peu près les mécanismes qui assurent la préservation des schistes bleus pendant leur remontée vers la surface, on comprend moins bien quel est le mécanisme responsable de cette remontée, un processus que les géologues nomment exhumation. Dès qu'une chaîne de montagnes est créée, elle est immédiatement soumise à l'érosion. Dès lors, le matériel emporté par les rivières sédimente dans les bassins continentaux ou marins qui bordent la chaîne de montagnes. Celle-ci, délestée d'une partie

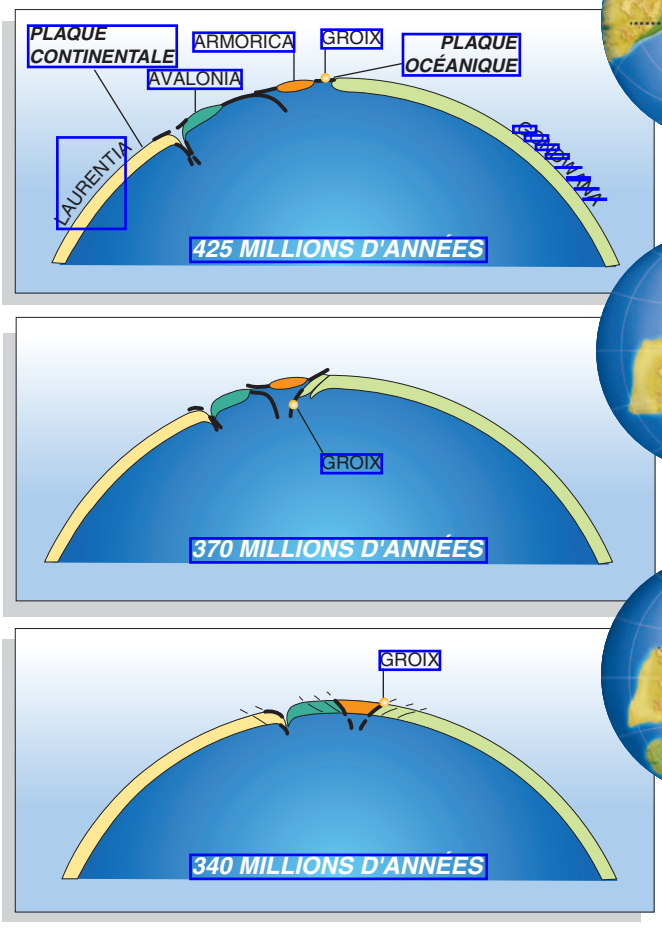


M. Bohn, Laboratoire domaines océaniques

5. LE GRENAT a enregistré l'histoire de la roche environnante lors de la subduction. Ces images obtenues à la microsonde électronique par Marcel Bohn, du Laboratoire domaines océaniques (CNRS – IFREMER), montrent *(en haut)* que le cœur du grenat est pauvre en magnésium *(en bleu)* par rapport à la périphérie du même grain (le vert correspond à une concentration supérieure). Inversement, les teneurs en manganèse diminuent dans le même grenat du cœur vers la périphérie *(en bas)*. Ces hétérogénéités chimiques reflètent les variations de pression et de température qu'a subies le grenat lors de sa croissance.

de son poids, remonte comme un navire qu'on aurait déchargé. Ainsi affleurent progressivement des roches qui étaient auparavant enfouies. Pour la plupart des géologues, l'érosion n'explique cependant pas, à elle seule, l'exhumation des schistes bleus. D'autres mécanismes s'ajoutent à l'érosion, par exemple la « régurgitation » de blocs rigides qui, en raison de leur faible densité, cessent de s'enfoncer plus profondément dans le manteau, ou encore l'extrusion des roches entre deux continents en collision (comme la pâte dentifrice expulsée d'un tube comprimé).

Si les roches de l'île de Groix témoignent de l'existence d'une ancienne zone de subduction, il nous reste à estimer quand cette zone de subduction a effectivement fonctionné. Un premier élément de réponse serait de connaître l'âge des anciennes coulées de basalte qui forment aujourd'hui les schistes bleus, ou l'âge du dépôt des argiles formant aujourd'hui les micaschistes, où des restes fossilisés d'organismes pourraient être conservés. En raison des intenses phénomènes de déformation et de recristallisation qu'ont subis ces roches, notre enquête est restée jusqu'à présent vaine : aucun fossile n'a été identifié, et aucun minéral précoce des anciens basaltes n'a été conservé. En revanche, grâce aux minéraux métamorphiques, il nous est possible de connaître l'âge de l'enfouissement de ces roches. En effet, les minéraux incorporent lors de leur cristallisation des éléments radioactifs (éléments-pères) qui, au cours du temps et à vitesse constante, se désintègrent en produisant des atomes généralement stables (éléments-fils) accompagnés de rayonnement (alpha, bêta et gamma). Si le minéral reste isolé de perturbations postérieures à sa cristallisation, la quantité d'éléments-fils formés est à chaque instant proportionnelle à la quantité d'éléments-pères non désintégrés. Cette dernière quantité diminue de moitié en un laps de temps appelé la période, caractéristique de l'élément considéré. En mesurant aujourd'hui les concentrations en éléments-pères et en éléments-fils dans le minéral, il nous est possible de connaître l'âge de sa cristallisation.



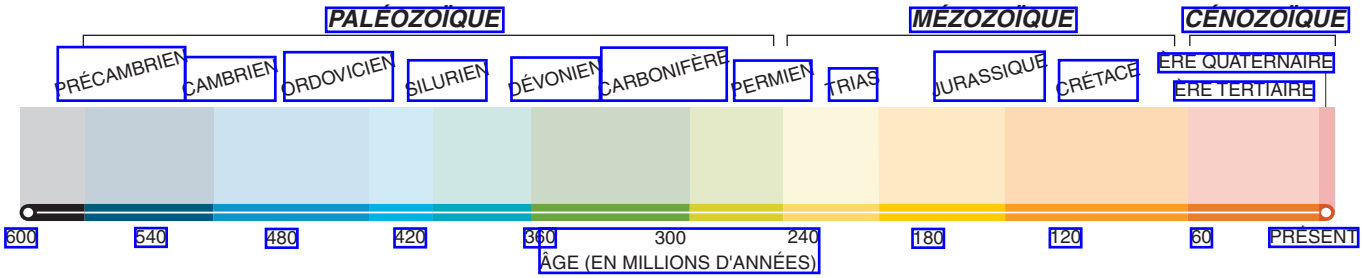
6. LA SUBDUCTION de Groix est survenue au Paléozoïque supérieur. L'île était originellement une portion du plancher de l'océan séparant la microplaque Armorica du Gondwana *(en haut)*. Ces deux continents se rapprochant, Groix a été enfouie sous Armorica vers – 370 millions d'années *(au milieu)*. L'île a été exhumée il y a 340 millions d'années *(en bas)*.

Les géochronomètres datent les minéraux

Il en est ainsi des micas, qui contiennent du potassium dont l'un des isotopes, le ^{40}K, est radioactif et se transforme en ^{40}Ar avec une période de 1,25 milliard d'années. D'autres géochronomètres peuvent être utilisés dans les roches de l'île de Groix, tel le rubidium 87 qui se désintègre en strontium (^{87}Rb – ^{87}Sr) avec une période égale à 48,8 milliards d'années, dans les micas et dans l'épidote, ou le samarium 147 qui se désintègre en néodymium (^{147}Sm – ^{143}Nd) avec une période de 100 milliards d'années, dans le grenat. Le choix d'un géochronomètre ou d'un autre est essentiellement fonction de la composition des minéraux métamorphiques (le chronomètre K – Ar ne peut être utilisé que dans les minéraux contenant du potassium), de la température à laquelle le système est isolé de l'extérieur (c'est-à-dire au-dessous de laquelle les échanges d'éléments-fils avec l'extérieur deviennent infiniment lents, de sorte qu'ils sont stockés dans le minéral), et de l'âge approximatif de l'échantillon.

Des analyses réalisées sur de nombreux échantillons et avec divers géochronomètres ont été effectuées depuis de nombreuses années sur les schistes bleus de Groix. Les résultats et les interprétations qui en découlent ont évolué avec les techniques employées, celles-ci devenant de plus en plus précises et permettant des analyses à des échelles de plus en plus petites. Contrairement à certaines hypothèses qui faisaient des schistes bleus les témoins d'une subduction précambrienne (il y a plus de 540 millions d'années), il a été tout d'abord établi dans les années 1970 qu'ils s'étaient formés au Paléozoïque supérieur (entre 300 et 400 millions d'années) pendant la formation de la chaîne hercynienne. Par la suite, les résultats obtenus à l'aide des géochronomètres ont confirmé ces conclusions en donnant des âges également compris entre 300 et 400 millions d'années. En collaboration avec Jean-Jacques Peucat, du Laboratoire géosciences Rennes, deux d'entre nous (Valérie Bosse et Gilbert Féraud), avons réduit cet intervalle de temps grâce aux géochronomètres ^{87}Rb-^{87}Sr et ^{40}K – ^{40}Ar utilisés sur des schistes bleus et sur des schistes verts. Les âges obtenus dans les schistes bleus se situent entre 360 et 370 millions d'années, tandis que les schistes verts sont

© POUR LA SCIENCE - N° 305 MARS 2003



plus jeunes, vers 345 à 355 millions d'années. Ces résultats montrent que les basaltes et les argiles océaniques ont été enfouis à une cinquantaine de kilomètres de profondeur dans une zone de subduction fonctionnant au Dévonien supérieur, avant d'être exhumés rapidement au Carbonifère inférieur, dans des conditions permettant leur parfaite conservation pendant le retour vers la surface.

Un scénario accrocheur

Durant le Paléozoïque supérieur, la répartition des continents émergés était notablement différente de sa répartition actuelle *(voir la figure 1)*. Pour notre propos, il suffit de savoir que trois grandes masses continentales étaient présentes : la Laurentia (l'actuelle Amérique du Nord), la Baltica (l'Europe du Nord de la Norvège à l'Oural), et le Gondwana (l'Amérique du Sud, l'Afrique et l'Europe du Sud, c'est-à-dire l'Espagne et la partie méridionale de la France). Entre ces domaines continentaux majeurs existaient d'autres domaines continentaux, de petites dimensions à l'échelle du globe, dont la position précise est encore controversée. Philippe Matte, de l'Université de Montpellier, a proposé une reconstitution de l'histoire de l'ancienne région incluant Groix. Il s'est fondé sur diverses données : la position des anciens continents déduite des informations paléomagnétiques, la répartition des faunes et des flores, et la répartition des zones de subduction déterminée d'après les schistes bleus. Il a identifié deux bandes continentales : Avalonia (la côte Atlantique du Canada, le Sud des îles Britanniques et la Belgique et le Nord de la France) et Armorica (la Galice, la Bretagne et sa prolongation sous le bassin de Paris). Ces domaines continentaux étaient séparés par des espaces océaniques. Le déplacement des plaques à la surface de la Terre a entraîné la collision entre les continents laurentien, baltique et avalonien, donnant naissance à la chaîne calédonienne ; puis cet ensemble est entré en collision avec le continent gondwanien au cours du Dévonien et du Carbonifère, accouchant de la chaîne hercynienne. Les océans qui séparaient les continents ont disparu dans des zones de subduction que l'on doit maintenant rechercher en identifiant soit des arcs volcaniques, soit des roches métamorphiques de haute pression et basse température. Ce sont précisément les minéraux qui nous permettent de reconstruire l'histoire de Groix.

Il y a 425 millions d'années, au milieu du Silurien, la microplaque Armorica est encore proche du Gondwana, dont elle n'est séparée que par un petit océan, s'étirant (dans la géographie actuelle) de la Galice à la Bretagne. Vers 370 millions d'années, la convergence du Gondwana avec la Laurussia – le continent résultant de la collision des plaques laurentienne, baltique et avalonienne – conduit à la disparition de ce petit océan, qui s'enfonce sous la microplaque Armorica *(voir la figure 6)*. Ainsi se forment les schistes bleus de l'île de Groix. Durant le Carbonifère, la convergence se poursuit, entraînant la collision des plaques Laurussia et Gondwana, aboutissant à un vaste domaine continental, la Pangée, entouré par un vaste domaine océanique, la Panthalassa.

L'histoire ne s'est pas arrêtée là. Durant le Mésozoïque (il y a quelque 160 millions d'années), la Pangée se disloque, et l'océan Atlantique s'ouvre ; le continent américain s'éloigne de l'Afrique et de l'Europe. L'océan Atlantique en cours de formation sépare alors en deux tronçons la chaîne hercynienne, une partie étant maintenant observable dans les Appalaches alors que l'autre forme l'ossature de la partie centrale de l'Europe. Il y a environ 110 millions d'années, s'ouvre le golfe de Gascogne, qui sépare la France et l'Espagne. Étrange destin que celui de notre océan paléozoïque, enfoui sous une autre plaque, puis intégré à une chaîne de montagnes, et dont les restes furent finalement séparés en deux portions de part et d'autre du golfe de Gascogne.

Ainsi, les schistes bleus, comme les autres roches qui existent sous haute pression et à basse température, marquent l'emplacement de zones de subduction fossiles, où disparurent des océans et s'affrontèrent des continents. Les schistes bleus de l'île de Groix sont parmi les rares témoins d'un océan disparu, parce qu'ils ont échappé aux transformations associées à la collision continentale ayant amalgamé les continents en une gigantesque Pangée. Ils signalent, par leur existence même, que le globe terrestre s'est déjà notablement refroidi depuis sa formation, il y a environ 4 500 millions d'années. Durant les premiers milliards d'années de son existence, l'augmentation de température avec la profondeur était trop forte pour que des minéraux comme la glaucophane puissent se former. Ce n'est qu'à la fin du Précambrien et au cours du Paléozoïque qu'apparaissent les schistes bleus, dont la formation se généralise durant le Mésozoïque et le Cénozoïque. Les schistes bleus de l'île de Groix sont ainsi parmi les plus anciens témoins du refroidissement du globe terrestre. On comprend alors leur intérêt patrimonial, justifiant la création d'une réserve naturelle sur l'île aux grenats.

Michel BALLÈVRE, professeur à l'Université de Rennes et Gilbert FÉRAUD, directeur de recherches au CNRS à Nice au Laboratoire géosciences-azur, se sont associés depuis quelques années pour étudier les mécanismes d'exhumation des roches enfouies lors d'une subduction. Valérie BOSSE a effectué la majeure partie de sa thèse sur les roches de l'île de Groix, et est maintenant maître de conférences à l'Université de Clermont-Ferrand.

V. BOSSE, M. BALLÈVRE et O. VIDAL, *Ductile thrusting recorded by the garnet isograd from blueschist-facies metapelites of the Ile de Groix, Armorican Massif, France*, *Journal of Petrology*, vol. 43, pp. 485-510, 2002.

C. AUDREN et al., Carte géologique de la France au 1/25 000, Feuille Île de Groix, BRGM, Orléans, 1993.

L'île de Groix, Numéro spécial de la revue *Penn ar Bed, Bretagne vivante*, Brest, réédition de 1990.

Les malformations des grenouilles

ANDREW BLAUSTEIN • PIETER JOHNSON

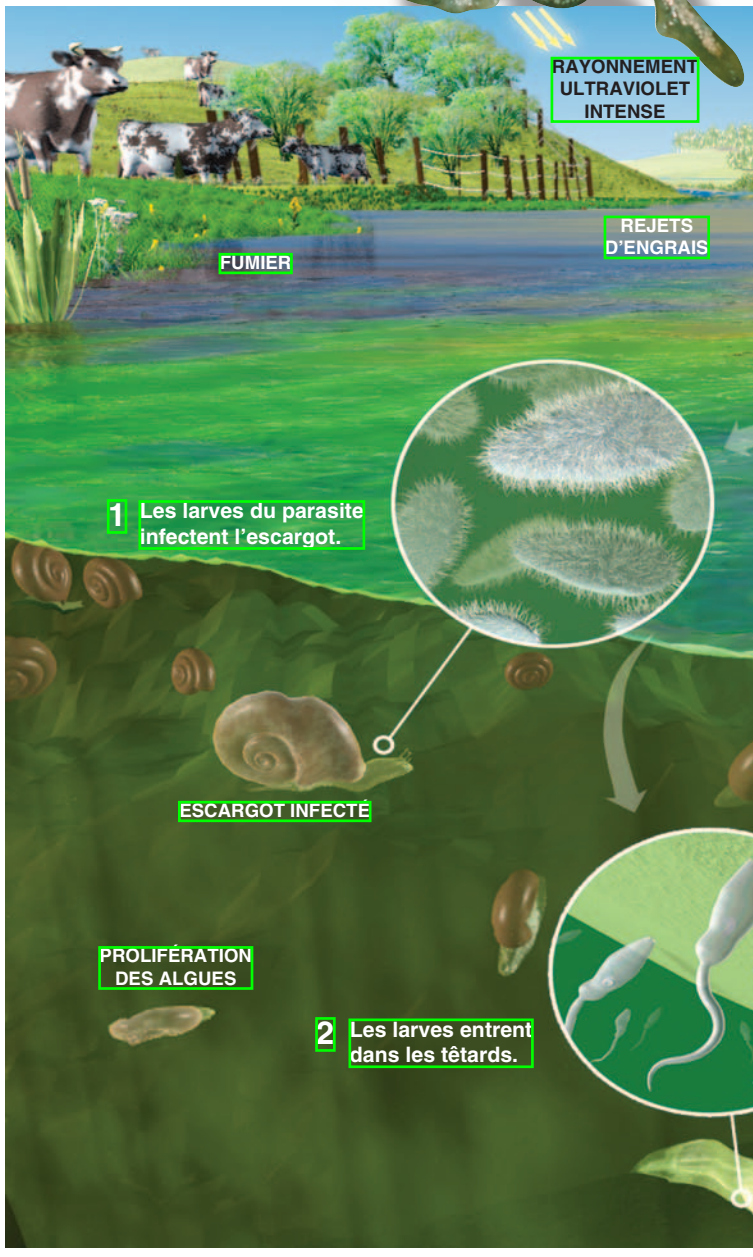


Trois facteurs sont incriminés dans l'accroissement du nombre de malformations chez les amphibiens : les rayonnements ultraviolets, la contamination chimique des eaux et une épidémie due à un parasite.

Parfois, au hasard d'une promenade, on peut observer des grenouilles qui n'ont pas de pattes ou qui, au contraire, ont des pattes surnuméraires. Certaines ont une ou deux pattes qui sortent de l'estomac. D'autres encore, n'ont qu'un œil. On observe de telles difformités en Europe, en Asie, aux États-Unis ou encore en Australie. Aucun continent ne semble épargné par ce phénomène. Le type de difformité le plus courant est l'excès ou l'absence de pattes. Quelle est l'ampleur du phénomène ? Quelle est la cause de ces difformités ? Depuis 1995, des malformations ont été observées chez plus de 60 espèces, dont les salamandres et les crapauds, et, dans certaines populations, 80 pour cent des animaux sont atteints.

Après avoir constaté l'ampleur du phénomène, les biologistes se sont demandé s'il était naturel. En effet, des études qui remontent à une centaine d'années, avaient montré que, dans chaque population, quelques individus présentaient des anomalies dues à des mutations génétiques, à des blessures ou à des anomalies de développement. Cependant, dans une population en bonne santé, moins de cinq pour cent des individus avaient des membres ou des doigts manquants ; les difformités les plus graves, comme des pattes postérieures surnuméraires, étaient encore plus rares. Diverses études indiquent que ces difformités sont, aujourd'hui, de plus en plus fréquentes.

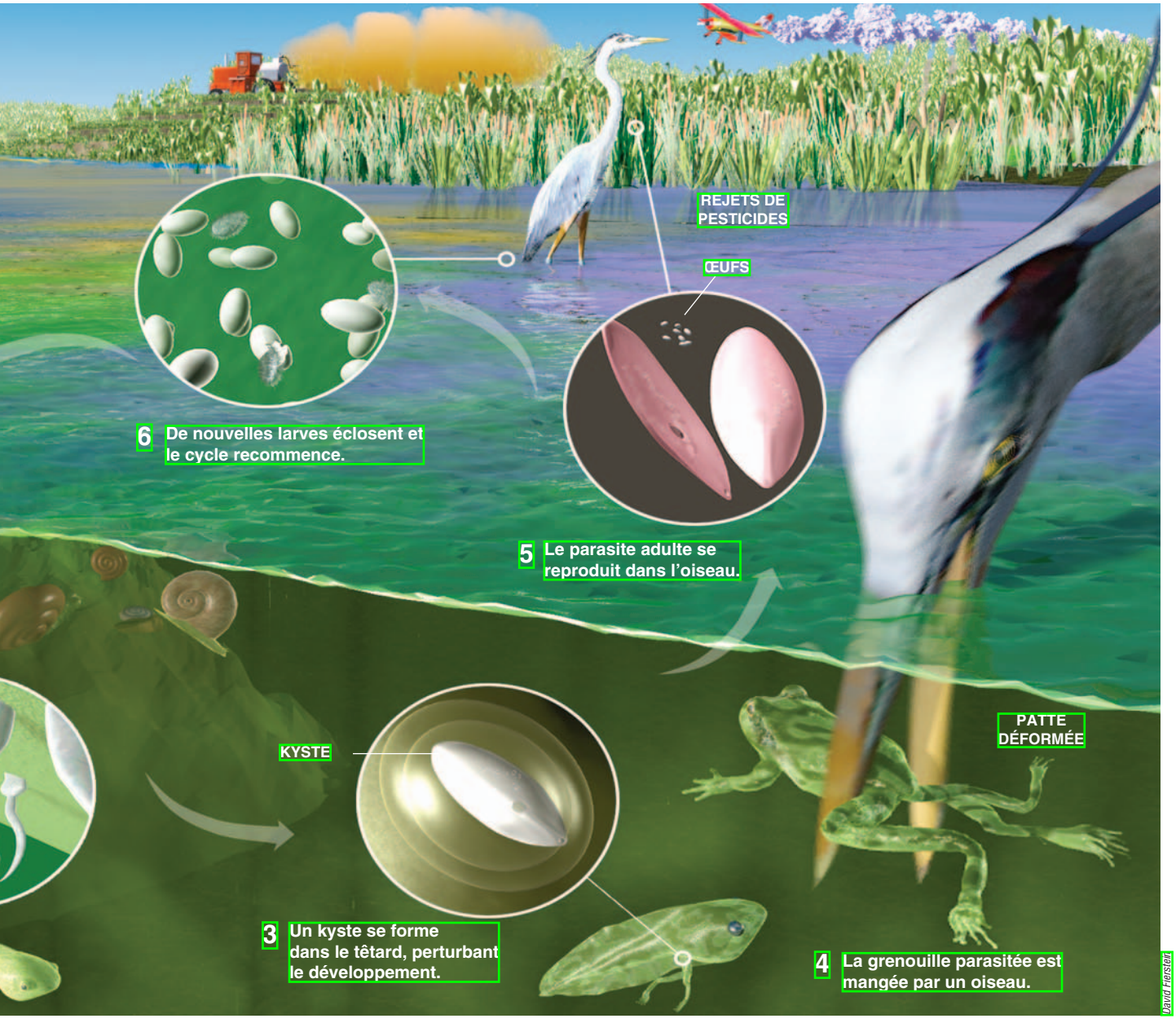
Les biologistes attribuent cet accroissement du nombre d'anomalies à une plus grande exposition des amphibiens aux rayonnements ultraviolets, à une contamination chimique de l'eau ou à une infection par un parasite. En réalité, ces trois facteurs interviennent probablement à des degrés divers, chacun causant des difformités spécifiques, et agissant parfois de conserve. En outre, tous sont en partie liés aux activités humaines qui perturbent l'habitat des amphibiens.



1. LE PARASITE TREMATODE *Ribeiroia ondatrae* est responsable des difformités (par exemple des pattes surnuméraires) observées sur les grenouilles. La larve du parasite infecte des escargots *(1)*. Puis elle se transforme, à l'intérieur de l'escargot, en une forme qui lui permet de se déplacer librement dans l'eau. Le parasite entre alors dans le têtard et se fixe à proximité de l'ébauche des futures pattes postérieures *(2)*. Là, se forme un kyste qui perturbe le développe-

Les difformités compromettent la survie des amphibiens et contribuent très probablement au déclin drastique des populations mondiales, observé depuis 1989. Les amphibiens sont considérés comme des indicateurs de la santé de la Terre, car leurs œufs sans coquille et leur peau perméable les rendent extrêmement sensibles aux perturbations de leur environnement. Les facteurs qui perturbent aujourd'hui le développement des grenouilles ne vont-ils pas faire bientôt payer un tribut aussi lourd à d'autres espèces ?

Une exposition excessive au rayonnement ultraviolet fut d'abord incriminée. D'une part, ce facteur avait déjà été impliqué dans le déclin des effectifs des populations d'amphibiens et, d'autre part, des travaux menés en laboratoire avaient montré que ces rayonnements perturbent leur développement. Ces rayonnements peuvent endommager, notamment, le système immunitaire et entraîner des mutations génétiques. Or la quantité de rayonnements ultraviolets qui atteint la Terre a augmenté avec la diminution de l'épaisseur de la couche d'ozone de la stratosphère, due à l'utilisation des chlorofluorocarbones, ainsi que d'autres substances chimiques libérées par l'homme. On a pris conscience de ces problèmes dans les années 1970. L'un de nous (A. Blaustein) et ses collègues ont montré que l'exposition aux rayonnements ultraviolets peut tuer les embryons et les larves d'amphibiens, provoquer, chez les grenouilles adultes, de graves lésions oculaires, et causer,



David Forster

ment normal des pattes et provoque la croissance de pattes supplémentaires lorsque le têtard devient grenouille *(3)*. La grenouille devient une proie facile pour l'hôte final du parasite, souvent un héron ou une aigrette *(4)*. Le parasite poursuit son développement et se reproduit dans l'oiseau qui libère des œufs de trématode dans ses déjections *(5)*. Quand de nouvelles larves éclosent *(6)*, le cycle recommence. Les activités humaines renforceraient la production de parasites par les rejets de fumier et d'engrais dans l'étang, qui accélèrent le développement des algues : la population des escargots qui se nourrissent de ces algues et qui hébergent le parasite augmente. Des rayonnements ultraviolets intenses et les rejets de pesticides – qui, par eux-mêmes peuvent causer d'autres types de difformités – affaiblissent le système immunitaire des têtards et rendent ces animaux plus vulnérables aux infections par les parasites.

aussi bien chez les grenouilles que chez les salamandres, divers types de difformités morphologiques.

Jusqu'à la fin des années 1990, on ignorait si les rayonnements ultraviolets avaient vraiment un effet sur le développement des pattes des amphibiens. Puis, Gary Ankley et ses collègues, de l'Agence pour la protection de l'environnant du Minnesota, ont mené une étude expérimentale pour apporter une réponse à cette question. Ils ont montré que, lorsque les grenouilles se développent à l'abri de tout rayonnement ultraviolet, leurs membres se développent normalement. Au contraire, quand les têtards sont exposés aux niveaux ambiants de rayonnements ultraviolets, les pattes sont incomplètes et des doigts manquent au terme de leur développement. Certaines difformités ressemblent à celles observées sur les grenouilles en milieu naturel.

Cependant, les rayonnements ultraviolets n'expliquent pas toutes les difformités observées en milieu naturel, notamment la croissance de pattes surnuméraires, l'une des anomalies les plus couramment observées depuis 1995. De nombreuses expériences en laboratoire et sur le terrain ont abouti à la même conclusion. D'autres biologistes ont aussi fait remarquer que, dans leur milieu naturel, beaucoup d'amphibiens se protègent d'une exposition continue aux rayonnements : qu'ils soient jeunes ou adultes, les amphibiens ne restent pas sans arrêt au Soleil. Ils vivent souvent dans des eaux boueuses et sortent parfois seulement la nuit.

Le rôle de la pollution

Pendant que certains biologistes étudiaient le déclenchement des difformités par les rayonnements ultraviolets, d'autres examinaient le rôle de la pollution de l'eau, notamment l'effet des pesticides. Ils se sont intéressés à la pollution, car parmi les premiers cas de difformités signalés, un grand nombre vivaient dans des régions où les insecticides et les engrais étaient utilisés en grande quantité. Au milieu des années 1990, de nombreux travaux de laboratoire avaient confirmé que des myriades de substances polluantes tuent les amphibiens, sans pour autant préciser s'ils pouvaient entraîner la formation de pattes surnuméraires ou incomplètes.

Les toxicologues étaient confrontés à une difficulté notable : comment isoler, parmi toutes les substances contenues dans l'eau analysée, un produit chimique unique ou, du moins, un groupe de produits potentiellement responsable des difformités morphologiques des grenouilles ? Des centaines de produits polluants sont déversés chaque année par millions de tonnes dans les régions où des amphibiens difformes ont été observés. Pourtant, un de ces produits a été immédiatement incriminé : le méthoprène. Ce pesticide, mis sur le marché en 1975, est supposé être moins dangereux que le DDT.

Le méthoprène fut d'abord suspecté parce que sa structure chimique ressemble à celle des rétinoïdes, qui jouent un rôle important dans le développement des vertébrés. C'est notamment le cas de l'acide rétinoïque. Leur pénurie ou leur excès entraînent parfois des difformités chez l'embryon. De nombreuses fausses couches et des anomalies morphologiques ont été attribuées à l'utilisation, par des femmes enceintes, de médicaments contre l'acné, contenant une substance dérivée de l'acide rétinoïque.

Quelques biologistes pensèrent que le méthoprène avait peut-être un effet similaire sur les grenouilles. Dans une série d'expériences faites à la fin des années 1990, les biologistes de l'Agence pour la protection de l'environnant du Minnesota montrèrent que de grandes quantités d'acide rétinoïque perturbent la formation des pattes arrière chez les grenouilles, mais que ce n'est pas le cas du méthoprène. D'autres études de terrain montrèrent également que ce pesticide ne pouvait pas être l'unique responsable. Le méthoprène se dégrade rapidement dans l'environnement, et les biologistes n'ont pas réussi à prouver sa persistance dans les zones où les difformités sont nombreuses. On aboutit aux mêmes conclusions pour les 61 autres produits chimiques utilisés en agriculture – et pour leurs produits de dégradation – dont les concentrations ont été mesurées dans diverses régions de l'Ouest américain, où les animaux sont atteints de nombreuses malformations. Pour autant, les pesticides ne sont pas considérés comme inoffensifs. Des centaines de produits n'ont pas été testés, et certains pesticides sont toujours soupçonnés de causer des anomalies morphologiques, autres que la formation de pattes surnuméraires.

Aujourd'hui, on admet que la pollution de l'eau et l'exposition aux rayonnements ultraviolets causent des difformités, mais une menace plus grande encore semble planer sur les batraciens.

Des parasites prolifiques

Cette menace, qui semble être la cause des fréquentes anomalies morphologiques constatées, s'est manifestée au milieu des années 1980. Stephen Ruth, à l'époque à l'Université de Monterey, explorait des étangs dans le Nord de la Californie lorsqu'il découvrit des centaines de grenouilles arboricoles du Pacifique et de salamandres à longs doigts auxquelles il manquait des pattes, ou qui, au contraire, avaient des pattes surnuméraires ou qui présentaient des anomalies morphologiques. Il ne tira cependant pas de signal d'alarme, car il était persuadé que le phénomène était isolé.

En 1986, S. Ruth demanda à Stanley Sessions, à l'Université Hartwick, dans l'État de New York, d'examiner ces étranges amphibiens. Ce dernier constata que les animaux étaient tous infectés par un parasite trématode, communément nommé douve. Les trématodes de Californie, dont on ignorait encore l'identité précise, ne semblaient pas être mortels pour leurs hôtes. S. Sessions soupçonna que, chez les têtards, ces parasites perturbaient le développement partout où ils formaient des kystes, le plus souvent près des pattes postérieures. Pour vérifier cette hypothèse, il implanta de petites billes de verre dans des embryons de grenouilles et de salamandres en développement. Ces deux espèces présentent l'intérêt de se reproduire facilement en captivité ; ce sont, en quelque sorte, les « souris blanches » de la biologie des amphibiens. On a observé des pattes surnuméraires apparaître, ainsi que d'autres difformités, exactement comme si elles avaient été parasitées.

Toutefois, ces résultats expérimentaux ne prouvaient pas que les trématodes étaient responsables des difformités observées, d'autant que les espèces de grenouilles et de salamandres étudiées ne présentent généralement pas d'anomalies morphologiques dans leur milieu naturel. Il fallut attendre encore quelques années pour que cette corrélation soit établie. Entre 1996 et 1998, l'un d'entre nous, (Pieter Johnson) inspecta, avec ses collègues, les milieux humides de Californie de façon systématique et il constata que les étangs où les grenouilles arboricoles présentaient des anomalies des pattes contenaient beaucoup de *Planorbella tenuis*,

© POUR LA SCIENCE - N° 305 MARS 2003

un escargot aquatique qui fait partie des hôtes colonisés par le trématode identifié par S. Sessions et aujourd'hui connu sous le nom de *Ribeiroia ondatrae*.

Kystes perturbateurs

Pensant qu'ils avaient peut-être découvert une relation directe entre les difformités observées chez les amphibiens dans leur milieu naturel et une épidémie liée à un parasite, P. Johnson et son équipe prélevèrent dans les étangs étudiés des grenouilles difformes et les disséquèrent. À chaque fois, ils trouvèrent une importante concentration de kystes formés par le parasite, juste sous la peau, à la base de chaque patte postérieure. Pour tester l'hypothèse selon laquelle les trématodes seraient responsables de l'apparition de pattes surnuméraires, des têtards de grenouilles arboricoles du Pacifique ont été exposés, en laboratoire, au parasite *Ribeiroia ondatrae*. Comme prévu, des difformités identiques à celles observées en milieu naturel apparurent sur les grenouilles infectées. En outre, plus la concentration en parasites était élevée, plus les malformations étaient importantes, alors que les grenouilles non infectées se développaient normalement.

Cette étude représenta une étape décisive de cette recherche. Des expériences ultérieures, dont celle que nous avons menée en 2001 sur des crapauds de l'Ouest, ont prouvé le rôle essentiel joué par *Ribeiroia ondatrae* dans l'apparition de difformités chez des amphibiens autres que les grenouilles arboricoles du Pacifique. Deux études, effectuées en 2002 par Joseph Kiesecker, de l'Université de Pennsylvanie, et par S. Sessions, Geffrey Stopper et leurs collègues, de l'Université Yale, ont montré que *Ribeiroia ondatrae* peut entraîner des difformités au niveau des pattes, dans diverses espèces.

D'autres études ont confirmé que l'on trouve des amphibiens difformes à peu près partout où le parasite *Ribeiroia ondatrae* est présent, tandis que ce n'est pas systématique en présence de polluants chimiques. De plus, au cours des dernières années, l'infection due à ce parasite semble s'être développée à un rythme croissant, atteignant quasiment le stade d'une épidémie. En 2001, une étude bibliographique exhaustive avait montré qu'avant 1990, seules sept populations d'amphibiens infectées par *Ribeiroia ondatrae* et présentant des malformations avaient été observées. En revanche, d'après les résultats de l'étude de terrain que nous avons publiés en 2002, nous avons identifié 25 zones d'habitats d'amphibiens concernées, uniquement dans l'Ouest des États-Unis. Sur ces sites, six espèces présentaient des difformités, et la proportion des animaux atteints dans chaque population variait de 5 à 90 pour cent. Au cours des deux dernières années, des difformités dues à *Ribeiroia ondatrae* ont été observées dans de nombreuses régions.

Aujourd'hui, les biologistes comprennent comment le cycle de vie de *Ribeiroia ondatrae* entretient le développement de difformités, génération après génération, chez les amphibiens qui vivent dans la même zone que des escargots infectés par le parasite *(voir la figure 1)*. Lorsque le parasite quitte l'escargot qui l'hébergeait et s'installe dans un têtard, il se fixe généralement près de l'ébauche d'une patte postérieure. Il prolifère et forme un kyste qui représente un obstacle au développement correct des pattes. Que la grenouille ait des pattes surnuméraires ou qu'au contraire, il lui en manque, elle ne se déplace pas correctement et devient une proie facile pour l'hôte final du parasite, en général un héron ou une aigrette. Le parasite se développe et se reproduit dans l'oiseau dont les déjections libèrent des œufs de trématodes dans l'eau. Lorsque les larves éclosent, elles colonisent un escargot, et le cycle recommence.

Si l'extension d'une épidémie provoquée par *Ribeiroia ondatrae* est en partie, ou même essentiellement, responsable de l'augmentation du nombre de difformités observées récemment chez les grenouilles, quelle est la cause de cette épidémie ? Vraisemblablement la perturbation, par l'homme, des zones d'habitat des grenouilles. Dans les populations humaines, comme chez les animaux sauvages, les maladies infectieuses émergent ou se répandent lorsque les caractéristiques de l'environnement se modifient favorisant la prolifération des organismes responsables de ces maladies. Le reboisement du Nord-Est des États-Unis, par exemple, a entraîné l'apparition de la maladie de Lyme, car il a favorisé la prolifération d'un cerf dont les tiques hébergent la bactérie de Lyme. La domestication des fleuves africains a contribué à une diffusion des douves présentes



Steven Holt/Stockpix.com

2. LES DIFFORMITES des grenouilles ont des causes diverses. Les parasites trématodes peuvent provoquer la croissance de pattes postérieures surnuméraires *(en haut)*. Ils peuvent aussi être responsables de pattes postérieures mal formées, voire d'une absence de pattes ; l'exposition excessive aux rayonnements ultraviolets, la pollution chimique ou les blessures infligées par des prédateurs peuvent également être incriminées. Les rayonnements ultraviolets sont souvent responsables d'anomalies des yeux *(en bas)* et de la peau.



Frans Lanting

dans les escargots aquatiques microscopiques, qui provoquent la bilharziose chez l'homme. Ces dernières décennies, les altérations des zones d'habitat ont aussi favorisé l'expansion de maladies dues aux hantavirus ou au virus *Ebola* (responsables de fièvres hémorragiques), au virus du Nil occidental, à la dengue et au VIH.

L'altération des zones d'habitat

Nous avons récemment mis en évidence une correspondance entre l'altération des zones d'habitat par l'homme et les sites où les parasites *Ribeiroia ondatrae* abondent : lors de notre campagne de surveillance dans l'Ouest américain, nous avons découvert que 44 des 59 sites humides dans lesquels les amphibiens étaient infectés par le parasite étaient des réservoirs, des étangs associés à des fermes ou autres plans d'eau artificiels. L'épandage d'engrais et l'abondance du fumier provenant des troupeaux élevés aux alentours de ces habitats favorisent souvent la prolifération des algues, entraînant la prolifération des escargots qui les mangent et qui hébergent les parasites *Ribeiroia ondatrae*, de sorte que les effectifs de grenouilles difformes augmentent. Enfin, les échassiers, qui sont l'autre type d'hôte indispensable à ces parasites, sont en général présents en abondance dans ces zones aménagées par l'homme.

Bien que le parasitisme exercé par les trématodes soit l'explication la plus vraisemblable de la plupart des difformités observées chez les amphibiens, ce n'est pas l'unique cause. Parfois, la pollution de l'eau ou une exposition excessive aux rayonnements ultraviolets provoqueraient aussi des anomalies morphologiques, de l'œil ou de la peau, notamment. Parfois, ils affaiblissent le système immunitaire des amphibiens, ce qui les rend plus vulnérables à l'invasion des parasites. Enfin, les prédateurs des amphibiens, tels les poissons, les sangsues ou les tortues, qui peuvent arracher des pattes aux têtards causent aussi des difformités.

Ainsi, les amphibiens sont exposés à plusieurs facteurs de risques. Les spécialistes devront démêler l'influence de chacun de ces facteurs et comprendre leurs interactions. Les facteurs qui perturbent le développement des grenouilles et qui augmentent leur mortalité pourraient un jour menacer d'autres animaux, voire l'homme. Nous devons y prendre garde.

Andrew BLAUSTEIN est professeur de géologie à l'Université d'Oregon. Pieter JOHNSON est écologue à l'Université Madison du Wisconsin.

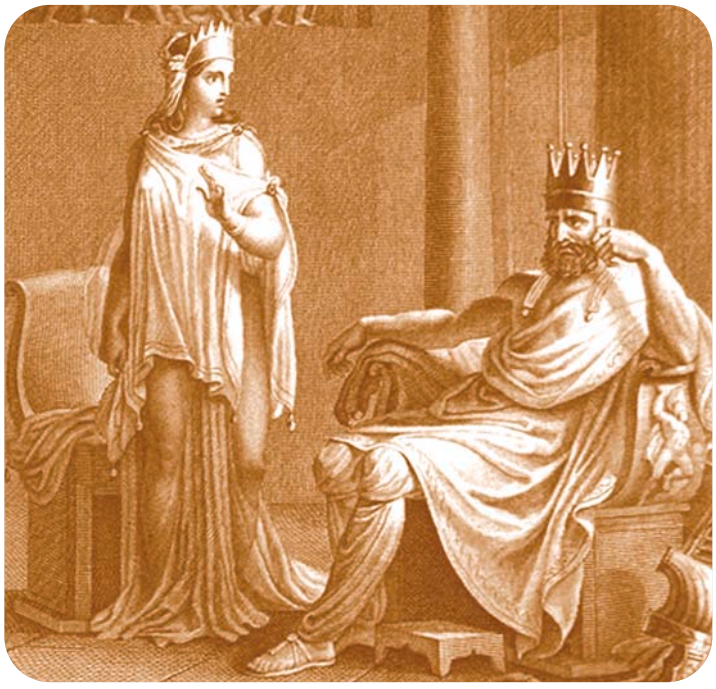
Pieter JOHNSON, Kevin LUNDE, Euan RITCHIE et Alan LAUNER, *The Effect of Trematode Infection on Amphibian Limb Development and Survivorship*, in *Science*, vol. 284, pp. 802-804, 30 avril 1999.

William SOUDER, *A Plague of Frogs*, Hyperion Press, 2000.

Ecosystem, Evolution and UV Radiation, sous la direction de Charles Cockell et Andrew Blaustein, Springer-Verlag, 2001.

www.npwrc.usgs.gov/narcam

Résiliences



Mithridate, ici représenté dans la tragédie de Corneille, serait le Saint Patron de la résilience : il absorbait du poison pour s'y habituer et s'en immuniser.

Qu-est ce que la résilience? En mécanique, la résilience est une mesure de la résistance aux chocs des matériaux, leur capacité de supporter les coups. Son origine est le verbe latin *resilio*, signifiant sauter en arrière, rebondir, rejaillir. Cette origine contient en germe un enrichissement du concept : la définition du terme s'est élargie. Pour Boris Cyrulnik, subir et vaincre les coups du sort enrichissent la personnalité et la préparent à d'autres adversités.

Dans la littérature, cet «entraînement au malheur» est illustré par l'entrée dans la vie des adolescents blessés par leur enfance. Si le roman est le miroir que l'écrivain transporte tout au long du chemin de la vie, ce miroir reflète, dans la diversité, la nécessité quasi physiologique de surmonter des épreuves. *Olivier Twist* de Dickens, *Cosette* de Victor Hugo, *L'enfant* de Jules Vallès et *Brasse-Bouillon* d'Hervé Bazin, sont des exemples, parmi tant d'autres, du passage douloureux par ce chemin initiatique.

Il n'est pas jusqu'à Albert Einstein, qui ne dut subir les brimades des échecs aux examens et les refus de postes universitaires. Modeste examinateur de brevets à Berne, il tira toutefois parti de son isolement pour développer son indépendance d'esprit et publier les articles qui changèrent la face du monde physique.

Aujourd'hui, la résilience, c'est la capacité pour un objet (organe, individu, écosystème) de revenir – plus ou moins vite – à son état initial après une perturbation (au sens large) due à son environnement.

Dans les Sciences humaines, la résilience est élargie à la capacité de tirer parti des coups du sort. Elle se construit dans l'interaction entre un individu et la collectivité. En biologie, la vaccination est un exemple de résilience acquise.

Pour éclairer notre propos, nous allons examiner le concept de résilience dans de multiples contextes scientifiques pour en éclairer différentes facettes : par exemple, l'apparente fragilisation d'un message mathématique, l'imperfection nécessaire d'une technologie pour éviter des phénomènes périodiques et dangereux, les mutations favorables qui font que les espèces évoluent lors d'un changement de l'environnement, de la récupération de la végétation d'un écosystème, comme une forêt après une tempête.

La résilience est la figure de style exprimant la résistance acquise suite à l'entraînement au mal.

Publi-reportage

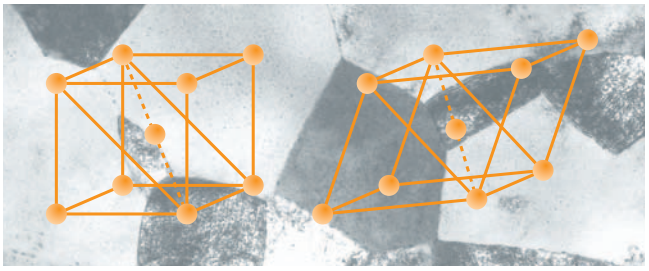


Ramollir les aciers pour augmenter leur résilience : les phénomènes de trempe et de recuit

Pour durcir leurs épées, les métallurgistes de Damas savaient, au Moyen Âge, qu'il était favorable de les «recuire». Le recuit et la trempe, deux techniques proches, consistent à porter le métal à une température où il se ramollit, plus précisément où il change de constitution cristallographique, puis à le refroidir pour qu'il prenne une conformation plus dure. La légende raconte qu'après avoir chauffé leurs épées en acier, les forgerons de Damas les plongeaient dans le ventre d'esclaves pour les refroidir... La structure obtenue par la trempe soudaine et, par conséquent, les caractéristiques mécaniques de l'acier, sont nettement différentes de celles de l'état d'équilibre résultant d'un refroidissement lent.

Cette technique de recuit est également utilisée en informatique : pour trouver le chemin de longueur minimale reliant plusieurs centaines de points, par exemple la tournée d'un voyageur de commerce, on perturbe un chemin obtenu en augmentant la longueur de certains trajets, puis on recalcule à partir de cette nouvelle configuration un chemin total de longueur inférieure. On obtient ainsi une longueur de chemin que l'on compare à celle dont on est parti. Si elle est inférieure, on recommence la procédure à partir de ce chemin. La aussi, on désorganise le système pour l'améliorer.

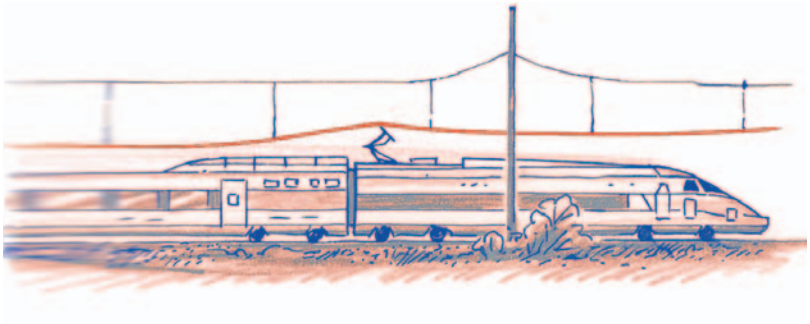
Résiliences



Les alliages à mémoire de formes plient, mais ne rompent pas

Découverts dans les années 1960, les alliages à mémoire de forme, par exemple, ceux de nickel et de titane, ont une résilience intrinsèque. Ils se déforment réversiblement sous le seul effet de la température. Leur secret consiste en une transition de phase de la maille cristalline, qui passe d'une forme cubique, dite austénitique, à une autre parallélépipédique, dite martensitique, quand la température diminue. C'est la première forme qui est mémorisée. Toute transformation mécanique de l'alliage sous sa forme martensitique est réversible : il suffit de le chauffer pour que ses cristaux reprennent leur forme initiale cubique. Plus encore, cette transition de phase dote les alliages de propriétés de superélasticité, c'est-à-dire qu'ils supportent de façon réversible des déformations mécaniques importantes, de l'ordre de cinq pour cent. La contrainte appliquée est répartie dans la transformation des cristaux cubiques : l'alliage ne rompt pas. Enfin, lorsqu'on imprime à un de ces alliages en phase martensitique une forme donnée que l'on maintient pendant 20 ou 30 cycles de chauffage et de refroidissement, on oriente les défauts cristallins : la forme martensitique est alors aussi mémorisée. Au final, grâce à leurs multiples propriétés, les alliages à mémoire «se relèvent indemnes» des diverses contraintes que l'on peut leur infliger.

Publi-reportage



Une petite imperfection renforce la résistance d'un dispositif mécanique

Au Japon, les caténaires vendues par les industriels français s'usaient très vite, beaucoup plus vite qu'en France. D'où venait la résilience des caténaires françaises? Les experts étaient perplexes, jusqu'au jour où l'un d'entre eux observa la pose des pylônes portant les fils le long des rails. Le mystère s'expliqua alors par le perfectionnisme des ouvriers japonais. En France, les pylônes étaient posés avec un certain laxisme, distants d'environ cent mètres. Au Japon, cette distance était exactement mesurée. Du fait de cette régularité, un système d'ondes stationnaires de grande amplitude s'établissait et le frottement résultant des déplacements du câble conducteur usait beaucoup les caténaires. Le défaut du dispositif était sa perfection, la solution du problème, un petit dérèglement qui empêchait l'établissement des ondes stationnaires. La régularité temporelle peut être aussi néfaste que la régularité spatiale. On sait que les troupes ne doivent pas défiler au pas sur des ponts, sinon les vibrations induites par les chocs périodiques et simultanés risquent de le faire s'écrouler. Le pont d'Angers se serait écroulé à cause de cette synchronisation intempestive de la marche d'un régiment. La résilience est meilleure avec la désynchronisation, il faut mettre de l'imperfection pour augmenter la résilience.

Résiliences

MESSAGES INDIVIDUELS	MESSAGES + CODES	MESSAGES TRANSMIS	
00	000	000 BON	011 BON
01	011	001 MAUVAIS	101 BON
10	101	010 MAUVAIS	110 BON
11	110	100 MAUVAIS	111 MAUVAIS

Une fragilisation du système élimine les risques d'erreur

Le mathématicien Hamming devait faire ses calculs sur un des premiers ordinateurs... et comme il travaillait pendant le week-end, toute erreur de transmission de ses données était fatale : elle mettait l'ordinateur en panne et Hamming devait attendre le retour de l'équipe de maintenance. Comment améliorer la transmission? Il eut l'idée de dépister les erreurs en allongeant la longueur de ses messages en chiffres binaires (constitués d'une série de 0 et de 1).

Cette action est paradoxale, car l'erreur de transmission sur chaque lettre étant constante, plus le message est long, plus il y a de risques qu'un chiffre soit erroné. Ce que Hamming avait découvert, c'est qu'en ajoutant un bit dit «de parité» à son message, il pouvait détecter une erreur de transmission. Pour un message de deux chiffres binaires, qui peut être 00, 01, 10, 11, Hamming ajoute un troisième chiffre égal à la parité du nombre de zéros (0 quand le nombre de zéros est pair ou nul, 1 quand ce nombre est impair) et obtient 000, 011, 101 et 110. Seuls les nombres appartenant à cette liste sont bons, c'est-à-dire permis. S'il y a une erreur de transmission, par exemple si 01 se transforme en 11, le chiffre transmis sera 111 et comme il ne fait pas partie de la bonne liste, il dénotera une erreur de transmission : grâce au bit supplémentaire redondant, Hamming pouvait vérifier son message pour qu'il ne bloque pas la machine et augmentait ainsi la résilience.

Publi-reportage



Des mini crashs éviteraient, en Bourse, les catastrophes

Si la bourse continue à éternuer, le monde économique pourrait attraper une grave bronchite. Pour augmenter la résilience des marchés, c'est-à-dire leur capacité à résister aux chocs, Michael Hart et ses collègues de l'Université d'Oxford suggèrent d'«immuniser» les actions boursières en déclenchant de petites attaques contre l'action. Ces ventes «tests» éviteraient les catastrophes majeures des jours noirs où tout le monde veut vendre et personne ne veut acheter. Une simulation informatique des marchés a été conduite. Pour simuler la diversité des opérateurs, les décisions d'achat et de vente se faisaient sur des bases probabilistes, reproduisant ainsi les caractéristiques de la réalité boursière. Ces simulations ont montré que les baisses importantes d'un titre étaient précédées de petites fluctuations à la hausse. Au contraire, quand des valeurs étaient soumises à de petites diminutions, elles ne s'écroulaient que rarement. Aussi pourrait-on, pensent les chercheurs, déceler sur le marché les signes avant-coureurs des catastrophes brutales. Dès l'apparition des signes prémonitoires, des paquets de valeurs seraient mis sur le marché, amenant les actions à leur niveau d'équilibre plus résilient. Toutefois, qui jouera le rôle de régulateur : l'État, la Commission des opérations de bourse, *Big Brother*?

Résiliences



Les enfants résilients s'épanouissent malgré les coups du sort

Selon Rudyard Kipling, si un fils peut voir détruire l'ouvrage de sa vie et, sans dire un seul mot, se mettre à reconstruire, il sera un homme. La littérature est friande de jeunesses difficiles, mais surmontées à l'âge adulte : Poil de Carotte, Tarzan, Rémi et Matthias de *Sans famille*. Ces héros – de fiction ou réels – illustrent la résilience telle que l'entendent les psychologues, la capacité à réussir sa vie en dépit d'une adversité (environnement parental, guerre, etc.) qui comporte le risque d'une issue négative : ces enfants avaient toutes les chances de mal tourner, mais il n'en a rien été. Né au XXe siècle, ce concept a été abordé par Anna Freud, puis étudié par Françoise Dolto au moment où l'on s'est intéressé à l'enfance, et enfin popularisé par Boris Cyrulnik. Depuis, on étudie la résilience au travers des mécanismes de protection mis en place par l'enfant, ceci afin de pouvoir venir en aide aux enfants en difficulté. Ainsi, on a montré qu'un cadre structuré et qu'un substitut affectif, telle une famille d'accueil, sont indispensables après la période de traumatisme. Les études ont révélé chez les enfants résilients le rôle essentiel du rêve, une projection dans l'avenir, et de l'intellectualisation de leur vie, c'est-à-dire d'un questionnement sur eux-mêmes et sur leur sort. C'est le triomphe du bonheur sur le malheur!

Publi-reportage



La souffrance initiatique, passage obligé vers l'adulte

Les Aborigènes d'Australie, les Masaïs du Kenya et les Indiens d'Amazonie ou d'Amérique du Nord vivent dans des conditions difficiles. Dans nombre de ces peuples, le passage de l'adolescence à l'âge adulte est l'occasion d'épreuves initiatiques qui visent à endurcir et renforcer l'impétrant. Le plus souvent, il s'agit d'un isolement dans un lieu éloigné et hostile, comme la forêt, la brousse, le sommet d'une montagne... Cet exil peut être complété ou remplacé par des épreuves physiques, tels des coups de fouet, des piqûres d'insectes, des bains glacés.

Chez les Indiens Mandans, aussi nommés O-Kee-Pa, les jeunes qui prétendent au statut d'homme et de guerrier se faisaient suspendre par des crochets placés dans le dos, dans la poitrine, dans les bras ou dans les cuisses pendant des heures.

Ce rite donnait aux membres de la communauté une expérience commune de la douleur qui les préparait à supporter les vicissitudes de leur existence et de celle de leur groupe. Selon les anthropologues, par ces diverses souffrances, les jeunes prennent contact avec la réalité inéluctable et fondamentale d'une vie qui ne les épargnera pas. Ainsi, les épreuves initiatiques renforcent la résistance des jeunes et augmentent leur résilience.

Résiliences

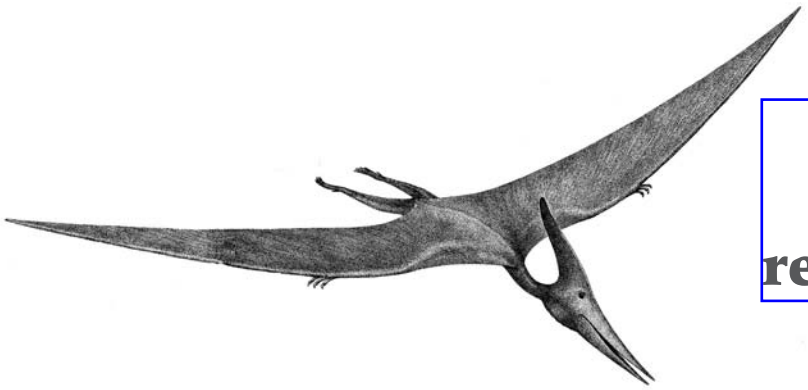


Les forêts, résilientes, préfèrent la brutalité à la douceur

En novembre 1883, l'éruption du Krakatoa, en Indonésie, recouvre de lave trois îles et y supprime toute trace de vie jusqu'au moindre brin d'herbe. Un siècle plus tard, elles sont recouvertes d'une dense forêt tropicale qui abrite quantité d'espèces végétales et animales.

La nature est résiliente! À ce titre, elle inspire de plus en plus les exploitants forestiers qui souhaitent tirer profit des capacités des écosystèmes à se régénérer après une perturbation comme un incendie ou une coulée de lave. Ainsi, certains biologistes iconoclastes proposent de renoncer aux forêts artificielles aménagées de façon à en maximiser la productivité, tel un agriculteur qui ne cultiverait qu'une seule essence dans son champ. Ils préconisent plutôt une imitation aussi fidèle que possible de la nature et de sa biodiversité : les nouvelles forêts seraient composées de nombreuses espèces de toutes tailles. Une coupe serait alors équivalente à un incendie, et la forêt perdurerait comme elle le fait dans des conditions naturelles. Dans cette hypothèse, les coupes sélectives et minimes ne sont plus appropriées. Au contraire, les prélèvements se doivent de refléter autant que possible l'hétérogénéité et la brutalité des perturbations auxquelles la nature est confrontée depuis des millions d'années. C'est le paradoxe de la résilience des forêts!

Publi-reportage



Évolution et erreurs fertiles dans la reproduction des gènes

L'ADN contenu dans le noyau de la cellule orchestre la vie d'un animal : il détermine la synthèse des protéines de l'organisme. Lors de la reproduction, des erreurs de réplication de l'ADN, des mutations, peuvent intervenir. Ces erreurs sont sources d'amélioration !

Généralement, ces erreurs ne sont pas bénéfiques, mais le mécanisme introduisant des erreurs est salutaire dans la mesure où il constitue une préparation à un changement possible de l'environnement. Lorsqu'intervient une modification climatique, il arrive que ces mutations aléatoires du génome confèrent à leur détenteur un avantage adaptatif sur ses congénères. Les chances de survie des possesseurs de la mutation sont plus grandes, et ceux-ci, vivant plus longtemps, se reproduisent plus abondamment. Ainsi, passée au crible de la sélection, la modification se transmet. De cette façon, Darwin expliqua l'apparition et la disparition des espèces, leur apparition étant le hasard de circonstances favorables, leur disparition résultant d'un génome inadapté aux nouvelles conditions de vie, parce que trop figé. Dans cette optique, l'Évolution sacrifie l'individu à l'espèce et l'espèce à la vie. Les modifications du génome et du climat sont des attaques qui déclenchent l'apparition des espèces animales et végétales et qui contribuent à la résilience de la vie.

Résiliences



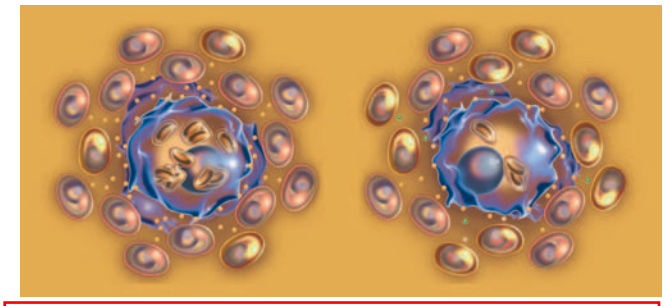
Mithridate, sixième du nom, est la résilience faite homme

Son enfance n'est qu'un long conditionnement à affronter les coups du sort dont sa vie sera ponctuée. Né en 132 avant notre ère, il fuit à 11 ans le domicile parental après la mort de son père où sa mère aurait joué un rôle. Dans la montagne où il se réfugie, il vit de chasse et s'endurcit au froid, à la faim et à la soif. Par ailleurs, il absorbe des petites doses des poisons les plus répandus à cette époque afin de s'en prémunir.

Après la mort de sa mère et de son frère, il rejoint Sinope, la capitale du Pont, en Asie, et accède au trône. Son règne n'est qu'une suite de conquêtes et de batailles, notamment contre Rome. Les populations des premières villes, libérées du joug romain, l'accueillent en libérateur, mais les défaites succèdent aux victoires, et le roi se réfugie en Arménie d'où il assiste à la déchéance de son royaume et à la traîtrise de son fils Macharès, qui fait la paix avec les Romains. En –66, le courage de Mithridate est encore entier, mais celui de ses sujets s'émousse : ils se révoltent et couronnent son autre fils, Pharnace.

Las, le seul roi qui s'opposa avec succès à l'Empire romain, tente de se suicider. C'est quand la résilience lui fait défaut qu'elle opère : le poison qu'il avale est sans effet. La mithridatisation est née! Seul le glaive d'un esclave emportera «le roi magnanime» qui, selon Montesquieu, «dans les adversités, tel un lion qui regarde ses blessures, n'en était que plus indigné».

Publi-reportage



L'attaque du vaccin augmente la résilience de l'organisme

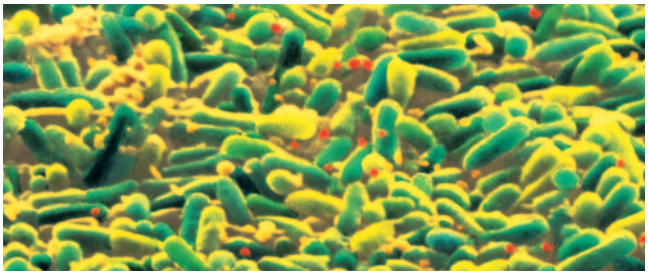
Deux millions de personnes meurent chaque année de la tuberculose dans le monde. Pourtant, si la vaccination n'existait pas, les méfaits de *Mycobacterium tuberculosis*, le bacille agent de cette maladie, seraient autrement plus considérables. En effet, les vaccins augmentent la résilience des individus face aux micro-organismes pathogènes.

Le vaccin contre la tuberculose mis au point par Calmette et Guérin au début du XX^e siècle est préparé par l'épuisement progressif des bacilles. Le système immunitaire de l'organisme inoculé par ces bacilles atténués réagit en amplifiant les résistances des cellules immunitaires qui évacuent le bacille. Lors d'une attaque ultérieure du bacille, le système immunitaire «préconditionné» par le BCG sait mieux lutter contre l'infection.

À la fin des années 1970, l'incidence de la tuberculose avait tant diminué dans les pays industrialisés que la question s'est posée : devait-on continuer la vaccination? Aujourd'hui on ne vaccine que dans les pays où l'incidence de la tuberculose est élevée, mais les chiffres indiquent qu'il faudrait le faire plus efficacement.

Ainsi, une première atteinte de l'organisme a augmenté sa résilience, et le vieil adage *Si vis pacem para bellum* est toujours applicable à la lutte anti-microbienne.

Résiliences



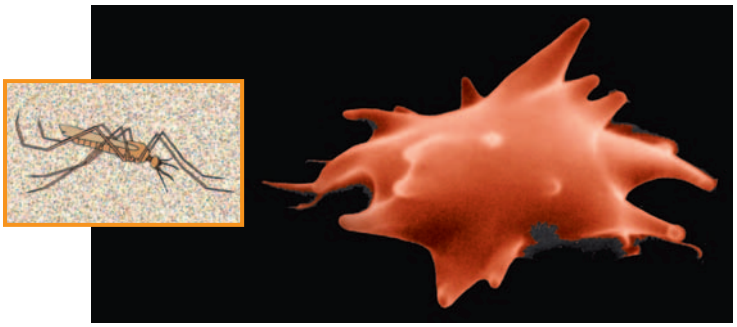
Quand un antibiotique favorise la résilience des bactéries

En 1941, presque toutes les souches des bactéries Staphylocoques dorés sont sensibles à la pénicilline G. En 1944, une part importante des souches hospitalières y est résistante. Plus encore, depuis 1980, des souches résistant à la méthicilline et à ses dérivés, employés à la place de la pénicilline, sont apparues et sont de plus en plus fréquemment isolées en milieu hospitalier. Ainsi, en quelques années, des populations de bactéries en contact avec un antibiotique «apprennent» à le contrecarrer.

Cet exemple illustre la résilience des populations bactériennes. Plusieurs mécanismes expliquent cette résilience. Par exemple, les bactéries se multiplient rapidement, jusqu'à toutes les 20 minutes pour certaines, et sont ainsi sujettes à de nombreuses mutations.

Celles-ci modifient parfois le récepteur aux antibiotiques, qui, cantonné à l'extérieur, devient inactif. Par ailleurs, des gènes de résistance, tels ceux d'enzymes qui modifient ou détruisent les molécules d'antibiotiques, portés par des plasmides (des petites molécules d'ADN circulaire), peuvent être transmis d'une bactérie à une autre. Ainsi, en présence d'un antibiotique, des bactéries résistantes apparaissent, prolifèrent et supplantent peu à peu celles qui étaient sensibles. Au final, une population bactérienne sensible à un antibiotique devient, en sa présence, résiliente.

Publi-reportage



«À quelque chose, malheur est (biologiquement) bon»

Les liens entre la drépanocytose et le paludisme illustrent la sagesse populaire empreinte de fatalisme. Ces deux maladies n'ont à première vue rien de commun. La première, aussi nommée anémie falciforme, résulte d'un défaut de l'hémoglobine. Cette protéine anormale, quand elle a fixé l'oxygène dans nos globules rouges, est moins soluble et forme alors des cristaux allongés : les cellules qui l'abritent ont une forme de faucille et, fragilisées, sont détruites précocement. La seconde résulte de l'infection d'un parasite, *Plasmodium*, transmis par la piqûre d'un moustique anophèle : le micro-organisme envahit les globules rouges où il se reproduit. Pourtant, dès 1949, le biologiste J.B.S. Haldane est frappé de la concordance des cartes de distribution du paludisme et de la drépanocytose. L'explication est génétique : les individus porteurs d'un gène muté et d'un gène normal sont plus résistants au *Plasmodium* que les individus sans gène muté. Aussi, en Afrique et en Asie où le paludisme fait des ravages, ces individus ont plus de chances que les autres d'avoir une descendance nombreuse : le gène muté est maintenu dans la population. Selon une hypothèse, le parasite qui se nourrit des protéines du globule rouge ne reconnaît pas l'hémoglobine modifiée et ne peut survivre. Ainsi, une maladie protège contre une autre!

Résiliences



La plasticité du phénotype augmente la résilience

Les grenouilles communes se reproduisent dans des mares qui s'assèchent parfois avant la métamorphose des larves. Comment résister aux aléas du climat? Des études ont montré que les larves exposées à l'assèchement se métamorphosent plus rapidement que celles qui restent dans un environnement constant. Pourtant, les mécanismes de cette transformation sont inscrits dans des gènes qui sont identiques d'une grenouille étudiée à l'autre. Ainsi, cette plasticité n'est pas génomique ; c'est la plasticité phénotypique, la capacité d'un génome à adapter la morphologie et la physiologie des individus aux fluctuations de leur milieu. Il s'agit de la source ultime de la diversité biologique! Autres exemples plus proches de nous : lors d'un séjour en altitude, le nombre de globules rouges dans notre sang augmente pour compenser la raréfaction de l'oxygène ; au soleil, notre peau brunit pour résister aux rayonnements ultraviolets. Ces mécanismes qui ont été sélectionnés au cours de l'évolution confèrent aux individus — animaux ou végétaux — qui en sont pourvus une plus grande flexibilité et un moyen de s'adapter à plusieurs environnements. Là où un génome rigide serait inadapté face à une trop grande variabilité du milieu, les gènes de la plasticité phénotypique sont le support de la résilience des individus face à l'imprévu.

Publi-reportage



La résistance du cœur face au manque d'oxygène : le cœur a sa résilience que la raison connaît

Des épisodes brefs de souffrance cardiaque sont à l'origine de la résilience myocardique face à l'ischémie. Depuis 1986, de nombreuses études expérimentales ont démontré que des cycles brefs d'ischémie-reperfusion protègent le cœur de lésions irréversibles lors de la survenue d'épisodes ischémiques plus sévères et plus longs. Chez l'animal, des expériences d'occlusions coronaires brèves sublésionnelles précédant un épisode d'occlusion prolongé entraînent une réduction de la taille de l'infarctus de 60 pour cent. Chez l'homme, lors d'une intervention de chirurgie cardiaque avec circulation extracorporelle, un clampage bref et intermittent de l'aorte limite la consommation d'énergie au cours d'une ischémie globale ultérieure prolongée. De même, l'on sait que lorsque des patients ont un infarctus précédé d'épisodes d'angine de poitrine, la zone de nécrose est plus limitée, la mortalité et le risque de développement d'une insuffisance cardiaque moindres que chez les patients présentant un infarctus d'emblée.

Chez l'animal et chez l'homme, les études suggèrent un rôle essentiel des canaux potassiques dans cette protection endogène, base de la résilience myocardique face à l'ischémie.

Résiliences

« Pour en savoir plus » :

- Jean Racine, *Mithridate*, Gallimard.
- Boris Cyrulnik, *Ces enfants qui tiennent le coup - 2e édition*, Hommes et Perspectives, 1998.
- Boris Cyrulnik, *Les vilains petits canards*, Odile Jacob, 2001.
- Dossier : *De l'importance d'être imparfait*, Pour la Science n° 200, juin 1994.
- I. Thornton, Krakatoa, *The Destruction and reassembly of an Island Ecosystem*, Harvard University Press, 1999.
- J. Lesourne, *Économie de l'ordre et du désordre*, Economica, 1991.
- E. Krahenbühl et R. Gotthardt, *Mémoire de formes, formes en mémoire*, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2002.
- Jean Paul Delahaye, *Information, complexité et hasard*, Hermès Sciences, 1999.
- Hervé Le Guyader (sous la direction de), *L'évolution*, Belin-Pour la Science, 1998.
- Vincent Thomas Louis, *L'anthropologie de la mort*, Payot, 1975.
- C.E. Murry, R.B. Jennings et K.A. Reimer, *Preconditioning with ischemia : a delay of lethal cell injury in ischemic myocardium*, in *Circulation*, n °5, pp. 1124-1136, 1986.
- G.S. Liu et al., *Protection against infarction afforded by preconditioning is mediated by A1 adenosine receptors in rabbit heart*, in *Circulation*, n ° 84, pp. 350-356, 1991.
- M. Ovize et al, *Coronary cyclic flow variations precondition the ischemic myocardium*, in *Circulation*, n °85, pp. 779-789, 1992.
- D.M. Yellon et al., *Preconditioning the human heart*, in *Lancet*, n °342 (8866), pp. 276-277, 1993.
- E. Deutsch et al., *Adaptation to ischemia during percutaneous transluminal angioplasty : clinical, hemodynamic, and metabolic features*, in *Circulation*, n °82, pp. 2044-2051, 1990.

Publi-reportage

L'ordinateur ultime

JEAN-PAUL DELAHAYE

Depuis le Big Bang, l'Univers, vu comme un ordinateur, a effectué 10^{120} calculs élémentaires. Nos limites physiques du calcul seront atteintes avant 200 ans ; pourrons-nous jamais disposer d'une puissance de calcul infinie qui engendrerait des paradoxes ?

Quand nous déplaçons une boule de haut en bas sur l'une des colonnes d'un boulier, nous effectuons une opération binaire de calcul, tout comme lorsque nous ouvrons un interrupteur, lorsqu'un condensateur se charge, lorsque l'état d'un transistor bascule, lorsqu'une porte logique détermine le OU logique entre ses deux entrées, etc.

Un ordinateur ne fait rien d'autre que de combiner des opérations binaires : le microprocesseur évalue le produit de 2345 par 721921, recherche un mot dans un dictionnaire, modifie un document affiché à l'écran, décomprime une page provenant du réseau Internet, exécute une piste du CD-audio placé dans votre lecteur, etc.

Tout changement, tout mouvement, toute interaction dans le monde physique peuvent être décomposés en suite d'opérations binaires, donc en calculs. De ce point de vue, tout système physique est un ordinateur qui, à chaque instant, enchaîne des opérations, et la physique, finalement, n'est que la théorie du calcul.

Parions que cette idée – qu'on dénomme déjà le réductionnisme computationnel – aura un grand succès dans le siècle qui commence. Elle remplacera sans doute l'idée chère au XVIII^{e} siècle selon laquelle l'univers est une grande horloge dont les engrenages complexes nous entraînent indéfiniment dans leur course, ou l'idée concurrente du XIX^{e} siècle que l'univers n'est qu'une machine thermodynamique dégradant sans cesse l'énergie et s'acheminant inéluctablement vers la mort thermique. Nous ne prétendons pas que l'assimilation du monde physique à un ordinateur est une conception qui résume et dépasse toutes les autres, mais qu'il est amusant d'en explorer les conséquences. Nous vous proposons ici de réfléchir à cette troublante hypothèse que des travaux récents corroborent.

En 1998, les physiciens Norman Margolus et Lev Levitin, de l'Université de Boston, se sont posé la question fondamentale : combien d'états distincts un système physique donné peut-il occuper dans un temps donné ? Autrement dit, quelle est la vitesse maximale de changement d'un système physique ? On sait, d'après le principe d'incertitude d'Heisenberg appliqué à l'énergie et au temps, que pour mesurer l'énergie E d'un système il faut au moins passer un temps t tel que le produit $E \times t$ soit égal à h, la constante de Planck, qui vaut $1{,}0545 \times 10^{-34}$ joule-seconde. Une variante élaborée de ce principe, le Théorème de Margolus-Levitin, indique que le nombre maximum d'états distincts qu'un système d'énergie moyenne E peut occuper par seconde, c'est-à-dire sa vitesse de calcul si on le considère comme un ordinateur, est donné par l'expression simple : $2E/\pi h$, où π est l'inévitable 3,14159...

Or l'énergie d'un corps de masse m est, nous le savons depuis Einstein, est égale à mc^2. Un ordinateur portable d'une masse de 1 kilogramme, donc d'énergie $8{,}9874 \times 10^{16}$ joules, peut, en conséquence, opérer un maximum d'environ 10^{51} opérations binaires par seconde. Ce nombre est la puissance maximale d'un ordinateur portable ultime d'un kilogramme. Si la mécanique quantique est bien la théorie adaptée à ce genre de problèmes – ce que l'on croit aujourd'hui – alors jamais dans l'avenir, quels que soient les progrès que feront les sciences et les technologies, vous ne disposerez sur votre table d'un ordinateur de un kilogramme ayant une puissance de calcul supérieure à ces 10^{51} opérations par seconde.

1. SI LES FACULTÉS DE CALCUL DE L'UNIVERS sont telles qu'il peut simuler sa propre dynamique, il s'ensuit des paradoxes dignes de la science-fiction.

En sommes-nous loin ? Combien de temps faudra-t-il pour que cette limite absolue soit atteinte ?

HERTZ, INSTRUCTIONS, OPÉRATIONS BINAIRES ?

A vrai dire, aucune de ces questions n'est simple, car les mesures de puissance des ordinateurs contemporains sont données en hertz (nombre de cycles d'horloge par seconde du microprocesseur) ou en instructions par seconde (une instruction est une opération entre groupes de données : comparaison, addition ou multiplication de deux entiers, recopie d'un mot mémoire, incrémentation d'un compteur, etc.).

Si l'on peut admettre, en gros, qu'un hertz correspond à quelques instructions par seconde (de un à dix selon les microprocesseurs), en revanche la conversion des instructions en opérations binaires est délicate, car tout change d'un microprocesseur à un autre et ce qui se passe au cours d'un cycle est très variable. Les processeurs actuels comportent plusieurs millions de transistors (42 millions de transistors pour le Pentium-IV) donc, à chaque cycle d'horloge du microprocesseur, un très grand nombre d'opérations binaires peuvent être effectuées, en théorie plusieurs millions. En revanche, le nombre d'opérations binaires utiles (impossibles à réduire par une meilleure conception des circuits ou organisation des calculs) est bien plus petit : pour additionner deux entiers codés sur 32 bits, une centaine d'opérations binaires suffisent ; pour une multiplication, un millier d'opérations binaires conviennent. Le facteur de conversion entre cycle (ou instruction) et opération

© POUR LA SCIENCE - N° 305 MARS 2003

binaire est donc un nombre entre dix et quelques millions et dépend arbitrairement du fait qu'on souhaite évaluer le nombre d'opérations utiles ou le nombre d'opérations physiques réelles qui, lui, dépend du niveau de détail avec lequel on observe le microprocesseur.

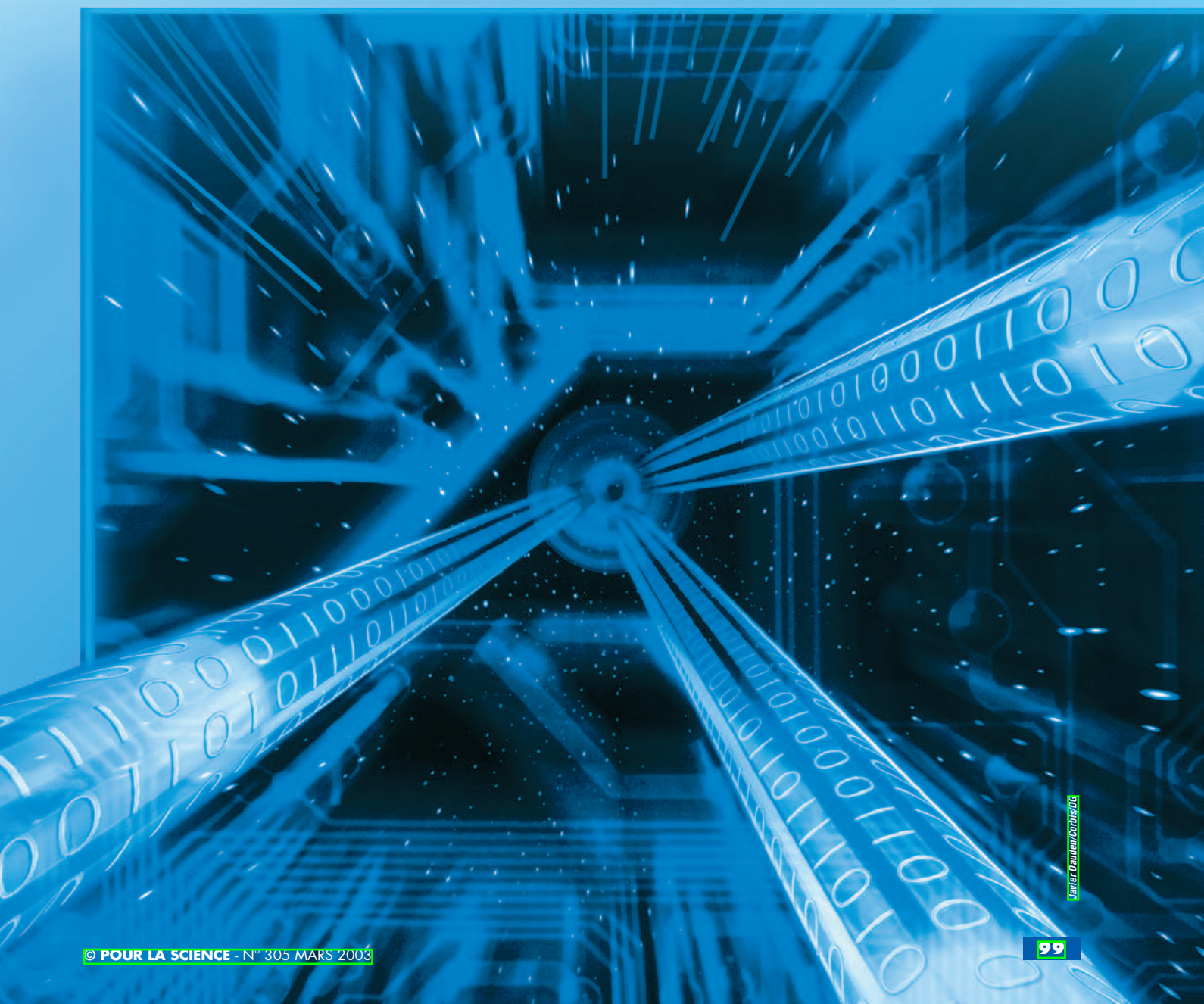
Comme certains physiciens le font parfois, et tout en étant bien conscients qu'il s'agit d'une conversion terriblement simplificatrice et approximative, nous adopterons : 1 hertz = 1 instruction par seconde = 10^5 opérations binaires par seconde.

Les ordinateurs portables actuels ont une puissance d'environ 10^9 hertz (le fameux gigahertz devenu banal depuis deux ans), donc de 10^{14} opérations binaires par seconde. Nous sommes donc très loin de la limite des 10^{51} opérations binaires par seconde donnée par le théorème de Margolus-Levitin. La loi de Moore indique que la puissance informatique de calcul double environ tous les 18 mois, soit un gain d'un facteur 10 tous les 5 ans. Cette loi empirique est vérifiée depuis 30 ans. À cause de la limite donnée par Margolus et Levitin, cette loi ne pourra pas être satisfaite indéfiniment et au plus tard cessera de s'appliquer dans 200 ans. Il y a 37 ordres de grandeurs à franchir entre les 10^{14} opérations binaires par seconde de nos ordinateurs d'aujourd'hui et les 10^{51} opérations par seconde de l'ordinateur portable ultime : à raison d'un ordre de grandeur tous les cinq ans, il faudrait 185 ans.

UNE MÉMOIRE THERMONUCLÉAIRE!

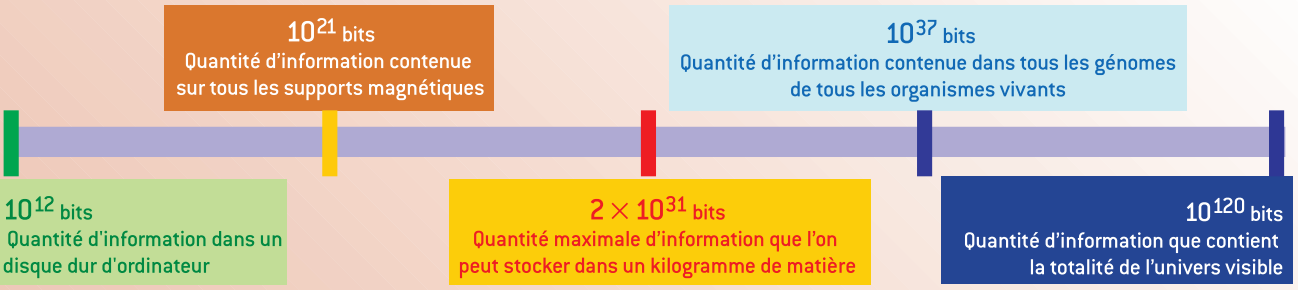
Seth Lloyd, s'appuyant sur les travaux de J. Bekenstein, a calculé la mémoire maximale d'un ordinateur ultime d'un kilogramme et d'un volume d'un litre : $2{,}13 \times 10^{31}$ bits, c'est-à-dire environ 3×10^{30} octets (un octet est égal à huit bits). Pour obtenir une telle densité de mémoire, S. Lloyd fait remarquer qu'il faudrait transformer toute la matière en énergie et qu'en conséquence la mémoire de l'ordinateur ultime ressemblerait à une explosion thermonucléaire ou à un petit morceau du Big Bang… La commercialisation et l'utilisation d'un tel «appareil portable» poseront quelques problèmes pratiques. Aujourd'hui les capacités maximales de stockage de nos dispositifs les plus performants d'un kilogramme et d'un litre sont d'environ 10^{12} octets (un téraoctet) : encore 28 ordres de grandeur à franchir (soit 140 ans)!

Notons que les 2×10^{31} bits de l'ordinateur portable ultime correspondent à environ 20 milliards de fois l'information totale stockée aujourd'hui sous forme électronique à la surface de la terre, qui est évaluée à environ 10^{21} bits *(voir l'article de cette rubrique de septembre 2002)*.



Javier Barcena Corquiero

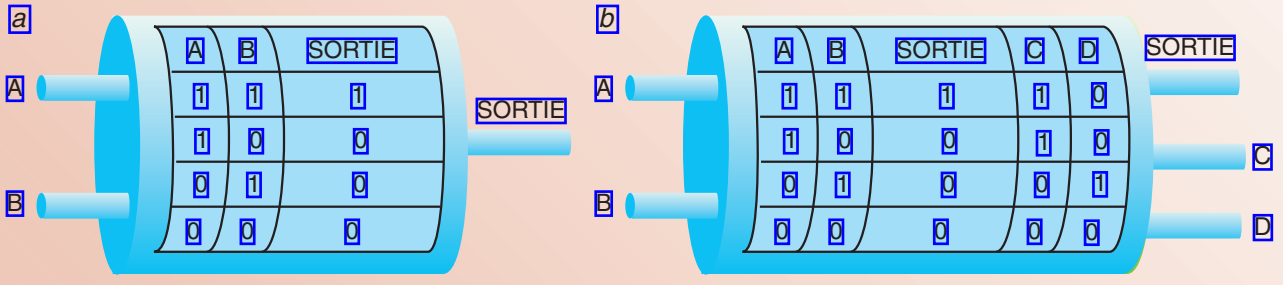
2. QUANTITÉS ASTRONOMIQUES D'INFORMATIONS



3. LA THERMODYNAMIQUE DU CALCUL

On sait depuis Maxwell qu'information et thermodynamique sont intimement liées,notamment par l'entropie qui mesure le désordre d'un système, mais certaines considérations des physiciens se sont révélées précipitées. En 1950, John von Neumann émit l'idée que toute opération binaire de calcul menée à la température T dissipait une quantité d'énergie de $k_B T \ln 2$ (où k_B est la constante de Boltzman qui vaut $1{,}3805 \times 10^{-23}$ joule par degré Kelvin) accroissant donc l'entropie de $k_B \ln 2$. Cette idée s'est révélée en partie fausse. Les travaux de Rolf Landauer montrèrent en effet que seule l'opération d'effacement (irréversible) d'une information binaire avait un tel coût thermodynamique. Ainsi une porte ET classique (*a*) dissipe de l'énergie, car elle perd des informations : quand l'état d'une ligne de sortie est 0, on ne peut en déduire l'état des lignes d'entrée. Au contraire (*b*), la porte logique réversible de Frekin ne dissipe pas l'énergie : deux bits de sortie, les bits de déchets C et D, permettent de faire fonctionner la porte en sens inverse afin de ramener l'ordinateur dans son état initial. Toute opération binaire réversible peut être ainsi menée avec un coût thermodynamique nul. Complétant ce résultat, il a été établi par Y. Lecerf en 1963, puis indépendamment par Ch. Bennett en 1973, que tout calcul peut être mené de manière réversible, et donc, sans coût thermodynamique. L'inconvénient des calculs réversibles est qu'ils conduisent à accumuler une sorte de déchet d'information : cette accumulation est créée par l'impossibilité de l'effacement qui oblige à conserver des informations parfois devenues inutiles et encombrantes.

Les méthodes de corrections d'erreurs très utilisées aujourd'hui et dont on voit mal comment on pourrait se passer pour mener des calculs fiables sont malheureusement des opérations fondamentalement irréversibles. La raison en est que corriger une erreur c'est l'effacer. S. Lloyd a calculé qu'un ordinateur ultime d'un kilogramme et d'un litre opérant à 10^{51} opérations par seconde (vitesse indépassable) devrait avoir un taux d'erreur inférieur à 10^{-10} pour éviter la surchauffe, mais que même avec ce taux très faible toute l'énergie du système serait dissipée pour opérer la correction d'erreur en moins d'une nanoseconde!



4. L'ORDINATEUR TROU NOIR

Lorsque l'on souhaite atteindre les limites physiques du calcul, le volume de l'ordinateur est déterminé par l'optimisation des opérations. Si l'on veut mener des opérations en parallèle, les paramètres importants sont la vitesse des communications et la mémoire : aussi un grand volume est préférable. Un petit volume est demandé pour une bonne exécution en série des calculs et une grande densité de mémoire.

Une très forte concentration de matière produit un trou noir et c'est pourquoi S. Lloyd a voulu évaluer les capacités de calcul de ces objets physiques très denses. Cela peut sembler absurde puisqu'aucune information ne devrait s'échapper d'un trou noir : la lumière elle-même par définition ne peut pas le quitter. Cependant la mécanique quantique montre que les trous noirs ne le sont pas complètement et qu'ils s'évaporent, c'est-à-dire émettent des particules, ce qui d'ailleurs limite leur durée de vie. Utilisant des résultats de Don Page, S. Lloyd évalue qu'un trou noir d'un kilogramme aurait une durée de vie d'environ 10^{-19} seconde et pourrait pendant ce temps mener un calcul de 10^{32} opérations sur 10^{16} bits de mémoire. Un tel trou noir calculerait donc à la vitesse maximale déterminée par S. Lloyd qui est d'environ 10^{51} opérations par seconde, pour un ordinateur d'un kilogramme. D'autres calculs menés par Y. Jack Ng et utilisant des méthodes différentes, confirment les résultats sur les capacités de calcul des trous noirs.

Bien sûr, l'idée de faire calculer des trous noirs est une idée de science-fiction et n'est envisagée que pour satisfaire la curiosité des théoriciens : il faudra sans doute attendre des décennies, voire des siècles, avant qu'on ne se pose vraiment la question pratique de programmer des trous noirs!

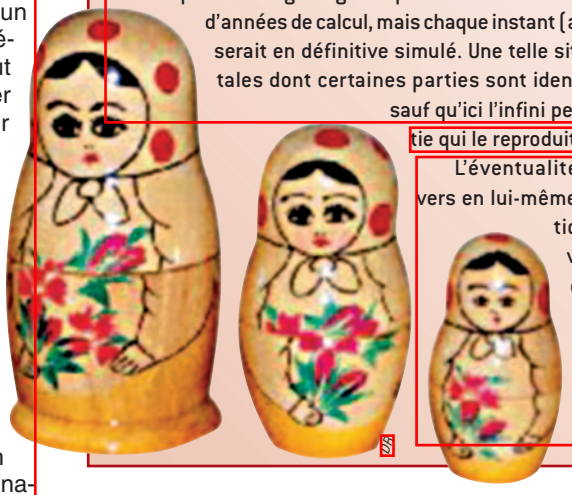
© POUR LA SCIENCE - N° 305 MARS 2003

S. Lloyd, s'interrogeant sur un modèle plus raisonnable d'ordinateur d'un kilogramme et d'un volume d'un litre, évoque l'idée d'un stockage, aux températures habituelles, à raison d'un bit par atome (ce qui ne semble pas totalement absurde, car nos technologies permettent déjà de manipuler des atomes un par un) : cela conduirait à une mémoire de 10^{25} bits. Cette mémoire – si l'on se limite à des interactions électromagnétiques entre électrons et atomes – pourrait alimenter un calcul à la vitesse d'environ 10^{40} opérations binaires par seconde, le tout constituant ce qu'on pourrait nommer «l'ordinateur ultime froid». Pour atteindre les capacités de cette machine, en comptant toujours un ordre de grandeur tous les 5 ans, il ne faudra que 60 ans pour la mémoire et 130 ans pour la vitesse.

Bien sûr, en cours de route des obstacles de toutes sortes seront à surmonter et les chiffres donnés sur ces ordinateurs extrêmes sont uniquement indicatifs de ce qu'on ne pourra pas dépasser quelles que soient les technologies mises en œuvre, y compris si les projets d'ordinateurs quantiques, optiques ou moléculaires aboutissent.

5. LA SIMULATION D'UN SYSTÈME PAR LUI-MÊME

Les poupées russes emboîtées illustrent les simulations de l'Univers dans l'Univers lui-même. S. Lloyd a évalué que l'univers depuis le Big bang a effectué un calcul d'environ 10^{120} opérations impliquant au maximum 10^{120} bits de mémoire. La quantité de calculs nécessaire pour simuler l'univers jusqu'à un instant donné est donc finie et une simulation parfaite de l'univers jusqu'à cet instant est envisageable (en théorie) si l'on dispose d'un ordinateur assez puissant. Selon les caractéristiques de l'évolution cosmologique de l'univers – sur lesquelles les spécialistes discutent encore – il est possible ou non de mener un calcul infini dans l'univers futur. Si un tel calcul infini est possible, on peut imaginer utiliser cette capacité pour simuler parfaitement et dans sa totalité l'univers lui-même à partir du Big Bang : les premiers instants demanderaient peut-être des milliards d'années de calcul, mais chaque instant (avec un décalage de plus en plus grand) serait en définitive simulé. Une telle situation évoque aussi les figures fractales dont certaines parties sont identiques au tout à une échelle réduite, sauf qu'ici l'infini permet à l'univers de posséder une partie qui le reproduit entièrement à l'échelle 1.



L'éventualité d'une simulation parfaite de l'univers en lui-même donne lieu à toutes sortes de situations étranges : lors de la simulation, votre vie sera simulée et donc, en quelque sorte, vous revivrez. Mais dans la simulation, la simulation sera elle aussi simulée et vous revivrez encore au sein de cette simulation dans la simulation. Etc. Au total votre vie se déroulera donc une infinité de fois!

LA CAPACITÉ DE L'UNIVERS

Poursuivant son exploration des limites physiques du calcul et du stockage S. Lloyd, dans un article publié il y a quelques mois, se pose la question grandiose : en considérant que l'univers dans sa totalité mène des calculs, quelle est sa mémoire et combien de calculs a-t-il effectués depuis l'origine des temps, le Big Bang? Ou ce qui revient au même, pour calculer tout ce qui s'est produit depuis le début du temps, combien faudrait-il d'opérations binaires?

Pour mener cette évaluation, quelques hypothèses sont nécessaires : nous admettrons que le modèle standard du Big Bang est correct. Dans ce modèle, l'âge de l'univers est d'environ 10^{10} ans. L'univers, selon la densité moyenne de la matière, est ouvert (infini en volume et en expansion indéfinie jusqu'à la fin des temps) ou fermé (fini en volume et finissant à terme par se contracter en un instant nommé le Big Crunch qui marque la fin de tout). Même si l'univers est ouvert, nous n'avons accès qu'à une partie finie de l'univers, le reste étant définitivement déconnecté de nous. L'ordinateur géant auquel s'est intéressé S. Lloyd est donc, soit l'univers entier – si l'univers est fermé (et donc fini) –, soit l'ensemble de ce qui se trouve dans la partie accessible de l'univers – si l'univers est ouvert.

Là encore, la mécanique quantique est considérée comme la théorie rendant correctement compte du monde physique et c'est elle qui fixe les caractéristiques de l'univers. Le résultat des calculs de S. Lloyd est que, depuis le Big Bang, cet ordinateur global a effectué un calcul équivalent à environ 10^{120} opérations binaires, et qu'il dispose d'une mémoire de 10^{120} bits (seulement 10^{90} si on se limite aux degrés de liberté contenus dans la matière et l'énergie sans prendre en compte la gravitation). Ces nombres s'expriment uniquement en fonction de l'âge de l'univers (10^{10} ans), et des constantes fondamentales c, h, G. (c est la vitesse de la lumière ; h est la constante de Planck, voir plus haut ; G est la constante de gravitation qui vaut $6{,}673\ 10^{-11}\ m^3/kgs^2$).

Pour obtenir des relations simples on introduit le temps de Planck t_p qui est une durée au-dessous de laquelle plus rien n'a de sens physique : $t_p = (Gh / c^5)^{1/2} = 5{,}391\ 10^{-44}$ seconde. Les limites de l'univers vu comme un ordinateur sont alors :
– Le nombre d'opérations binaires depuis le Big Bang, $(t / t_p)^2$ est égal à 10^{120}.
– La mémoire, sans la gravitation, $(t/t_p)^{3/4}$, est égale à 10^{90}.
– La mémoire en prenant en compte la gravitation $(t / t_p)^2 = 10^{120}$.

Que signifient ces nombres? S. Lloyd en propose trois interprétations. (a) Ils fixent des bornes à la quantité de calculs qu'on peut attribuer à toute la matière depuis son origine lorsque l'on interprète tout mouvement et toute évolution comme une opération binaire de calcul. (b) Ils indiquent la quantité d'opérations et de mémoire requise pour qu'un ordinateur puisse simuler l'univers dans sa totalité depuis le Big Bang jusqu'à aujourd'hui. (c) Si l'on accepte de considérer que l'univers est un ordinateur, ces nombres indiquent la caractéristique du calcul qu'il a réalisé (à la question : «Qu'est-ce que calcule cet ordinateur?», S. Lloyd propose de répondre : la dynamique de l'univers).

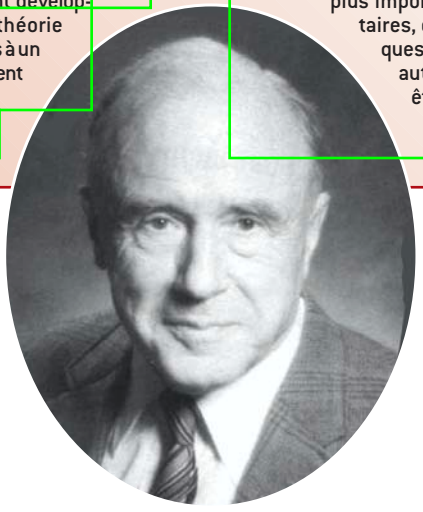
L'UTILITÉ DES MATHÉMATIQUES

De tels résultats, s'ils sont confirmés, démontrent d'une manière irréfutable l'utilité du raisonnement mathématique. En effet, imaginons qu'on cherche à prouver que le nombre $n = 2^{1279} - 1$, qui possède 386 chiffres, est un nombre premier (cela peut être utile en cryptographie). Si on utilise la méthode naïve – division de n par tous les entiers de 2 jusqu'à la racine carrée de n en s'assurant de ne jamais trouver un reste nul – alors la taille du calcul dépasse 10^{192} opérations. En effet, il faut faire une division au moins pour chacun des entiers entre 2 et la racine carrée de n, et il y en a plus de 10^{192}. Même si depuis le début des temps l'univers entier s'était consacré uniquement à démontrer que $2^{1279} - 1$ est premier, il n'aurait pas réussi, car sa capacité est limitée à 10^{120} opérations binaires.

6. LA PHYSIQUE N'EST QU'INFORMATION ET CALCUL

John Archibald Wheeler a exprimé sa conception ultime de la physique comme science de l'information et du calcul. Ce manifeste fondateur d'une certaine conception informationnelle de la physique qui depuis 1990 s'est considérablement développée (travaux sur les ordinateurs quantiques, théorie quantique de l'information, assimilation de l'univers à un ordinateur, etc.) exprime l'idée que fondamentalement tout en physique n'est qu'information et calculs.

«Au niveau microscopique, il n'existe plus d'espace, de temps, d'espace-temps continu [...] la fonction d'onde et la théorie quantique standard ne sont que des idéalisations continues qui masquent la nature informationnelle et discrète des expériences dont tout provient [...] Rien en physique n'est plus important que les phénomènes quantiques élémentaires, c'est-à-dire que l'acte fondamental de poser une question physique ayant une réponse OUI ou NON. Dit autrement encore, toute quantité physique, chaque être, tirent son sens ultime des bits ou informations binaires OUI-NON. Une conclusion qu'on peut résumer par IT from BIT (l'être provient du bit).»



Pourtant, depuis le 25 juin 1952, on sait de manière certaine que $2^{1279} - 1$ est un nombre premier et aujourd'hui on connaît des nombres premiers de plusieurs millions de chiffres. Bien sûr, les méthodes pour prouver que ces nombres sont premiers sont bien différentes de la méthode naïve et n'existent que parce que des mathématiciens les ont conçues et ont démontré, par le raisonnement, qu'elles étaient correctes. Ce qui est impossible sans les mathématiques se fait aujourd'hui de manière courante avec elles. Comme nos ressources en calcul sont limitées, raisonner n'est pas un luxe, c'est une nécessité absolue !

L'AVENIR DU CALCUL

Que tout le calcul fait dans le passé soit fini et ait été mené en n'utilisant qu'une quantité limitée de mémoire est une conséquence de la théorie du Big Bang et des principes fondamentaux de la mécanique quantique. En revanche, concernant les calculs qui pourront être faits dans l'avenir tout est plus compliqué et encore sujet à discussion.

De nombreux physiciens, dont Frank Tipler, se sont intéressé à la question fondamentale : à quelles conditions l'univers peut contenir un calcul infini, c'est-à-dire un calcul composé à la fois d'une infinité d'opérations binaires et utilisant un nombre infini de bits ? La condition sur le nombre infini de bits est importante, car un calcul infini en nombre d'opérations, mais ne portant que sur un nombre borné de bits, ramène nécessairement à un moment ou à un autre le système (l'ordinateur, l'univers) dans un état antérieur, ce qui – si l'on admet que le déterminisme est valide – produit alors une répétition cyclique de la même série d'événements (l'Éternel retour). Pour que l'univers puisse contenir un authentique calcul infini, il faut que son évolution cosmologique satisfasse des conditions très particulières dont il n'est pas du tout évident qu'elles soient vraies.

Assez paradoxalement, un univers ouvert d'après F. Tipler ne convient pas car son expansion rend impossible l'échange d'informations entre parties éloignées et donc l'existence d'une mémoire infinie utilisable. Pour F. Tipler, un calcul infini n'est possible que si, au contraire, l'univers est fermé. Cependant ce n'est pas suffisant et il faut de plus que (a) la singularité finale se réduise à un point unique et (b) que la répartition des particules élémentaires possède une certaine forme.

Nous ne discuterons pas de ces questions que les spécialistes de cosmologie étudient encore. Cependant, même si nous ne le savons pas aujourd'hui, il se peut que notre ordinateur-univers poursuive un calcul infini. Avec les théories physiques admises aujourd'hui, si le calcul passé est nécessairement fini, peut-être pas le calcul futur. L'éventualité d'un calcul futur illimité conduit à des spéculations à la frontière de la science où nous allons quand même nous laisser glisser.

Admettons donc que l'univers puisse mener un calcul infini. Il ne fait pas de doute alors qu'il constitue ce que Alan Turing a dénommé un ordinateur universel. Un ordinateur universel est une machine théorique capable, pourvu qu'on adopte le bon codage des données et qu'on la munisse du bon programme, de calculer toute fonction calculable par un ordinateur quel qu'il soit. Contrairement à ce qu'on pourrait penser, les ordinateurs universels ne sont pas rares et, à une réserve près concernant la mémoire qui doit être potentiellement infinie, tout ordinateur vendu actuellement est un ordinateur universel. Si vous fournissez à votre ordinateur portable quand il le demande les compléments de mémoire dont il a besoin (par exemple en utilisant son lecteur de disquettes) alors c'est un ordinateur universel au sens de Turing.

La démonstration que des systèmes très simples sont des ordinateurs universels (le Jeu de la vie de Conway est l'un des plus élémentaires) a établi sans que persiste le moindre doute que le monde physique si son avenir satisfait les conditions permettant une mémoire infinie est un authentique ordinateur universel. Or un ordinateur universel dans un univers autorisant un calcul infini pourrait entreprendre la simulation parfaite de l'univers depuis le Big Bang. Pour cela, il suffirait de le programmer en s'inspirant du principe de dilution dans l'infini : la suite des nombres entiers 1,2,3,..., n, ... peut être diluée dans une suite infinie de zéros : 0, 0, 0, 0, 0,... Cette dilution est nécessaire pour qu'une partie de l'univers puisse en simuler la totalité. À cette fin on insère les nombres en les espaçant de plus en plus comme dans : 0, 1, 0, 2, 0, 0, 3, 0, 0 0, 4, 0, 0, 0, 0, 5, ...

De même, en simulant la première nanoseconde de l'univers, ce qui pourrait prendre un temps assez long (par exemple 10^{10} années) si votre ordinateur universel n'est pas très rapide, puis la deuxième nanoseconde en prenant le temps nécessaire (par exemple 10^{20} années, car l'expansion a rendu l'univers plus complexe), puis la troisième nanoseconde en prenant le temps nécessaire (par exemple 10^{30} années) etc. On enclenche un processus de calcul qui à l'intérieur de l'univers engendre une simulation exacte de l'évolution de l'univers. Notons bien que la simulation exacte de la première nanoseconde de l'univers est en théorie possible puisque d'après les calculs de S. Lloyd elle n'a demandé qu'un nombre fini d'opérations binaires et une mémoire finie. De même pour la deuxième seconde, etc. La mécanique quantique en ramenant tout à des quantités finies autorise – en théorie – les simulations exactes de l'univers. Bien sûr, le continu dans cette conception du monde n'est qu'une illusion.

Cette simulation parfaite et totale de l'univers dans lui-même est l'équivalent du paradoxe de la bibliographie proposé par Bertrand Russell : Tristram Shandy a passé deux ans à écrire l'histoire des deux premiers jours de sa

vie, il déplorait que, ne pouvant pas aller plus vite, il lui soit impossible d'écrire son autobiographie complète ; c'est faux, fit remarquer Russell, s'il vit éternellement toute journée de sa vie sera décrite : Shandy consacrera son année de vie numéro n à l'écriture du récit de sa journée numéro n, et donc aucune journée de sa vie ne sera omise.

Revenons à l'univers. Si on imagine que nos descendants lancent une simulation parfaite de l'univers et s'arrangent pour qu'elle se poursuive indéfiniment (même si c'est très lentement), alors cela signifie en particulier que votre vie sera simulée, ce qui sera pour vous une sorte de seconde vie dans l'ordinateur. Malheureusement si la simulation est parfaite, elle sera en tout point identique à votre première vie et votre conscience simulée ne saura pas qu'elle n'est que le résultat d'une simulation et non pas une vraie vie… peut-être d'ailleurs êtes-vous en ce moment non pas dans le véritable univers, mais dans sa simulation?

Explorons encore plus avant cette étrange idée. La simulation exacte contiendra en elle-même la simulation de la simulation, qui elle-même… Ce n'est donc pas une fois seulement que votre vie sera reproduite dans l'ordinateur simulant l'univers, mais une infinité de fois! Plus troublant encore, avec cet ordinateur universel véritable, on pourrait s'amuser à simuler des variantes de l'univers, par exemple des variantes dans lesquelles votre vie au lieu de s'arrêter brusquement en 2050 se poursuivrait 20 ans de plus. Pourquoi ne pas imaginer que la variante de la simulation soit telle que vous soyez immortel? Si c'est possible, nos descendants ne résisteront pas à la tentation de se rendre ainsi immortels… et peut-être nous avec!

Un ordinateur universel pourrait simuler tous les univers possibles : il commencerait par n'en simuler qu'un en n'utilisant ses ressources d'une manière diluée, puis avec les capacités restantes en simulerait un autre, encore de manière diluée, etc. Les univers envisageables dans le cadre de la théorie du Big Bang et de la mécanique quantique ne demandent pour être simulés jusqu'à un instant t qu'un nombre fini d'opérations binaires et de mémoires, ils peuvent donc être exhaustivement énumérés et simulés par un unique ordinateur universel convenablement programmé. Dans un tel calcul, tous les univers physiques possibles sont simulés et donc vous y êtes, y compris dans des versions de vous-même variées à l'infini.

Tout cela paraît délirant, pourtant ces considérations ne résultent que de la prise au sérieux des théories dont on admet qu'elles sont les plus vraisemblables pour rendre compte du monde physique.

Face à ces considérations inquiétantes trois attitudes sont possibles.

– On peut décréter que, sans doute, les théories véritables rendant compte du monde ne sont pas celles qu'on a utilisées pour arriver à tout cela. Puisque les théories scientifiques sont régulièrement remplacées par de nouvelles théories contredisant les précédentes, cette attitude semble raisonnable et tentante, bien qu'elle laisse sans réponse la question : si on ne doit pas prendre au sérieux les conséquences des théories les mieux vérifiées, que doit-on prendre au sérieux?

– On peut considérer que c'est seulement la possibilité d'un calcul infini qui doit être contestée : les hypothèses cosmologiques autorisant qu'un authentique calcul infini se déroule ne sont sans doute pas satisfaites, et donc aucune simulation parfaite de l'univers ne sera jamais possible. N'est-ce pas un peu facile?

– On peut considérer à l'opposé comme le propose F. Tipler dans son étrange livre *The Physics of Immortality* que le monde ne peut pas être fini ou cyclique et qu'il doit donc être configuré de telle façon qu'un calcul infini y soit possible avec tout ce qui s'ensuit. F. Tipler en tire une sorte de christianisme scientifique qui surprend quelque peu, et qui malgré une incontestable cohérence, à ma connaissance n'a pas soulevé beaucoup d'enthousiasme, ni chez les croyants ni chez les athées.

A vous de choisir.

Jean-Paul DELAHAYE est professeur d'informatique théorique à l'Université de Lille.

Philip BALL, *Life Can Go Forever. An Accelerating Universe Does Not Have to Fry Life*, in *Nature*, 20520-11, mai 2002.

Charles BENNETT et Rofl LANDAUER, *Les limites physiques du calcul*, in *Pour la Science*, pp. 18-27, septembre 1985.

Seth LLOYD, *Ultimate Physical Limits to Computation*, in *Nature*, vol. 406, pp. 1047-1052, 2000.

Seth LLOYD, *Computational Capacity of the Universe*, in *Physical Review Letters*, vol. 88, n °23, 237901/1-4, 2002.

Norman MARGOLUS et L.B. LEVITIN, *The Maximum Speed of Dynamical Evolution*, in *Physica*, D 120, pp. 188-195, 1998.

Frank TIPLER, T*he Physics of Immortality*, Doubleday, New York, 1994.



Collection of Albright-Knox Art Gallery, Buffalo, NY. ©Hans Namuth

Attraction fractale

RICHARD TAYLOR

Les secrets des œuvres de Jackson Pollock, un maître de l'art abstrait, révélés par l'analyse informatique : elles sont fractales !

Au début des années 1940, le peintre américain Jackson Pollock (1912-1956) quitte Manhattan pour s'installer dans une maison à Long Island, dans l'État de New York. Là, une vieille grange lui sert d'atelier, un immense atelier où, selon les critiques, l'art moderne a été bouleversé. En effet, les petites toiles installées verticalement sur un chevalet deviennent trop étroites pour l'artiste. Il leur préfère d'autres en grand format, de plusieurs mètres carrés de surface, posées à même le sol. Le pinceau est alors relégué au placard au profit d'un long bâton d'où s'écoule une peinture fluide qui laisse sur la toile la trace des mouvements de l'outil. Au final, l'œuvre est un entrelacs inextricable de trajectoires colorées *(voir Blue Poles : number 11, sur la page ci-contre)*.

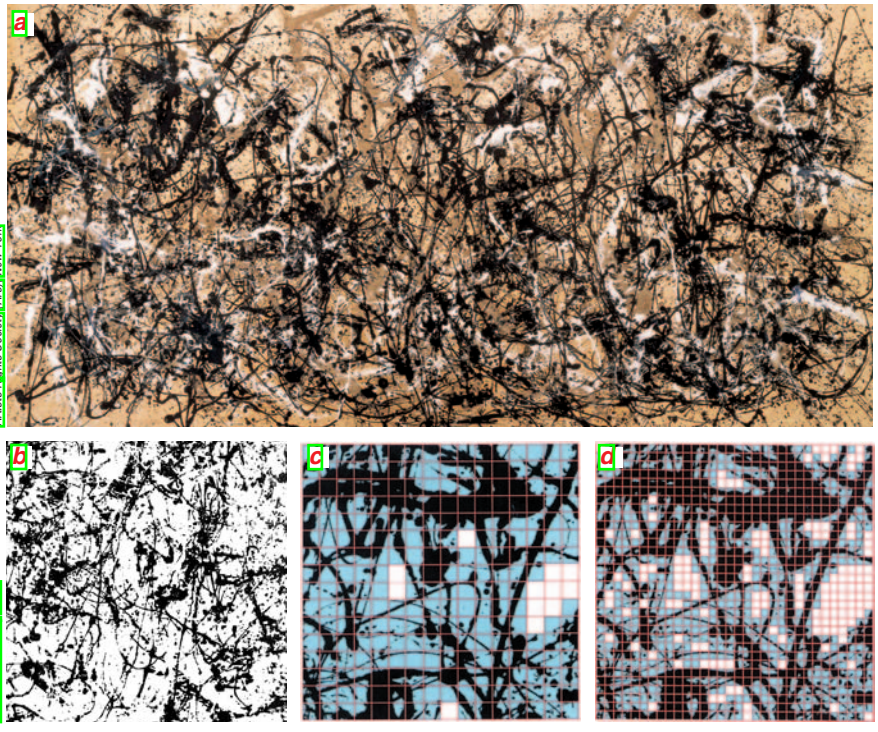
À l'opposé du peintre néerlandais Piet Mondrian (1872-1944), chantre de l'abstraction artificielle et géométrique, Pollock prône une peinture « naturelle et organique. » En quoi les œuvres de Pollock reflètent-elles la nature ?

À l'époque de Pollock, la nature semblait désordonnée et régie par le hasard. Pourtant, pendant les années 1960, l'étude de la dynamique des systèmes naturels a donné naissance à la théorie du chaos. Puis, dix ans plus tard, Benoît Mandelbrot a jeté les bases de la géométrie fractale. On comprenait enfin la forme des nuages, des montagnes, des côtes maritimes… Aujourd'hui, l'analyse informatique des œuvres de Pollock révèle que les fractales sont aussi au cœur de l'art abstrait.

Les objets de la géométrie classique ont pour dimensions des nombres entiers, par exemple, le plan est de dimension deux. Toutefois, en géométrie fractale, certains éléments, tel le triangle de Sierpinski *(voir la figure à côté du titre)*, ont pour dimension des nombres non entiers. Comment détermine-t-on la dimension fractale d'un objet ? Par exemple, un carré C peut être divisé en $N = 4$ petits carrés identiques au premier selon un rapport d'homothétie de facteur $f = 2$, ou bien, 16 petits carrés identiques au premier selon un rapport d'homothétie de facteur quatre. Les mathématiciens définissent la dimension d du carré C par $\text{Log } N / \text{Log } f$, ici, $d = \text{Log } 4/\text{Log } 2 = \text{Log } 16/\text{Log } 4 = 2$. Pour le triangle de Sierpinski, $d = 1{,}58$.

L'une des propriétés des objets fractals est l'autosimilarité : une partie agrandie est identique à l'objet entier. Toutefois, on distingue l'autosimilarité exacte, telle celle du triangle de Sierpinski, et l'autosimilarité statistique, quand un détail n'est pas rigoureusement identique à l'ensemble, mais que les propriétés statistiques sont conservées. La plupart des motifs naturels fractals ne sont qu'autosimilaires statistiquement. Est-ce le cas des tableaux de Pollock ? Si oui, quelle est leur dimension fractale ?

Le tableau *Autumn rhythm (voir la figure)*, peint en 1950, est composé de quatre couleurs : noir, marron, blanc et gris. À l'aide d'un ordinateur, on sépare les différentes couches du tableau numérisé. D'abord, on s'intéresse à la couche noire, dite d'ancrage, qui constitue le



Metropolitan Museum of Art, New York. ©2002 Pollock-Krasner Foundation / Artists Rights Society (ARS), New York

Courtesy Richard P. Taylor

National Gallery of Australia, Canberra. ©2002 Pollock-Krasner Foundation/Artists Rights Society (ARS), New York

L'analyse du caractère fractal du tableau *Autumn rhythm (a)* requiert sa numérisation, puis la séparation des couches de différentes couleurs. Sur la couche noire, par exemple *(b, ici un détail)*, on superpose une grille de carrés égaux *(c)*, puis l'on compte les carrés *(en bleu)* traversés par le motif peint *(les carrés vides sont en blanc)*. On répète l'opération avec des grilles de carrés plus petits *(d)*. Au final, on observe que le logarithme du nombre de carrés bleus « traversés » est proportionnel au logarithme de la taille des carrés élémentaires : le motif noir est fractal, et le quotient en est la dimension. Il en est de même pour toutes les couches colorées ainsi que pour l'ensemble du tableau.

fond de l'œuvre monumentale (plus de 14 mètres carrés !) et que Pollock abandonnait entre deux jours et six mois avant d'ajouter les peintures colorées. On superpose une grille de carrés et l'on compte ceux traversés par le motif peint, puis on répète la même opération avec des grilles où la taille des carrés varie, ici de quelques décimètres (de l'ordre de grandeur du tableau) à quelques millimètres (la taille du plus petit détail). La diminution de la taille des carrés est équivalente à l'étude d'un agrandissement du tableau.

L'analyse mathématique révèle que le logarithme du nombre $N(L)$ de carrés occupés par le motif est proportionnel à celui de la taille L du carré élémentaire de la grille. On retrouve la loi décrite précédemment : la dimension est égale à ce rapport de proportionnalité (à un signe près), soit environ 1,66.

La couche de peinture noire, majoritaire (elle occupe 35 pour cent de la toile, alors que les trois autres couches occupent ensemble 13 pour cent), donne la structure générale de l'œuvre. Les couches supplémentaires, dont l'analyse révèle qu'elles sont aussi fractales, affinent l'ensemble et modifient peu l'autosimilarité de l'œuvre. Ainsi, la dimension fractale de *Autumn rhythm* entier est de 1,67.

La nature fractale des tableaux de Pollock est confirmée par leur élaboration. Des films montrent qu'il procédait selon une méthode systématique : il peignait d'abord quelques îlots, c'est-à-dire que les jets de peinture sont regroupés en quelques endroits. Puis, dans une seconde phase, il reliait ces îlots par de grandes coulures de peinture, plus amples, qui peu à peu les submergeaient dans un dense réseau fractal. De la même façon, de nombreux objets naturels fractals, tels les flocons de neige, naissent de centres de nucléation simples qui s'étendent ensuite.

L'étude de l'ensemble des œuvres de Pollock répondant à cette facture met en évidence un accroissement régulier de la dimension fractale de ses œuvres au fil des années. Pour les premières, d est peu supérieur à 1,1, tandis que pour les dernières, elle atteint 1,7. Parallèlement, les tableaux sont de plus en plus chargés et obligent les spectateurs à plus de concentration pour pénétrer le réseau d'intrications. Curieusement, l'artiste a détruit une œuvre, analysée grâce à des enregistrements vidéo, où d est égal à 1,9. Peut-être la trouvait-il trop dense.

La fractalité n'est pas une conséquence de la technique de Pollock. La plupart des motifs obtenus par des jets de peinture sur un support ne sont pas autosimilaires. Aussi, les experts peuvent-ils compter sur l'analyse du caractère fractal des œuvres pour identifier un Pollock. Qui plus est, ils peuvent même en estimer la date d'exécution.

Enfin, pendant les 50 dernières années, les œuvres de Pollock ont été au centre d'une polémique : dessinait-il des éléments figuratifs, tel un visage humain, sur sa toile avant d'en estomper jusqu'à la disparition les traits avec plusieurs couches de peinture apparemment désordonnées ? La découverte du caractère fractal infirme cette hypothèse, car des motifs fractals ne peuvent contenir de tels éléments. Aussi, Pollock avait raison quand il affirmait que « les rythmes de la nature sont ma seule préoccupation ».

Richard TAYLOR est professeur de physique à l'Université de l'Oregon.





«Mais, Monsieur, dit Cosinus, c'est mon coefficient de frottement qui s'est trouvé trop faible pour détruire ma composante tangentielle...! – J'connais pas tous ces gens-là, dit le contrôleur. C'est 12fr. 50 que vous m'devez. Maintenant vous pouvez les réclamer à vot'tante Gentielle, comme vous dites!»

Blocages parfaits

JEAN-MICHEL COURTY • ÉDOUARD KIERLIK

La chaussure d'escalade sur la paroi ou la vis ne glissent pas grâce aux frottements solides.

Accroché au granit, un varappeur est en proie au doute : certes, son pied ne dérape pas là où il l'a posé sur la roche, mais peut-il s'y appuyer de tout son poids ? Quelques minutes plus tard, son compagnon d'escalade boulonne une plaquette d'attache à un piton scellé dans la paroi et ressent une inquiétude similaire. S'il venait à « dévisser », la plaquette resterait-elle vissée ? La réponse est deux fois oui, car les lois du frottement solide le garantissent. Analysons comment ces blocages parfaits résultent des frottements solides.

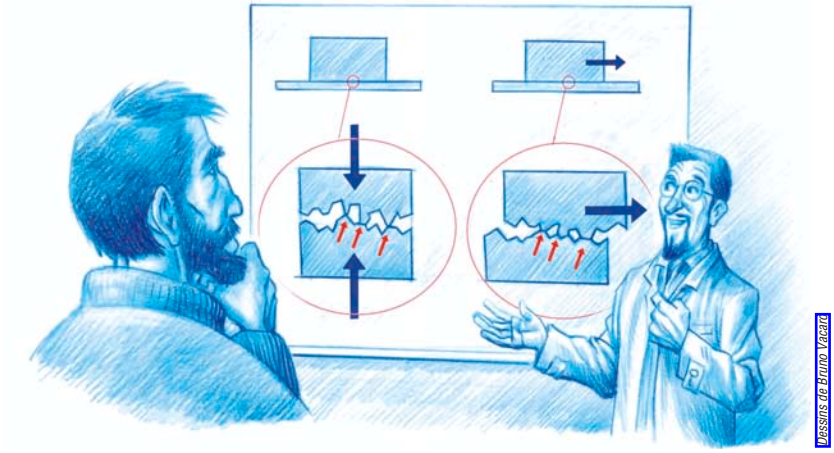
De l'empirisme aux lois de Coulomb

Quiconque a déjà poussé une caisse reposant sur le sol sait qu'il faut exercer une poussée minimale pour y parvenir. Quelle est cette force qui, tant que la poussée est faible, la compense exactement ? C'est la « force de frottement solide », qui se manifeste quand on tente de faire glisser l'une sur l'autre les faces non lubrifiées de deux solides. Contrairement aux frottements fluides, qui n'apparaissent qu'au cours d'un mouvement (résistance de l'air,…), le frottement solide s'exerce aussi sur un objet au repos. Le seuil de frottement dépassé, l'objet s'ébranle et la force de frottement solide ne fait plus que le ralentir.

Un déménageur connaît les étranges propriétés de la force de frottement solide : qu'il pose deux caisses identiques l'une sur l'autre ou l'une derrière l'autre, il doit appliquer la même force pour les faire glisser ! Cela n'est-il pas étonnant ? Quand les caisses sont l'une sur l'autre, l'empilement est deux fois moins en contact avec le sol que quand elles sont l'une derrière l'autre ! Au début du XVIe siècle, le grand Léonard de Vinci s'intéresse déjà au phénomène. Toutefois, Guillaume Amontons (1663-1705) est le premier physicien qui formule la loi du frottement solide : la force tangentielle nécessaire pour mettre en mouvements relatifs deux solides en contact l'un avec l'autre est proportionnelle à la force qui presse les solides l'un contre l'autre et elle ne dépend pas de l'étendue de la surface de contact.

En 1785, Charles Coulomb (1736-1806) précise cette loi qui porte aujourd'hui son nom : il montre que le coefficient de proportionnalité entre la force de frottement et la force de pression dépend du matériau. Ce coefficient reste de l'ordre de 1, passant de 0,4 pour du papier sur papier à 0,5 pour du bois sur bois et atteignant 1 pour une semelle en caoutchouc sur la roche.

L'indépendance de la valeur de seuil de la force de frottement vis-à-vis de l'étendue de la surface de contact resta longtemps un mystère. Les physiciens britanniques Frank Philip Bowden et David Tabor n'en découvrirent la cause que dans les années 1940. Étudiant le contact solide à l'échelle mésoscopique (intermédiaire entre l'échelle microscopique et l'échelle macroscopique), ils comprirent que deux solides qui se touchent… ne se touchent presque pas. Car même la surface la mieux polie comporte des aspérités minuscules d'une taille typique d'un dixième de micromètre. Ces rugosités sont les premières zones en contact lorsqu'on approche les deux solides, et elles le restent ! Ainsi, l'aire de contact réel entre les deux solides est très faible, comme celle d'un fakir sur sa planche à clous, comme celle d'une brosse posée sur ses poils.



Dessins de Bruno Vacaro

Toute surface solide est rugueuse à une échelle assez petite. Deux surfaces en contact entremêlent leurs rugosités. Celles-ci résisteront au glissement tant qu'elles ne se seront pas assez déformées pour cela.

Contact apparent et contact réel

La pression sur les aspérités est égale à la force pressante divisée par l'aire de contact réelle. Cette pression est si forte qu'elle excède largement la résistance de tout matériau. Aussi les aspérités sont écrasées, l'aire de contact augmente et la pression diminue jusqu'à une valeur limite – nommée dureté. À l'équilibre, la surface réelle de contact est égale au rapport entre la force pressante et la dureté et donc ne dépend en rien de la surface apparente de contact ! Ainsi pour un cube de cuivre de 22 centimètres de côté et de masse 90 kilogrammes reposant sur une surface plane constituée du même métal, la surface de contact entre le cube et le support est d'environ un millimètre carré ! Cette surface de contact réelle est donc environ 50 000 fois plus faible que la surface de contact apparente.

Cherchons maintenant à faire glisser les deux solides l'un sur l'autre. À l'échelle des rugosités, le glissement est impossible, car les aspérités sont imbriquées. Le mouvement n'est possible qu'une fois les aspérités déformées au point que le contact se rompt. Le glissement d'un solide sur un autre est comparable à celui d'une brosse de fer sur une surface métallique. Particulièrement raides, les poils d'une telle brosse ne glissent



Une chaussure glisse d'autant plus facilement sur un plan que celui-ci est incliné (angle *a*), car la composante du poids parallèle à la surface, qui tend à la faire glisser devient grande par rapport à la composante perpendiculaire, qui l'applique sur la roche. La chaussure glisse quand le rapport de ces forces excède le coefficient de frottement.

Lorsque les corps sont en accélération, les réactions en noir ne sont pas opposées aux forces motrices en couleur orangée. Les frottements solides sécurisent le grimpeur même pour une vis verticale à laquelle il se suspendra de tout son poids ; le coup de marteau assure l'imbrication des surfaces.

pas, mais plient un moment avant de se redéployer brusquement pour aller se bloquer un peu plus loin. La force nécessaire pour faire aller et venir une telle brosse est proportionnelle au nombre de poils coincés dans la surface, nombre qui augmente quand nous appuyons. De même, la force motrice nécessaire pour déplacer un solide au contact d'un autre est proportionnelle à l'aire représentée par les aspérités imbriquées, c'est-à-dire à la surface réelle de contact, et par là, à la force pressante. Le point de vue microscopique résout le paradoxe de l'indépendance apparente entre frottement et surface de contact : la surface de contact n'est pas celle que l'on croit. Le paradoxe des caisses est résolu : une surface double ou une pression deux fois plus forte donnent la même surface de contact !

Blocages irréversibles

Nous pouvons maintenant rassurer le varappeur qui pose la pointe de sa chaussure sur un minuscule plan incliné de granit. Peut-il y appuyer tout son poids ? Nous saurons s'il « dévissera » en divisant la force tendant à le faire glisser (la composante de son poids parallèle au plan incliné) par la force pressante (la composante du poids perpendiculaire au plan incliné). Le grimpeur teste ce quotient en appuyant légèrement du pied sur son plan d'appui. S'il adhère, c'est que ce rapport est inférieur au coefficient de frottement de la surface de sa chaussure sur la roche. Le quotient en question, égal à la tangente de l'angle *a* entre le plan incliné et l'horizontale, ne dépend donc en rien du poids du grimpeur ! Il peut donc confier sans crainte tout son poids au minuscule plan incliné, puis ayant ainsi libéré ses mains, s'assurer. Le coefficient de frottement du caoutchouc synthétique sur la roche sèche est environ 1 et le grimpeur ne glisse pas tant que l'inclinaison de l'écaille de granit sur laquelle s'appuie son orteil n'excède pas 45 degrés. Une pente considérable !

Le second varappeur aussi peut être tranquille. Si l'écrou qui retient sa plaquette d'attache ne se dévisse pas lorsqu'il tire faiblement dessus, il ne se dévissera pas plus sous l'effet d'une force supérieure. Dans le cas de la vis, l'équivalent de la pente est l'angle *a* du filetage par rapport au plan perpendiculaire à l'axe du boulon. Lorsque l'on visse, tout se passe comme si on faisait progresser un objet sur un plan incliné en lui appliquant une force horizontale. Cette propulsion est facile si la pente est assez faible pour que la force propulsive soit quasi parallèle au plan de glissement ; de même, le vissage est facile quand l'angle *a* est petit. Quand la vis ou le boulon est entièrement vissée, on la coince par un coup de marteau (ou mieux un dernier quart de tour) destiné à accroître l'imbrication des rugosités de son filetage avec celle du boulon ou de la roche. Ce blocage achevé, toute traction ou poussée exercées dans la direction de l'axe de la vis ou du boulon se traduit par une redistribution de forces plus petites sur chacun des éléments de filetage. Tant que l'inclinaison du filetage est assez faible, les composantes de ces forces parallèles au filet sont minimes comparées à leurs composantes qui lui sont perpendiculaires. Leur rapport sera donc inférieur au coefficient de frottement du métal sur la roche (vis) ou sur lui-même (boulon). Ainsi, il existe un angle de filetage limite en deçà duquel un boulon ne peut se dévisser quelle que soit la traction qu'il subit.

Cet « angle de glissement » est d'environ 12 degrés en cas de contact métal sur métal et de quelque 20 degrés en cas de contact de métal sur le bois, ce qui explique que les boulons aient un filetage moins incliné que les vis à bois. Le caractère irréversible (parfait) des blocages « à vis » s'observe facilement sur les tabourets qui équipent les photomatons. Un enfant peut en modifier la hauteur en les faisant tourner sur leur vis, ce qui n'empêche pas qu'un adulte pesant son quintal s'y cale, même s'il lève les pieds !

Nommé arc-boutement, ce phénomène est exploité au sein de nombreux mécanismes, tels les vérins mécaniques ou encore les coins de bûcheron. Dans tous les cas, il s'agit d'obtenir une poussée intense dans une certaine direction à l'aide d'une petite force motrice dans une autre, et d'éviter de perdre les résultats obtenus si la force motrice s'annule. Plutôt que de s'inquiéter de son boulon, notre second varappeur doit plutôt vérifier la qualité de la roche où il a planté son piton !

Jacques Duran, Sables, *poudres et grains : introduction à la physique des milieux granulaires*, Eyrolles Sciences, 1997.

J. L. Meriam et L.G. Kraige, *Mécanique de l'ingénieur : Statique*, Vuibert, 1995.

Éthologie

Foi d'animal ! De la puce à l'éléphant

Catherine Vincent, images de Michel Lablais, Éditions du Seuil, 2002 (192 pages, prix 38 euros).

Pourquoi sommes-nous si touchés par les animaux ? Telle est la question posée dès la préface du livre *Foi d'animal !* L'intérêt est si ancien que les Grecs s'en préoccupaient déjà. Jean de La Fontaine (1621-1695) inspiré par Ésope (fabuliste du VIe siècle) y répond dans ses recueils de *Fables*, «un tableau où chacun de nous se trouve dépeint». Il propose non seulement des connaissances sur les propriétés et les caractères des animaux, mais souhaite initier les enfants à se familiariser avec les habitants du monde. Au XIXe siècle, le dessinateur et graveur Gustave Doré (1832-1883) a illustré les *Fables* et les a rendues inoubliables. Même si l'art du bestiaire (ensemble des animaux décrits par un écrivain et représentés par un peintre) s'est déplacé du terrain symbolique vers les sciences naturelles, il a inspiré de bien jolis textes à des écrivains dont Guillaume Apollinaire (*Le bestiaire ou cortège d'Orphée*, 1911) ou Maurice Genevoix (*Bestiaires*, 1969-1971, illustrés par l'auteur en 1972). Catherine Vincent, qui signe, chaque mardi dans le journal *Le Monde*, une chronique sur les curiosités animales, offre ici dans le même esprit, un bestiaire éthologique, une collection de 57 animaux, communs ou rares, connus ou bizarres. L'opus est illustré par Michel Lablais avec des pastiches de planches du XVIIIe ou du XIXe siècle, en y ajoutant de l'humour. Comment ne pas sourire en découvrant l'imposteur Dahu *(Dahutus montanus)*, prétexte des escapades montagnardes de quelques crédules enthousiastes!



Disons-le *Foi d'animal!* est une réussite. On feuillette avec nostalgie un livre présenté «à l'ancienne», tel qu'on pouvait en recevoir autrefois à la distribution des prix de fin d'année à l'école communale, avec sa typographie, ses vignettes et ses planches. Les savants qui ont marqué l'histoire des sciences sont cités, de Lamarck, Cuvier, Étienne et Isidore Geoffroy Saint-Hilaire, Darwin… à Stephen Jay Gould. Tout en guidant le lecteur en douceur, sans vocabulaire rébarbatif, mais en glissant ce qu'il faut de systématique et en donnant les noms latins, l'auteur aborde les connaissances éthologiques les plus actuelles. Au fil des pages, on s'interroge sur les mystères de l'évolution et sur la fragilité de la biodiversité.

Le flamant rose *(Phoenicopterus ruber)* mange la tête en bas à cause d'un curieux bec dont la mandibule supérieure est petite et l'inférieure profonde et creusée ; en France, l'espèce a été sauvée par la construction d'un îlot artificiel protégé en Camargue et par la vigilance d'une station biologique. Le microcèbe *(Microcebus murinus)*, petit singe lémurien, est arrivé dans l'île de Madagascar, il y a 35 millions d'années, sur un radeau de fortune. Il s'est produit pour lui le même phénomène que pour les pinsons de Darwin, aux Galápagos, l'espèce a subi une radiation évolutive qui a donné 25 espèces. Pourtant ces singes sont très décimés, sauf l'ancêtre *Microcebus* qui ne doit sa survie qu'à ses qualités propres, son agilité, sa discrétion et ses mœurs nocturnes. Certains animaux pourtant adulés disparaissent rapidement, il reste moins de 1 000 pandas en Chine, aussi le décès d'un panda dans un zoo prend-il des allures de catastrophe nationale. Il y a aussi les retournements de situation : ainsi le grand hamster d'Alsace *(Cricetus cricetus)*, surnommé le cochon des céréales, tellement combattu pour ses ravages, a quasiment disparu et figure maintenant sur la liste des espèces menacées.

Animaux lointains ou proches, ils ont tous leur histoire et certains seront surpris d'apprendre que le grillon *(Gryllus campestris)* a élu domicile dans les voies de garage du métro où l'eau ruisselante, l'obscurité et la chaleur lui conviennent. Il existe même, depuis 1972, une ligue de protection des grillons du métro parisien! Passionnés, chercheurs professionnels, agriculteurs, amateurs étudient et protègent aussi bien le manchot royal *(Aptenodytes patagonica)* des îles du Crozet, des Kerguelen ou du Prince Edouard, le mouton d'Ouessant (genre *Ovis*) ou la baleine à bosse *(Megaptera novaeangliae)*, la cantatrice des mers du globe.

La promenade qui met en scène la puce jusqu'à l'éléphant est charmante et permet de réveiller en nous le naturaliste, dont on peut espérer qu'il sommeille encore.

Michèle FEBVRE

Économie

Aux origines de la monnaie

Sous la direction d'Alain Testart, par Jean-Jacques Glassner, Bernadette Menu, Alain Testart, François Thierry, Éditions Errance, 2002 (144 pages, 18 euros).

La monnaie existait-elle avant la monnaie? C'est la question que se posent les quatre auteurs de ce livre qui s'interrogent sur le fonctionnement des économies privées de l'objet que nous appelons monnaie, c'est-à-dire un morceau de métal rond portant une marque imposée par un État. En fait, ils s'interrogent surtout sur les économies «pré-monétaires». Après un tour d'horizon général, trois chapitres analysent, exposé théorique à l'appui, les sociétés mésopotamiennes du IIIe millénaire, l'Égypte pharaonique et la société chinoise ancienne. D'entrée, le lecteur se retrouve non seulement dans des périodes historiques différentes, mais aussi sur des continents différents.

Or, tous convergent vers une même conclusion, à savoir que l'échange, la dette et le crédit existent en l'absence de l'objet qu'est la pièce de monnaie. Ils peuvent même remplir son rôle, se substituer au numéraire dont ils remplissent alors les fonctions. Rejetant les dimensions «magiques» de la monnaie – qui confère à un objet une dimension symbolique –, ils retiennent une analyse plus fonctionnelle : c'est la multiplication et la diversité des dettes qui imposent la (ou une) monnaie-objet comme moyen global et universel de s'en acquitter. Les exemples montrent, en effet, que la valeur monétaire était au centre de la pensée et de la vie économique mésopotamienne dès la 26e dynastie (au IIe millénaire),

© POUR LA SCIENCE - N° 305 MARS 2003

mais également que les billets à ordre circulaient et étaient acceptés. Les données égyptiennes fournissent de nouveaux éléments avec des instruments de valeur du IVe millénaire, l'utilisation de monnaie scripturale et diverses formes de crédit. Enfin, on trouve en Chine des exemples de monnaies totalement fiduciaires (c'est-à-dire fondées sur la «foi», la confiance des acteurs économiques dans l'émetteur), au cours fluctuant, dont la forme peut changer selon les régions et selon les époques.

Ces quelques exemples ne servent qu'à souligner l'intérêt de ce travail collectif que chaque historien et chaque économiste devraient avoir lu. Les éléments qui y sont collectés bouleversent l'idée d'une lente, mais régulière construction économique qui aboutit vers le VIIe siècle avant notre ère à la création de la monnaie. À trop se concentrer sur la forme habituelle du numéraire occidental (produit par l'État, en métal noble), on a fini par oublier la diversité des situations et la complexité de la vie économique.

La situation chinoise, par exemple, reste incompréhensible dans ce cadre : la monnaie y est sans valeur intrinsèque (contrairement à la pièce en métal noble) et le cours des espèces fiduciaires est lui-même fluctuant et polymorphe (monnaie, tissus, objets, etc.). De même, le fait que les sociétés anciennes comme l'Égypte ou la Mésopotamie aient connu des systèmes d'échanges complets et complexes avec des monnaies fiduciaires et des crédits devrait être mémorisé par tous les économistes, trop «ethnocentrés».

La portée de cet ouvrage ne réside pas seulement dans les informations apportées sur quelques exemples d'économies très anciennes. La démarche, les synthèses et leur capacité à proposer des interrogations nous semblent tout aussi importantes. Lorsqu'on se penche sur les sociétés médiévales ou même sur celles du XVIIIe siècle, on devrait garder en mémoire le fait que l'absence de numéraire n'implique rien d'autre qu'une absence de pièces de monnaies. L'économie fonctionnait et les échanges se poursuivaient selon d'autres modalités. C'est ce que perçoivent ceux (dont je suis) qui analysent les économies «monétaires». Les auteurs démontrent que monnaies multiformes, billets, crédits, dettes (publique et privées) existaient depuis plusieurs millénaires. Ils battent en brèche ceux qui discourent encore sur l'absence de dette d'État dans les économies prémonétaires ou sur la non-pertinence de l'étude des progrès et des reculs du numéraire dans les échanges.

Georges DEPEYROT

Physique

Aurores, mirages, éclipses… Comprendre les phénomènes optiques de la nature

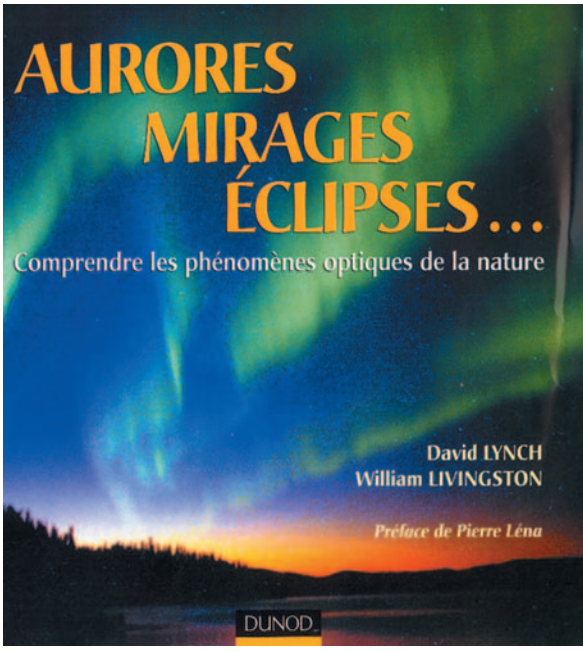
David Lynch et William Livingston, Éditions Dunod, 2002 (262 pages, 39 euros).

En observant la nature, nous avons tendance à n'y voir que ce que nous connaissons déjà et nous restons parfois aveugles aux phénomènes nouveaux ou moins habituels. Cette traduction du livre de David Lynch et de William Livingston se propose d'ouvrir nos yeux sur des phénomènes accessibles à tous avec, pour seul outil d'observation, ceux que la nature nous a donnés. Aristote, passionné de classification, avait déjà essayé d'expliquer, dans *Les Météorologiques*, tous les phénomènes régis par les interactions entre les quatre éléments et en particulier l'air et le feu qui étaient, selon lui, à l'origine de la plupart des phénomènes atmosphériques. Ce sont ces mêmes phénomènes qu'*Aurores, mirages, éclipses* entreprend à son tour de présenter. En bref, ce livre nous explique la richesse des effets liés à la propagation de la lumière dans un milieu hétérogène, que ce soit l'air, l'eau ou la glace. L'explication de la plupart des phénomènes exposés repose sur les principes fondamentaux de l'optique, qui peuvent être illustrés très simplement à l'aide de schémas clairs.

L'ouvrage, très exhaustif, aborde aussi bien des phénomènes très communs, tels les arcs-en-ciel ou les ombres, que des phénomènes quasi mythiques, tels, par exemple, le rayon vert ou les parhélies (les taches lumineuses que l'on observe dans certaines conditions de part et d'autre du Soleil). En ce qui concerne les phénomènes les plus connus, les sujets sont fouillés en détail, D. Lynch et W. Livingston s'attachant toujours à mettre en lumière des aspects que nous n'avions peut-être pas remarqués. Contemplons avec eux un ciel nuageux. Pourquoi les nuages sont-ils en général blancs, et pourquoi certains sont-ils sombres? Tous les cumulus ont-ils un bord argenté? Pourquoi la Lune, vue à travers un nuage, apparaît-elle bleue? Chacune de ces questions trouve, bien-sûr, sa réponse dans *Aurores, mirages, éclipses...*

On ne le dira jamais assez, l'observation d'un phénomène ne dépend pas seulement de ses propriétés, mais aussi de celles de l'outil que l'on utilise pour l'observer. Fort judicieusement, *Aurores, mirages, éclipses* détaille le fonctionnement de notre détecteur naturel d'ondes électromagnétiques : l'œil. Tout astronome amateur ou photographe sait à quel point un outil adapté peut rendre certaines observations possibles… ou non. La physiologie de l'œil est donc un élément essentiel à la compréhension des phénomènes optiques. Dans un arc-en-ciel, un œil «normal» voit toutes les couleurs du spectre visible, du rouge au violet. Rien d'étonnant à cela! Qui sait, cependant, que les aléas de la vie, telle une opération de la cataracte, par exemple, peuvent accidentellement améliorer les qualités de notre vision, lui donnant accès à la composante ultraviolette du spectre solaire?

Tandis que vous lirez *Aurores, mirages, éclipses,* vos yeux se porteront d'abord sur une variété inimaginable d'ombres, avant de s'abandonner au clair de lune puis d'observer les couchers de soleil, les mirages ou les aurores boréales. En tournant nos regards vers l'élément liquide, nous découvrons comment les gouttelettes sont à l'origine des arcs-en-ciel ou de l'irisation et nous comprenons la variété des reflets marins. Après un détour par les effets de la glace (couleur, halos...), l'œil s'élève vers le cosmos proche pour découvrir des phénomènes facilement observables, tels, par exemple, les météores, les étoiles filantes, la Voie lactée. Les explications sont claires et bien documentées (les seules exceptions étant celles des aurores boréales ou des éclairs qui sont traités un peu plus rapidement et moins en profondeur). Dans tous les cas, le phénomène considéré est toujours au centre de l'explication qui s'articule autour de photographies choisies pour mettre en relief ses divers aspects



caractéristiques. Ainsi, tout se passe comme si le lecteur se promenait avec un guide qui lui raconte, au détour de nouvelles rencontres, le pourquoi et le comment dans un style simple (le vocabulaire technique est détaillé dans un glossaire complet).

On pourrait craindre qu'en décortiquant les spectacles de la nature, on en perde la poésie. Bien heureusement, ce n'est pas le cas, grâce au souci manifesté par les auteurs de laisser l'émerveillement devant les phénomènes au centre de leur propos. Les photographies sont toujours étonnantes et rendront jaloux plus d'un photographe amateur. Les auteurs gratifient même le lecteur, dans un ultime chapitre en forme de bis, d'un florilège de nuages rares et exotiques.

Voici donc un ouvrage qui allie les caractéristiques d'un beau livre de photographies à celui d'un texte de vulgarisation complet et plaisant à lire. Il éveille l'attention à des phénomènes méconnus et apporte de nombreuses réponses aux questions «naïves» que nos enfants ne manquent jamais de nous poser un jour... et dont la réponse, avouons-le, nous échappe parfois.

Jean-Philippe UZAN

Biologie

Le chant d'amour des concombres de mer

Bertrand Jordan, Éditions du Seuil, 2002 (187 pages, 17 euros).



En reposant le merveilleux petit livre de Bertrand Jordan, j'ai été ramené à une réflexion que je m'étais faite en lisant l'entretien entre Jean-François Revel et son fils, Matthieu Ricard, devenu moine bouddhiste. En effet, ce dernier, après avoir préparé une thèse de biologie moléculaire dans un des laboratoires les plus prestigieux de l'Institut Pasteur, remarquait : «J'ai donc été amené à être en contact avec des personnages fascinants à bien des égards. Mais, en même temps, le génie qu'ils manifestaient dans leur discipline ne s'accompagnait pas nécessairement, disons… de perfection humaine.» (*Le moine et le philosophe*, Nil, 1977, p. 24). M'étaient alors venus à l'esprit les mesquineries, les bassesses et mauvais coups de certains «grands» chercheurs. Heureusement, l'ouvrage de Bertrand Jordan est là pour démontrer que l'on peut être un biologiste moléculaire et témoigner d'une grande sensibilité, d'une réelle humanité.

En effet, ce chant d'amour (à la vie) est un recueil d'essais, ciselés avec talent, et dont chacun trouve pour point de départ (pour prétexte ?) un élément, anecdotique ou essentiel, du vécu de l'auteur. Ainsi, à l'occasion d'une plongée en apnée dans les calanques près de Marseille, il met en situation : le petit matin après une nuit à la belle étoile, le froid de l'eau s'insinuant sous la combinaison, le silence dans l'élément liquide, l'effort sur les palmes, la beauté d'un paysage minéral, puis une présence, l'accélération des battements du cœur, le déplacement coulé d'un bigorneau, l'évocation d'un fugu, le ballet de concombres de mer… Et c'est l'incidente qui mène à une méditation biologique. On trouve dans ce livre des réflexions sur des propositions théoriques difficiles, élaguées et exposées avec une grande simplicité (ne pas confondre simple et simpliste…), tels le gène égoïste de R. Dawkins ou l'hypothèse Gaïa de J. Lovelock. D'autres chapitres concernent des résultats récents, considérés comme fondamentaux : la découverte des gènes de l'apoptose, le rôle du gène Pax6 dans la morphogenèse de l'œil et, plus généralement, des organes photorécepteurs.

Le passage entre le quotidien et la vie du laboratoire est une réelle réussite. Il est évident que tout lecteur y trouvera son compte. Le biologiste sera surpris et ravi de voir surgir, sous un angle inattendu, le développement d'une théorie qu'il croit connaître ; le non-biologiste comprendra sans effort en quel sens des découvertes de laboratoire souvent ardues et paradoxales sont, malgré tout, en lien avec la vie de tous les jours. Et tout le monde découvrira avec bonheur un biologiste moléculaire qui, à l'occasion, nous révèle l'étendue de sa sensibilité.

Hervé LE GUYADER

Histoire des sciences

Fabre, le miroir aux insectes

Patrick Tort, Éditions Vuibert / Adapt, 2002 (352 pages, 35 euros).

L'histoire des sciences se débarrasse-t-elle de ses mauvais penchants : l'admiration sans faille ou l'attaque en règle des acteurs de la science? L'image du savant a bien besoin d'une cure d'objectivité. Ainsi, le dévalorisé Lamarck (1744-1829) a-t-il retrouvé une plus juste place grâce aux travaux de Goulven Laurent et de Pietro Corsi. Patrick Tort, incontestablement le chef de file des défenseurs de Darwin en France, nous livre ici une analyse critique de l'œuvre de Jean-Henri Fabre (1828-1915) qui malmène la légende que l'auteur des *Souvenirs entomologiques* s'est lui-même forgée, bien secondé à son époque par l'inconditionnel docteur Legros (1861-1940), auteur, en 1912, d'une biographie très favorable au naturaliste.

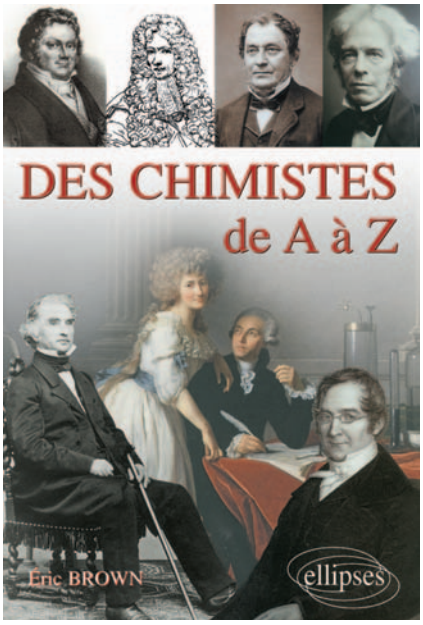
Les documents photographiques très «posés» de Fabre montrent un homme austère, au visage émacié et fermé, de noir vêtu, appuyé sur un bâton ou accoudé à une minuscule table de travail. D'origine modeste, il a fait de fort brillantes études : École normale, baccalauréats littéraire et mathématique, licences de physique, de maths et de sciences naturelles, doctorats de zoologie sur les myriapodes (les mille-pattes) et de botanique. Son œuvre imprimée est importante et parmi ses 201 titres, on trouve, en rapport avec sa carrière d'enseignant, 102 ouvrages pédagogiques. Ce forçat de l'édition scolaire a couvert toutes les matières : physique, chimie, maths, sciences naturelles, zoologie, botanique, géologie, astronomie, lecture, économie domestique et hygiène alimentaire… Ses droits d'auteur, confortables (jusqu'à l'arrivée de Jules Ferry qui a bouleversé les programmes), lui ont permis d'acquérir le domaine de l'Harmas de Sérignan (Vaucluse), d'assurer son indépendance et les ressources familiales. En 1879, à 56 ans, il s'isole derrière ses murs et cultive son don : l'observation des insectes, qualité dont il précise qu'elle lui est propre, soulignant avec un orgueil déplacé la «complète nullité sur les délicatesses de l'observation» de son ascendance.

Vivre à la campagne, s'immerger dans la nature en fuyant l'agitation des villes ou du milieu universitaire, on peut rapprocher ce choix de vie avec celui que fit également Darwin. Pourtant, malgré leur correspondance amicale (du côté de Darwin) et réticente (du côté de Fabre), les idées de l'évolutionniste anglais ont laissé de marbre le naturaliste français. En effet, Fabre demeure hostile au transformisme (il voue même une haine implacable à cette théorie) et à l'explication de l'instinct proposée par Darwin. Fabre est fixiste, il pratique une éthologie descriptive éloignée des «hautes théories». Pour lui, l'instinct guide l'insecte sans erreur, sans détournement de conduites immuables dans leur déroulement et parfaitement adaptées à sa nature. On est loin de l'explication darwinienne de l'instinct avec l'idée d'un perfectionnement possible selon le mécanisme de la sélection naturelle. Pour Darwin, l'instinct est un mélange d'innéité et d'intelligence, l'animal peut se tromper et corriger son erreur. Le débat est d'importance. Évidemment pour P. Tort, les options butées de Fabre sont inacceptables. Fallait-il aller si loin dans la présentation d'un Fabre spiritualiste, alors qu'il a refusé la croix sur sa tombe se conduisant ainsi en libre-penseur? Fallait-il le fustiger parce qu'il a refusé d'admettre le cycle haplo-diploïde des hyménoptères déjà connu depuis 1845 grâce à Dzierzon, un apiculteur allemand? La reine des abeilles stocke dans sa spermathèque des spermatozoïdes et les œufs non fécondés et donc haploïdes donnent des mâles tandis que les œufs fécondés et diploïdes, des femelles ; il admet le choix du sexe au moment de la ponte, mais pense qu'il faut s'incliner devant ce mystère lié à la nécessaire harmonie dans la nature. Bien entendu, il n'est pas question d'approuver l'intolérance de Fabre vis-à-vis des idées importantes de son siècle, mais à sa décharge on peut préciser que les *Souvenirs entomologiques* se veulent une œuvre littéraire et poétique, s'adressant à tous et qui a attiré et attire encore de nombreux lecteurs vers l'amour de la nature et la contemplation des êtres qui la peuplent. Certes son éthologie pionnière est bien imparfaite et les entomologistes peuvent lui reprocher un certain désintérêt pour la systématique. Cependant il semble que le personnage ne mérite ni l'idolâtrie dont il fait encore l'objet ni un rejet sans appel.

Il faut préciser que le livre de P. Tort est magnifiquement illustré, comprenant en particulier un très beau cahier central de Michel Boulard du Muséum national d'histoire naturelle, sur les insectes de L'Harmas. La propriété de Fabre est revenue au Muséum, bien que Fabre ait été bien éloigné des entomologistes de cette institution. Il suffit de lire le témoignage d'Étienne Rabaud (1868-1956) qui fut président de la Société entomologique de France et qui n'a pas été tendre avec Fabre. Il écrit en 1924 : «Pour lui, l'instinct est une force interne qui mène la bête en dépit d'elle-même et que la bête a reçu en don, à l'instant où elle fut créée… Tout est réglé d'avance dans le système nerveux ; les actes divers y sont inscrits dans un ordre déterminé et ne peuvent se succéder que dans cet ordre : jamais l'insecte ne peut s'arrêter et se reprendre ; c'est un bel automate dont les rouages furent montés, par une puissance supérieure, tout au Commencement.»

Si ce livre incite à lire ou relire Fabre dont les *Souvenirs entomologiques* se trouvent facilement en librairie (trois gros livres de poche) et Darwin, son *Miroir aux insectes,* P. Tort aura rempli son rôle et enrichi le débat.

Michèle FEBVRE



Des chimistes de A à Z

Éric Brown, Éditions Ellipses, Paris, 2002 (400 pages, 25 euros).

C'est un recueil de plus de 260 notices consacrées à des chimistes de tous les temps que propose Éric Brown, professeur à l'Université du Maine. Chaque notice commence, d'une manière générale, par une analyse chronologique de l'œuvre du chimiste et se termine par une description des principales étapes de sa vie. À côté des détails purement chronologiques sur la vie et sur la carrière du chercheur, l'auteur ne néglige pas de présenter «ses joies, ses épreuves, son caractère, et, noblesse oblige, ses excentricités». J'apprécie ces informations, ainsi que le ton humoristique et polémique du livre, et je passe volontiers sur quelques

POUR LA SCIENCE
8, rue Férou 75278 PARIS CEDEX 06
Tél : 01-55-42-84-00
www.pourlascience.com
Commande de dossiers ou de magazines :
02-37-43-65-64

POUR LA SCIENCE Directeur de la rédaction : Philippe Boulanger. Françoise Pétry-Cinotti (Rédactrice en chef), Philippe Pajot (Rédacteur en chef adjoint), Loïc Mangin, Claire Le Poulennec, François Savatier, Laurence Plévert, Marie-Neige Cordonnier, Xavier Müller, René Cuillierier, Sébastien Bohler (Rédacteurs). Secrétariat de rédaction/Maquette : Annie Tacquenet, Sylvie Sobelman, Pauline Bilbault, Pierre Saminadin, Céline Lapert. Site Internet : Nicolas Botta-Kouznetzoff. Marketing et Publicité : Stéphane Montouchet, assisté de Séverine Merviel et Estelle Dorey. Direction financière : Anne Gusdorf. Direction du personnel : Jean-Benoît Boutry. Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Christine de Cacqueray. Presse et communication : Floryse Grimaud, assistée de Isabelle Huet. Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet. Conseiller scientifique : Hervé This.

Ont également collaboré à ce numéro : François et Ivana Barron, Claude Combes, Christian Érard, Claudine Goldbach, Matthieu Gounelle, Christian Jeanmougin, Marie-Thérèse Landousy, Christophe Pichon.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor : John Rennie. Board of editors : Mariette Di Christina, Michelle Press, Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Carol Ezzell, Wayt Gibbs, Steve Mirsky, George Musser, Ricki Rusting, Sarah Simpson, Gary Stix, Kate Wong, Philip Yam. Chairman Emeritus : John Hanley. Chairman : Rolf Grisebach. President and Chief Executive Officer : Gretchen Teichgraeber. Vice-President : Chuck McCullagh and Frances Newburg.

PUBLICITÉ France

Chef de Publicité : Jean-François Guillotin (jf.guillotin@pourlascience.fr), assisté de Catherine Teissier
8 rue Férou 75278 Paris Cedex 06
Tél. : 01 55 42 84 28 ou 01 55 42 84 97
Télécopieur : 01 43 25 18 29
Étranger : 415 Madison Avenue, New York. N.Y. 10017 - Tél. (212) 754.02.62

SERVICE ABONNEMENTS
Anne-Claire Ternois et Ginette Grémillon :
Tél. : 01 55 42 84 04

DIFFUSION
Estelle Dorey : 01 55 42 84 81.

DIFFUSION DE LA BIBLIOTHÈQUE POUR LA SCIENCE
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.

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).

préciosités d'écriture qui rendent parfois le texte un peu énigmatique. Le livre se lit agréablement et donne une quantité considérable d'informations.

Ainsi deux des personnages cités par E. Brown ne figurent pas, bien à tort, dans les histoires «classiques» de la chimie. Sherlock Holmes (18?-19?), héros de Conan Doyle (1859-1930), a droit à une notice aussi amusante que détaillée : le célèbre détective ne s'était-il pas aménagé un laboratoire, dans son petit appartement de Baker Street? E. Brown commente plaisamment certaines des expériences chimiques du détective, et déplore que certains auteurs britanniques récents aient mis en doute ses talents de chimiste, sous le prétexte qu'il avait souvent les doigts tachés ou recouverts de pansements. E. Brown consacre également une notice à James Riddick Partington (1886-1965), physico-chimiste qui restera dans l'histoire comme l'auteur d'une fabuleuse *History of chemistry* en quatre volumes que E. Brown décrit excellemment comme «une œuvre monumentale… [qui] cite des milliers de livres, de manuels et d'articles scientifiques 'primaires', dont beaucoup sont très anciens et devenus d'une extrême rareté». Cet éloge est si convaincant que l'on comprend encore moins que, dans les notices du livre ici commenté, les références bibliographiques soient quasi absentes! Elles sont pourtant clairement repérables, car écrites en italique et placées entre guillemets. Pourquoi n'avoir indiqué qu'exceptionnellement les auteurs de ces textes? C'est regrettable, car cette absence empêchera ce livre de devenir l'ouvrage de références qu'il avait tout pour être.

Le choix des personnalités retenues, surtout en ce qui concerne les chimistes contemporains, peut être discuté, et certains détails des biographies seront contestés. J'évoquerai ici une absence et une insuffisance qui m'ont vraiment gêné.

L'absence est celle d'Isaac Newton (1642-1727) : il ne fut pas seulement le génie de la physique que l'on sait, mais aussi un homme qui, toute sa vie, s'est consacré à l'alchimie (sans rien divulguer de ses travaux alchimiques de son vivant) et qui a publié, à la fin de la deuxième édition de son *Optique* (1717), sous forme de «Questions», un certain nombre de conjectures. La «Question 31» traite ainsi de la structure particulaire de la matière, des forces interparticulaires, de la réactivité et des affinités chimiques. La «chimie newtonienne» influença nombre de chimistes du XVIIIe siècle.

L'insuffisance est celle de la notice consacrée au chimiste américain Arthur Michael (1853-1942), surtout connu par l'importante réaction qui porte son nom et qui est détaillée dans une demi-page du livre de E. Brown. Toutefois, ce dernier aurait dû mentionner les autres centres d'intérêts chimiques de Michael, notamment ses efforts pour introduire la thermodynamique en chimie organique et son intérêt pour les mécanismes de réaction, qui en firent un des tout premiers chimistes américains de son temps. Michael était un grand amateur d'art oriental et aimait les voyages. En 1889, il offrit à sa jeune épouse un voyage de noces autour du monde. Puis, pendant quatre ans, il s'établit dans l'île de Wight où il fit construire un laboratoire personnel. Il y poursuivit ses recherches, aidé de quelques assistants et de sa femme (également chimiste). En 1912, l'Université Harvard décida de se l'attacher comme professeur. Les conditions de sa nomination étaient exceptionnelles : Michael était libre de faire ce qu'il voulait, quand et où il le souhaitait. Il ne donna pas de cours et effectua ses recherches dans son laboratoire privé ; les étudiants qui y effectuaient leurs recherches recevaient le doctorat de Harvard. Pourquoi cet aspect de Michael, personnage original très attachant, n'est-il pas évoqué?

Terminons ce rapide survol du livre en examinant la notice consacrée à Marcelin Berthelot (1827-1907), figure importante de la chimie française et homme politique influent. On lui a justement reproché son opposition à la théorie atomique : à cause de son influence, cette opposition a entraîné, comme l'écrit E. Brown, «une véritable stérilisation de notre pays» en chimie. Cette très juste remarque montre que E. Brown a modifié sur ce point son sentiment – il faut l'en féliciter – du moins tel qu'il se dégageait de la lecture de sa «présentation» donnée au livre *Marcelin Berthelot*, de Daniel Langlois-Berthelot (Éditions J.-C. Lattès, 2000). E. Brown s'est donc rapproché des positions exprimées par Jean Jacques (1917-2001), qui fut chimiste au Collège de France, et qui rédigea une biographie approfondie et critique de Berthelot, *Berthelot, autopsie d'un mythe* (Éditions Belin, 1987) (ouvrage qui ne laisse, comme l'écrit E. Brown, «planer aucune équivoque sur l'objectif médico-légal que s'est fixé son auteur»). Je regrette que E. Brown n'ait pas choisi de se situer plus directement par rapport aux positions de Jacques. Il se contente de citer – en donnant la référence, pour une fois! – un texte qui n'est qu'une analyse très sommaire du livre de Jacques, publiée, au moment de sa parution, dans un bulletin du CNRS. E. Brown y voit «une publicité pour ainsi dire officielle». Ceux qui ont connu Jean Jacques imagineront sans peine la jubilation sarcastique avec laquelle il aurait accueilli la révélation de son statut d'auteur «officiel».

Georges BRAM

Imprimé en France – Maury Imprimeur S.A. Malesherbes – Dépôt légal 5636 – Mars 2003 – N° d'édition 077305-01 – Commission paritaire n° 0907K82079 du 19-09-02 – Distribution : NMPP
ISSN 0 153-4092 – N° d'imprimeur I01/101185P – Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet.