

LUMIÈRE PIÉGÉE • DARWIN, PENSEUR MODERNE • LA VIE EXTRATERRESTRE



Pour la Science

■ POUR LA

SCIENCE

Septembre 2000

édition française de

SCIENTIFIC
AMERICAN

www.pourlascience.com



*Les gaz mortels
du lac Nyos*



Le génome,
enjeu industriel

BLOC-NOTES

de Didier Nordon

TRIBUNE DES LECTEURS



POINT DE VUE

La stérilisation

par Alain Giami et Henri Leridon



PRÉSENCE DE L'HISTOIRE

La découverte des rayons gamma

par Leif Gerward et André Rassat



SCIENCE ET GASTRONOMIE

Ordres de grandeur

par Hervé This



PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES

- La prévision des incendies de forêt
- Miroirs et ondes gravitationnelles

- Vibrer d'amour
- Les serpents nageaient...
- Le plomb au service de l'environnement
- Pas de quoi en faire un plat
- Biologie ultrarapide



LOGIQUE ET CALCUL

Numérologie et coïncidences

par Jean-Paul Delahaye



VISIONS MATHÉMATIQUES

La topologie marine

par Ian Stewart



IDÉES DE PHYSIQUE

L'air chaud qui descend de la montagne

par Roland Lehoucq et Jean-Michel Courty



ANALYSES DE LIVRES

■ Les animaux pensent-ils?, avec la collaboration de Gérard Lenclud

- L'origine de l'homme. L'odyssée de l'espèce, de Pascal Picq
 - Flore vasculaire de Basse-Normandie, de Michel Provost
 - Les canaux ioniques cellulaires, de Jean-Marc Dubois,
- avec la collaboration de Laurent Combettes, Édouard Corabœuf et Jean-François Faivre
- Physique des transitions de phases. Concepts et applications. Cours avec exercices corrigés, de Pierre Papon, Jacques Leblond et Paul H.E. Meijer

Deux encarts d'abonnement entre les pages 18 et 19, un encart broché service lecteurs et une carte d'abonnement entre les pages 98 et 99. Coupon à retourner Voyage dans l'imaginaire des mathématiques sur une sélection d'abonnés.



Chaque mois, retrouvez le sommaire complet de la revue **en ligne** avec pour chaque article une bibliographie et un complément d'information.

www.pourlascience.com

Où sont-ils?

par Ian Crawford

Malgré des années de recherche, aucune intelligence extraterrestre n'a été trouvée. Serions-nous seuls dans la Galaxie?

Les communications galactiques

par George Swenson

Pour communiquer à travers la Galaxie, des correspondants extraterrestres devraient utiliser des méthodes originales.

La lecture du génome humain

par Kathryn Brown

Le décryptage de l'information génétique humaine a été une rude épopée... Pourtant l'aventure ne fait que commencer.

La bio-informatique

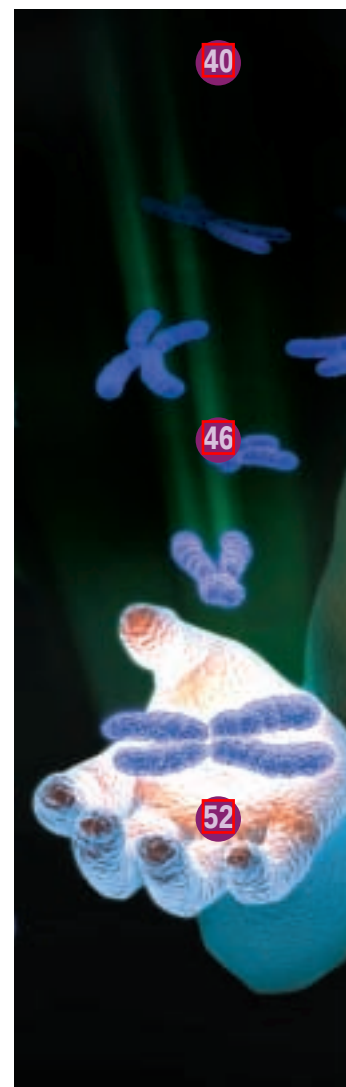
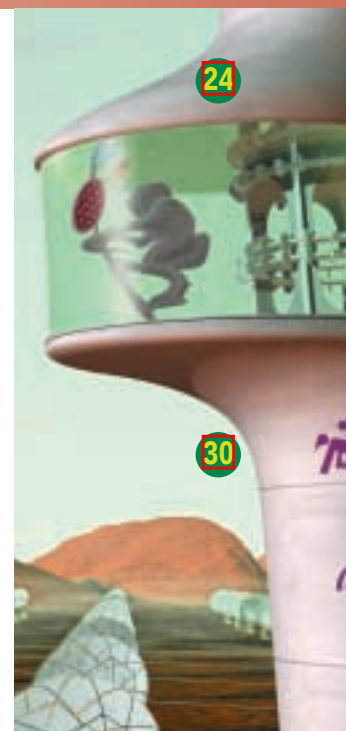
par Ken Howard

Une nouvelle discipline issue de la biologie et de l'informatique transforme des données brutes du séquençage du génome en informations utiles aux biologistes.

Au-delà du génome

par Carol Ezzell

Le séquençage de l'ADN d'un être humain n'est qu'une première étape dans l'étude du fonctionnement d'une cellule : on doit aujourd'hui explorer les protéines codées par ces gènes.



Les ponts légers de Robert Maillart 58

par David Billington

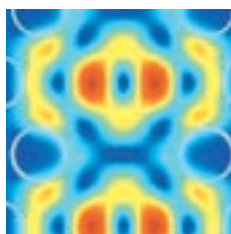
L'ingénieur suisse Robert Maillart a construit des ouvrages fins et élancés, qui supportent des charges énormes.



La lumière en cage 66

par Jean-Michel Lourtioz et Daniel Maystre

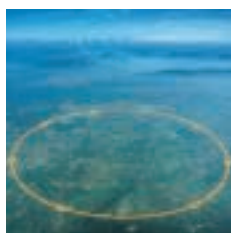
Les physiciens contrôlent la lumière en construisant des cristaux photoniques qui piègent, filtrent et véhiculent les photons.



Le Grand Collisionneur de hadrons 74

par Chris Llewellyn Smith

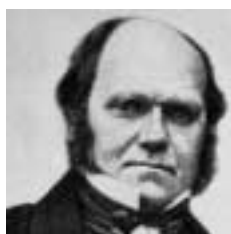
Des physiciens et ingénieurs du monde entier construisent, près de Genève, le LHC, accélérateur de particules d'une puissance inégalée.



L'influence de Darwin sur la pensée moderne 82

par Ernst Mayr

C'est à Charles Darwin que le XX^e siècle doit les changements les plus nombreux et les plus importants de sa vision du monde.



Des lacs meurtriers 90

par Marguerite Holloway

Au Cameroun, deux lacs risquent à tout moment de libérer des gaz qui tueraient les populations riveraines. Une équipe internationale de scientifiques tente de prévenir un tel accident.



Ignorance et catastrophisme

L'espérance de vie augmente, dans les pays industrialisés, de deux mois par an environ. La durée de vie moyenne des Français sera, en 2050, de 87 ans.

Jamais la santé de la fraction riche de l'humanité n'a été aussi éclatante.

Jamais elle ne s'est autant plainte.

Nous sommes préoccupés de notre alimentation, inquiets des dangers éventuels des téléphones portables, anxieux des concentrations en nitrates dans les nappes phréatiques, chagrins des possibles modifications humaines du climat et des incendies de forêts, tourmentés par le risque de transmission à l'homme de l'encéphalite spongiforme bovine.

Longue litanie. Ainsi le financier en bonne santé s'inquiète-t-il plus que le savetier malade. Est-il une raison à cette irrationalité?

Les craintes viendraient d'une méfiance envers les scientifiques, d'un rejet des progrès de la science, prétendent certains. Ils ont tort. La science intéresse : les couvertures des journaux portent de plus en plus souvent sur des sujets de science, les émissions scientifiques à la télévision sont toujours plus nombreuses, les manifestations scientifiques attirent leur lot croissant de curieux.

D'où vient l'angoisse? D'une non-maîtrise de l'absolu : l'ignorance (partielle et inévitable) engendre le catastrophisme.

Car il est impossible de prouver l'innocuité de toutes les innovations scientifiques. Qui peut prédire l'effet physiologique éventuel des téléphones portables? La théorie et les observations militent en faveur de leur sécurité, mais nous n'avons pas assez de recul pour évaluer statistiquement ou prouver physiologiquement l'effet des ondes électromagnétiques sur l'ADN et sur les cellules cérébrales. Remarque : si nous craignons les possibles effets du portable, il faut aussi renoncer au sèche-cheveux.

Le principe de précaution ultime n'exprimerait-il pas cette chimère du savoir total?

La nature est dangereuse, mais ses colères sont vécues avec fatalisme. Au contraire, les dangers engendrés par les techniques humaines sont stressants, et le stress, lui aussi, rend malade. Les autruches qui plongent la tête dans le sable pour ignorer les périls inconnus – et souvent inexistantes – vivent peut-être plus vieilles que leurs congénères stressées. Dans l'ignorance, le pire n'est pas certain.

Philippe BOULANGER



BLOC-NOTES

DIDIER NORDON

La bataille du rail

L'écartement entre les rails de chemin de fer est de 1,435 mètre. Pourquoi ce nombre étrange? A cause des Anglais, qui ont inventé le chemin de fer, donc ont imposé l'écartement entre les rails : 4 pieds et 8,5 pouces, soit 1,435 mètre. Mais pourquoi ont-ils choisi cet écartement? Parce que les premières lignes de chemin de fer furent construites sur le modèle des tramways. Mais pourquoi les tramways, etc.? Parce qu'ils reprenaient l'écartement des chariots et des diligences. Mais pourquoi les chariots, etc.? Parce que les routes d'Europe avaient des ornières et qu'un écartement différent aurait causé la rupture des essieux des chariots. Mais pourquoi les ornières, etc.? Parce que l'Empire romain avait standardisé la taille de ses propres chariots. Et pourquoi l'Empire romain avait-il choisi cette norme-là? Parce que c'était elle qui permettait à deux ânes de marcher côte à côte sans se gêner!

Devinez, enfin, la largeur des réservoirs additionnels de la navette spatiale américaine. Réponse : 4 pieds et 8,5 pouces, bien sûr. Pourquoi? Parce qu'ils sont acheminés par train. Ainsi, la largeur de la croupe d'un âne est visible sur le moyen de transport le plus avancé du monde! (D'après B. Eschapasse, *Jeune Afrique/L'Intelligent*, n° 2056.)

Se non è vero, è ben trovato.



L'essence précède l'inexistence

Il y a des livres intéressants et il y en a d'inintéressants. Il y a des livres qui m'intéressent..., il n'en est aucun qui m'inintéresse.

L'absence en français du verbe «inintéresser» est une regrettable lacune. S'il existait, on dirait, par exemple : «Ce livre m'inintéresse prodigieusement.» Autrement dit, il est activement ennuyeux ; il fait des efforts exceptionnels, et réussis, pour ne pas intéresser. La

langue française, défaillante, interdit d'exprimer pareille idée. Une phrase comme : «Ce livre ne m'intéresse prodigieusement pas» est en effet incompréhensible.

Militons donc pour la création du verbe «inintéresser»! Comment faire? Écrivons systématiquement de façon telle que le lecteur ressente le besoin urgent de l'utiliser...



Coincidence culturelle

Pourquoi diable a-t-il fallu que, peu après le peintre français Manet (1832-1883), en naisse un autre, du nom de Monet (1840-1926)? Pour démasquer les faux amateurs de peinture, évidemment. Les vrais n'hésitent pas : la proximité des noms les frappe moins que l'éloignement des styles. Les faux amateurs (c'est-à-dire les mondains qui, pour paraître cultivés, font juste semblant) marquent une seconde d'hésitation et se trahissent : ils connaissent non la peinture, mais les noms qu'on doit connaître.

La preuve de ce que j'avance là, c'est que tous les arts s'ingénient à faire naître quasi simultanément, quasi dans les mêmes pays, des gens portant quasi le même nom. Pourquoi agir de la sorte, sinon pour disposer d'un traquenard contre les faux connaisseurs? Le procédé est habile : pour je ne sais quelle raison psychologique, distinguer deux personnes ayant quasi le même nom est plus difficile qu'en distinguer deux ayant exactement le même (un père et un fils, par exemple). Les mélomanes savent différencier Corelli (1653-1713) de Torelli (1658-1709), Schubert (1797-1828) de Schumann (1810-1856), Schönberg (1874-1951) de Berg (1885-1935) ; ceux qui ne vont au concert que pour se montrer ne savent pas. Il faut être docteur en histoire (au moins!) pour ne pas mélanger les politiciens Daladier (1884-1970) et Ramadier (1888-1961), dont les carrières ont suivi de peu celles des présidents Doumer (1857-1932) et Doumergue

(1863-1937). La physique quantique doit beaucoup à Born (1882-1970) et pas moins à Bohr (1885-1962). Toujours un peu brouillonne, la littérature multiplie les Milner, les Miller, les Mailer. Vicieuses, les mathématiques jouent de l'homonymie parfaite (Schwarz et Schwartz). Le cyclisme a appliqué le même procédé, faisant gagner le Tour de France au Suisse Kubler en 1950 et au Suisse Koblet en 1951.

La surprise vient du célèbre couple Berthollet-Berthelot. Au lieu d'être contemporains, ces chimistes ont vécu, respectivement, de 1748 à 1822 et de 1827 à 1907. Commise par une science aussi précise que la chimie, une erreur de près d'un siècle est étonnante. Mais, au fond, qu'importe, l'opération est quand même réussie : Berthollet et Berthelot, tout le monde les confond. Sauf les chimistes. Et encore.

Une fine alitée

Au secours! Bernardin de Saint-Pierre est de retour! On s'en souvient peut-être, Bernardin de Saint-Pierre a ajouté à sa gloire d'écrivain (*Paul et Virginie!*) la gloire d'une magistrale contribution aux sciences. Grâce à lui, en effet, on sait pourquoi le melon présente des côtes : Dieu l'a voulu ainsi afin qu'on puisse le découper en parts et le manger en famille.

Cette adéquation sublime entre nos désirs et ce qui a été prévu sinon par Dieu du moins par la Nature, un Bernardin de Saint-Pierre des Temps modernes vient de le retrouver dans le corps féminin. «Pourquoi sommes-nous attirés par certaines personnes? Trois facteurs interviennent dans l'éclosion du désir sexuel : l'immunité, la santé et la fécondité. Un visage symétrique est signe d'immunité. Plus les seins sont volumineux, plus le corps possède d'œstrogène. Mais l'œstrogène nuit à l'immunité. Une poitrine généreuse est ainsi le signe d'un corps fécond, mais faible sur le plan immunitaire. En revanche, des seins volumineux et symétriques représentent un corps fécond et fort du point de vue immunitaire. Il en est de même pour le rapport taille/hanches. Le rapport que nous considérons désirable (0,7) est justement celui qui correspond au mélange d'hormones le plus efficace. Cette relation entre l'"efficacité" d'un corps et le désir qu'il provoque est un exemple de réalité biologique.» (Olivier Dyens, *Chair et métal*, VLB éditeur, 2000.)

Les gens sont tellement passionnés de sciences et de mesures qu'ils sont excitables, aussi, par le double décimètre et le cahier d'observations...



TRIBUNE DES LECTEURS

Des dents de reptile

J'ai lu avec beaucoup d'intérêt l'article de Jean-Loup Welcomme, Pierre-Olivier Antoine et Laurent Marivaux sur le rhinocéros géant (voir *Pour la Science*, juillet 2000). Il allie avec brio science et aventure et justifie à nouveau, si besoin en était, la nécessité pour le paléontologue d'être avant tout un homme de terrain.

J'aimerais toutefois faire un commentaire sur la légende de la figure 3, dans laquelle on peut lire : «Au contraire des mammifères et comme tous les reptiles, les crocodiles ont des dents indifférenciées...»

Si dans le cas qui nous intéresse, les auteurs ont tout à fait raison, les cicatrices présentes sur l'os correspondent bien à des traces de dents d'un crocodile, la généralisation est ici malheureuse. De nombreux reptiles fossiles présentent une denture différenciée avec des dents antérieures coniques simples et des dents postérieures (postcanines) complexes présentant plusieurs cuspidés.

On peut citer parmi ceux-ci les exemples de procolophonides du Trias supérieur et le ptérosaure *Eudimorphodon*. De même, certains dinosaures, tel *Heterodontosaurus*, possèdent des dents antérieures et postérieures différenciées.

Ceci est également vrai chez les crocodiles, avec, par exemple, *Malawisuchus* du Crétacé d'Afrique de l'Est (Malawi), décrit en 1997 par Elizabeth Gomani. Chez ce crocodile, les premières dents sont simples et coniques, suivies par des dents de forte taille «caniniformes».

Ensuite viennent des dents comportant de nombreuses cuspidés de tailles variables qui ne sont pas sans rappeler celles de mammifères primitifs.

Attention donc à ne pas tomber dans ce piège encore trop souvent enseigné sur les bancs des Universités : les reptiles, au cours de leur longue histoire, ont souvent développé des dentures différenciées.

Dr Gilles CUNY, Université de Bristol

De Nordon à Pangloss

Étonnant «point de vue» de Didier Nordon, exprimé dans son Bloc-notes (voir *Pour la Science*, juillet 2000). Il y fait l'étrange éloge d'un ouvrage (André Pichot, *La société pure, De Darwin à Hitler*, Flammarion, 2000) qu'il n'est pas possible d'analyser ici en détail, faute de place.

En effet, par l'examen des thèses et des auteurs en cause, il apparaîtrait vite au public que l'enthousiasme de D. Nordon est à relativiser (en particulier au sujet de Darwin

et de Carrel). En revanche, on peut s'interroger sur la pertinence d'une chronique scientifique (c'est-à-dire de la vie des sciences, de leurs acteurs, de leurs commentateurs, etc.) dans laquelle son responsable incite à la lecture d'un livre dont il reconnaît ne pas avoir les compétences pour en juger le contenu conceptuel et théorique...

S'il s'était agi d'un *Traité de géologie du Dévonien*, ce serait surprenant mais pas trop grave. Mais il s'agit d'un essai ouvrant sur des questions idéologiques et socio-politiques de grande ampleur, dont le sous-titre laisse pour le moins pantois (misère des éditeurs et des lois du marketing, dira-t-on). Dans ce cas-ci, c'est non seulement étonnant, mais surtout choquant.

La démarche de D. Nordon est méthodologiquement suspecte (il parle de ce qu'il ignore, certes en l'admettant, et il prend prétexte de récuser des idées reçues pour en accepter d'autres ; or, prendre le contrepied d'une thèse ne garantit pas que la thèse inverse soit exacte) et éthiquement inacceptable (il accrédite ces idées qui, en leur substance, lui échappent, tout en étant prescripteur de ces idées, puisqu'il publie son opinion).

Tout cela est navrant, parce que la «morale de cette histoire» (les rapports de la biologie avec l'eugénisme et le racisme) reste légitime : nous devons, savants-citoyens et citoyens qui cherchent à savoir, prendre garde aux utilisations idéologiques des sciences, comme aux idéologies scientifiques. Dire sur la science, c'est aussi adopter des règles. À moins de se transformer en Pangloss...

Marc SILBERSTEIN

Guillaume LECOINTRE

Muséum national d'histoire naturelle

Réponse de Didier Nordon

Si l'argumentation historique d'André Pichot paraît erronée à Marc Silberstein et Guillaume Lecoindre, qu'ils disent en quoi.

Si c'est son idéologie qui leur déplaît, qu'ils laissent les lecteurs de *Pour la Science* libres de choisir la leur.

Les scientifiques et la guerre

En tant qu'abonné à *Pour la Science*, je tiens à vous remercier pour l'intéressant numéro des *Génies de la Science* sur Bourbaki, mais aussi à vous dire ma consternation en lisant les propos d'André Weil, cités sans aucune critique, concernant les politiques différentes de l'Allemagne et de la France pendant la Première Guerre mon-

diale vis-à-vis de leurs jeunes générations scientifiques.

Ainsi, d'après A. Weil, les Allemands ont sagement cherché à «mettre à l'abri» les jeunes scientifiques, tandis que les Français, «dans un souci mal entendu de l'égalité, ont conduit une politique tout opposée, dont les conséquences désastreuses peuvent se lire par exemple sur le monument aux morts de l'École normale supérieure.»

Les citoyens français sont en effet égaux devant la mort, et l'idée de préserver les élèves normaliens tandis que les autres catégories sociales iraient se faire tuer au front est insupportable.

L'unité de la Nation a pu se payer au prix d'un relatif recul de la science française, mais la conception allemande de l'époque a coûté beaucoup plus cher.

Je souhaite que *Pour la Science* soit à l'avenir plus attentif aux principes d'égalité et de fraternité, fondateurs de la République française.

Xavier RELIQUET, Chambourcy

Réponse de Pour la Science

Le point de vue exprimé par André Weil est fort contestable. Dans une démocratie, la conscription s'applique à tous, et toute discrimination est détestable. Dans une dictature, certains passe-droits ont pu jouer en faveur de scientifiques qui auraient été dispensés de service militaire pour «l'intérêt supérieur de la Nation». Cela, semble-t-il, aurait été le cas en Allemagne lors de la Première Guerre mondiale, où les scientifiques, notamment les mathématiciens, n'auraient pas été envoyés au front.

La rédaction de *Pour la Science* a publié le sentiment d'André Weil, qui plaçait les mathématiciens au-dessus de tout. Elle ne le partage pas.

La rédaction de *Pour la Science*

Avertissement

La rubrique *Jeu-concours* est provisoirement interrompue. La réponse au *Jeu-concours 73* est sur le site Internet de *Pour la Science*.

Ecrivez 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@pouirlascience.fr. Découvrez d'autres contributions de lecteurs sur le site Web www.pouirlascience.com.



La stérilisation

ALAIN GAMI • HENRI LERIDON

La France doit débattre des autorisations de stérilisation, volontaires et forcées.

En France, le statut de la stérilisation est paradoxal : d'une part, le recours à la stérilisation volontaire à but contraceptif est peu fréquent ; d'autre part, des femmes vulnérables subissent fréquemment des stérilisations à leur insu. À quoi est due cette situation ?

Au milieu des années 1960, la croissance de la population mondiale a atteint un maximum de deux pour cent par an : les démographes préoyaient un doublement du nombre d'êtres humains en 35 ans. Puis le taux d'accroissement annuel est retombé à 1,4 pour cent, et il diminue encore régulièrement : la fécondité a diminué plus vite que la mortalité, en raison d'une meilleure diffusion des moyens de régulation des naissances.

Très vite, la méthode la plus répandue a été la stérilisation : au début des années 1990, 135 millions de femmes et 35 millions d'hommes étaient stérilisés dans le monde, soit près de 20 pour cent des couples (mariés) en âge de reproduction. Cette valeur moyenne recouvre en fait une grande disparité de situations : la proportion de couples stérilisés est inférieure à un pour cent dans des pays tels que la France, mais supérieure à 35 pour cent en Corée du Sud, au Brésil, à Porto Rico, dans une demi-douzaine d'états de l'Inde, dans plusieurs provinces chinoises, aux États-Unis, au Canada ou en Australie. La proportion d'hommes stérilisés est variable, atteignant 20 pour cent au Canada.

Si l'accès volontaire à la stérilisation semble garanti dans la plupart des cas, les personnes vulnérables du fait de leur précarité sociale ou de leur dépendance psychologique restent trop souvent les cibles de stérilisations réalisées à leur insu ou sous la contrainte, ou sans consentement réel.

La société est de mieux en mieux informée des abus, telles les stérilisations imposées à des dizaines de milliers de femmes (et, moins souvent, d'hommes) depuis le début du siècle et jusqu'aux années 1960, aux États-Unis et dans plusieurs pays d'Europe du Nord : l'eugénisme intensif pratiqué dans ces pays, ouvertement ou discrètement, voulait empêcher de larges catégories de per-

sonnes de se reproduire et d'avoir une activité sexuelle. En la matière, les pratiques du régime nazi n'ont été que l'aboutissement de recommandations et de programmes déjà répandus dans des pays pourtant « démocratiques ».

Cependant, la vigilance est de rigueur : des stérilisations restent imposées aux hommes et aux femmes d'Inde ou du Pérou. En France, des opérations sont pratiquées abusivement sur des femmes handicapées mentales, à l'initiative des familles et avec l'accord de certains médecins, alors que la stérilisation à des fins contraceptives est réputée interdite (toujours en France). En 1996, le Comité national d'éthique a été saisi de la question, mais aucune solution n'a été donnée. Plus généralement, les conditions du recueil d'un libre consentement sont loin d'être satisfaisantes dans de nombreux pays du monde.

La situation actuelle présente bien des contradictions. Le développement de la pratique des stérilisations dans l'entre-deux guerres n'a pas été encouragé : pourtant la demande de stérilisation volontaire à des fins contraceptives est très forte dans de larges régions du monde depuis des dizaines d'années.

C'est l'eugénisme qui a servi de support idéologique aux pratiques de stérilisations forcées. En France, si les courants de pensée eugéniques étaient importants, ils ont eu moins d'effet, principalement parce que les médecins étaient plus soucieux d'hygiénisme et plus enclins au natalisme que leurs collègues étrangers.

Le succès de la stérilisation contraceptive tient certainement à la simplicité de l'intervention, à son faible coût, à l'absence d'effets secondaires et à son effet certain. La méthode a toutefois l'inconvénient de n'être pas réversible à coup sûr. Elle ne doit donc être proposée qu'à des couples ayant réfléchi aux conséquences de leur décision et sûrs de ne plus souhaiter d'enfant : il faut espérer que les aléas de la vie ne viendront pas modifier le contexte existant au moment de la demande... En revanche, la stérilisation des femmes handicapées mentales est souvent pratiquée dans l'urgence, à l'insu des per-

sonnes, et sape leur développement ainsi que leur insertion future dans la société.

Surtout, le statut juridique de la stérilisation reste flou. Aucun texte ne l'interdit formellement : ceux qui refusent la méthode mettent souvent en avant l'argument de l'interdiction de porter atteinte à l'intégrité corporelle, sauf motif thérapeutique clair, mais les tribunaux n'ont pas eu à se prononcer à ce sujet sur le plan pénal depuis... 1937, et le Conseil national de l'Ordre des médecins, gardien de la bonne conduite médicale, a adopté une position nuancée depuis 1983. Le Conseil de l'Europe a adopté en 1975 une résolution qui stipule que la stérilisation volontaire doit être un acte médical autorisé, résolution votée par la France.

Le cas des personnes handicapées mentales est grave : il n'est pas sain qu'une pratique aussi répandue dans cette population reste juridiquement aussi incertaine.

Il est temps de débattre nationalement de cette question, afin que des couples obtiennent sans difficulté une stérilisation volontaire quand leur projet familial est réalisé : on sait que certaines femmes ne peuvent plus recourir à la contraception hormonale ou au stérilet après un certain âge, et que le nombre des interruptions volontaires de grossesse demandées par des femmes de plus de 35 ans représente 20 pour cent du total (soit environ 40 000 par an). Un tel débat devrait, de toute évidence, reprendre les propositions faites par le Comité national d'éthique il y a quatre ans sur la stérilisation de certaines personnes handicapées, dans des contextes bien précis, afin d'assurer leur protection contre les abus.

Dans les deux cas, il va de soi que la question centrale doit porter sur les conditions du recueil d'un consentement « libre, éclairé et exprès » de la part de toutes les personnes concernées.

Alain GAMI est psychosociologue à l'INSERM (U292). Henri LERIDON est démographe à l'INED. Ils ont coordonné un ouvrage intitulé *Les enjeux de la stérilisation* (Éditions INSERM / INED, 2000).

■ POUR LA SCIENCE

VOTRE ABONNEMENT 100 % NUMÉRIQUE

1 an au prix de 48 €

soit **4 € seulement par numéro** au lieu de ~~5,20 €~~

Pour consulter et télécharger
en toute liberté sur www.pourlascience.fr
les 12 prochains numéros
dès leur parution.



Oui, je m'abonne
à *Pour la Science* 100 % numérique
1 an (12 numéros) pour 48 €

Je préfère découvrir toutes
les offres d'abonnement disponibles
en cliquant ici.



La découverte des rayons gamma

LEIF GERWARD • ANDRÉ RASSAT

A la fin du XIX^e siècle, le chimiste Paul Villard s'intéresse aux rayons cathodiques, puis à la radioactivité. Lors de ses expériences sur le rayonnement du radium, il découvre les rayons gamma, mais sa découverte n'est pas reconnue.

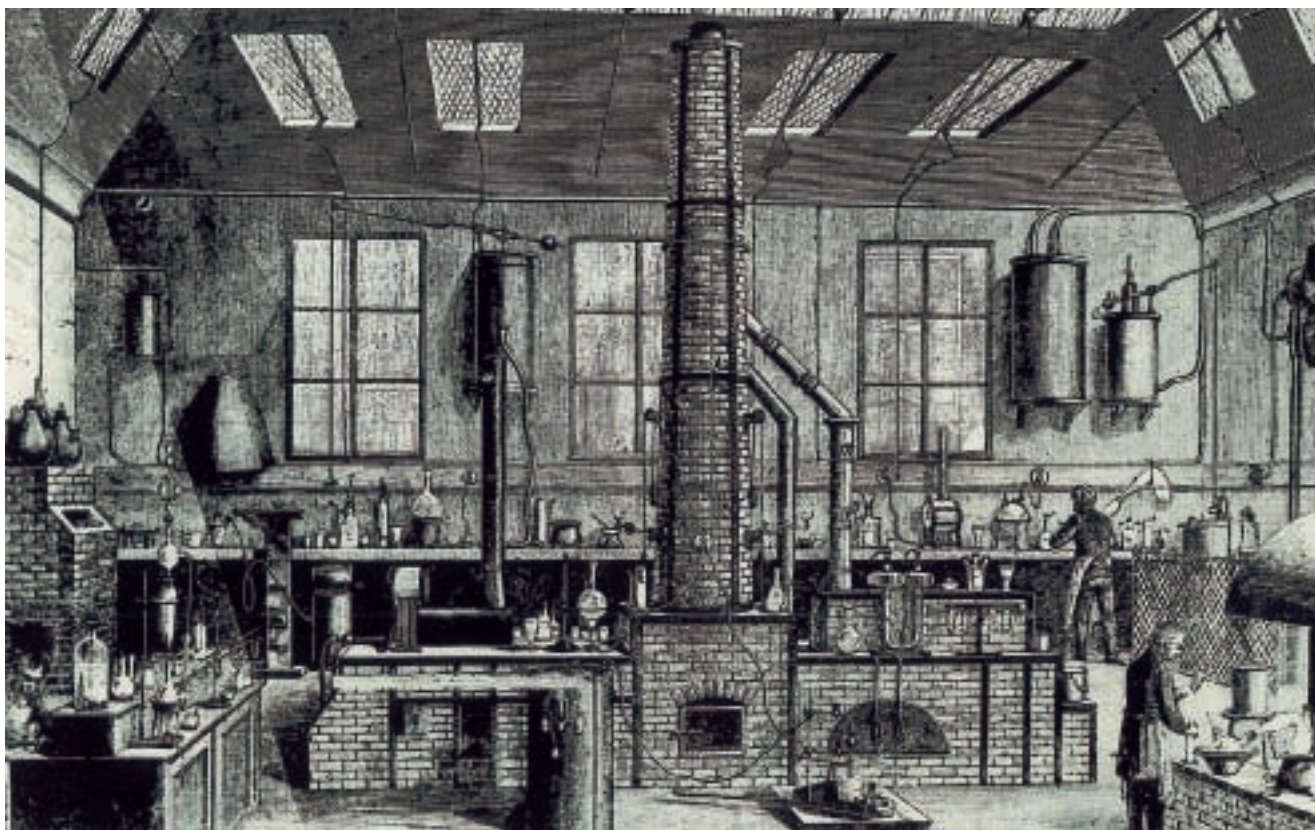
A l'époque où Paul Villard commence ses travaux sur les rayons cathodiques, la physique et la chimie des rayonnements sont en plein essor : en 1895, Wilhelm Röntgen réalise la première radiographie aux rayons X. Peu après, Henri Becquerel découvre la radioactivité et Joseph Thomson prouve l'existence des électrons. Marie et Pierre Curie trouvent deux nouveaux éléments radioactifs, le polonium et le radium. C'est alors que Villard observe un nouveau type de rayons extrêmement pénétrants, les rayons gamma. Hélas, la personnalité de Villard et une

certaine apathie de la communauté des physiciens font que cette découverte restera inaperçue et que le nom de Villard ne passera pas à la postérité. C'est une injustice.

Villard naît à Lyon en 1860. En 1881, il entre à l'École normale supérieure, à Paris, où il étudie les sciences physiques. En 1884, il est reçu à l'agrégation et part en province, où il enseigne dans plusieurs lycées. Avec l'appui de Marcelin Berthelot, il entre à la faculté des sciences de Montpellier. Cependant, ses fonctions de chargé de conférence lui laissent trop peu de temps pour ses activités de recherche.

En 1892, il démissionne afin de rejoindre le laboratoire de chimie de l'École normale supérieure. Il n'y occupe pas de poste officiel et subvient à ses besoins grâce à la modeste fortune qu'il a reçue en héritage. En 1904, Robert Lespieau, directeur du laboratoire de chimie de l'École normale supérieure, lui attribue une petite pièce où il installe son laboratoire et où il travaillera pratiquement jusqu'à la fin de ses jours.

Villard mène ses recherches de façon indépendante : il signe seul la plupart de ses articles et se soucie peu de sa renommée. Cependant, l'Académie



1. Le laboratoire de chimie de l'École normale supérieure en 1870.



2. Le laboratoire de chimie de l'École normale supérieure en 1895. Villard est probablement au premier plan, en train de travailler sur le banc. Comparée à la gravure de la figure 1, cette photographie montre le développement rapide de la chimie en une science moderne, à la fin du XIX^e siècle.

des sciences récompense ses travaux par plusieurs prix et l'accueille en son sein en 1908.

Les premiers travaux de Villard portent sur les hydrates cristallisés, qui se forment sous pression par la combinaison de molécules d'eau et de divers gaz. Il reprend d'abord les expériences de Berthelot, puis produit bientôt ses propres hydrates, sur lesquels il rédige sa thèse de doctorat. En 1896, il réussit à combiner de l'eau avec de l'argon, découvert deux ans auparavant par Walter Rayleigh et William Ramsay, et prétendu «inerte».

BEQUEREL, LES CURIE ET LA RADIOACTIVITÉ

À partir de 1897, Villard possède un tube de Crookes qu'il a fait fabriquer par l'excellent souffleur de verre de l'École normale supérieure, qu'il a formé lui-même. L'instrument produit des rayons cathodiques : le tube renferme un gaz raréfié et deux électrodes. On sait aujourd'hui que la tension appliquée entre ses dernières arrache des électrons à la cathode. Ceux-ci sont accélérés vers l'anode par le champ électrique qui règne à l'intérieur du tube et ionisent le gaz qu'il contient sur leur passage. Lorsque les électrons heur-

tent l'anode, le choc produit des rayons X. À l'époque où Villard commence à étudier les rayons cathodiques et les rayons X avec son nouveau tube de Crookes, on ne connaît pas encore leur nature.

En 1896, Becquerel découvre la radioactivité de l'uranium : cet élément émet spontanément des rayons invisibles, capables d'impressionner une plaque photographique protégée par une feuille de papier noir. En 1897, Thomson démontre l'existence d'un corpuscule chargé négativement (le terme électron, inventé en 1891, désigne alors l'unité de l'électricité et non pas la particule). En 1898 Pierre et Marie Curie découvrent le polonium et le radium, qui permet aux scientifiques de mieux comprendre la radioactivité, car son activité est plus d'un million de fois supérieure à celle de l'uranium. En 1899, Thomson mesure la charge de l'électron et en déduit la masse. La même année, Ernest Rutherford montre que les rayons de l'uranium ionisent les gaz, comme les rayons cathodiques et les rayons X. Il distingue les rayons alpha des rayons bêta, plus pénétrants. Becquerel montre qu'un champ magnétique dévie les rayons bêta, ce en quoi ils ressemblent aux rayons cathodiques. En 1900, les travaux de Becquerel et des Curie montrent que les deux types de rayons sont de même nature (ce

sont des électrons) à la différence près que les rayons bêta se déplacent bien plus vite que les rayons cathodiques.

Ainsi, à l'époque de Villard, de nombreux scientifiques s'intéressent aux rayonnements et à la radioactivité. Rutherford écrira d'ailleurs à sa mère : «Je dois publier mes travaux le plus rapidement possible, si je veux rester dans la course. Ces dernières années, Becquerel et les Curie, à Paris, ont déjà obtenu de nombreux résultats de première importance sur la radioactivité.»

Villard étudie l'action chimique des rayons cathodiques. Il remarque leur pouvoir réducteur : une plaque de cuivre oxydée retrouve son éclat lorsqu'il l'expose à ces rayons. En 1900, malgré les travaux antérieurs de Thomson, il conclut que l'hydrogène est le constituant des rayons cathodiques : «Or l'hydrogène est le seul gaz réducteur connu [...]. En attendant qu'un autre gaz simple réducteur soit découvert, on peut considérer comme acceptable l'hypothèse que l'hydrogène constitue la matière radiante.» Malheureusement, Villard est sur la mauvaise piste et son hypothèse ne retient pas l'attention de la communauté scientifique, qui considère Thomson comme l'autorité en la matière. Plus tard, Villard changera d'avis et deviendra l'un des plus fervents défenseurs de la théorie des électrons.

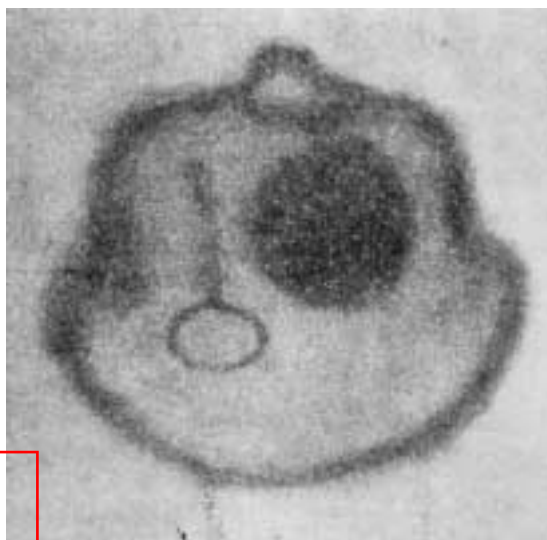
VILLARD ET L'ACTION CHIMIQUE DES RAYONS

Villard étudie l'action chimique des rayons X, notamment la coloration du verre, qu'il interprète comme une oxydation (on sait aujourd'hui qu'elle est due à la création de défauts, nommés centres colorés, par les rayons X). Quand Pierre et Marie Curie annoncent une action chimique similaire du rayonnement émis par le radium, en 1899, Villard subodore l'existence d'une relation entre les deux types de rayons.

Il s'intéresse alors à la radioactivité et notamment aux rayons bêta, déviés sous l'action d'un champ magnétique. Il mesure leur réfraction, en utilisant une feuille d'aluminium, qui intercepte le faisceau émis par un sel faiblement radioactif. Une plaque photographique montre qu'une partie du demi-faisceau a subi une réfraction accompagnée d'une forte dispersion, tandis que l'autre partie, non réfractée, s'est propagée en ligne droite. Il essaye en vain de dévier cette dernière à l'aide d'un champ magnétique.

Ces nouveaux rayons sont suffisamment pénétrants pour impressionner une plaque photographique protégée par plusieurs couches de papier noir et par une feuille d'aluminium. Ils traversent une feuille de plomb de 0,2 millimètre d'épaisseur. Le 9 avril 1900, Villard présente ses résultats à l'Académie des sciences, dans un article intitulé *Sur la réflexion et la réfraction des rayons cathodiques et des rayons déviables du radium* et conclut que : «Les faits précédents conduisent à admettre que la partie non déviable de l'émission du radium contient des radiations très pénétrantes, capables de traverser des lames métalliques, radiations que la méthode photographique permet de déceler.»

Poursuivant ses expériences sur du radium, Villard compare le pouvoir pénétrant des rayons bêta et des nouveaux rayons. Ceux-ci, canalisés par un sillon creusé dans un bloc de plomb, impressionnent deux plaques photographiques placées l'une derrière l'autre. La première présente la trace de deux faisceaux, dont l'un (les rayons bêta) a été dévié et élargi par le champ magnétique appliqué, tandis que l'autre s'est propagé en ligne droite et ne s'est pas élargi. Sur la seconde plaque, on n'observe que la trace du faisceau non dévié, aussi petite et nette que sur la première plaque. Villard s'aperçoit que le faisceau non dévié peut traverser une plaque de verre d'un centimètre d'épaisseur sans atténuation notable. Le 30 avril 1900, il présente



3. La première radiographie gamma, réalisée par Marie Curie en 1904, montre un porte-monnaie, ainsi que la pièce de monnaie et la clé qu'il contenait.

ces résultats, identifiant les nouveaux rayons aux rayons X : «Ainsi les rayons X émis par le radium ont une puissance de pénétration beaucoup plus considérable que les rayons déviables : c'est l'analogue de ce qui a lieu avec les tubes de Crookes» (c'est-à-dire l'émission de rayons X). Le 19 mai 1900, il déclare encore : «L'auteur pense qu'il s'agit de véritables rayons X.»

La découverte de Villard passe inaperçue. Becquerel refait l'expérience décrite par son confrère et nie la présence de rayons pénétrants : «L'existence de ces rayons n'aurait pu échapper aux expériences de Monsieur et Madame Curie ou aux miennes.» Becquerel doit bientôt admettre l'existence des nouveaux rayons : «Le rayonnement des corps radioactifs comprend deux groupes distincts : l'un, qui consiste en rayons cathodiques, est déviable par un champ magnétique et par un champ électrique ; l'autre, dont la nature est inconnue jusqu'ici, n'est pas déviable et paraît comprendre des rayons ayant des puissances diverses de pénétration au travers des métaux et des corps opaques pour la lumière.» Pour Becquerel, seuls deux types de rayons existent. Dans un article de synthèse paru dans *Nature* en 1901, Becquerel mentionne la découverte de Villard de manière très succincte : «Récemment, Monsieur Villard a prouvé l'existence de rayons du radium très pénétrants et non déviables.»

L'absence de nom pour les nouveaux rayons, pendant les trois années qui suivent leur découverte, est révélatrice du peu d'intérêt qu'ils suscitent (c'est Rutherford et non Villard, qui met en place les notations alpha, bêta et gamma pour les rayons du radium en 1903). Les physiciens, qui ne comprennent pas la nature

des nouveaux rayons, en acceptent difficilement l'existence. En 1903, Rutherford et Frederick Soddy remarquent que le radium «émet aussi des rayons très pénétrants, mais qui n'ont pas été étudiés en détail [...]». Ces rayons n'ont pas été suffisamment examinés pour que l'on puisse discuter du rôle qu'ils tiennent dans les processus radioactifs. En 1904, Marie Curie présente une radiographie gamma dans sa thèse, montrant ainsi une application possible de la découverte de Villard. En éliminant les rayons bêta à l'aide d'un aimant, elle obtient une image plus nette, mais les temps d'exposition nécessaires sont plus long qu'avec les rayons X pour un contraste moindre.

La découverte de Villard dérange parce qu'elle va à l'encontre des connaissances de l'époque sur la physique et la chimie des rayonnements. Après les travaux de Thomson sur l'électron, les scientifiques ont tendance à supposer que les éléments radioactifs libèrent des particules matérielles. Cette conception s'appliquait aux rayons cathodiques, aux rayons alpha et bêta, mais pas aux rayons gamma. Plus tard, Rutherford et Soddy assimilent les rayons gamma à des rayons X très pénétrants émis par les atomes radioactifs en même temps que les rayons bêta. En 1912, Max Laue établit que les rayons X sont indubitablement des ondes électromagnétiques (ce que Stokes avait suggéré en 1898), en montrant leur diffraction par un cristal. Quelques mois plus tard, Rutherford s'aperçoit que les rayons gamma sont de même nature.

Après la publication de ces deux articles sur les rayons gamma, en 1900, Villard abandonne le sujet. Est-il déçu par le peu d'intérêt que suscite sa découverte ? Quoi qu'il en soit, il se consacre à l'étude des rayons cathodiques et des rayons X, construisant lui-même tous ses appareils de mesure. Notamment, il invente le radioscléromètre, pour déterminer la quantité de rayons X émis dans un tube cathodique. L'intérêt de cet instrument est reconnu 20 ans plus tard, quand le roentgen (ancienne unité d'exposition aux radiations) est adopté. Aujourd'hui, le nom de Villard a quasiment disparu des livres de sciences et d'histoire, malgré l'importante contribution de cet homme à la science des radiations.

Leif GERWARD est professeur de physique à l'Université technique du Danemark. André RASSAT est professeur de chimie à l'École normale supérieure de Paris.



Ordres de grandeur

HERVÉ THIS

Les systèmes dispersés permettent d'obtenir beaucoup avec peu.

Le cuisinier qui fait des flans cherche souvent, pour des raisons économiques ou diététiques, à limiter la proportion d'œuf ou, ce qui revient au même, à augmenter la proportion d'eau. Jusqu'où peut-il aller ? Bien au-delà de ce que la cuisine fait classiquement.

Pour examiner ce problème, commençons par analyser deux cas voisins : combien de mayonnaise peut-on faire à partir d'un seul jaune d'œuf ? combien de blanc en neige obtient-on à partir d'un seul blanc ?

Les livres de cuisine indiquent souvent qu'un jaune d'œuf permet d'obtenir un grand bol de mayonnaise ; or, la compréhension de la physico-chimie de la mayonnaise conduit à la confection de plusieurs litres de sauce. Comment ? La mayonnaise est une dispersion de gouttelettes d'huile dans l'eau, chaque goutte étant entourée de molécules dites « tensioactives », dont une partie se dissout dans l'eau et l'autre pas. La quantité de molécules tensioactives du jaune d'œuf (environ cinq grammes) est suffisante pour couvrir un terrain de football d'une couche monomoléculaire. Aussi, quand ces molécules couvrent des gouttelettes d'huile dont le rayon moyen est de l'ordre du micromètre, ou millionième de millimètre, elles suffisent à stabiliser jusqu'à 25 litres de mayonnaise.

Pourquoi alors les mayonnaises classiques « tournent-elles » quand on y met trop d'huile, conformément à l'observation culinaire ? Parce qu'elles manquent d'eau, où les gouttelettes d'huile se dispersent. La vérification expérimentale est simple... mais elle gâche de l'huile ; faites plutôt un grand bol de mayonnaise à partir d'une seule goutte de jaune d'œuf (qui apporte le tensioactif) dissoute dans une cuillerée d'eau (ou de vinaigre, si vous souhaitez déguster votre préparation).

Passons au blanc d'œuf battu en neige. Formellement, il est analogue à la mayonnaise, mais l'huile (insoluble dans l'eau) est remplacée par l'air (bien peu soluble dans l'eau), et les molécules tensioactives, qui « isolent l'air », sont les protéines, qui constituent dix pour cent

du blanc. Le système obtenu n'est plus une émulsion, mais une mousse. D'où la question : combien de blanc en neige obtient-on à partir d'un seul blanc d'œuf ? Là encore, le calcul d'ordres de grandeur est simple : on commence par chercher le nombre de molécules de protéines présentes dans le blanc ; puis on détermine la surface totale que peuvent occuper ces protéines, et l'on détermine ensuite le nombre de bulles d'air qui peuvent être recouvertes par ces protéines ; en multipliant ce nombre par le volume d'une bulle, on obtient le volume maximal de blanc en neige accessible, à partir d'un seul blanc d'œuf : plusieurs litres, voire plusieurs mètres cubes, selon les hypothèses que vous choisirez pour la taille des bulles et le type de recouvrement des bulles par les protéines.

Pourquoi, alors, n'obtient-on généralement qu'un petit décimètre cube de mousse ? Puisque l'air ne manque pas,



Les deux répartitions extrêmes des protéines que l'on cuit en présence d'eau.

c'est l'eau qui fait défaut. Vérification expérimentale : à du blanc d'œuf, ajoutons de l'eau et fouettons ; le volume de mousse augmente et un battage assidu procure plusieurs litres de blanc en neige... moins stable toutefois qu'un blanc en neige classique : la stabilité de la mousse dépend en effet de la viscosité de la phase liquide (elle est réduite par l'ajout d'eau) et de la taille de bulles (qui détermine le jeu des forces capillaires,

entre les bulles).

Les émulsions et les mousses sont des systèmes dispersés. D'où l'idée : d'autres systèmes dispersés présents en cuisine auraient-ils le même comportement ? Culinairement la question se pose quand on réalise une quiche : sur de la pâte placée dans un moule, on ajoute des lardons et un mélange d'œufs et de lait. Toutefois le cuisinier qui hésite à surcharger ses plats ou à consommer des œufs qui lui semblent plus coûteux que le lait augmente parfois tant la quantité de ce dernier que la quiche reste liquide, à la cuisson. D'où la question : combien d'eau (le lait, c'est de l'eau, en première approximation) peut-on ajouter à un œuf afin d'obtenir ce qui est l'équivalent d'un flan ?

Supposons que les protéines qui assurent la coagulation soient des sphères. Lors de la coagulation, elles peuvent : soit se grouper de façon compacte, et aucune eau n'est incluse ; soit se disposer, adjacentes, selon les arêtes d'un très gros cube, et inclure un volume maximal d'eau ; soit enfin se répartir sur les arêtes d'un réseau que, pour la simplicité du calcul, on considérera comme cubique.

Dans le premier cas, le volume d'eau inclus est nul. Dans le deuxième cas, un calcul simple montre que le volume serait d'un trop grand nombre de mètres cubes pour être admissible. Considérons donc un cas intermédiaire, fondé sur l'observation d'un œuf sur le plat au microscope à force atomique. Cette fois, un calcul d'ordres de grandeur conduit à un volume de flan (ce que la physico-chimie nomme un gel) égal à un litre.

Pour vérifier ce calcul, partons d'un œuf et ajoutons-lui son volume en eau, puis cuissons. Ayant obtenu un flan, refaisons l'expérience en augmentant progressivement la quantité d'eau : deux volumes, trois volumes... On découvre ainsi que l'on fait « gélifier » jusqu'à plus de 0,7 litre d'eau avec un seul œuf, ce qui est du même ordre de grandeur que ce que prévoyait le calcul.

D'autres idées ? La gamme des systèmes dispersés est vaste : nous avons exploré le liquide dispersé dans un liquide, le gaz dispersé dans un liquide, le solide dispersé dans un liquide, mais il reste toutes les autres combinaisons.

La prévision des incendies de forêt

Le déclenchement et l'intensité des incendies de forêts dépendent de la teneur en ozone de l'atmosphère.

Aux mois de juillet et d'août 2000, des incendies gigantesques ravagent les forêts de l'Ouest américain. Ces feux sont si puissants que, selon les pompiers américains, seules les premières neiges pourront en venir à bout. Cet été, un quart du parc naturel de Cap de Creus, en Catalogne, a été détruit par les flammes. Chaque été revient avec son cortège de sinistres, et chaque année se pose la question de leur inéluctabilité. Peut-on en limiter les conséquences? Peut-on les prévoir?

Les incendies sont, en grande partie, allumés par la foudre dans les régions peu peuplées comme le Canada, et majoritairement par l'homme dans nos régions méditerranéennes. Quelles que soient leurs causes, leur fréquence et leur intensité dépendent de l'état du couvert végétal. Depuis quelques années, on connaît le rôle de la composition du feuillage, et celui du rayonnement ultraviolet dans leur sur-

nue. En modélisant les fréquences des incendies selon la qualité de la végétation, la météorologie et l'activité du Soleil, notre équipe a identifié pour la première fois un facteur météorologique déterminant dans la prévision à court terme des grands feux : la quantité d'ozone dans l'atmosphère.

Le rythme saisonnier des feux dépend de la composition du feuillage et de sa variation pendant la saison. Ainsi, les résineux ne perdent pas leurs aiguilles chaque année, et celles qui datent de l'année précédente, plus sèches et plus facilement inflammables, sont propices au déclenchement des incendies. En revanche, les feuilles des feuillus sont favorables simultanément au déclenchement et à la propagation du feu, car leur combustion produit plus de gaz. Des expériences récentes effectuées sur des rameaux de Pin d'Alep, très présents dans le bassin méditerranéen, ont montré qu'après une semaine d'exposition à un rayonnement ultraviolet, la sensibilité au feu des aiguilles augmente, tant au niveau de leur inflammation qu'à celui de la durée de la flamme.

Quand on élimine l'effet de ces paramètres saisonniers, deux facteurs environnementaux dominent : l'activité solaire et la quantité d'ozone atmosphérique. Notre modèle montre que les fréquences des feux et les superficies brûlées sont toutes deux fortement corrélées à l'ac-

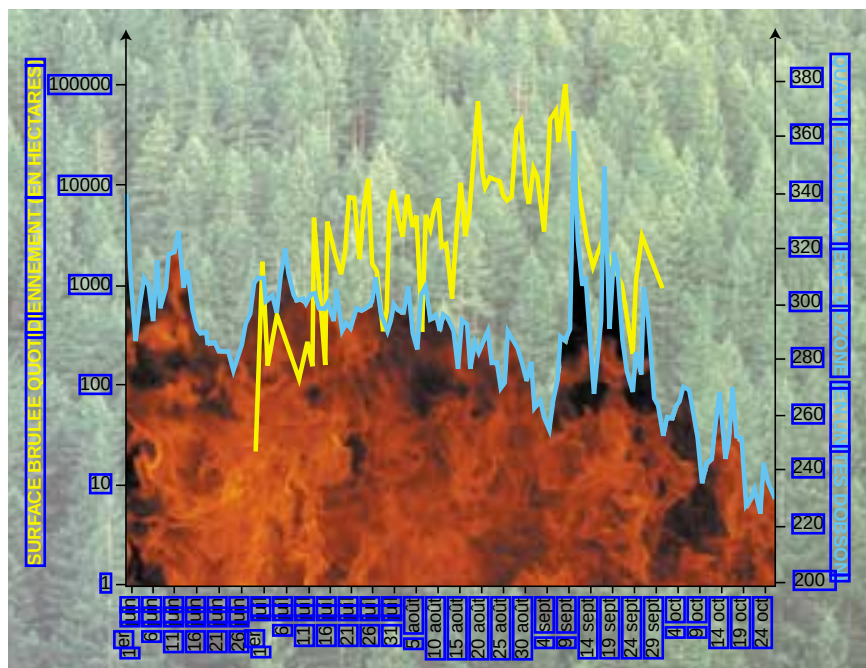
tivité solaire, cette activité déterminant l'intensité du rayonnement ultraviolet qui arrive au sol, elle-même liée à la quantité d'ozone dans l'atmosphère. La physique des interactions entre le rayonnement ultraviolet et l'ozone est compliquée parce que non linéaire : les ultraviolets participent à la production de l'ozone dans la haute atmosphère et sont absorbés dans l'atmosphère par l'ozone.

Ainsi, la quantité et la gravité des incendies dépendent de l'activité solaire et de la quantité d'ozone atmosphérique. Les données statistiques sont-elles en accord avec cette hypothèse? Oui! Nous l'avons vérifié, d'une part, à partir des chronologies de feux du parc américain Yellowstone, qui sont rigoureusement tenues depuis le début du xx^e siècle, d'autre part, à partir des estimations de l'intensité des feux établies depuis 1700 par des analyses des cernes concentriques des arbres dans une partie du parc. Par exemple, on constate une absence de grands incendies entre 1647 et 1737, soit à la fin de la «petite période glaciaire» (les périodes glaciaires sont déterminées par les variations d'ensoleillement dues aux modifications de la trajectoire et de l'inclinaison de la Terre).

Notre modèle est aussi utile pour la prévision à court terme des grands incendies. Nous avons rapproché les statistiques journalières de l'ozone stratosphérique de celles des feux : ces derniers se produisent souvent après une chute importante de la quantité d'ozone en quelques jours. Par exemple, en 1988, à Yellowstone, 395 000 hectares ont brûlé entre le 30 juin et le 1^{er} octobre : la figure montre les variations d'aires brûlées quotidiennement en fonction des quantités d'ozone mesurées par le satellite TOMS. En outre, ces phénomènes ont été observés en région méditerranéenne française, lors des années de grands feux (1985, 1986 et 1990) et, plus récemment, lors des incendies américains et de l'Est méditerranéen pendant l'été 2000.

Bien entendu, ces «événements» climatiques sont à replacer, en ce qui concerne leur gravité, selon leur position dans le cycle solaire où ils se produisent et également à plus long terme, en fonction de l'évolution du climat. Aujourd'hui, l'activité solaire est maximale et les variations de la quantité d'ozone dans l'atmosphère sont spectaculaires : les autorités concernées doivent rester vigilantes.

Michel BERNARD,
Université d'Aix-Marseille.



Les statistiques journalières des aires brûlées (en jaune, du 30 juin au 1^{er} octobre) et des quantités d'ozone atmosphériques (en bleu, du 1^{er} juin au 25 octobre) montrent la relation qui lie ces deux paramètres : lorsque la quantité d'ozone chute, la surface brûlée augmente.

Miroirs et ondes gravitationnelles

La détection des ondes gravitationnelles par le système Virgo nécessite des miroirs aux performances inégales.

Avec le système *Virgo*, en construction près de Pise, le CNRS et l'Institut national de physique nucléaire italien (INFN) veulent détecter directement des ondes gravitationnelles sur la Terre, par une méthode d'interférométrie optique : la lumière d'un laser sera divisée en faisceaux, qui parcourront trois kilomètres avant d'interférer. Le passage d'une onde gravitationnelle conduira à une variation apparente de la longueur des bras de 10^{-18} mètre. Le système ne détectera les modifications résultantes des figures d'interférence que si ses performances optiques sont exceptionnelles.

Ainsi les miroirs de *Virgo* sont des blocs de silice polie, à faces parallèles, avec une couche antireflet sur une face et une couche réfléchissante sur l'autre face. Lorsqu'un faisceau lumineux rencontre un tel miroir, une partie de son énergie est perdue pour l'expérience : elle est soit absorbée, soit diffusée à de grands angles en raison de défauts présents dans la structure du miroir. Pour détecter les ondes gravitationnelles, les pertes totales devront être inférieures à quelques parties par million. Aussi a-t-on dû mettre au point de nouvelles méthodes de fabrication de composants, ainsi que des systèmes de mesure pour les caractériser.

L'idée constante des opticiens du Service des matériaux avancés (SMA) de l'Institut de physique nucléaire de Lyon a été : «Si on peut détecter un défaut, on peut l'éliminer». D'où la participation du Laboratoire de spectroscopie en lumière polarisée de l'École supérieure de physique

et de chimie de Paris, qui construit, depuis près de dix ans, des détecteurs de défauts dans les systèmes optiques. Les deux équipes ont utilisé une stratégie où la métrologie optique n'est plus le dernier maillon de la chaîne de fabrication, mais fait partie intégrante de la fabrication.

Ainsi l'absorption dans les blocs de silice et dans les revêtements a été détectée par effet mirage, le même qui fait apparaître des reflets sur les routes ensoleillées : la lumière chauffe le sol, et l'air qui s'échauffe alors par contact a un indice de réfraction diminué, de sorte que la lumière provenant des objets éloignés est déviée vers le haut quand elle traverse cette zone. Dans les blocs de silice que l'on teste, de même, on focalise un laser à l'intérieur du miroir, afin de chauffer le matériau, de sorte qu'un second faisceau laser qui traverse la région chauffée est dévié d'une quantité que l'on mesure avec une grande précision. On suit ainsi les variations de l'absorption dans le miroir.

En testant ainsi de petits blocs de silice produits par la Société allemande *Heradeus*, les physiiciens français ont participé à la détermination des méthodes de fabrication optimales. Puis le même travail a été fait pour les revêtements, déposés par le SMA (par pulvérisation, à l'aide de faisceaux d'ions, de pentoxyde de tantale). On a ainsi obtenu de la silice synthétique dont le coefficient d'absorption, à la longueur d'onde du laser de *Virgo*, est passé sous la barrière symbolique d'une partie par million par centimètre. Bientôt le SMA construira des miroirs de grandes dimensions dont les pertes totales seront inférieures à cinq parties par million et dont l'amplitude des défauts géométriques de surface sera contrôlée à mieux que deux nanomètres près (le miroir du télescope spatial *Hubble* a des défauts de surface 50 fois supérieurs). Le grand moment de la détection d'ondes gravitationnelles approche.

Vincent LORIETTE, ESPCI, Paris

BRÈVES

Le parachute de Léonard vole

Léonard de Vinci aurait pu sauter du haut de la tour de Pise. Le génie visionnaire de la Renaissance avait dessiné un parachute en forme de pyramide, mais les spécialistes croyaient ce système incapable d'un vol stable. Prenant un risque calculé, le champion de parachutisme Adrian Nicholas vient de démontrer le contraire : sautant d'une montgolfière, toile déployée, il a mis cinq minutes pour passer d'une altitude de 3500 mètres à une altitude de 500 mètres d'altitude, freiné uniquement par sa pyramide de toile. Craignant d'être assommé à l'atterrissage par les 85 kilogrammes de bois et de toile du système de Léonard, il l'a largué en vol et a terminé sa descente à l'aide d'un parachute moderne.

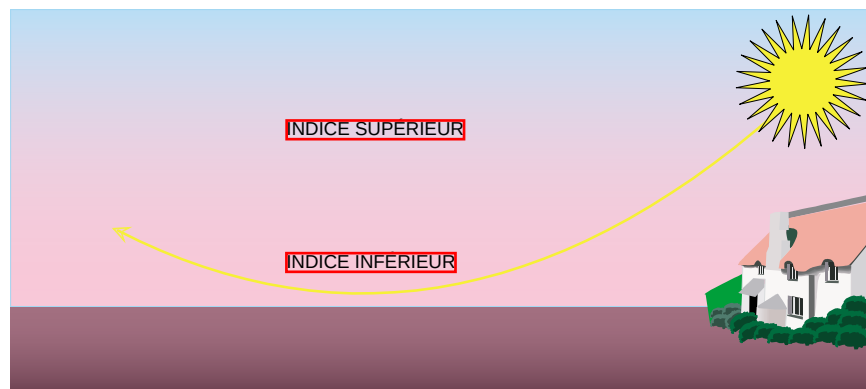


Toute une vie sans sexe

Scandale de l'évolution! Depuis 35 millions d'années au moins, les organismes multicellulaires *Bdelloidea* se passent de rapports sexuels. Manifestement, cette sous-espèce du groupe des rotifères a pourtant su maintenir sa diversité génétique. Comment? À Harvard, David Mark Welch et Mathew Meselson ont étudié la question en comparant leurs gènes à ceux d'autres rotifères. Alors que, dans les espèces sexuées, les deux brins d'ADN sont parfaitement identiques, ils sont au contraire fortement différenciés chez les *Bdelloidea*. Comment est-ce possible? La question reste sans réponse à ce jour.

Les moines et la syphilis

On a longtemps prétendu que la syphilis était arrivée en Europe en 1492, rapportée du Nouveau Monde par l'équipage de Christophe Colomb. Des archéologues de l'Université de Bradford ont analysé les squelettes médiévaux enterrés au monastère de Hull : ils présentent des lésions caractéristiques de la syphilis. Le plus atteint appartenait à un homme qui semble être un moine, mort entre 1300 et 1450, d'après la datation au carbone 14. La découverte de ces squelettes enlève les derniers doutes quant à la présence de la maladie en Angleterre au Moyen Âge.



Un rayon lumineux est dévié par effet mirage quand il se propage dans des zones dont l'indice optique varie.

L'action échappe à l'intention

Nous ne contrôlons pas toujours les mouvements rapides de notre main. À l'INSERM, Yves Rosseti et ses collègues ont demandé à des sujets de pointer du doigt une cible sur un écran d'ordinateur, mais d'arrêter leur geste si la cible sautait avant qu'ils ne l'aient touchée : des mouvements irrépressibles de la main sont apparus, amenant les sujets à pointer vers la deuxième position de la cible. Les chercheurs ont localisé le réseau de neurones **responsable de** ces mouvements, grâce à une patiente dont la région pariétale du cerveau avait été endommagée lors d'un accident vasculaire : ses mouvements étaient toujours délibérés. Ainsi, en cas d'urgence, un réseau de neurone situé dans l'aire pariétale prend de vitesse les circuits de l'action volontaire.

Bouées climatiques

Comment évoluera le climat? Quelle est l'influence de l'océan sur celui-ci? Les océanologues de l'*Ifremer* étudient cette question à l'aide de flotteurs dérivants qu'ils libèrent aujourd'hui dans les divers océans du Globe ; ils en lâcheront 3000 d'ici 2003. Placés dans les courants principaux qui les répartissent, ces flotteurs mesurent la température et la salinité de l'eau, de la surface jusqu'à 2 000 mètres de profondeur, et envoient leur données via un satellite *Argos* : ils flottent pendant une heure, coulent à 2 000 mètres pendant 10 jours, puis remontent. On espère ainsi comprendre et anticiper le refroidissement qui guette l'Europe du Nord et l'assèchement qui menace l'Europe du Sud.

La couleur des toxiques

Comment détecter les produits chimiques toxiques? En «regardant» leur odeur : une équipe de chimistes américains a mis au point un indicateur composé de petites zones qui prennent une couleur vive quand elles sont exposées à des vapeurs organiques. Chaque zone comprend des molécules qui se colorent quand elles réagissent avec des composés spécifiques. De ce fait, les diverses vapeurs organiques «allument» des zones colorées spécifiques, et sont révélées par une empreinte particulière. Les couleurs s'intensifient avec la concentration. Résistants à l'eau, de lecture claire, ces indicateurs seront faciles à utiliser.

Vibrer d'amour

Les punaises vertes utilisent des signaux acoustiques et des signaux chimiques pour attirer leurs partenaires sexuels.

Perdu dans une immense forêt, vous cherchez votre guide, mais la densité des arbres vous empêche de voir à plus de quelques mètres. Que faire? Vous hurlez le nom du guide en espérant que celui-ci vous entende et vous localise. En collaboration avec l'équipe d'Andrej Cokl, de l'Institut slovène de biologie, nous avons démontré que la punaise verte *Nezara viridula* cherche ses partenaires sexuels de la même façon : à l'aide de signaux acoustiques.

La punaise verte vit sur des plantes qui atteignent plus d'un mètre de haut, tels le maïs, le soja ou le coton. Dans cet environnement où la vue est limitée, l'insecte doit utiliser des moyens de communication plus adaptés.

Les insectes n'utilisent généralement qu'un seul système de communication : soit des signaux chimiques (les phéromones), tels ceux qui sont émis par les papillons de nuit ; soit des signaux acoustiques, dont le chant des cigales est un

bel exemple. Toutefois, la rencontre des punaises vertes met en jeu à la fois des signaux chimiques émis par les mâles, et des signaux acoustiques émis par les deux sexes et transmis par la plante.

Les phéromones émises par un mâle agissent à grande distance et attirent les femelles sur la plante sur laquelle le mâle est posé. La femelle signale alors sa présence en faisant vibrer le végétal. Ces vibrations résultent des contractions musculaires de l'abdomen à la fréquence de résonance de ce dernier (ce phénomène de résonance a causé l'effondrement de ponts : aussi les soldats rompent le pas quand ils franchissent les ponts) : ces vibrations font alors vibrer le thorax, puis les pattes et enfin la plante. Les signaux des femelles sont des pulsations durant 0,8 à 1 seconde, répétées à intervalles réguliers (environ toutes les cinq secondes). Ces signaux suscitent trois réactions simultanées des mâles. La première est locomotrice : le mâle recherche la femelle en s'orientant grâce aux vibrations transmises par la plante. À chaque embranchement, il pose ses pattes et ses antennes sur les tiges et détermine l'origine des vibrations (*voir la figure*).

La deuxième réaction est acoustique : le mâle émet des chants, dits de cour, en alternance avec les appels de la femelle. Ces chants entretiennent les vibrations de celle-ci et facilitent ainsi sa localisation. Enfin, la troi-



Le mâle de la punaise verte, sur une tige, a libéré des substances chimiques, nommées phéromones, qui ont attiré la femelle sur une feuille du même végétal (a). La femelle produit alors des vibrations d'appel qui se propagent dans la plante et orientent le mâle, notamment aux bifurcations (b et c). Il répond à la femelle par d'autres vibrations et par des phéromones qui stimulent la femelle. Enfin, la rencontre a lieu (d).

sième réaction est chimique : le mâle augmente sa production de phéromones, qui ont, cette fois, un rôle aphrodisiaque.

Nous avons également découvert que les mâles différencient les chants d'appel d'individus de différentes provenances : les réactions locomotrices et acoustiques des mâles aux vibrations d'appel dépendent de l'origine des deux partenaires ; ainsi, les mâles français répondent mieux et plus rapidement aux femelles françaises qu'à celles de Guadeloupe, et *vice versa*.

La durée de chaque pulsation et les intervalles entre elles varient selon les

populations. En revanche, la fréquence de ces chants est la même (100 hertz), quelle que soit l'origine des insectes. Cette fréquence de 100 hertz est très proche de la fréquence de résonance des végétaux colonisés par les punaises vertes : les signaux sont ainsi conduits sur de longues distances.

La découverte des interactions entre la chimie et l'acoustique nous a permis de mieux appréhender la complexité des systèmes de communication chez les punaises. La localisation et la reconnaissance du partenaire sexuel sont des étapes primordiales de la phase précopulatoire. Ces comportements sont

à la base des phénomènes de sélection sexuelle : ils déterminent le choix de la femelle par le mâle.

En outre, les variations de ces signaux entre populations géographiquement isolées indiquent probablement une évolution divergente de la communication sexuelle au sein d'une même espèce. La punaise verte est un modèle original pour observer la mise en place de mécanismes qui favorisent l'isolement des populations et donc, peut être, l'apparition de nouvelles espèces.

Nadège MIKLAS et Michel RENOU,
Station INRA de Versailles

Les serpents nageaient...

...quand ils avaient des pattes.

Les serpents semblent l'archétype d'animaux sans pattes. Pourtant certains d'entre eux conservent des vestiges de membres postérieurs, et tous leurs caractères anatomiques montrent que ce sont des vertébrés tétrapodes (ou quadrupèdes) : issus d'animaux à quatre pattes, ils ont perdu celles-ci au cours de leur évolution. Selon cette hypothèse, les paléontologues avaient prédit qu'ils finiraient par trouver des fossiles qui présenteraient des caractéristiques des serpents et de leurs ancêtres, avec, notamment, des pattes bien développées.

On a récemment trouvé de tels fossiles : curieusement, on vient de signaler à très peu d'intervalle, non pas un, mais deux fossiles de serpents munis de pattes ... seulement postérieures. Des

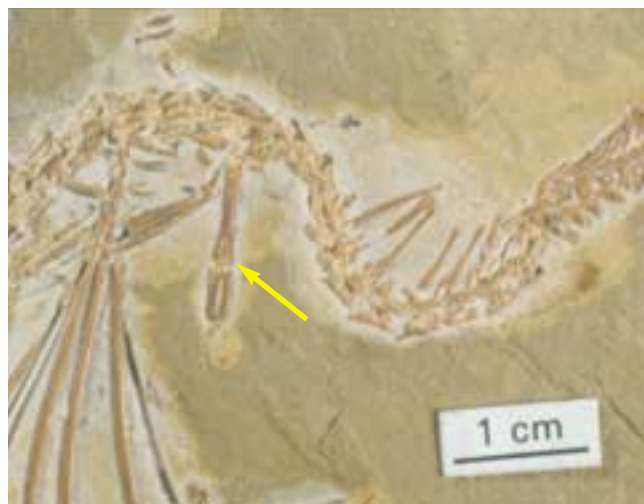
serpents non pas quadrupèdes mais bipèdes ! Ils ont été découverts au Moyen-Orient, dans des dépôts marins déposés au milieu du Crétacé, il y a quelque 95 millions d'années. Le premier, décrit par une équipe menée par Eitan Tchernov, de l'Université de Jérusalem, a été nommé *Haasiophis terrasanctus* ; l'autre, que nous avons étudié, est *Podophis descouensi*.

Ce ne sont pas les premiers serpents à pattes connus, mais leur découverte a déclenché une acerbé polémique. En effet, en 1997, les deux paléontologues Michael Caldwell et Michael Lee avaient réuni deux fossiles incomplets, auparavant énigmatiques, et montré qu'ils appartenaient à une même espèce, reconstituant ainsi le premier serpent à pattes, *Pachyrhachis problematicus*. Également trouvé au Moyen-Orient, il est contemporain des deux fossiles qui viennent d'être trouvés. Ces derniers confirment que M. Caldwell et M. Lee ne se sont pas trompés en reconstituant *Pachyrhachis* et en le considérant comme un serpent à pattes postérieures.

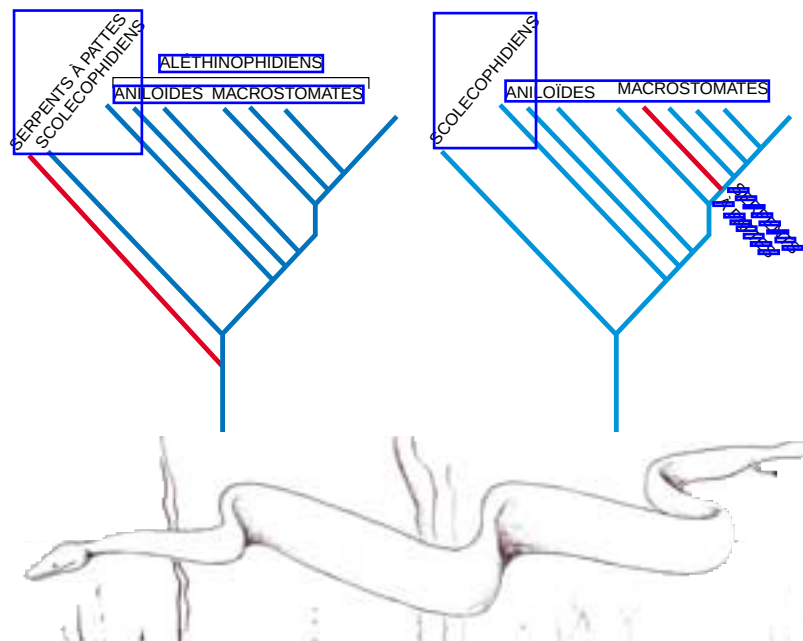
Ces trois animaux ne se distinguent pas notablement des serpents actuels : ils n'ont ni ceinture, ni pattes antérieures. Leur corps était aplati latéralement, comme les serpents marins actuels, et ils avaient une grande bouche. Leurs membres étaient courts (deux centimètres pour une longueur totale de 85 centimètres, chez *Podophis*), dans une position surprenante : très postérieure, à seulement 4,5 centimètres de l'extrémité de la queue, cette dernière étant très courte.

Pour comprendre la polémique, examinons la phylogénie des serpents modernes. Ces derniers se composent de deux groupes issus d'un ancêtre commun inconnu : les aléthiophidiens et les scolécophidiens. Les premiers comprennent les anilloïdes, supposés primitifs, et les macrostomates, supposés évolués. Ces derniers (boas, couleuvres, vipères...) se caractérisent par une très grande ouverture buccale, qui leur permet d'avaler des proies dont le diamètre est supérieur au leur.

M. Caldwell et M. Lee avaient supposé que ces serpents à pattes représentaient



Podophis descouensi, fossile de serpent à pattes (à droite, l'une d'elles est marquée par une flèche jaune) découvert au Moyen-Orient.



Deux arbres généalogiques concurrents des serpents. En bas, reconstitution du serpent à pattes *Podophis descouensi*. On remarque la très petite taille relative des pattes et leur curieuse position, près de l'extrémité caudale.

une branche ancienne, qui s'était détachée du tronc commun des serpents avant que les scolécophidiens et les aléthynophidiens ne s'individualisent. En revanche, E. Tchernov et ses collègues, se fondant surtout sur l'analyse d'*Haasiophis*, dont la bouche

est étonnamment grande, considèrent que ces serpents bipèdes sont des macrostomates, c'est-à-dire des serpents évolués. *Podophis*, lui, semble confirmer l'hypothèse de M. Caldwell et M. Lee : il montre que les serpents bipèdes sont primitifs.

Dans cette hypothèse, les serpents anciens auraient été macrostomates ; la grande bouche des serpents actuels serait une structure anatomique ancienne. Autrement dit, les serpents évolués ne seraient pas ceux que l'on croit.

Dans l'hypothèse inverse, comment les serpents à pattes seraient-ils dérivés de serpents ne possédant plus de pattes ? Autrement dit, soit tous les groupes de serpents autres que les formes bipèdes ont perdu indépendamment leurs pattes postérieures, soit les pattes postérieures sont réapparues chez les serpents bipèdes.

Des caractères anatomiques importants ayant été mal interprétés par E. Tchernov et ses collègues, leur hypothèse semble douteuse, mais le paradoxe subsiste. On devra commencer par revoir les données sur ces trois fossiles. On n'oubliera pas non plus que les serpents bipèdes étaient marins. S'ils sont effectivement primitifs, il s'agit d'un argument qui s'ajoute au fait que les plus proches parents des serpents sont des lézards vanaroïdes du Crétacé, marins eux aussi. Ainsi, on devrait conclure que les serpents sont nés de lézards en milieu marin, alors qu'on pensait naguère qu'ils étaient issus d'animaux fouisseurs.

Jean-Claude RAGE
et François ESCUILLIÉ

Le plomb au service de l'environnement

Pour détecter la contamination des nappes phréatiques par les décharges publiques

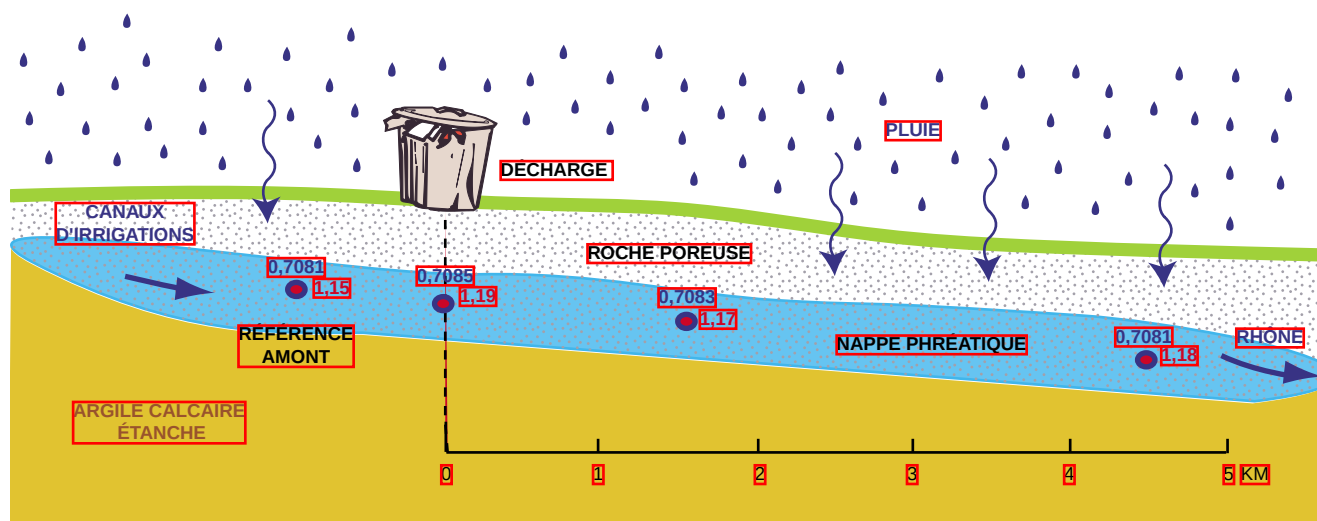
Les décharges d'ordures ménagères sont disgracieuses et nauséabondes. On sait moins qu'elles polluent les sols et les eaux : quand l'eau de pluie traverse les déchets, elle en extrait certaines substances solubles (des sels, des composés organiques...) qu'elle emporte avec elle ; ce «lixiviat» passe dans le sol. Aussi, depuis quelques années, on utilise des barrières composées de couches successives d'argile et de matériaux synthétiques, afin de confiner les lixivats. Cependant, en l'absence de barrière ou en cas de fuite, ceux-ci s'infiltrent dans les aquifères (les formations géologiques poreuses) et se mélangent à la nappe phréatique. Pour détecter une éventuelle contamination de ces réserves d'eau, voire leur pollution, on compare les concentrations en

certaines substances chimiques en amont et en aval de la décharge. Les plus utilisées sont les ions chlorures, sulfates et nitrates, ainsi que le carbone présent dans des molécules organiques. Cependant, à cause de leur dilution dans l'eau des aquifères, les concentrations de ces molécules sont parfois inférieures à la limite de détection (en général, un microgramme par litre). En outre, ces traceurs ne sont pas toujours issus de la décharge : le carbone organique est omniprésent dans la nature ; les chlorures viennent parfois du salage des routes, et les sulfates et les nitrates des engrais. Notre équipe a mis au point une méthode à la fois plus fiable et plus sensible de détection des lixivats : nous proposons de mesurer les rapports isotopiques du plomb et du strontium dans les eaux des nappes phréatiques (les isotopes sont des atomes qui ont le même nombre de protons, mais un nombre de neutrons différent : ils n'ont pas la même masse).

Dans les décharges d'ordures ménagères, le plomb est surtout présent dans les circuits électriques et dans les piles, tandis que le strontium vient principalement des objets en plastique, où

il est associé aux carbonates de calcium, qui améliorent leur résistance mécanique. On retrouve ces deux éléments en faibles concentrations dans les lixivats : quelques microgrammes par litre de plomb et jusqu'à un milligramme par litre de strontium.

Chaque minerai de plomb ou de strontium présente une composition isotopique qui dépend de son âge, de sa composition et des conditions où il s'est formé. Les variations de cette composition résultent de mécanismes de fractionnement naturels, lors de la formation du minerai : les rendements des transformations physiques et chimiques des isotopes d'un même élément sont légèrement différents, surtout dans le cas des éléments légers (la différence relative de masse entre les isotopes est plus grande que pour les éléments lourds). Dans les lixivats issus des décharges, les abondances isotopiques relatives résultent de celles des déchets, dont les matériaux ont été fabriqués à partir de minerais variés (il n'y a pas de fractionnement lorsque les lixivats traversent les formations géologiques). Elles sont distinctes des abondances naturelles dans la nappe phréatique, qui sont



Les rapports isotopiques du plomb ($^{206}/^{207}$, en bleu) et du strontium ($^{87}/^{86}$, en rouge) diffèrent en amont et en aval de cette décharge. En amont, ils dépendent de la nature géochimique du sous-sol. En aval, ils résultent du mélange avec la nappe phréatique de l'eau qui

a traversé les déchets (dont les matériaux ont des rapports isotopiques propres aux minerais utilisés pour les fabriquer) et s'est infiltrée dans le sol. Grâce à la mesure de ces rapports, on détecte une éventuelle contamination de la nappe phréatique.

déterminées par la nature géochimique du sous-sol.

Dans les nappes phréatiques analysées, on détecte le plomb et le strontium par spectrométrie de masse : les plus faibles concentrations mesurables sont de l'ordre de 10 picogrammes (10 millièmes de microgramme) par litre pour le plomb et de 50 nanogrammes (50 millièmes de gramme) pour le strontium. Les concentrations effectivement mesurées sur le terrain sont trop faibles pour que l'on parle de pollution : celle du plomb est 500 fois inférieure à la limite autori-

sée dans l'eau potable. En revanche, les rapports isotopiques différents, en amont et en aval des décharges, prouvent que les lixiviats qui en sont issus atteignent les nappes. Sur l'un des sites étudiés, nos analyses montrent que le rapport isotopique du strontium dans l'eau de la nappe phréatique revient à sa valeur amont à 4,5 kilomètres en aval de la décharge. En revanche, à cette distance, le rapport isotopique du plomb reste supérieur (voir la figure) : grâce au plomb, on détectera une éventuelle contamination à plus grande distance.

Lorsque les lixiviats pénètrent dans les aquifères, ils participent à des réactions biologiques conduisant à la dégradation de la matière organique par des bactéries et à des réactions physico-chimiques concomitantes, qui fixent une partie des métaux. En étudiant les rapports isotopiques du plomb et du strontium dans l'aquifère, on espère mieux comprendre ces phénomènes.

J.-Y. BOTTERO et J.-D. VILOMET
Unité mixte 6635
(CNRS/CEREGE/Université d'Aix-Marseille III)

Pas de quoi en faire un plat

Faute d'une théorie convenable, le débat cosmologique s'enlise.

Depuis quelques années, le public est averti des « progrès » spectaculaires de la cosmologie : un jour, on découvre que l'expansion de l'Univers s'accélère ; un autre, que l'origine de la masse manquante est enfin élucidée ; le mois dernier, des cosmologistes affirmaient que, dans le cadre des modèles proposés, l'Univers est plat. Pourquoi les nouvelles de ce genre s'accumulent-elles sans être confirmées. Qu'avons-nous réellement appris sur l'Univers depuis 50 ans ? Que signifie la platitude de l'Univers ?

La théorie de la gravitation d'Einstein a permis de forger le concept d'univers courbe. Cette courbure apparaît quand on considère comment deux rayons lumi-

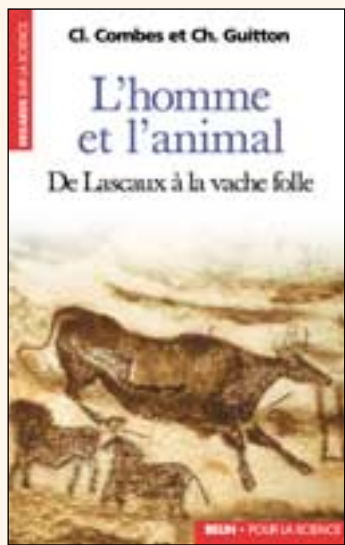
neux issus de la Terre et qui se propagent selon deux directions voisines s'écartent, à mesure que la lumière se propage. Dans un univers plat, l'écartement entre les rayons varie conformément à la géométrie euclidienne : il augmente proportionnellement à la distance parcourue à partir de la source. Dans un univers courbe, la courbure se manifeste par une différence entre l'écartement mesuré et celui que donnerait, à la même distance de la source et au même écartement angulaire, la formule euclidienne.

Selon la courbure, positive ou négative, cette différence correspond à un déficit ou à un excès d'écartement par rapport à celui qui existerait dans un univers euclidien.

Le point clé du débat est que la courbure n'est perceptible que suffisamment loin du point d'observation, lorsque la distance à ce point est une fraction notable d'une longueur caractéristique nommée « rayon de l'Univers ». Ce rayon indique à quelle échelle de dis-

tance la différence avec le cas euclidien devient notable. Dans un univers à courbure positive, à une distance égale à son rayon, l'écart entre les faisceaux lumineux est 16 pour cent inférieur à l'écart euclidien, tandis qu'il n'est que 4 pour cent inférieur à l'écart euclidien à une distance égale à la moitié de ce rayon.

Le problème est de déterminer le rayon d'un univers. Notre Univers est âgé d'environ 15 milliards d'années, ce qui fixe la distance de l'horizon cosmologique et limite le volume observable de l'Univers (la lumière qui est au-delà de l'horizon cosmologique n'a pas pu nous parvenir). Ainsi, si le rayon de notre Univers est bien supérieur à 15 milliards d'années-lumière, la courbure sera indétectable, et notre Univers paraîtra plat. C'est comme si l'on décrétait que la Terre est plate parce que, à l'échelle de la France, elle semble plate (voir la figure). Tant que l'horizon cosmologique est bien inférieur au rayon de l'univers, tout univers semble plat.



L'homme et l'animal

**Claude Combes,
Christophe Guittton**

«160 pages brillantes
d'érudition, de profondeur
et d'ouverture d'esprit.»

*Philippe Dorchies,
professeur de parasitologie,
La Dépêche vétérinaire*

...

«Une promenade plaisante,
claire et documentée, guidée
conjointement par un biologiste
et un vétérinaire.»

Eurêka

...

«Un livre riche et divertissant
alliant philosophie et sciences
grand public publié par deux
scientifiques de l'université
de Perpignan.»

Midi Libre

**Code P012 • 95 F
160 pages**

**Voir bon de commande
page 98**

BELIN • POUR LA SCIENCE

Or, c'était exactement la situation peu après le Big Bang, lorsque l'Univers était si récent que la lumière n'avait pas eu le temps de parcourir un trajet suffisant : la théorie de la relativité montre alors que ce trajet reste plusieurs ordres de grandeur inférieur au rayon. Ainsi tous les univers semblent plats lorsqu'ils naissent ; ils continuent de le paraître tant qu'ils n'ont pas atteint leur âge «adulte», c'est-à-dire tant que la portion d'espace explorée n'est pas suffisante pour que l'on détecte une courbure.

Quant aux univers «exactement» plats, ce sont des univers mathématiques dont la courbure, si elle était indécélable à très grande distance, le serait encore à distance supérieure. Si nous vivions dans un tel univers, nous ne pourrions jamais le savoir, car la preuve de platitude imposerait l'exploration de portions d'espace toujours plus grandes, à la recherche d'une courbure qui infirmerait l'hypothèse de départ. La contradiction logique soulevée montre que le concept mathématique d'univers plat est à éliminer du débat cosmologique.

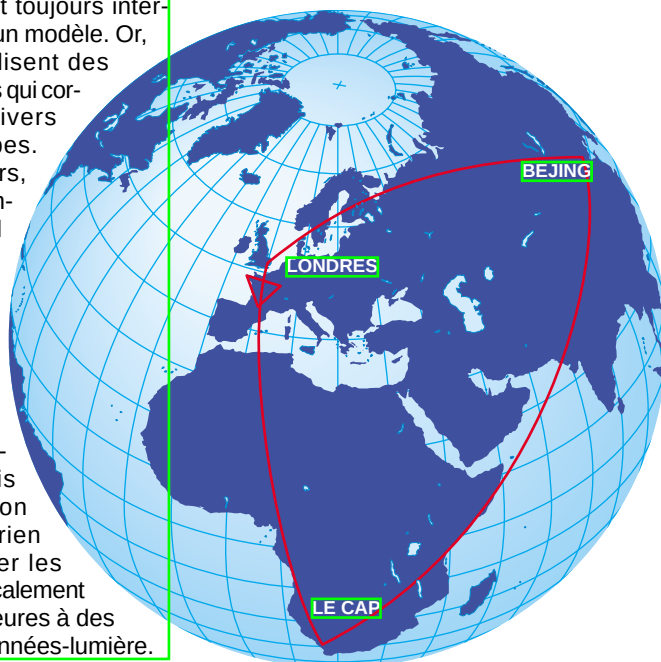
Au final, si les mesures montrent que notre Univers est plat, c'est que sa courbure est difficilement détectable, soit parce que la qualité des mesures est insuffisante, soit parce que le rayon de courbure est trop grand par rapport à la profondeur de l'espace que nous pouvons sonder. À moins que la théorie elle-même ne soit en cause...

En effet, une mesure ne signifie rien en elle-même : elle est toujours interprétée dans le cadre d'un modèle. Or, les cosmologistes utilisent des modèles mathématiques qui correspondent à des univers homogènes et isotropes. Ces univers particuliers, choisis par souci de simplicité, décrivent mal l'Univers où nous vivons : notre Univers n'est pas un gaz homogène de particules (des structures comme les galaxies ou les amas de galaxies ne sont pas en expansion) ; les astronomes n'ont jamais prouvé que l'expansion était isotrope ; enfin, rien n'autorise à extrapoler les paramètres observés localement à des distances supérieures à des dizaines de milliards d'années-lumière.

La contribution de la théorie des univers homogènes et isotropes est certes importante : c'est elle qui a inventé le Big Bang. Toutefois, en se fondant uniquement sur ces modèles, les cosmologistes ne peuvent prétendre rendre compte de manière satisfaisante de la réalité. De surcroît, notre physique reste incapable de traiter le Big Bang lui-même.

Une des graves contradictions qui entachent les modèles d'univers homogène est le problème de l'horizon. À l'origine, au Big Bang, la proportion d'Univers visible (pour chaque observateur potentiel) était infiniment faible. Autrement dit, dans ce type d'univers homogènes construits selon la théorie d'Einstein, les différents points sont «causalement» déconnectés à l'origine. Comment des points qui ne peuvent s'influencer forment-ils un univers homogène, ce qui nécessite que ces points aient uniformisé leurs propriétés physiques ? C'est un problème incompréhensible dans le cadre de la physique actuelle : la cause de l'homogénéité serait antérieure à l'instant où notre physique peut décrire l'Univers, et les débats relatifs au choix des paramètres initiaux ou à l'idée de l'inflation (une phase d'expansion très rapide qui aurait permis l'homogénéité) ne l'évitent pas. Qu'avons-nous découvert depuis la théorie de la relativité générale et le Big Bang ? Rien, hors la confirmation de la justesse globale de la théorie.

Christian MAGNAN, GRAAL, Montpellier



A l'échelle de la France, la Terre semble plate, tandis qu'à plus grande échelle, sa courbure se fait sentir. La distance entre Strasbourg et Montpellier n'est inférieure que de 0,2 pour cent à la distance euclidienne, calculée à partir des distances entre Brest et Strasbourg, Brest et Montpellier, et l'angle Strasbourg-Brest-Montpellier. Pour Londres, Pékin et Le Cap, la distance entre Pékin et Le Cap est inférieure de 18 pour cent à la distance euclidienne.

Biologie ultrarapide

Une réaction enzymatique a été «photographiée» grâce à des impulsions laser ultrabrèves.

Durant la lecture de cet article, de la perception des mots à la compréhension du sens, votre organisme est le siège de millions de réactions enzymatiques : des molécules seront transformées, liées ou dissociées par des protéines. Ces dernières, de la classe des enzymes, accélèrent des réactions chimiques qui seraient normalement très lentes. L'équipe INSERM de Jean-Louis Martin, à l'École polytechnique, a utilisé des «lasers femtosecondes», c'est-à-dire dont les impulsions se mesurent en milliardièmes de milliardièmes de seconde), pour étudier les mécanismes de l'une d'entre elles.

Lors d'une réaction enzymatique, une molécule, nommée substrat, se lie au site actif d'une enzyme. Pendant un bref instant, l'enzyme et le substrat se modifient et adoptent une nouvelle conformation. Puis, le substrat transformé chimiquement par cette interaction est libéré ; l'enzyme retrouve son état initial, la réaction est terminée. Lors de la courte étape intermédiaire, le complexe enzyme-substrat est dans un état dit de transition pendant quelques centaines de femtosecondes (milliardièmes de milliardièmes de seconde) ; le complexe évolue alors selon les vibrations des atomes et la probabilité de réarrangement des électrons. Pour comprendre le fonctionnement d'une enzyme, on doit analyser cet état de transition fugace et déterminer les événements moléculaires de la réaction enzymatique.

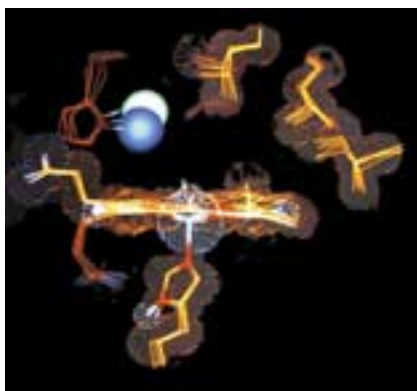
J.-L. Martin et ses collègues ont analysé les états de transition au sein de la

cytochrome oxydase, une enzyme qui, pour évacuer les électrons produits pendant la synthèse cellulaire d'énergie, réduit une molécule d'oxygène en molécule d'eau.

Pour cette étude, les biophysiciens éclairent la molécule d'enzyme par une impulsion d'un laser ultrarapide ; puis ils utilisent les impulsions suivantes du même laser pour effectuer une «spectroscopie» de la molécule. L'analyse spectroscopique détermine la position des différents atomes en examinant les rayons lumineux partiellement absorbés et déviés lorsqu'ils traversent l'enzyme et les molécules liées à celle-ci.

Les molécules diatomiques, tels l'oxygène (O_2), mais aussi le monoxyde de carbone (CO) ou le monoxyde d'azote (NO), que produit l'organisme en petite quantité, se fixent sur le site actif de l'enzyme, soit sur un atome de fer, soit sur un atome de cuivre.

Ainsi l'oxygène moléculaire se fixe à l'atome de cuivre, puis à l'atome de fer avant d'être transformé en eau qui se détache de l'enzyme. Toutefois, les trois réactions sont spontanées : à un instant donné, les enzymes observées dans un milieu réactionnel sont dans des états différents, ce qui rend l'étude spectroscopique impossible.

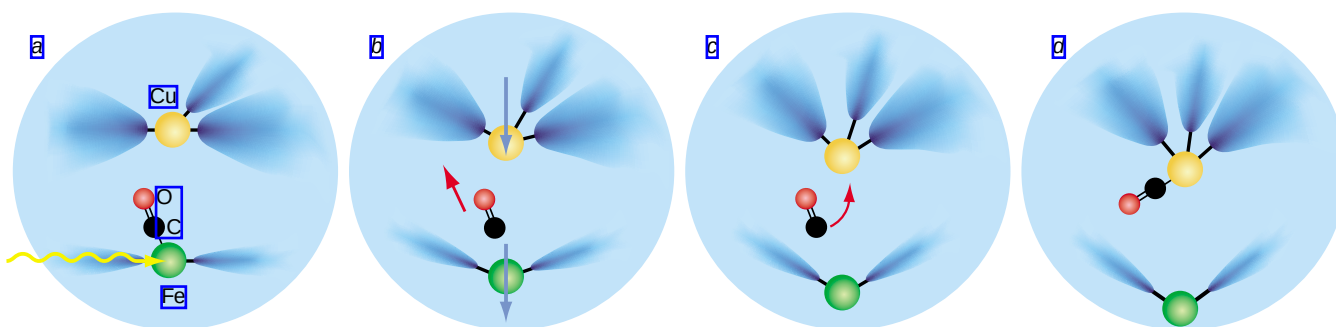


Aussi, les biophysiciens ont utilisé le monoxyde de carbone : celui-ci se fixe à l'atome de fer, mais, à l'inverse de l'oxygène, il ne se détache et ne rejoint l'atome de cuivre que s'il reçoit de l'énergie. Cette énergie est apportée par une impulsion laser qui déclenche la réaction.

Dans l'obscurité, les molécules de monoxyde de carbone sont liées à l'atome de fer. Puis, la première impulsion laser provoque la rupture de cette liaison en moins de 50 femtosecondes. Le monoxyde de carbone est alors éjecté, tandis que la partie du site actif à laquelle il était fixé se déforme. Simultanément, la partie du site actif qui porte l'atome de cuivre rapproche celui-ci du monoxyde de carbone qui subit une translation, suivie d'une rotation, lesquelles le placent dans une position propice à l'établissement d'une liaison avec l'atome de cuivre (voir la figure).

J.-L. Martin et ses collègues ont mesuré que le transfert du monoxyde de carbone s'effectue en 350 femtosecondes avec une probabilité de 85 pour cent à la première tentative : une telle réussite montre que la dissociation créée, au sein de l'enzyme, des mouvements cohérents qui optimisent le déplacement du monoxyde de carbone de l'atome de fer à l'atome de cuivre. En l'absence de ces mouvements internes, le substrat ne se déplacerait que par diffusion dans la cavité du site actif. La vitesse du transfert mesurée dans la cytochrome oxydase est bien supérieure à celle d'une diffusion.

Naguère la théorie était le seul moyen, peu efficace, d'étudier ces états de transition. Grâce aux lasers femtosecondes, les biochimistes photographient les états de transition des réactions enzymatiques qu'ils étudient depuis des années. Ainsi, on conçoit de façon rationnelle des inhibiteurs ou des activateurs spécifiques fondés sur la dynamique de l'enzyme et non plus seulement sur sa structure.



Dans l'enzyme cytochrome oxydase, le site actif (zones foncées du disque clair, lequel représente une partie de l'enzyme) a un atome de cuivre (en orange) et un atome de fer (en vert) capables de fixer un substrat, tel le monoxyde de carbone (en rouge et noir). Lorsque ce dernier est lié à l'atome de fer (a), l'impulsion lumineuse d'un laser femtoseconde libère le monoxyde de carbone. Le changement de conformation de l'enzyme (flèches bleues) rapproche l'atome de cuivre

du monoxyde de carbone qui, après une translation (b) et une rotation (c), s'y lie (d). Le monoxyde de carbone sera ensuite libéré. La modélisation (en haut) est formée de la superposition de conformations, espacées dans le temps de 50 femtosecondes, de l'hémoglobine, une protéine dont le site de fixation est semblable à celui de la cytochrome oxydase, après la dissociation du monoxyde de carbone (en sphères pleines).

Où sont-ils?

IAN CRAWFORD

Malgré des années de recherche, aucune intelligence extraterrestre n'a été trouvée. Serions-nous seuls dans la Galaxie?

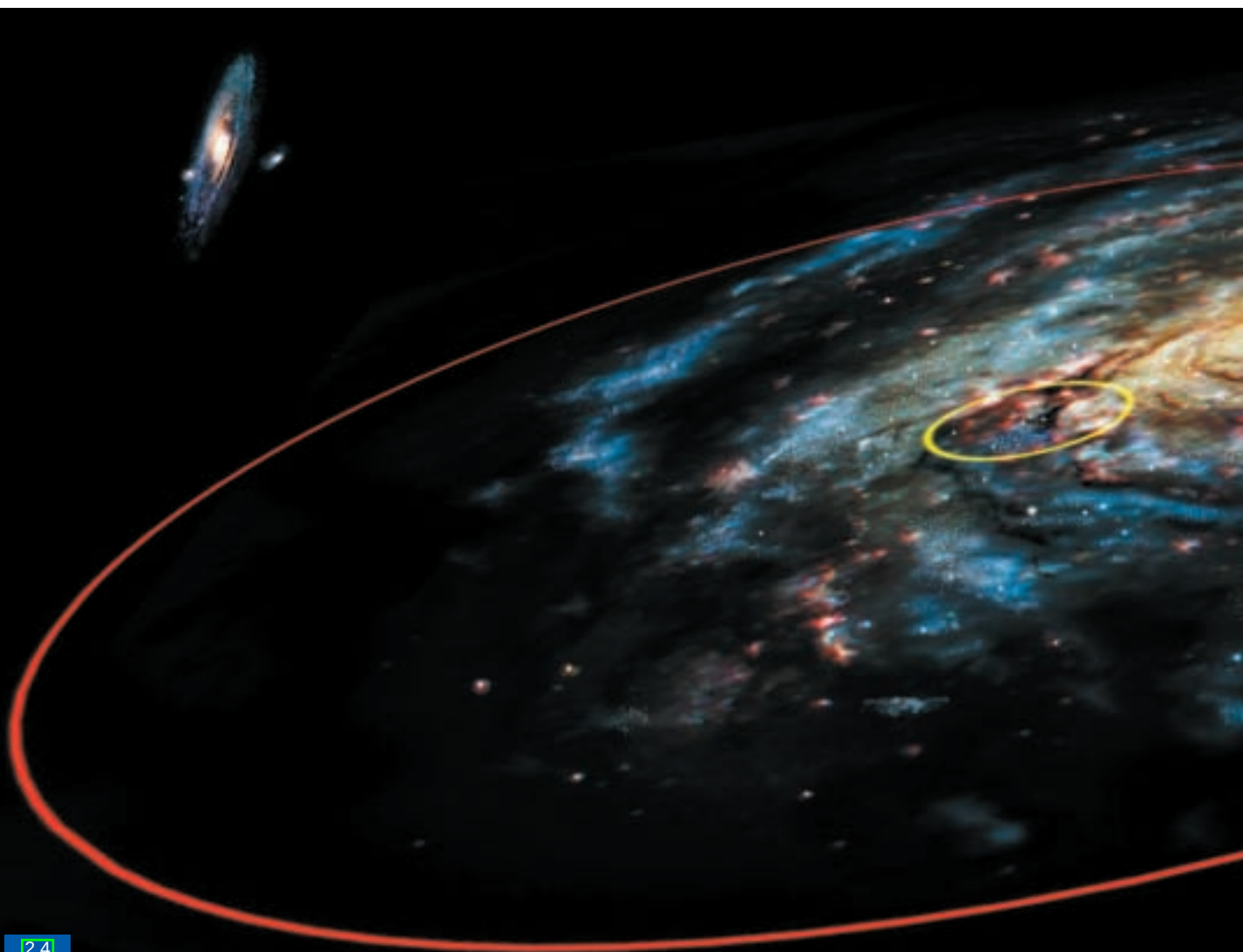
Combien d'autres civilisations l'Univers abrite-t-il? Plusieurs découvertes ont ravivé l'intérêt pour cette question fascinante. En premier lieu, l'existence de planètes hors de notre Système solaire est désormais avérée.

Ces cinq dernières années, les astronomes ont découvert des planètes d'une masse proche de celle de Jupiter autour d'une quarantaine d'étoiles analogues au Soleil. Ils n'ont pas trouvé de planètes de type terrestre – les instruments n'étant pas encore assez sen-

sibles –, mais ces dernières sont vraisemblablement aussi nombreuses que leurs grandes sœurs. Si l'on admet que les planètes sont nécessaires à la genèse et à l'évolution de la vie, ces découvertes confortent l'idée de l'omniprésence de la vie dans l'Univers.

La vitesse incroyable à laquelle la vie s'est établie sur notre planète corrobore également cette idée. En 1993, William Schopf, de l'Université de Los Angeles, a trouvé des bactéries fossilisées dans des roches d'Australie vieilles de 3,5 milliards d'années. Ces

organismes relativement complexes étaient le fruit d'une longue évolution. Ainsi, si la vie est née sur Terre, elle a dû y apparaître il y a environ quatre milliards d'années. Or, la Terre elle-même s'est formée il y a 4,6 milliards d'années : l'apparition rapide de la vie (à l'échelle des temps géologiques) indique que cette première étape est relativement facile à franchir. Selon le biochimiste belge Christian de Duve (prix Nobel de chimie en 1974), l'apparition de la vie est quasi inéluctable partout où les conditions physiques



sont semblables à celles qui prévalaient sur notre planète il y a quatre milliards d'années. Tout porte à croire que notre Galaxie fourmille de créatures vivantes.

Peut-on en déduire un foisonnement de civilisations techniques? Nombre de biologistes ont ainsi estimé que, dès l'apparition d'une forme de vie primitive, la sélection naturelle conduirait inéluctablement à l'intelligence et à la technique. Inéluctablement? En 1950, le physicien Enrico Fermi a contesté cette thèse : si les extraterrestres sont si nombreux, où sont-ils donc? Ne manifesteraient-ils pas leur présence? Ce «paradoxe de Fermi» est largement débattu depuis un demi-siècle.

Les débats se sont fondés sur deux types d'études. D'une part, on a cherché des intelligences extraterrestres dans le domaine radio : ces programmes SETI (*Search for ExtraTerrestrial Intelligence*, soit «recherche d'intelligence extraterrestre») n'ont jamais détecté d'émissions pouvant provenir d'une autre civilisation.

D'autre part, on a cherché – en vain – des traces de la visite d'extraterrestres sur la Terre.

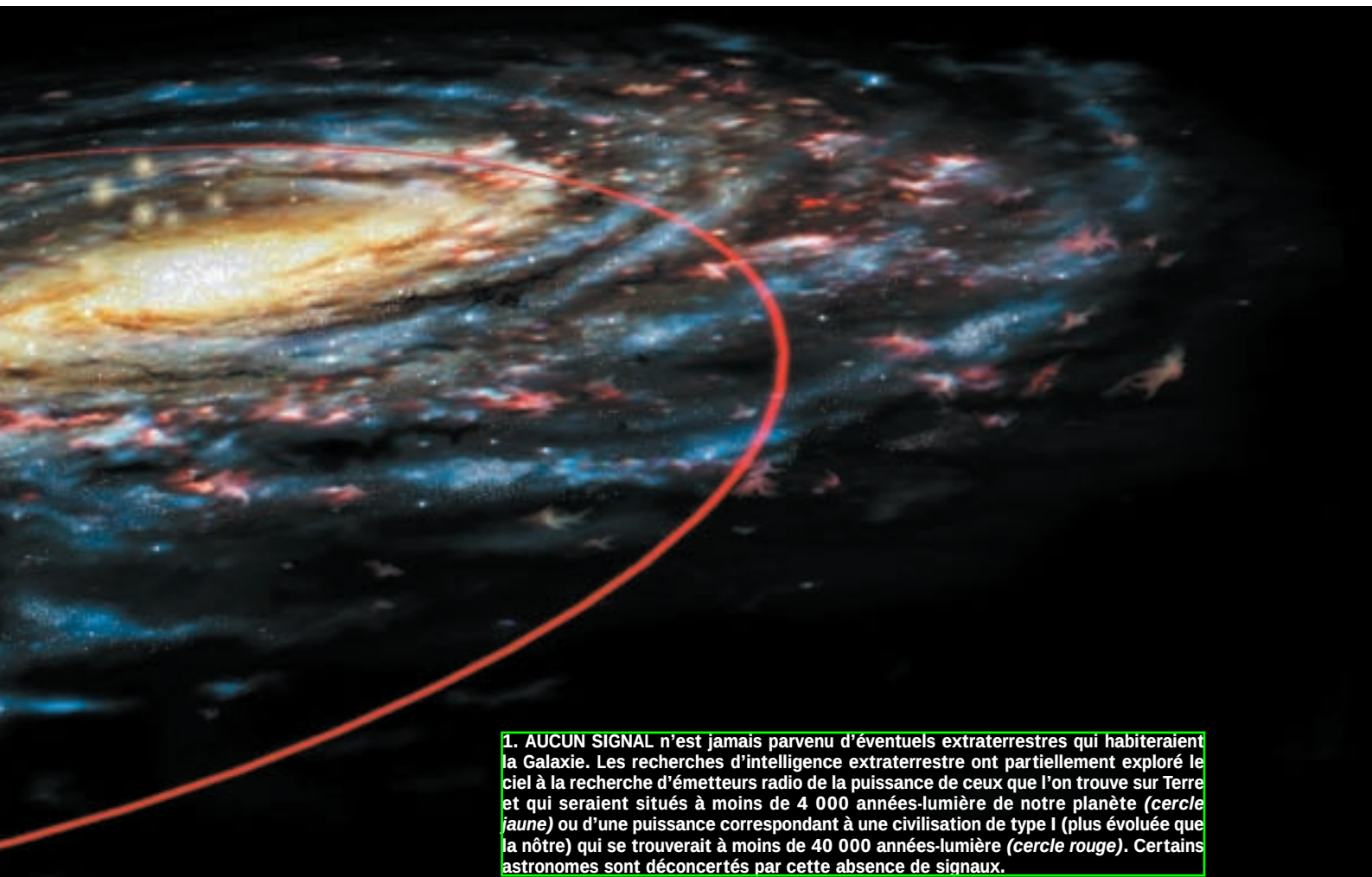
La recherche d'extraterrestres par radioastronomie a été envisagée sérieusement pour la première fois par les physiciens Giuseppe Cocconi et Philip Morrison, dans un article publié en 1959 dans la revue scientifique *Nature*. Un an après, la recherche proposée commençait avec le projet *Ozma* : Frank Drake et ses collègues de l'Observatoire de radioastronomie de Green Bank, en Virginie de l'Ouest, ont écouté les signaux en provenance de deux étoiles proches. Depuis, de nombreuses études ont suivi, de l'écoute de l'ensemble de la voûte céleste à des recherches ciblées sur des centaines d'étoiles individuelles. Malgré les efforts, les astronomes n'ont pas détecté de signaux extraterrestres.

Un demi-siècle de recherche, c'est peu pour une question si grave, et l'absence de résultats positifs ne permet pas d'affirmer qu'il n'existe pas de civilisations extraterrestres. Seule une

petite partie des possibilités a été explorée, mais les résultats initiaux donnent des limites intéressantes sur le nombre de civilisations capables de transmettre des ondes radio dans la Galaxie (voir l'encadré des pages 26 et 27).

Le paradoxe de Fermi s'aggrave quand on examine les hypothèses sur lesquelles se fonde la recherche d'intelligence extraterrestre, notamment l'estimation du nombre total de civilisations galactiques, éteintes ou existantes. Paul Horowitz, de l'Université Harvard, estime qu'il devrait exister au moins une civilisation capable d'émettre des signaux radio à moins de 1 000 années-lumière du Soleil, c'est-à-dire dans un volume de l'espace contenant approximativement un million d'étoiles de type solaire. Dans cette hypothèse, l'ensemble de la Galaxie devrait abriter un millier de civilisations.

Ainsi, à moins que ces civilisations ne soient très durables, un nombre considérable de civilisations se sont développées et ont décliné au cours



1. AUCUN SIGNAL n'est jamais parvenu d'éventuels extraterrestres qui habiteraient la Galaxie. Les recherches d'intelligence extraterrestre ont partiellement exploré le ciel à la recherche d'émetteurs radio de la puissance de ceux que l'on trouve sur Terre et qui seraient situés à moins de 4 000 années-lumière de notre planète (*cercle jaune*) ou d'une puissance correspondant à une civilisation de type I (plus évoluée que la nôtre) qui se trouverait à moins de 40 000 années-lumière (*cercle rouge*). Certains astronomes sont déconcertés par cette absence de signaux.

de l'histoire galactique. Statistiquement, le nombre de civilisations présentes à un moment donné est égal à la fréquence d'apparition multipliée par leur durée de vie moyenne. On estime la fréquence d'apparition des civilisations galactiques en considérant qu'elle est égale au nombre total de civilisations qui sont apparues divisé par l'âge de la Galaxie, c'est-à-dire environ 12 milliards d'années. Si les civilisations apparaissent à un rythme régulier et si elles vivent en moyenne 1 000 ans chacune, 12 milliards de civilisations techniques ont dû se développer dans toute l'histoire de la Galaxie pour qu'on en compte 1 000 aujourd'hui. En modifiant les hypothèses sur la fréquence de formation et sur la durée de vie moyenne, on détermine des nombres différents de civilisations, mais ils restent très grands. Comment aucune de ces milliards de civilisations n'aurait-elle laissé de preuve de son existence?

La migration extraterrestre

Ce problème a été examiné en 1975 par l'astronome Michael Hart et par l'ingénieur David Viewing. Il a ensuite été approfondi, notamment par le physicien Frank Tipler et par le radioastronome Ronald Bracewell. Tous considèrent qu'il n'existe aucune preuve claire de visites extraterrestres sur la Terre ; en tout cas, la Terre n'a jamais été colonisée par une civilisation extraterrestre, car elle aurait bloqué notre propre évolution et nous ne serions pas là pour en parler.

Comment concilier l'absence de signes extraterrestres avec l'idée d'un grand nombre de civilisations avancées? Quatre possibilités ont été évoquées : les vols spatiaux interstellaires sont techniquement impossibles ; les civilisations extraterrestres explorent activement la Galaxie, mais ne sont pas encore parvenues jusqu'à nous ; le

voyage interstellaire est possible, mais les extraterrestres ont choisi de ne pas l'entreprendre ; enfin, les extraterrestres sont parvenus au voisinage de la Terre, mais ils ont décidé de ne pas nous approcher. Si nous parvenons à éliminer ces quatre explications, nous devons envisager que nous sommes peut-être les formes de vie les plus évoluées de la Galaxie.

La première explication ne tient pas : aucun principe connu n'interdit les vols spatiaux interstellaires. Nous n'en sommes qu'à l'aube de l'ère spatiale, et les ingénieurs imaginent déjà des engins qui iraient à 10 ou 20 pour cent de la vitesse de la lumière : on atteindrait les étoiles les plus proches en quelques décennies (voir *Vers les étoiles*, par Stéphanie Leifer, *Pour la Science*, avril 1999).

Pour la même raison, la deuxième explication (les extraterrestres voyagent, mais ne nous ont pas trouvés)

Où se cachent-ils?

Notre Galaxie semble dépourvue de civilisations avancées, mais des cultures moins développées pourraient avoir échappé à nos recherches.

A ce jour, personne n'a jamais détecté un signal radio envoyé par des extraterrestres. La quête commence seulement, mais l'absence de détection est déjà un résultat : les exobiologistes en déduisent le nombre maximum de civilisations qui pourraient vivre dans la Galaxie, et ils connaissent leur niveau technique.

Seules les fréquences voisines de 1,42 gigahertz ont été bien étudiées : elles correspondent à la raie d'émission de l'hydrogène, l'élément le plus répandu de l'Univers, car on suppose que des extraterrestres intelligents attireraient notre attention grâce à cette fréquence « naturelle ». Le diagramme de la page ci-contre montre le degré d'avancement des recherches de signaux extraterrestres autour de cette fréquence. Si des civilisations émettent à cette fréquence, soit elles sont hors de portée, soit elles émettent trop faiblement pour que nos instruments les détectent. Ainsi, on exclut l'existence de certains types de civilisations : des civilisations primitives (de niveau analogue à celui de la Terre) proches de la Terre, et des civilisations plus évoluées, mais plus éloignées.

Dans ce diagramme, la distance à la Terre est portée en abscisse et la puissance efficace rayonnée isotrope est en ordonnée. Cette puissance est la puissance de l'émetteur divisée par la fraction du ciel couverte par l'antenne. Dans le cas d'un émetteur omnidirectionnel, la puissance efficace rayonnée isotrope est égale à la puissance de l'émetteur. Aujourd'hui, l'émetteur le plus puissant de notre planète est le radiotélescope d'Arecibo, à Porto Rico ; s'il était utilisé comme dispositif radar à faisceau étroit, sa puissance efficace rayonnée isotrope serait de l'ordre de 10^{14} watts.

Cette puissance sert à classer le degré technique des civilisations éventuelles : au début des années 1960, Nikolaï Kardachev, le pionnier russe de la recherche de signaux extraterrestres, et le physicien américain Carl Sagan ont considéré que les civilisations de type I émettent des signaux d'une puissance équivalente à celle de toute la

lumière solaire atteignant une planète comme la Terre, soit 10^{16} watts environ ; les civilisations de type II exploiteraient toute la puissance émise par une étoile de type solaire, soit environ 10^{27} watts ; enfin, les civilisations de type III, encore plus évoluées, maîtriseraient la puissance d'une galaxie entière, soit 10^{38} watts. Des intermédiaires sont envisageables : par interpolation, on détermine que l'humanité, jugée d'après le télescope d'Arecibo, est une civilisation de type 0,7.

Pour une distance et une puissance d'émission données, le diagramme indique la proportion d'étoiles qui ont été scrutées. Les zones colorées représentent les civilisations dont nous pouvons dire avec plus ou moins de certitude qu'elles n'existent pas. La zone noire correspond aux civilisations qui auraient pu échapper aux recherches. La zone noire s'élargit sur la droite du diagramme, ce qui correspond aux grandes distances par rapport à la Terre. Les programmes de recherche de signaux extraterrestres excluent déjà la présence d'émetteurs radio équivalents au télescope d'Arecibo à moins de 50 années-lumière de la Terre. Plus loin, ils permettent d'exclure la présence des émetteurs les plus puissants. Au-delà de la Voie lactée, les programmes de recherche de signaux ne détecteront rien, car les vitesses relatives des galaxies feraient sortir les éventuels signaux de la bande de détection (plus un émetteur s'éloigne vite, plus la longueur d'onde émise est perçue allongée : c'est par cet effet Doppler que la sirène d'une ambulance qui s'éloigne paraît plus grave).

Les résultats obtenus ne sont pas des évidences. Avant de commencer leurs recherches, les exobiologistes supposaient l'existence de nombreuses civilisations de type II et III. Elles n'ont pas été trouvées. Cette conclusion confirme d'autres données astronomiques : à moins d'avoir miraculeusement contourné le deuxième principe de la thermodynamique, les «supercivilisations» devraient se débarrasser de leur surplus de chaleur, et des rayonnements infrarouges devraient être perceptibles. Or, les observations de Jun Jugaku et de ses collègues de l'Institut de recherche des civilisations, au Japon, n'ont repéré aucune émission de ce type dans un rayon de 80 années-lumière. Si

est également douteuse. Toute civilisation disposant de fusées rapides coloniserait la Galaxie entière en un temps bref à l'échelle cosmique. Considérons qu'une civilisation envoie des colons sur quelques systèmes planétaires voisins. Une fois ces colonies établies, elles partiraient fonder d'autres colonies, et ainsi de suite. Par un tel processus, le nombre de colonies croîtrait exponentiellement. Un front d'onde de colonisation se propagerait à une vitesse déterminée par la vitesse des vaisseaux et par le temps nécessaire à l'établissement de chaque colonie. D'autres colonies rempliraient rapidement le volume d'espace situé derrière ce front d'onde (voir la figure 2).

En supposant une distance entre les colonies de dix années-lumière, une vitesse de déplacement spatial égale à dix pour cent de la vitesse de la lumière, et une période de 400 ans entre

la fondation d'une colonie et l'envoi de ses propres colons vers l'extérieur, on calcule que le front d'onde de colonisation se propagerait à une vitesse moyenne de 0,02 année-lumière par an. Comme la Galaxie s'étend sur 100 000 années-lumière, cinq millions d'années suffiraient à la coloniser entièrement. Long à l'échelle humaine, ce temps ne représente que 0,05 pour cent de l'âge de la Galaxie. Par rapport aux autres échelles de temps pertinentes pour notre étude (astronomiques et biologiques), il est insignifiant. Dans les estimations précédentes, la principale incertitude concerne le temps nécessaire à une colonie pour s'établir et essaimer. Ce temps semble inférieur à 5 000 ans : c'est le temps qu'il a fallu à la civilisation humaine pour progresser, de l'ère des premières cités à l'ère spatiale. En remplaçant 400 par 5 000 dans les calculs, on obtient une colonisation complète

de la Galaxie en une cinquantaine de millions d'années.

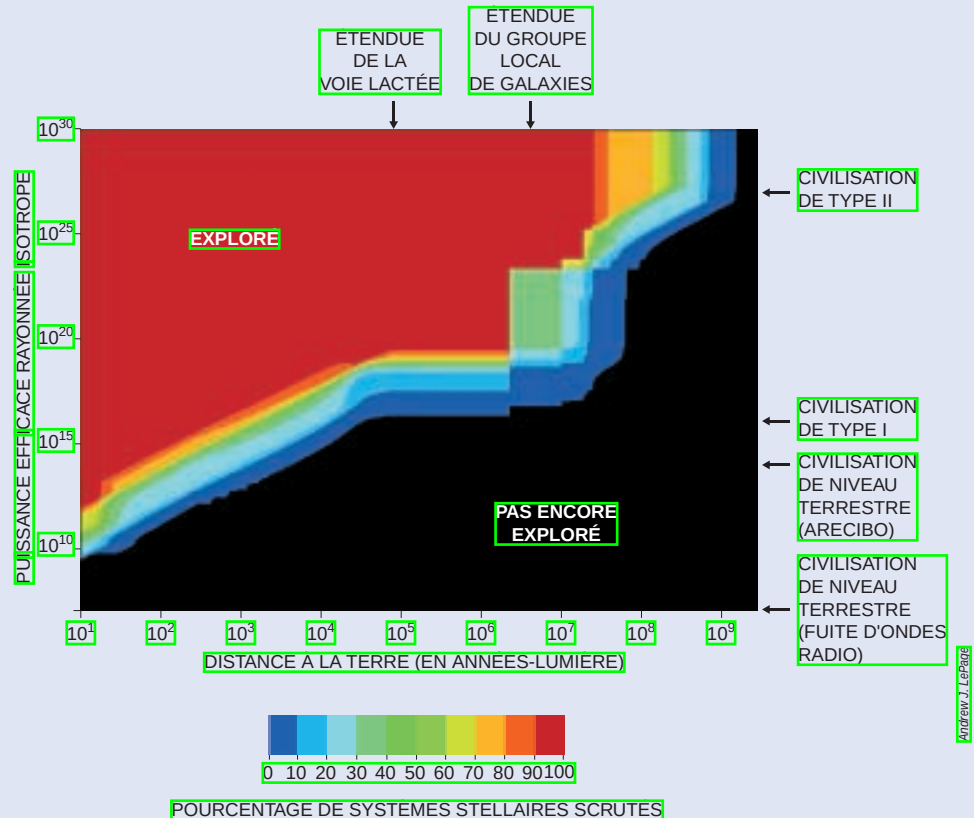
La conséquence est immédiate : la première civilisation dotée de la capacité et de la volonté de coloniser la Galaxie aurait pu le faire avant que d'éventuels concurrents aient la moindre chance de se développer. En principe, un tel événement aurait pu avoir lieu il y a plusieurs milliards d'années, quand les seuls habitants de la Terre étaient des micro-organismes et que la planète était ouverte à toutes les influences extérieures. Pourtant, on n'a relevé aucun artefact physique ni aucune trace chimique ou biologique d'une visite éventuelle de la Terre par des extraterrestres. Même si les germes de la vie ont été délibérément introduits sur Terre, comme l'ont proposé certains, notre planète n'a plus été importunée depuis.

Ainsi, on doit supposer que le comportement des extraterrestres leur a

l'on suppose que la répartition des civilisations est aléatoire dans l'espace, ces résultats limitent également l'espacement moyen des civilisations, et donc leur probabilité de présence dans les zones non explorées de la Galaxie.

En revanche, des millions de civilisations légèrement plus évoluées que la nôtre peuplent peut-être la Voie lactée. Une centaine de civilisations de type I pourraient également partager la Galaxie avec nous. Pour compliquer les choses, les extraterrestres pourraient utiliser une autre fréquence que celle de l'hydrogène, ou émettre par intermittence. Les programmes de recherche de signaux ont enregistré de nombreux «événements non statistiques» : des signaux trop forts pour être du bruit, mais jamais observés à nouveau. Ces signaux ne sont peut-être que des émissions de téléphones portables, mais ils pourraient également correspondre à des émissions extraterrestres intermittentes. Beaucoup reste encore à explorer.

Andrew LEPAGE est physicien à la Société Visidyne, à Burlington, où il analyse des données de télédétection par satellite.



LES RÉSULTATS DES PROGRAMMES de recherche de signaux extraterrestres sont résumés sur ce diagramme. La zone en noir correspond aux civilisations qui auraient pu échapper à nos recherches radio, soit en raison de leur éloignement, soit parce que leurs émetteurs sont trop faibles. Pour comprendre ce diagramme, choisissez une puissance d'émetteur (en ordonnée), déplacez-vous horizontalement jusqu'à la limite de la zone noire, et descendez alors pour lire la distance à la Terre sur l'axe horizontal. Par exemple, un émetteur équivalent à celui d'Arecibo (10^{14} watts) doit être à plus de 4 000 années-lumière pour avoir échappé aux investigations. Les couleurs indiquent la proportion estimée de tous les systèmes stellaires qui ont été inspectés pour une puissance supérieure ou égale à une puissance donnée.

barre l'accès à la Terre : les civilisations s'autodétruisent-elles trop rapidement pour coloniser l'espace ? Ne sont-elles pas intéressées par la colonisation ? Ont-elles décidé de ne pas perturber le développement des autres formes de vie ?

Parmi les chercheurs qui participent au projet SETI, beaucoup sont convaincus que les civilisations extraterrestres sont très répandues, mais évacuent le paradoxe de Fermi en avançant sans examen ces considérations sociologiques.

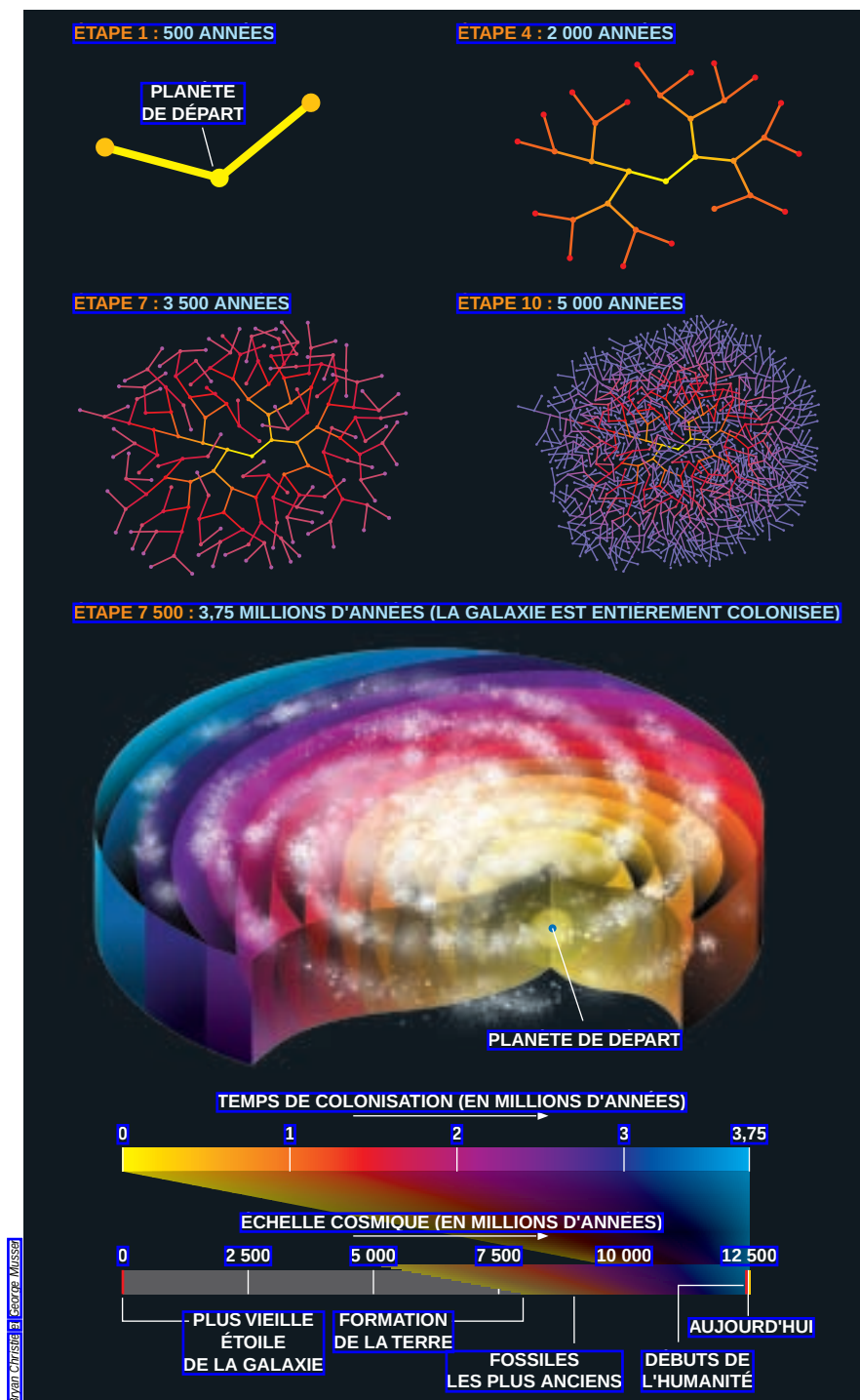
Toutefois, ces tentatives d'explication ne résistent pas lorsque le nombre de civilisations extraterrestres est élevé. Si la Galaxie a abrité des millions ou des milliards de civilisations techniques, il est très peu probable que toutes, sans exception, se soient autodétruites, que toutes se soient contentées d'une existence sédentaire, ou que toutes aient eu le même respect des formes de vie moins développées. Une seule civilisation avancée qui en aurait eu la volonté ou le besoin aurait colonisé la Galaxie. De surcroît, la seule civilisation technique que nous connaissons, la nôtre, ne s'est pas encore autodétruite ; ses tendances expansionnistes sont fortes, et elle ne cherche pas à éviter les contacts avec d'autres créatures vivantes.

Pour plusieurs raisons, je pense qu'un programme de colonisation interstellaire est assez probable. D'abord, une aptitude à la colonisation chez une espèce lui conférerait un avantage évolutif transmissible aux cultures de l'ère spatiale. De surcroît, les motivations de colonisation spatiale sont nombreuses : elles sont d'ordre politique, religieux ou scientifique. L'intérêt scientifique est puissant, car la première civilisation évoluée serait, par définition, seule dans la Galaxie. Toutes ses recherches d'intelligences extraterrestres étant infructueuses, elle serait tentée de lancer un programme d'exploration interstellaire pour en comprendre la raison.

La solution du paradoxe ?

Même si la plupart des civilisations extraterrestres étaient paisibles, sédentaires et peu curieuses, elles finiraient toutes par avoir une raison capitale d'explorer l'espace : leur survie finirait par être menacée par l'étoile de leur système planétaire. En effet, aucune étoile n'est éternelle. Dans l'histoire de la Galaxie, des centaines de millions d'étoiles de type solaire ont épuisé leur combustible, l'hydrogène, et achevé leur existence sous forme de géantes rouges ou de naines blanches. Si les civilisations étaient nombreuses autour de telles étoiles, où sont-elles parties ? Se sont-elles tout simplement laissées mourir ?

La rareté apparente des civilisations techniques appelle une explication, que l'enrichissement chimique de la Galaxie pourrait fournir. Toutes



2. LA COLONISATION DE LA GALAXIE est une entreprise colossale, mais rapide, à l'échelle de l'Univers. L'humanité pourrait d'abord envoyer des colons vers deux étoiles proches ; le voyage durerait une centaine d'années avec les techniques envisageables aujourd'hui. Après 400 ans d'installation, chaque colonie enverrait deux nouvelles missions de colonisation, et ainsi de suite. En 10 000 ans, nos descendants auraient investi tous les systèmes stellaires dans un rayon de 200 années-lumière autour de la Terre. La colonisation de l'ensemble de la Galaxie ne prendrait que 3,75 millions d'années, une fraction de seconde en termes cosmiques. Si une civilisation extraterrestre avait déjà entrepris un tel programme de colonisation, on devrait trouver ses colonies autour de nous.

les formes de vie terrestre et toute vie extraterrestre imaginable sont composées d'éléments plus lourds que l'hydrogène et l'hélium : carbone, azote, oxygène... Ces éléments sont créés par des réactions nucléaires au sein des étoiles, et ils s'accumulent progressivement dans le milieu interstellaire ; ensuite, ils s'intègrent aux nouvelles étoiles et aux planètes. Au début de l'histoire de la Galaxie, ces éléments étaient moins abondants qu'aujourd'hui, et leur rareté a peut-être prévenu l'apparition de la vie. Par rapport aux autres étoiles de notre région de la Galaxie, le Soleil contient beaucoup de ces éléments pour son âge. Est-ce par hasard que le Système solaire a une longueur d'avance du point de vue biologique ?

En outre, l'argument précédent n'est pas parfaitement convaincant. Les exobiologistes ne connaissent pas les quantités minimales d'éléments lourds à partir desquelles la vie peut se développer. Si des concentrations à peine supérieures au dixième des valeurs solaires suffisent, ce qui est plausible, alors la vie aurait pu apparaître autour d'étoiles beaucoup plus vieilles que le Soleil. En outre, bien que le Soleil contienne beaucoup d'éléments lourds, il est loin d'être exceptionnel. Ainsi l'étoile 47 de la constellation de la Grande Ourse a autant d'éléments lourds que le Soleil. Assez proche du Système solaire, cette étoile est accompagnée d'une planète d'une masse analogue à celle de Jupiter, et son âge semble d'environ sept milliards d'années. La vie aurait pu apparaître dans son système planétaire deux milliards et demi d'années avant la vie terrestre. Des millions d'étoiles chimiquement riches et d'âge comparable peuplent la Galaxie, en particulier vers son centre. L'évolution chimique de la Galaxie ne résout pas le paradoxe de Fermi.

L'histoire de la vie sur Terre indique une autre explication, qui semble plus plausible. La vie a très vite été présente sur la Terre, mais la vie animale, multicellulaire, n'est apparue qu'il y a 700 millions d'années seulement : pendant plus de trois milliards d'années, les seuls habitants de la Terre étaient des micro-organismes unicellulaires. Ainsi l'évolution d'organismes plus complexes que les unicellulaires est peu probable, et la transition de la vie unicellulaire aux êtres multicellulaires ne s'opère-t-elle peut-être que sur



3. LES CADAVRES D'ÉTOILES, telle la nébuleuse du Papillon, jonchent la Galaxie. Si des êtres intelligents ont autrefois habité autour de ces étoiles, où sont-ils aujourd'hui ?

une faible proportion des millions de planètes occupées par des organismes unicellulaires.

On peut rétorquer que la longue solitude des bactéries est simplement un passage obligé de l'apparition de la vie animale sur la Terre. Peut-être a-t-il fallu si longtemps (et cela s'applique aux autres planètes habitées), parce que cet intervalle correspond au temps nécessaire pour que la photosynthèse bactérienne produise les quantités d'oxygène atmosphérique indispensables à la complexification de la vie. Même dans le cas où des formes de vie multicellulaire finissent par apparaître sur toutes les planètes porteuses de vie, une évolution vers des créatures intelligentes n'est pas inéluctable, et elle l'est encore moins vers une civilisation technique. Selon le biologiste Stephen Jay Gould, l'évolution de la vie intelligente dépend d'une multitude d'influences environnementales qui sont principalement le fruit du hasard.

L'évolution des dinosaures illustre cette contingence : ces animaux ont dominé la planète pendant 140 millions d'années sans devenir capables de coloniser l'espace. Sans leur extinction, à la suite d'un événement fortuit, l'évolution de la vie sur la Terre aurait été très différente. Le développement de la vie intelligente sur

Terre résulte de nombreux événements aléatoires, dont certains étaient très improbables.

En 1983, à l'Observatoire de Meudon, le physicien Brandon Carter concluait que les civilisations comparables à la nôtre sont vraisemblablement très rares, même si des planètes aussi hospitalières que la Terre sont monnaie courante dans la Galaxie.

Concluons en signalant que tous ces arguments, qui paraissent aujourd'hui très solides, seront peut-être contredits par de nouvelles découvertes. En 1853, le minéralogiste britannique William Whewell observait : « Les discussions qui nous occupent relèvent des frontières de la science, de la limite entre la fin de la connaissance et le début de l'ignorance. » Malgré les progrès réalisés depuis cette époque, nous sommes encore à la limite de l'ignorance, et le seul moyen de résoudre le paradoxe de Fermi est d'explorer notre environnement cosmique avec le plus d'attention possible.

Les programmes d'écoute de signaux extraterrestres doivent se poursuivre jusqu'à ce que nous détections des signaux, ou (c'est l'hypothèse la plus vraisemblable selon moi) jusqu'à ce que nous puissions considérer que le nombre de civilisations capables d'émettre en radio et qui auraient échappé à notre vigilance est inférieur à une limite très restrictive. Nous devons poursuivre l'exploration de Mars, afin de déterminer si la vie est jamais apparue sur cette planète ; si la réponse est négative, nous devons expliquer pourquoi. Nous devons construire des instruments spatiaux capables de détecter des planètes de la taille de la Terre autour d'étoiles proches, et rechercher des signes de vie dans les spectres de leur atmosphère.

Enfin, nous devons construire des sondes capables d'aller étudier les planètes en orbite autour d'étoiles proches.

Il faudra ce lourd programme d'exploration pour que nous parvenions à mieux comprendre notre place dans l'Univers. Si nous ne trouvons aucune trace d'autres civilisations techniques, c'est peut-être l'humanité qui devra se lancer dans l'exploration et la colonisation de la Galaxie.

Ian CRAWFORD est astronome au département de physique et d'astronomie de l'University College à Londres.

Les communications galactiques

GEORGE SWENSON

Pour communiquer à travers la Galaxie, des correspondants extraterrestres devraient utiliser des méthodes originales.

Avec ses centaines de milliards d'étoiles, la Voie lactée pourrait abriter des milliers de civilisations développées. Naguère douteuse, cette idée a été renforcée par la découverte de nombreux systèmes planétaires dans la Voie lactée.

Aussi les astronomes s'intéressent-ils aujourd'hui beaucoup aux résultats d'études commencées il y a quatre décennies : quelques équipes scrutent le ciel, espérant détecter des signaux radio qu'une civilisation évoluée aurait envoyés dans l'immensité de la Galaxie. Cette recherche d'intelligence extraterrestre, le programme SETI (en anglais, *Search for ExtraTerrestrial Intelligence*), est une recherche passive des signaux, fondée sur l'utilisation d'antennes paraboliques et de récep-

teurs radio sensibles. S'ils existent, toutefois, ces signaux sont sans doute très affaiblis quand ils nous arrivent.

Dans les études mises en œuvre jusqu'ici, on se contente de chercher des signaux qui auraient été transmis il y a des dizaines d'années ou, plus probablement, des centaines, voire des milliers d'années. Paradoxalement, on s'est peu demandé comment on construirait un dispositif de transmission radio dont les émissions pourraient être détectées à des dizaines ou à des centaines d'années-lumière. Or, l'étude de cette question aiderait la recherche de signaux extraterrestres.

La question n'est pas un exercice futile : pour savoir quels signaux chercher, on doit avoir une idée des installations et des stratégies de transmission qui seraient utilisées par nos correspondants. Les difficultés de transmission de signaux sur des distances aussi grandes sont considérables : avec les limitations stipulées par la physique actuelle, une civilisation ferait très dif-

ficilement connaître sa présence à une autre civilisation dont elle ignorerait la position dans la Galaxie.

Cette analyse expliquerait l'un des paradoxes des programmes de recherche d'intelligence extraterrestre : même si la Galaxie abrite des milliers de civilisations évoluées, nous aurions de grandes difficultés à les entendre.

Comment passer au-dessus du bruit ?

Avant de concevoir un émetteur qui enverra des signaux dans la Galaxie, on doit choisir la gamme des ondes électromagnétiques qui transporteront les signaux. Nous n'examinerons ici que le cas des ondes radio : elles traversent bien mieux l'espace interstellaire que d'autres rayonnements électromagnétiques, telle la lumière visible, qui est diffusée et absorbée par les poussières interstellaires.

La gamme des ondes radio est large, mais les astronomes pensent

1. UN OPERATEUR RADIO EXTRATERRESTRE (page de droite) ne pourrait nous envoyer un message perceptible que s'il commandait un réseau d'antennes paraboliques de très grande surface efficace.



que la bande de fréquences comprises entre un et trois gigahertz est la mieux adaptée aux communications interstellaires : premièrement, nos techniques fonctionnent bien pour cette partie du spectre ; deuxièmement, les molécules interstellaires et les nuages de poussière absorbent peu ces ondes, sauf aux fréquences d'émission de l'hydrogène neutre, vers 1,42 gigahertz. Enfin, le rayonnement de fond de la Voie lactée n'est pas trop fort dans cette gamme.

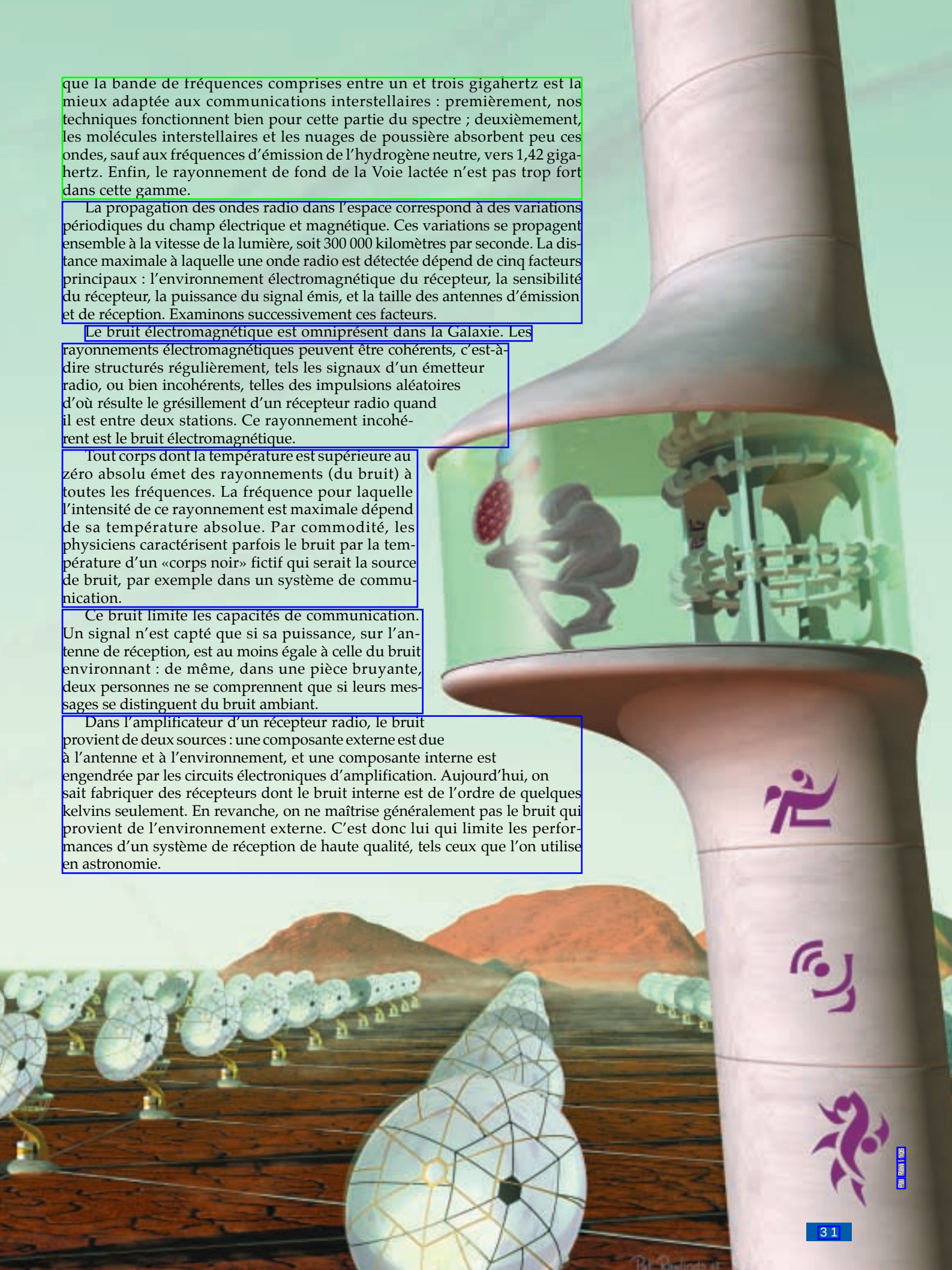
La propagation des ondes radio dans l'espace correspond à des variations périodiques du champ électrique et magnétique. Ces variations se propagent ensemble à la vitesse de la lumière, soit 300 000 kilomètres par seconde. La distance maximale à laquelle une onde radio est détectée dépend de cinq facteurs principaux : l'environnement électromagnétique du récepteur, la sensibilité du récepteur, la puissance du signal émis, et la taille des antennes d'émission et de réception. Examinons successivement ces facteurs.

Le bruit électromagnétique est omniprésent dans la Galaxie. Les rayonnements électromagnétiques peuvent être cohérents, c'est-à-dire structurés régulièrement, tels les signaux d'un émetteur radio, ou bien incohérents, telles des impulsions aléatoires d'où résulte le grésillement d'un récepteur radio quand il est entre deux stations. Ce rayonnement incohérent est le bruit électromagnétique.

Tout corps dont la température est supérieure au zéro absolu émet des rayonnements (du bruit) à toutes les fréquences. La fréquence pour laquelle l'intensité de ce rayonnement est maximale dépend de sa température absolue. Par commodité, les physiciens caractérisent parfois le bruit par la température d'un «corps noir» fictif qui serait la source de bruit, par exemple dans un système de communication.

Ce bruit limite les capacités de communication. Un signal n'est capté que si sa puissance, sur l'antenne de réception, est au moins égale à celle du bruit environnant : de même, dans une pièce bruyante, deux personnes ne se comprennent que si leurs messages se distinguent du bruit ambiant.

Dans l'amplificateur d'un récepteur radio, le bruit provient de deux sources : une composante externe est due à l'antenne et à l'environnement, et une composante interne est engendrée par les circuits électroniques d'amplification. Aujourd'hui, on sait fabriquer des récepteurs dont le bruit interne est de l'ordre de quelques kelvins seulement. En revanche, on ne maîtrise généralement pas le bruit qui provient de l'environnement externe. C'est donc lui qui limite les performances d'un système de réception de haute qualité, tels ceux que l'on utilise en astronomie.



Le bruit externe provient du sol (pour les antennes construites sur une planète), de l'atmosphère planétaire, du fond diffus galactique, des sources astronomiques d'émission radio à l'intérieur et à l'extérieur de la Galaxie, et du fond diffus cosmologique, qui est une relique du Big Bang. Sur la Terre, pour un récepteur à la pointe de la technique, protégé des rayonnements du sol par un écran, toutes ces sources réunies, y compris le bruit interne du récepteur, engendrent un bruit de fond de température égale à environ 15 kelvins.

Quelle doit être la puissance émise pour qu'une antenne de réception lointaine reçoive un signal supérieur à ce bruit? Observons tout d'abord que la puissance du bruit dans le récepteur dépend de la gamme de fréquences, ou bande passante, du récepteur : comme le bruit est réparti sur tout le spectre, plus on restreint la bande passante du récepteur, plus l'énergie du bruit reçu est faible. Par conséquent, pour détecter un signal faible, on doit limiter la largeur de bande à la plus petite valeur compatible avec le signal attendu.

À l'inverse, plus la bande passante est large, plus la quantité de données que l'on peut envoyer est grande. Par exemple, la parole humaine nécessite une bande passante de 2,5 kilohertz environ, et un signal de télévision classique occupe une bande passante de 4,5 mégahertz. Pour notre étude, fixons-nous un débit d'information de cinq bits par seconde. En fonction des valeurs relatives du signal et du bruit, une bande passante d'environ 2,5 hertz est nécessaire. Cette bande passante permet d'envoyer le message «bonjour» en sept secondes, en supposant que cinq bits sont nécessaires pour coder chaque caractère.

Ayant déterminé une bande passante et une température de bruit, reprenons la question initiale : quelle doit être la puissance du signal, sur l'antenne réceptrice, pour qu'il sorte du bruit? La puissance de bruit est le produit de la constante de Boltzmann (notée k , elle est égale à $1,38 \times 10^{-23}$ joule par kelvin) par la température absolue de bruit (15 kelvins) et par la bande passante du système de détection, soit 2,5 hertz. Ainsi, on trouve une puissance de bruit de $5,2 \times 10^{-22}$ watt. Le récepteur doit recevoir des signaux ayant au moins cette puissance pour

les détecter. Supposons que l'antenne ait une surface de un mètre, la puissance nécessaire serait alors de $5,2 \times 10^{-22}$ watt par mètre carré.

La puissance nécessaire pour que l'émetteur envoie une telle intensité sur l'antenne de réception dépend de la distance entre l'émetteur et le récepteur. Elle dépend aussi du mode d'émission du signal : soit omnidirectionnel (ou isotrope), soit sous forme de faisceau contenu dans un cône étroit. Pour la distance, choisissons arbitrairement 100 années-lumière, soit $9,46 \times 10^{17}$ mètres. Quant au mode d'émission, nous supposons qu'il est omnidirectionnel, car une civilisation qui veut communiquer sa présence ignore où se trouvent ses éventuels correspondants.

Comme la puissance diminue, au cours de la propagation des signaux, comme l'inverse du carré de la distance, nous pouvons calculer la puissance nécessaire d'un émetteur omnidirectionnel situé à la distance fixée : c'est $(5,2 \times 10^{-22}) \times 4\pi \times (9,46 \times 10^{17})^2$, soit $5,8 \times 10^{15}$ watts.

Cette puissance est plus de 7 000 fois supérieure à celle que fournissent toutes les centrales électriques d'Europe. De surcroît, à l'échelle de la Galaxie, 100 années-lumière est une distance minuscule. Seulement un millier d'étoiles se trouvent à moins de 100 années-lumière de la Terre, soit moins d'un millionième de pour cent des étoiles de la Galaxie. Pour avoir une chance de tomber sur une civilisation évoluée, il faudrait atteindre les planètes situées dans un volume d'espace beaucoup plus grand.

Concentrer la puissance?

Plutôt que d'utiliser un système d'émission et de réception isotrope, pourrait-on concentrer les émissions? Considérons le compromis entre la taille de l'antenne de réception et la puissance d'émission requise. Une antenne dont la surface est grande par rapport au carré de la longueur d'onde qu'elle reçoit a un «faisceau» de réception étroit. Quand une telle antenne est pointée vers un émetteur, le gain est élevé. Autrement dit, la puissance nécessaire pour arriver jusqu'au récepteur est inférieure. L'inconvénient de cette méthode (il faut que le faisceau soit pointé dans une direction donnée) est notable, car on ne sait pas où se trouvent les correspondants éventuels.

Quelle est la probabilité d'une communication par cette méthode? Nous avons supposé, dans l'exemple précédent, que l'antenne de réception avait une surface efficace de un mètre carré seulement. Si l'appareil utilisé est une antenne parabolique, son diamètre doit être égal à 1,5 mètre environ. Une telle antenne, fonctionnant avec des ondes de 20 centimètres de longueur, aurait un cône de réception d'environ 11 degrés. À l'intérieur de ce cône, le signal est bien reçu, à condition d'être pointé vers l'émetteur.

En augmentant la taille des antennes de réception, on capte des émissions moins puissantes, mais la taille du cône de réception diminue. Considérons, par exemple, un réseau d'antennes de un kilomètre de côté. Captant des rayonnements de longueur d'onde égale à 20 centimètres, ce réseau aurait un gain un million de fois supérieur à celui de l'antenne de un mètre carré. Malheureusement, sa largeur de faisceau ne serait que de onze millièmes de degré : la puissance d'émission nécessaire serait un million de fois inférieure, mais l'étroitesse du faisceau demanderait une extrême précision de pointage et de suivi.

En utilisant également une antenne de un kilomètre carré pour l'émission du signal, nous améliorons le gain du même ordre de grandeur – mais avec un rétrécissement du faisceau identique à celui de la réception. En supposant qu'un réseau d'antennes de un kilomètre carré émette vers un réseau analogue, la puissance d'émission est réduite à 5 700 watts, mais il est alors très improbable que les faisceaux très étroits de ces antennes viennent à s'aligner.

Le dilemme est classique : avec de petites antennes, la puissance de l'émetteur est considérable, et, avec des antennes gigantesques, les besoins en puissance sont modestes, mais les faisceaux d'émission et de réception sont si fins qu'il paraît difficile que les faisceaux des correspondants se croisent à travers l'étendue de la Galaxie. Même si toutes les solutions intermédiaires sont possibles, les distances gigantesques qui séparent les étoiles requièrent des mesures extrêmes.

Est-ce sans espoir? Non, car les paramètres que nous avons considérés ici, bien que plausibles, sont arbitraires. Si les éventuels correspondants utilisaient des appareils ayant un rapport signal sur bruit inférieur, ou une bande

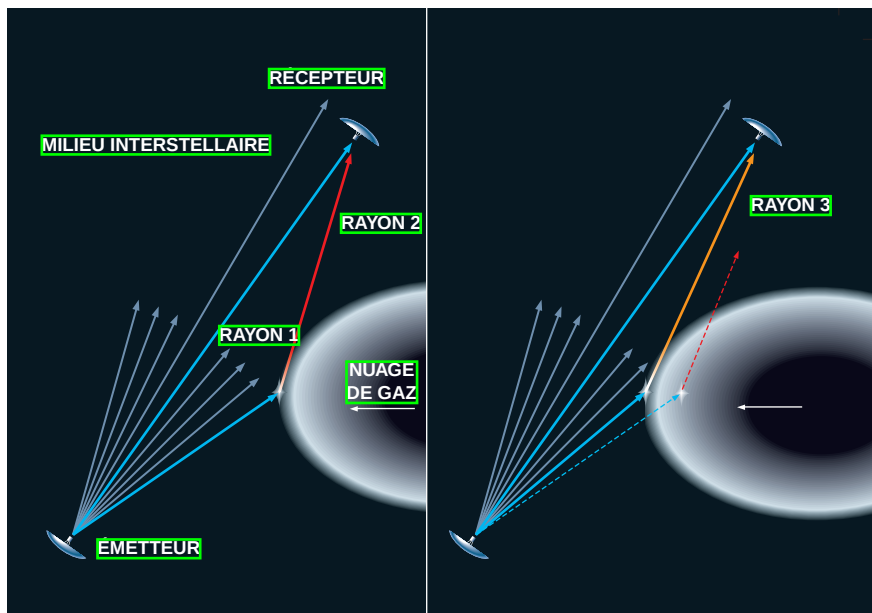
passante plus étroite, les besoins en puissance seraient réduits.

De surcroît, une très grande antenne de réception, constituée d'un assemblage d'antennes et de récepteurs individuels, peut être programmée de manière à recevoir simultanément des faisceaux de nombreuses directions différentes, ce qui faciliterait la recherche des émetteurs inconnus. L'utilisation simultanée de nombreux canaux de réception, un multiplexage en fréquence, déjà en œuvre dans les programmes SETI actuels, améliore l'efficacité de la réception. Toutefois, les avantages de ce multiplexage ne peuvent s'appliquer à l'émission sans une perte de puissance de chaque faisceau ou de chaque canal de fréquence, car la puissance totale est fixée.

À travers le milieu

Jusqu'ici, nous avons examiné la conception des deux extrémités de la communication, l'émetteur et le récepteur. Cependant, entre les deux, le rayonnement peut se propager difficilement dans l'immensité interstellaire. Dans le vide, les ondes électromagnétiques se propagent en ligne droite, à moins de rencontrer un obstacle matériel qui les absorbe, les réfléchit ou les réfracte. Or, le milieu interstellaire n'est pas vide : il contient des gaz, des poussières et des champs magnétiques qui perturbent la propagation de ces ondes. Le long des trajets immenses, ces éléments dévient les ondes de leur chemin en ligne droite, changent leur polarisation et font fluctuer l'intensité du signal reçu. Ces phénomènes plaident contre l'utilisation de faisceaux d'émission et de réception trop étroits, et rendent plus criants encore le besoin d'émetteurs puissants.

Lorsque les ondes traversent un nuage de gaz, où la vitesse de propagation est inférieure à celle dans le vide, les ondes sont réfractées. Cette réfraction dévie les ondes et superpose parfois deux ondes qui ont la même source. Lorsque l'onde pénètre dans le nuage, l'une de ses composantes peut être plus ralentie qu'une autre : un déphasage apparaît entre les composantes de l'onde. Selon l'amplitude du déphasage et selon la différence de chemin entre les composantes de l'onde, les portions déphasées peuvent se renforcer, s'annuler ou



2. LES ONDES sont perturbées quand elles se propagent dans la Galaxie. Notamment, les nuages de gaz réfractent, c'est-à-dire dévient la lumière (en rouge et en orange), de sorte qu'elle interfère avec un autre rayon (en bleu) issu du même émetteur. Quand le nuage se déplace, la différence de longueur de trajectoire entre le rayon direct et le rayon réfracté change. Ainsi, les rayons reçus passent continûment et continuellement d'un renforcement constructif à une annulation réciproque : le signal reçu (la somme des signaux propagés selon les divers chemins) scintille sur le récepteur, et une partie de sa cohérence est perdue.

donner toutes les combinaisons intermédiaires.

Supposons maintenant que la nappe de gaz qui se trouve sur le chemin de la deuxième onde soit en mouvement par rapport à la trajectoire de l'onde, de sorte que le déphasage varie dans le temps (voir la figure 2). Dans ce cas, l'onde qui résulte de la superposition des deux composantes variera dans le temps, tantôt s'annulant, tantôt se renforçant. Des effets du même type résultent des réflexions, des décalages Doppler, etc. Toutes ces perturbations transforment un signal initialement régulier en un signal fortement modulé à son arrivée, sur un lointain récepteur.

L'utilisation des ondes radio pour les contacts interstellaires est décou-

rageante. La taille gigantesque de la Galaxie impose des systèmes redhibitoires : des puissances d'émission considérables ou des antennes immenses, avec des faisceaux si fins qu'ils risquent de ne servir à rien. Le système nécessaire pour envoyer un signal vers un grand échantillon d'étoiles est certainement hors de portée de notre technique. De surcroît, même si l'on parvenait à établir le contact, plusieurs siècles pourraient s'écouler avant que nous recevions une réponse à notre message. Même si nous réussissions à venir à bout des formidables contraintes physiques, le projet de communication avec des civilisations extraterrestres nécessiterait une ténacité dont l'humanité n'a pas encore fait preuve.

George SWENSON est professeur émérite d'électrotechnique et d'astronomie à l'Université de l'Illinois.

Extraterrestrials, Where Are They? sous la direction de Ben Zuckerman et Michael H. Hart, Cambridge University Press, 1995.

Christian DE DUVE, *Vital Dust : Life as a Cosmic Imperative*, Basic Books, 1995.

James M. CORDES, T. Joseph W. LAZIO et Carl SAGAN, *Scintillation-Induced*

Intermittency in SETI, in *Astrophysical Journal*, vol. 487, pp. 782-808, 1^{er} octobre 1997.

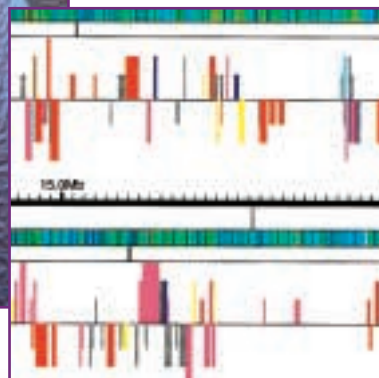
Andrew J.H. Clark et David H. CLARK, *Aliens : Can We Make Contact with Extraterrestrial Intelligence?* Fromm International, 1999.

Peter Douglas WARD et Donald BROWNEE, *Rare Earth : Why Complex Life Is Uncommon in the Universe*, Copernicus Books, 2000.

Introduction

Il y a seulement dix ans, les mots «génomique» ou «génomique» n'étaient connus que des généticiens. Aujourd'hui, ils sont dans tous les journaux, évoqués par toutes les télévisions ou les radios, connus de l'ensemble du public. Entre-temps, plusieurs milliards de francs ont été alloués au *Projet génome humain* : des laboratoires de plusieurs pays ont déchiffré ensemble les trois milliards de lettres qui composent le «mode d'emploi» d'un être humain. Aujourd'hui, ce projet est quasi achevé, et la concurrence fait rage entre des organismes publics et des sociétés privées. De nombreux groupes pharmaceutiques cherchent à exploiter les résultats du travail effectué.

Avec les articles de ce dossier, *Pour la Science* fait le point sur la génomique et présente deux disciplines – la bio-informatique et la protéomique – qui sont les filles naturelles du décryptage du génome humain.



La lecture du génome humain

KATHRYN BROWN

Le décryptage de l'information génétique humaine a été une rude épopée... Pourtant l'aventure ne fait que commencer.

A l'heure où vous lisez cet article, l'essentiel de l'information génétique d'un être humain est disponible sur le réseau *Internet*. Le profane trouvera, répétées, les lettres A, T, C, G qui font un texte qui remplirait plus de 200 annuaires téléphoniques. Les biologistes y lisent un enthousiasmant roman : celui de l'être humain.

En effet, les lettres A, T, C et G désignent les nucléotides, c'est-à-dire les sous-unités chimiques de l'ADN, la molécule qui porte les gènes et commande le fonctionnement de toutes nos cellules. Le *Projet génome humain*, qui a coûté plus de 1,8 milliard de

francs, a établi la carte complète de nos gènes, composée de six milliards de nucléotides. Ce consortium public, qui réunit depuis dix ans plus de 1 100 scientifiques, fédère quatre grands centres de séquençage aux États-Unis, le Centre Sanger, en Angleterre, et divers laboratoires au Japon, en France, en Allemagne et en Chine.

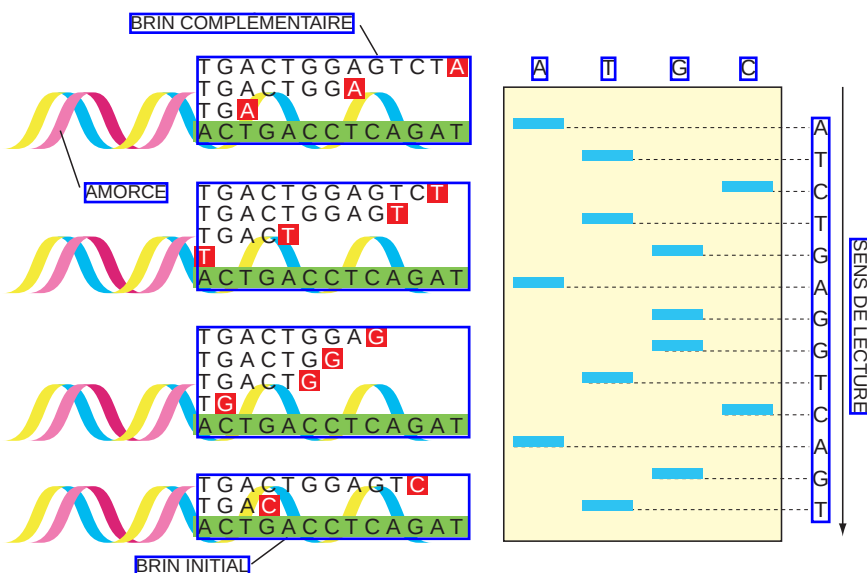
Ce travail de fourmi est resté discret jusqu'en avril 2000, lorsque la Société privée *Celera Genomics* a annoncé sa propre évaluation du génome humain. Cette rivalité du privé contre le public a mis en vedette le génome de l'être humain, son séquençage et son utilisation. Détaill-

lons l'histoire de ce séquençage. En quoi peut-il améliorer notre quotidien, et notamment la médecine? Quelles contraintes ses applications devront-elles respecter?

De l'ADN au séquençage

En 1953, Francis Crick et James Watson découvrent la structure de l'ADN, la molécule que l'on savait être le support de l'hérédité de tous les organismes vivants : deux chaînes d'éléments nommés nucléotides (représentés par les lettres A, T, C et G) s'apparient de façon qu'un A soit toujours face à un T, et un C face à un G ; les deux chaînes forment une double hélice. Puis, en 1966, Marshall Nirenberg et H. Gobind Khorana déchifrent le code génétique, c'est-à-dire qu'ils découvrent comment une succession de nucléotides code la synthèse d'une protéine. L'ADN est une gigantesque bibliothèque où sont stockés tous les programmes de synthèse des protéines, dont une cellule a besoin pour fonctionner. Chaque programme est un gène : déchiffrer, ou séquencer l'ADN d'une cellule, consiste à «lire» toutes les lettres de l'ADN, afin, ensuite, d'identifier tous les gènes. Les biologistes ont d'abord séquencé le génome de divers organismes simples : la levure, la mouche... (voir l'encadré de la page 43), puis ils ont cherché à identifier celui d'un être humain, mais comment lire les trois milliards de lettres qui le compose?

L'approche des laboratoires du *Projet génome humain* est laborieuse, mais précise. À partir de cellules sanguines et sexuelles (des spermatozoïdes), les généticiens ont isolé les



1. LE SEQUENÇAGE DE L'ADN selon la méthode de F. Sanger s'effectue avec des molécules fluorescentes (en rouge) qui bloquent la synthèse d'un brin complémentaire à partir d'un brin initial (en vert). À partir d'une amorce (en rose), une enzyme greffe les nucléotides complémentaires : en ajoutant la molécule fluorescente, on obtient des fragments de longueurs différentes, que l'on sépare sur un gel d'électrophorèse selon leur taille (à droite). Lorsque cette opération est répétée pour chaque type de nucléotide, on lit la séquence de l'ADN directement sur le gel.

23 paires de chromosomes. Ils ont alors coupé l'ADN de chaque chromosome en grands fragments d'environ 100 000 nucléotides chacun ; puis après les avoir clonés, c'est-à-dire reproduits chacun en de nombreux exemplaires, ils les ont ordonnés en y détectant de courtes séquences d'ADN dont on connaît la localisation et qui jouent le rôle de balises. Les grands fragments ordonnés ont ensuite été à leur tour découpés en fragments plus petits, dont on a identifié la séquence complète par une méthode qui dérive de celle que le biochimiste britannique Frederick Sanger mit au point en 1977. Dans cette méthode, on utilise une enzyme nommée ADN polymérase, qui, à partir d'une amorce, lit un brin et fabrique un brin complémen-

taire en additionnant des nucléotides libres qu'elle trouve dans la solution. Lorsque la synthèse est en cours, à l'aide de molécules fluorescentes que l'on ajoute après différents laps de temps, on bloque la synthèse à des stades divers et l'on obtient des fragments de longueurs diverses, que l'on sépare selon leur masse, en les plaçant sur un gel, dans un champ électrique : la vitesse de déplacement de chaque fragment dépend de sa masse et de sa charge électrique. En juxtaposant les quatre résultats (un pour chaque type de nucléotide), un lecteur optique d'un séquenceur automatique localise la fluorescence et recompose finalement la séquence du morceau d'ADN initial (voir la figure 1). Les informations sont stockées dans des banques de données, sur d'énor-

mes disques durs, et gérées par des programmes d'analyse et de récupération de données (voir l'article de Ken Howard sur la bio-informatique).

Ainsi, patiemment, les généticiens ont reconstruit les séquences de tous les chromosomes, puis celles du génome entier. Cette méthode, appliquée à une encyclopédie, consisterait à extraire les pages, successivement, puis à déchirer chaque page en morceaux, à identifier ces derniers, à reconstituer la page et, enfin, l'encyclopédie entière.

En revanche, les généticiens de la Société *Celera Genomics*, après avoir testé

2. L'USINE DE SEQUENÇAGE de la Société Celera Genomics dispose de 300 séquenceurs d'ADN automatisés, capables d'identifier des dizaines de millions de nucléotides par jour.



leurs méthodes sur le génome de la drosophile, ont choisi de déchiqueter toute l'encyclopédie en une seule fois ! Avec cette technique, dite aléatoire, tout le génome est découpé en fragments

que l'on séquence selon la même technique que celle utilisée par le consortium public. Le travail de reconstitution du génome à partir des fragments est effectué par de puissants ordinateurs :

tout repose sur la puissance de calcul et sur l'utilisation d'algorithmes pour analyser les données (voir la figure 3).

Au mois d'avril 2000, les équipes de *Celera Genomics* ont annoncé que les

L'inventaire des gènes

L'interprétation de la séquence du génome humain n'est pas un exercice aussi simple que prévu. Les outils bio-informatiques actuels butent, d'une part, sur des difficultés connues et, d'autre part, ne sont pas adaptés à traiter des données de séquence encore inachevées. À l'exception des deux plus petits chromosomes (21 et 22), dont la séquence est complète, il est aujourd'hui impossible de procéder à un inventaire sérieux des gènes humains. Nous restons limités à des estimations globales parfois discutables. La récente controverse sur le nombre de gènes du génome est un parfait exemple de notre niveau d'ignorance.

L'alternance des régions codantes, nommées exons, et des régions non codantes, les introns, des gènes des organismes multicellulaires est une source de grandes difficultés pour l'interprétation des séquences du génome et, notamment, pour l'identification des gènes. Cette complication est encore accrue par le phénomène d'«épissage alternatif» qui, à partir d'un seul gène, donne naissance à plusieurs ARN messagers, c'est-à-dire à plusieurs protéines. Connus depuis plus de 20 ans, ce mécanisme est plus important que prévu chez les vertébrés.

Pour identifier les gènes dans des séquences d'ADN d'organismes multicellulaires, les généticiens recourent à deux types de méthodes informatiques. D'une part, ils

comparent des séquences à l'aide de programmes, tel BLAST, et, d'autre part, ils utilisent des programmes de prédictions des exons et, dans une moindre mesure des gènes entiers.

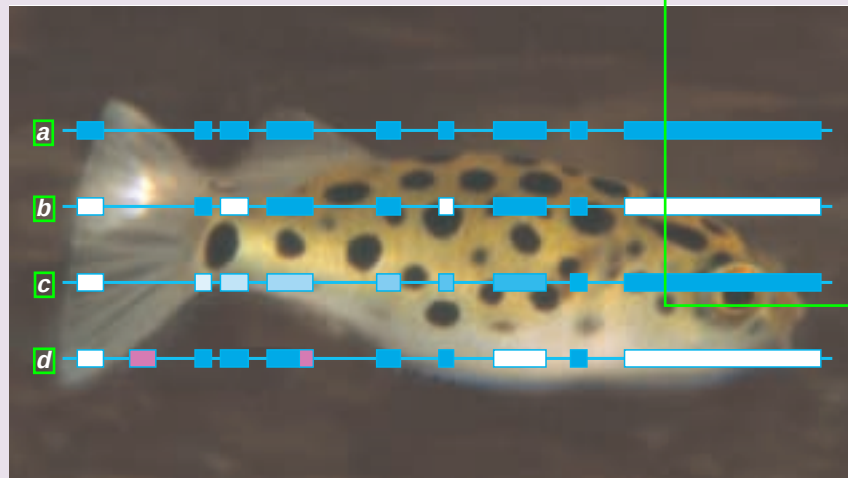
Certains auteurs soulignent l'intérêt des comparaisons avec l'ADN d'autres génomes pour identifier les gènes et pour essayer de connaître les fonctions de leurs protéines. C'est précisément afin d'identifier des gènes humains au moyen de telles comparaisons, que nous poursuivons, au *Genoscope*, le séquençage du génome du poisson *Tetraodon* (voir la figure). Ces poissons ont un génome compact environ huit fois plus petit que celui des mammifères, mais qui contient les mêmes gènes. Les estimations les plus récentes à partir de ces comparaisons donnent moins de 30 000 gènes chez l'être humain.

Appliquées aux ADN complémentaires, c'est-à-dire des ADN synthétisés à partir d'ARN composés des seuls exons, les comparaisons de séquences, délimitent sans hésitation les introns et les exons d'un gène. Malheureusement, la plupart des séquences d'ADN complémentaires sont incomplètes : au *Genoscope*, nous avons entrepris un programme d'identification des séquences entières d'ADN complémentaires pour remédier à cette situation.

Les programmes informatiques de prédiction utilisent de nombreux critères pour identifier les exons des gènes. Cependant, ils en détectent souvent qui n'existent pas dans la réalité. En outre, les résultats des analyses informatiques sont issus de calculs et ne correspondent pas nécessairement à la réalité : valider ces prédictions par une démarche expérimentale est donc indispensable.

En raison de ces difficultés et de quelques autres, l'inventaire des gènes du génome humain est loin d'être achevé et la controverse actuelle sur le nombre de gènes humains ne se résorbera pas avant des mois voire quelques années. Il est certes capital d'entreprendre dès à présent des programmes à grande échelle pour l'exploration de la fonction des gènes et des protéines, mais il serait grave de négliger de faire un inventaire aussi exhaustif que possible des gènes humains.

Jean WEISSENBACH,
Directeur général du *Genoscope*,
Centre national de séquençage



La composition en exons, des séquences codantes (rectangles bleus), et en introns, des séquences non codantes (lignes bleues), d'un gène (a) peut être identifiée par diverses méthodes à partir d'une séquence nouvelle. La première consiste à comparer cette séquence nouvelle à celle de gènes connus. Toutefois, lorsque les gènes ne sont que faiblement apparentés, une fraction des exons (en blanc) est ignorée (b). La comparaison à des séquences d'ADN complémentaires est la deuxième méthode. Cependant, les séquences disponibles sont souvent incomplètes : la probabilité de détection des exons varie selon leur position le long du gène (c, l'intensité du bleu est proportionnelle à la probabilité de détection d'un exon). Enfin, la troisième méthode requiert un programme informatique de prédiction (d) ; certains exons réels ne sont pas prédits, alors que d'autres, qui n'existent pas, le sont (en rose). D'autres encore ne sont pas prédits intégralement (en rose et blanc). Le recours simultané à plusieurs méthodes augmente la qualité de l'identification d'un gène.

résultats du séquençage «approximatif», c'est-à-dire à plus de 90 pour cent, du génome d'une personne anonyme seraient disponibles dans un délai de six semaines. Le consortium public a immédiatement crié au coup bas, arguant que le séquençage approximatif du génome d'une seule personne, et vérifié seulement trois fois, était loin des objectifs annoncés lors de la formation de la société, en 1998 : elle voulait alors séquencer entièrement les génomes de plusieurs personnes, et vérifier le résultat dix fois.

Et maintenant ?

De surcroît, la Société *Celera Genomics* a utilisé les résultats que les équipes du *Projet génome humain*, consortium public, déposaient régulièrement sur une banque de données publique, nommée *GenBank*, accessible par le réseau *Internet*.

Au début du mois de mai 2000, les généticiens du *Projet génome humain* annonçaient à leur tour la fin du séquençage de 90 pour cent du génome humain, ainsi que la séquence complète du chromosome 21, présent en trois copies au lieu de deux chez les personnes atteintes de trisomie 21 et qui contient les gènes de plusieurs autres maladies génétiques (la séquence complète du génome humain s'achèvera en 2003). Avec le séquençage, une première étape est achevée ; disposant des mots du génome, les généticiens cherchent aujourd'hui la grammaire et la syntaxe du message génétique, tandis que les sociétés pharmaceutiques étudient de nouveaux traitements fondés sur l'utilisation de ces informations.

Comment utiliser cette liste de trois milliards de lettres ? Les généticiens ont longtemps pensé qu'après le séquençage de l'ADN ils comprendraient qui nous sommes, pourquoi nous contractons des maladies, pourquoi nous vieillissons... Ils avaient tort : aujourd'hui, ils ne peuvent encore qu'imaginer à quoi servira la séquence du génome (voir l'article de *Caroll Ezzell*).

Ainsi, dans le domaine de la médecine, certaines sociétés pharmaceutiques espèrent fabriquer des médicaments sur mesure : un pharmacien vous délivrera un médicament pour la tension artérielle adapté à votre seul profil génétique, tandis que la personne suivante obtiendra une

Les «autres» génomes

Qu'avons-nous de commun avec des mouches, des vers, des levures ou des souris ? *A priori*, pas grand-chose. Pourtant les généticiens utilisent les génomes de ces organismes – dits modèles – pour étudier diverses maladies humaines, notamment le cancer et le diabète.

Les gènes des organismes modèles sont intéressants, car les protéines qu'ils codent ressemblent souvent à celles des êtres humains : un gène humain a souvent son équivalent chez des vers ou chez des drosophiles (ou mouches du vinaigre). Examinons le séquençage génétique des principaux organismes modèles.

La levure

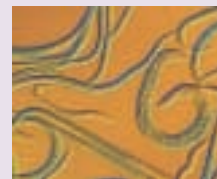
En 1996, la levure de boulangerie *Saccharomyces cerevisiae* a été le premier organisme pourvu d'un noyau dont les secrets génétiques ont été percés. Environ 2 300 (38 pour cent) des protéines de levure ont un équivalent chez les mammifères. Grâce à cet organisme, les biologistes ont découvert les mécanismes fondamentaux du contrôle de la division cellulaire et de la réparation de l'ADN, des processus importants dans le cancer. Puis ils ont élucidé le mode d'action de certains médicaments anticancéreux, tel le cisplatine, qui tue les cellules cancéreuses dotées d'une altération spécifique de leur faculté de réparation de l'ADN.



4. Syed S. Photo Researchers, Inc.

Le ver

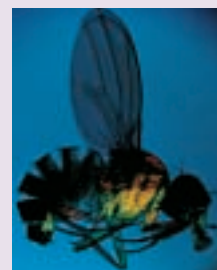
Le génome du ver nématode *Caenorhabditis elegans* a été séquencé en 1998. Les biologistes ont alors découvert qu'un tiers des protéines de ce ver, soit plus de 6 000, ressemblent à celles de mammifères. Aujourd'hui, plusieurs sociétés utilisent ces petits vers – d'environ un millimètre de long – dans des tests de dépistage automatisés, pour rechercher de nouveaux médicaments. Par exemple, pour identifier un principe actif de médicament contre le diabète, on place dans un petit récipient un à dix vers dont une mutation du gène du récepteur de l'insuline bloque la croissance, puis on ajoute des molécules variées et l'on identifie celles qui rétablissent la croissance des vers : elles pallient l'anomalie génétique. Comme certains diabètes résultent également d'une mauvaise utilisation de l'insuline par les cellules, la méthode conduit à de nouveaux traitements contre le diabète.



5. Sammers S. Photo Researchers, Inc.

La drosophile

Le séquençage du génome de la drosophile s'est terminé en mars 2000. Il a été effectué par des organismes publics et par la Société *Celera Genomics*. Environ 60 pour cent des 289 gènes connus de maladies humaines ont un gène homologue chez cette mouche, et 50 pour cent des protéines de drosophiles ressemblent à des protéines de mammifères. Par exemple, en mars 2000, des généticiens ont identifié chez la drosophile un gène homologue au gène humain *p53* : un gène suppresseur de tumeur qui, muté, laisse les cellules devenir cancéreuses. Le gène *p53* intervient dans une voie métabolique qui mène au suicide des cellules génétiquement endommagées. Les cellules de mouches où la protéine P53 est inactivée ne s'autodétruisent plus, après une altération génétique, et prolifèrent anarchiquement. De telles analogies font de la mouche, moins coûteuse que les souris, un modèle parfait pour l'étude des cancers humains dans les cas où ils sont dus à un défaut dans ce gène.



6. Pascale Petermann P. Inc.

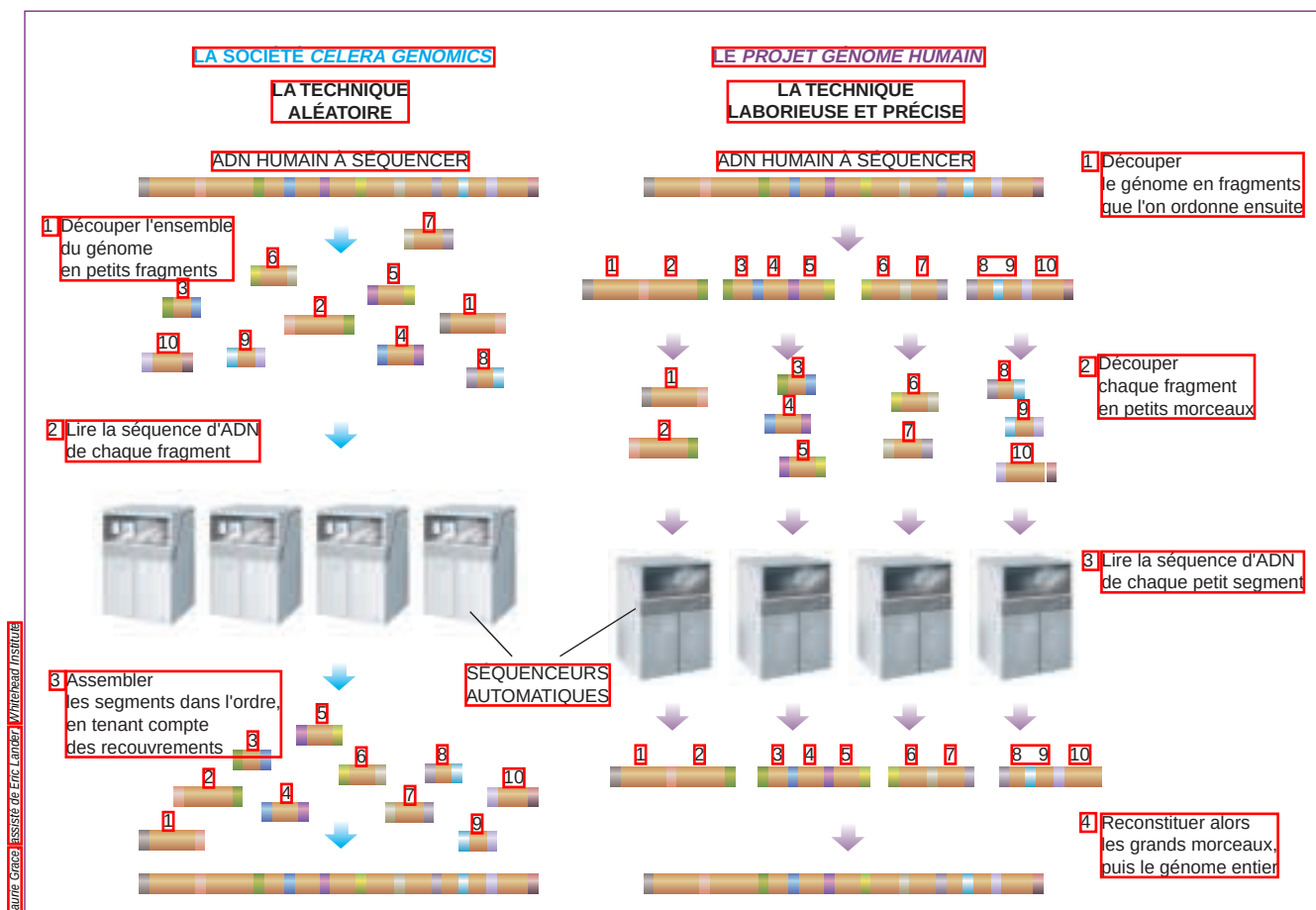
La souris

Aussi appropriés que soient les autres organismes modèles, tous les nouveaux médicaments sont testés sur des mammifères : généralement la souris. Plus de 90 pour cent des protéines de souris identifiées ressemblent à des protéines humaines. Aujourd'hui, environ trois pour cent du génome de la souris est séquencé, et une séquence approximative est prévue pour 2003. Peut-être la Société *Celera Genomics*, qui a décidé d'y consacrer des moyens exceptionnels, y parviendra-t-elle avant ?



7. Thomson Laboratory

Julia KAROW, journaliste à *Scientific American*



3. LES STRATÉGIES DE SÉQUENÇAGE.

autre version du même médicament. D'autres sociétés mettent au point des tests sanguins qui détecteront des gènes pathogènes et prévoiront, par exemple, l'apparition de la maladie de Huntington. Enfin, ultime Graal, la thérapie génique, qui vise à réintroduire directement des gènes fonctionnels dans l'organisme du malade, suscite de nombreux espoirs.

Après s'être uniquement intéressés aux 99,9 pour cent de nos gènes que nous partageons avec nos voisins, les généticiens et les sociétés pharmaceutiques ont compris l'intérêt des 0,1 pour cent de nos gènes qui varient : la modification, ou polymorphisme, d'un seul nucléotide, tel un T à la place d'un C dans la séquence d'un gène, peut entraîner un dysfonctionnement.

Ces variations génétiques ténues expliquent les variations d'efficacité d'un grand nombre de médicaments : certains ne sont efficaces que sur 30 à 50 pour cent de la population ; dans des cas extrêmes, un produit qui sauve une personne peut en intoxiquer une autre. Par exemple, la Rezu-

line, administrée contre certains diabètes, a été associée à plus de 60 pour cent de décès par empoisonnement hépatique. Un test génétique individualisé serait utile en déterminant si un tel médicament peut vous soigner efficacement ou risque de vous tuer.

Des géants de la pharmacie s'associent à de plus petites sociétés spécialistes de génomique : aujourd'hui, la médecine personnalisée n'en est qu'au stade de l'éprouvette, mais certains experts lui prédisent un avenir florissant.

Des brevets...

La connaissance du génome modifiera, sans doute aussi, la conduite des essais thérapeutiques et inaugurer une nouvelle médecine. Pourtant, les difficultés restent de taille. Certaines sont d'ordre technique : on devra chercher la fonction réelle des gènes qui seront trouvés dans le génome. Des problèmes sociaux et politiques se posent aussi : le diagnostic d'une maladie incurable qui se manifestera dans 20 ans est-il sou-

haitable? Enfin, l'un des points délicats est celui des brevets : comment peut-on breveter un gène?

Personne ne s'alarme lorsqu'une marque de voitures dépose un brevet pour un nouveau modèle ou quand une société de micro-électronique protège un nouveau système. En revanche, beaucoup s'indignent quand les groupes industriels revendiquent des droits sur l'ADN humain. Le problème est complexe, car de tels brevets sont parfois, pour les sociétés, le seul moyen de mettre au point des tests ; ainsi, sans brevets, la Société Myriad Genetics n'aurait pu mettre au point les tests de dépistage de mutations dans les gènes *BRCA1* et *BRCA2*, associées au cancer du sein et de l'ovaire.

De nombreux biologistes conviennent que les brevets semblent nécessaires, mais certains se plaignent que les sociétés privées profitent des découvertes qui ont demandé un travail de séquençage contraignant avec les fonds publics. Les données accessibles sur le site *GenBank* fournissent au monde entier un aperçu sans

précédent sur ce qui constitue un être humain : en avril 2000, 35 000 personnes ont consulté sur *Internet*, chaque jour, le site *GenBank*. Certaines de ces personnes travaillent dans des sociétés qui établissent des catalogues de gènes, afin d'en breveter les utilisations potentielles. Par exemple, la Société *Incyte* a obtenu plus de 500 brevets de gènes complets, et elle en a demandé 7 000 autres. Pourtant, la fonction des gènes brevetés parfois n'est pas connue. Simultanément, la Société *Incyte* – et d'autres – vendent par *Internet* la séquence de plus de 100 000 gènes ou des exemplaires réels de ces gènes.

De nombreux biologistes craignent que de telles activités ne ralentissent les recherches : si l'accès aux informations est protégé ou si l'utilisation des gènes est limitée par des brevets, l'étude de nombreuses maladies sera entravée.

...et des tests

Alors que le débat fait rage, les États ajoutent à la confusion. Ainsi, en mars 2000, au cours d'une déclaration à la presse ambiguë, Bill Clinton et Tony Blair ont revendiqué un libre accès aux résultats bruts des études de séquençage : les sociétés privées de génomique qui avaient précieusement protégé leurs séquences semblaient visées. Suite à la conférence de presse et, surtout, à la chute des cours des actions en Bourse des sociétés concernées, les dirigeants de certaines d'entre elles ont annoncé la mise à disposition gratuite de leurs résultats bruts sur le génome. Cependant, dans les semaines suivantes, des responsables du gouvernement américain ont précisé que les brevets pour de nouveaux produits de santé d'origine génétique restaient autorisés.

En France, les lois de bioéthique promulguées en 1994 interdisent la commercialisation de tout produit d'origine humaine. Toutefois, au niveau européen, l'interdiction est plus floue : un élément isolé du corps humain, notamment la séquence d'un gène, peut être breveté s'il a été isolé ou produit. Le gouvernement français hésite à incorporer cette directive dans le droit français et le ministre de la Recherche reste opposé aux brevets des séquences d'ADN.

Au cœur du débat figure l'inventivité et la démonstration de l'utilité

des séquences brevetées. Aujourd'hui, les brevets découlent principalement des analyses informatiques des gènes : à partir de séquences complètes ou partielles de gènes, on détermine la séquence en acides aminés de la protéine codée par le gène. En comparant cette protéine hypothétique à des protéines connues, on cherche la fonction du gène et son utilité pour la mise au point d'un médicament ou d'un test de diagnostic. Ce résultat est la base de la demande de brevet.

Aujourd'hui, les brevets concernent plus de 740 tests génétiques qui sont déjà commercialisés ou sont en cours de mise au point. Cependant, les lacunes de la génétique sont considérables : par exemple, plusieurs années après la mise au point des tests des gènes *BRCA1* et *BRCA2*, les généticiens ignorent la contribution exacte des mutations de ces gènes au risque de cancer chez les femmes. Ce n'est qu'en août 2000 que des biologistes ont découvert que la protéine codée par le gène *BRCA1* participe, avec d'autres, au repliement de l'ADN dans le noyau des cellules et commande ainsi l'expression d'autres gènes. Pour la maladie de Huntington, le test identifie exactement la modification du gène, mais il n'indique ni l'âge auquel apparaîtront les symptômes ni la gravité et la progression de la maladie.

Les conséquences sociales de ces tests sont également importantes. La présence d'une maladie dans une famille peut inciter une personne à subir un test génétique de dépistage, et les employeurs ou les assureurs pourraient utiliser les résultats à des fins discriminatoires. Une législation pour protéger les individus et bannir la discrimination génétique est nécessaire. Ainsi, le séquençage est porteur d'espoir, mais aussi d'abus : la possession des résultats compte moins que leur utilisation.

Kathryn BROWN est journaliste scientifique.

E. PENNISI, *Are Sequencers Ready to Annotate the Human Genome?*, in *Science*, vol. 287, n° 5461, page 2183, 24 mars 2000.

E. GREEN, *The Human Genome Project and Its Impact on the Study of Human Disease*, in *Metabolic and Molecular Bases of Inherited Disease*, sous la direction de Charles R. Scriver, huitième édition, McGraw-Hill, 2000.

La bio-informatique

KEN HOWARD

Une nouvelle discipline issue de la biologie et de l'informatique transforme des données brutes du séquençage du génome en informations utiles aux biologistes.

En 1967, dans le film *Le lauréat*, un ami du héros lui murmure : «le plastique» ; en lui désignant le grand secteur industriel des années 1970, il l'invite à y faire carrière. Si le film était tourné aujourd'hui, le mot «plastique» serait remplacé par «bio-informatique».

Le séquençage du génome humain, c'est-à-dire la lecture des nucléotides A, C, T et G qui constituent le code génétique humain, a fourni trois milliards de bits d'information : pour les stocker, on devrait utiliser plus de 2 000 disquettes informatiques. Pourtant, aussi impressionnante soit-elle, cette information n'est rien par rapport à ce que l'on vise : on ignore encore où et quand les gènes sont activés ; quelles sont les petites différences génétiques entre individus, nommées polymorphismes mononucléotidiques ; quelles sont les structures des protéines codées par les gènes ; comment les protéines interagissent (voir l'article de Carol Ezzell) et interviennent dans les maladies... De surcroît, le génome humain ne sera exploré que si on le compare aux génomes d'organismes dits

modèles, telles la drosophile et la souris. Au total, les biologistes font face à un «raz de marée» de données. Si la bio-informatique parvient à utiliser ces données, elle changera le visage de la médecine.

Plusieurs sociétés vendent des produits et des services de bio-informatique : elles proposent, par exemple, de collecter et de stocker les données, d'effectuer des recherches dans des banques de données et d'interpréter les données. Leurs clients sont des laboratoires pharmaceutiques et des sociétés de génie génétique, qui déboursent parfois des sommes importantes pour de tels services. Selon des experts financiers, le chiffre d'affaires de la bio-informatique devrait atteindre 15 milliards de francs.

Pourquoi ? Parce que la bio-informatique aide à trouver plus efficacement les principes actifs de médicaments que les méthodes classiques : en identifiant les molécules anormales qui causent les maladies, elle facilite le tri des molécules testées. Elle réduit ainsi le temps de recherche et de mise au point des médicaments et augmente donc le temps pendant lequel

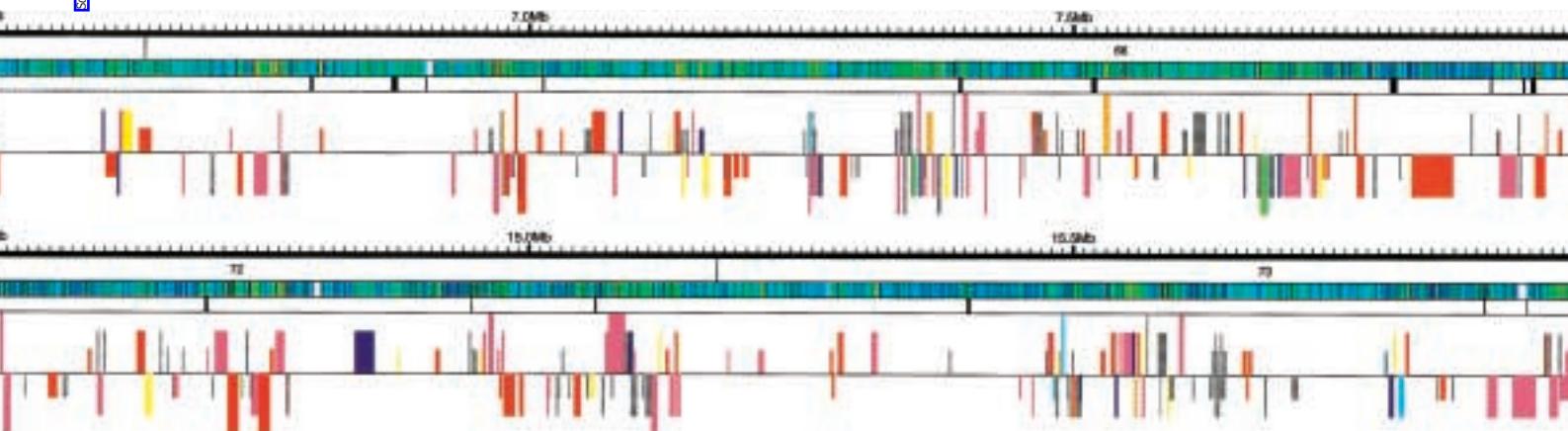
un médicament est en vente avant l'expiration de son brevet : un an de gagné dans la commercialisation d'un médicament, c'est parfois plusieurs milliards de francs de gains supplémentaires.

Toutefois, avant d'éventuelles retombées financières, les entreprises de bio-informatique doivent apprendre à assimiler la pléthore de données génomiques et affiner leur techniques d'analyse. Dans un souci de prospective, elles doivent aussi se donner des objectifs plus ambitieux, telle la recherche de relations entre les diverses informations et discerner un schéma global.

Du bricolage à l'automatisation

La discipline est née au début des années 1980, quand le Laboratoire européen de biologie moléculaire, puis le Département américain de l'énergie ont créé les banques de données EMBL et GenBank pour enregistrer les courtes séquences d'ADN que les biologistes commençaient à obtenir. Initialement, la structure était réduite à une seule

SCIENCE 201 837 01 5461 24 mars 2000



1. CES CARTES DE CHROMOSOMES de la drosophile illustrent une utilisation de la bio-informatique : la comparaison des gènes de divers organismes. Les barres montrent les régions où les gènes de la mouche sont semblables aux gènes d'autres espèces.

pièce : sur des claviers ne comportant que les lettres A, C, T et G, quelques techniciens saisissaient fastidieusement les séquences d'ADN publiées dans les revues de génétique. Puis les informaticiens mirent au point des protocoles afin que les généticiens contactent EMBL ou *GenBank* et y placent leurs données. Après l'avènement du réseau *Internet*, les données de séquences sont devenues accessibles, gratuitement, de n'importe quel endroit du monde.

Parallèlement, en France, Jean Dausset créait le Centre d'études du polymorphisme humain. À partir de données génétiques recueillies sur les membres de familles à la généalogie connue, les généticiens de ce laboratoire ont cartographié le génome humain, c'est-à-dire identifié et localisé des fragments d'ADN communs à tous les êtres humains. La vocation du CEPH était de mettre ces informations à la disposition de la communauté scientifique.

Après le lancement du *Projet génome humain*, en 1990, le volume des données stockées dans les banques de données a crû exponentiellement. Quelques années plus tard, les techniques de séquençage étaient améliorées grâce à des robots et à des ordinateurs, et les débits de stockage ont encore augmenté. Aujourd'hui, les banques de séquences contiennent les données qui décrivent plus de sept milliards de sous-unités de l'ADN.

Quand le projet public s'est développé, des sociétés privées ont utilisé ses résultats pour effectuer leurs propres séquençages et établir leurs propres bases de données. Certaines d'entre elles identifient plus de 20 millions de nucléotides d'ADN en une seule journée, d'autres détiennent jusqu'à 50 000 milliards de bits de données enregistrées, soit l'équivalent de 80 000 disques compacts.

À titre de comparaison

Que faire d'une telle quantité d'information? La recherche de similitudes, ou d'homologies, entre un fragment d'ADN nouvellement séquencé et des fragments d'ADN séquencés auparavant et provenant d'organismes variés, est l'une des opérations élémentaires de la bio-informatique. Quand ils détectent ainsi une quasi-correspondance, les biologistes prédisent le type de protéine que la nouvelle séquence code. Ainsi, les cibles thérapeutiques pertinentes sont détectées rapidement, et des principes actifs sont plus facilement identifiés.

Dans les années 1990, des informaticiens ont ainsi mis au point un groupe de programmes qui comparent les séquences d'ADN : ce logiciel, nommé BLAST, fait partie d'une série d'outils de recherche de séquences d'ADN ou de protéines qui sont accessibles auprès de nombreux fournisseurs d'accès à des bases de données, tel le Centre de ressources *Infobiogen*, qui coordonne, en France, la recherche, le développement et l'exploitation de l'informatique appliquée à la génomique.

Infobiogen offre aussi l'accès à des banques de données qui contiennent les structures tridimensionnelles des protéines, les génomes complets d'organismes modèles, et des

2. LES DONNÉES GÉNÉTIQUES sont la matière première de la bio-informatique. Celle-ci recherche des informations dans des banques de données gigantesques où sont stockées les séquences génétiques des organismes. L'ADN est décrit par les lettres A, C, T et G, qui représentent les quatre constituants de l'ADN. Chercher une séquence particulière dans le génome, c'est comme chercher une aiguille dans une botte de foin... ou les initiales PLS de *Pour la Science* dans le tableau ci-contre.

références aux revues scientifiques relatives à chaque information des banques de données.

L'utilité de la bio-informatique s'est illustrée dès 1993, quand des biologistes ont isolé des «ostéoclastes»

de personnes souffrant de tumeurs osseuses. Les ostéoclastes sont des cellules qui participent à l'équilibre des os ; tandis que des cellules nommées ostéoblastes font croître les os, les ostéoclastes les dégradent. On

les pense hyperactives chez les personnes qui souffrent d'ostéoporose. Les généticiens isolèrent des ADN complémentaires d'ostéoclastes de tumeurs, déterminèrent la séquence de ces ADN et la comparèrent à celle

Ne dites plus *in vitro*. Dites plutôt *in silico*.

Après le séquençage du génome humain, les spécialistes de prospective imaginent la modélisation bio-informatique de toutes les réactions biochimiques qui s'enchaînent jusqu'à l'apparition de la vie humaine. Stuart Kauffman, directeur du Groupe Bios de l'Institut de Santa Fe, prévoit des applications inédites de la bio-informatique.

Pour la Science : Quel est l'avenir de la bio-informatique et de la biologie *in silico* ?

S. Kauffman : On peut imaginer que les gènes d'une cellule humaine fonctionnent à la manière d'un ordinateur chimique, parallèle, où des gènes sont en permanence activés ou inactivés, et ce, à l'intérieur d'un réseau complexe d'interactions. Des voies de signalisation intracellulaires (voir *La communication dans les cellules*, par John Scott et Tony Pawson, *Pour la Science*, août 2000) sont reliées à des voies de contrôle génétique selon des modalités que nous entrevoyons à peine. Le plus énorme projet bio-informatique consiste à identifier les mécanismes de ce réseau, qui commande le développement cellulaire, de la fécondation de l'œuf jusqu'à l'âge adulte.

PLS : Quelles en seront les retombées ?

S. K. : Nous saurons sur quels gènes agir, ou sur quelles séquences de gènes et dans quel ordre, afin de redonner un comportement normal aux cellules cancéreuses ou, au contraire, de provoquer leur apoptose (la mort cellulaire programmée). On pourra aussi activer la régénération des tissus. Par exemple, on apprendra à régénérer la moitié du pancréas qu'un malade aura perdue ou des cellules bêta, productrices d'insuline, chez des diabétiques.

PLS : Comment atteindre un tel objectif ?

S. K. : La bio-informatique ne suffira pas. Elle devra être épaulée par les mathématiques, qui mettront au point les outils nécessaires pour trouver des circuits de rechange dans des réseaux cellulaires défectueux. On devra également confronter les nouveaux outils à des études expérimentales pour mettre en évidence ce que sont réellement les réseaux biochimiques dans les cellules. La bio-informatique doit s'ouvrir et inclure l'idée d'expérience. Chacun

des secteurs de la bio-informatique fournira des hypothèses qui seront à vérifier.

PLS : Quels sont les principales difficultés ?

S. K. : Imaginons que je choisisse dix gènes qui interagissent par les protéines qu'ils codent, et que j'essaie de construire le circuit de leurs interactions. Ces dix gènes sont probablement reliés à d'autres gènes, situés hors du circuit considéré : je n'aurais ainsi qu'un petit morceau de circuit prélevé à un circuit bien plus grand, qui inclut des milliers de gènes. Comment représenter le comportement d'un circuit sans connaître les gènes externes auxquels il est relié ?

Par exemple, nous connaissons depuis longtemps chaque neurone des ganglions gastriques du homard (un faisceau de nerfs reliés au système digestif de l'animal), ainsi que toutes les connexions synaptiques et les neuromédiateurs de ces neurones. Chaque ganglion n'a que 13 à 20 neurones, mais on ne parvient pas à représenter son comportement.

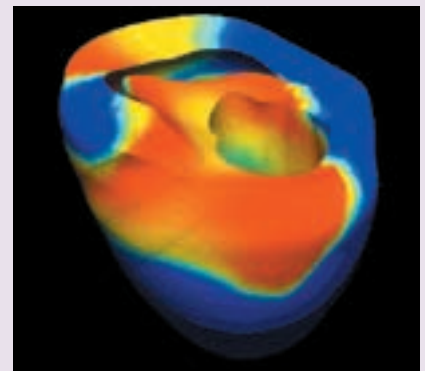
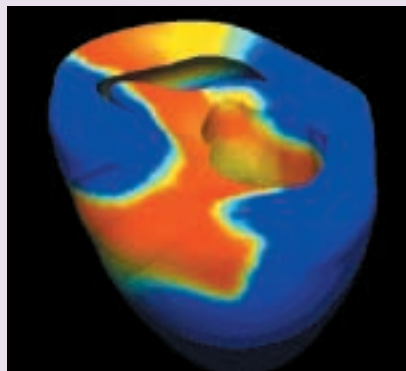
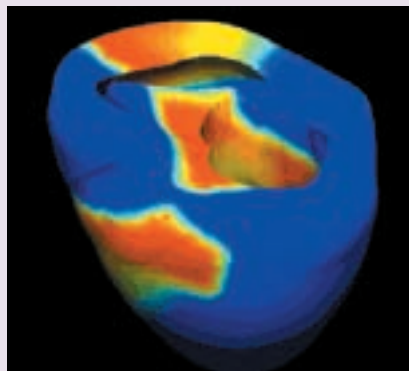
Certes, la compréhension d'un système à 13 variables est difficile, mais le génome humain est un système à 100 000 variables ! Si chaque variable a deux états possibles, combien y a-t-il de situations possibles ? $2^{100\,000}$, soit approximativement $10^{30\,000}$. Ainsi, même en ne traitant les gènes que comme des systèmes à deux états (activé ou désactivé, ce qui est inexact puisqu'ils ont des degrés d'activité intermédiaires), on a $10^{30\,000}$ situations possibles. Rappelons que le nombre de particules dans l'Univers connu est égal à 10^{80} ...

PLS : Où en sommes-nous, face à ce problème ?

S. K. : Nous commençons seulement son étude, mais le jour viendra où un cancer ne sera plus seulement diagnostiqué d'après la morphologie de la cellule cancéreuse, mais aussi à partir des modèles détaillés de l'activité des gènes et des protéines dans cette cellule.

PLS : A quelle échéance : un an, ou 200 ans ?

S. K. : Dans 10 à 12 ans, nos outils seront au point. Nous progresserons alors dans la compréhension des circuits commandés par des pans entiers du génome. Nous devrions avoir compris la majeure partie du génome dans 30 à 40 ans.



CE MODÈLE INFORMATIQUE D'UN CŒUR en fibrillation (les contractions sont désordonnées et rapides) montre l'activité électrique déréglée qui parcourt l'organe. Le modèle a été éta-

bli à partir des modifications de l'expression de quatre gènes dont le fonctionnement est perturbé lorsque se produit une lésion cardiaque.

des banques de données. Ces comparaisons spécifiques de l'échantillon ont permis de découvrir un gène sur-exprimé dans les ostéoclastes : celui d'une classe de molécules déjà identifiées et nommées cathepsines. Sans la bio-informatique, qui a ainsi fourni une cible thérapeutique prometteuse en quelques semaines, des années d'expériences de laboratoire classiques et un peu de chance auraient été nécessaires.

Aujourd'hui, les biologistes cherchent un médicament pour bloquer la cible de la cathepsine K. Les recherches de principes actifs, ainsi que les évaluations de l'activité, de la toxicité et de l'absorption, se font encore dans un laboratoire de biochimie classique, c'est-à-dire sur une paillasse avec de la verrerie. Ce travail long et fastidieux sera progressivement confié aux ordinateurs, grâce aux nouveaux outils bio-informatiques et à la quantité croissante de données sur les structures des protéines et sur les voies métaboliques de l'organisme (voir l'encadré de la page 48) : après la biologie *in vivo* est venue la biologie *in vitro* ; bientôt, elle sera *in silico*.

Beaucoup pensent que les promesses réelles de la génomique ne seront tenues que si la bio-informatique se développe : ce n'est pas la génomique qui est révolutionnaire, mais l'utilisation qui peut en être faite.

La bio-informatique à domicile

Cette révolution bio-informatique se fonde sur des groupes de toutes tailles. Certaines entreprises de bio-informatique pourvoient de gros clients, en ciblant leurs produits : elles créent des programmes personnalisés et des services de consultation adaptés à l'ensemble de l'entreprise. En revanche, d'autres visent des clientèles plus petites ou des organismes universitaires : elles proposent, par le réseau *Internet*, des services d'achat à la carte et de consultation de banque de données.

Enfin, de grands groupes pharmaceutiques valorisent leurs travaux en génomique en créant des unités internes de bio-informatique. Parmi eux, certains ont organisé de vastes services afin de mettre en œuvre les logiciels d'accès aux bases de données : ces groupes veulent ainsi rapprocher des services classiquement séparés, tels ceux qui sont chargés de la recherche de nouveaux

Entrez dans l'ambiance orientale
des mille et une nuits et laissez-vous
charmer par l'imagination
de Shéhérazade contant la science
et les tribulations des savants

Philippe Boulanger

Les mille et une nuits de la science

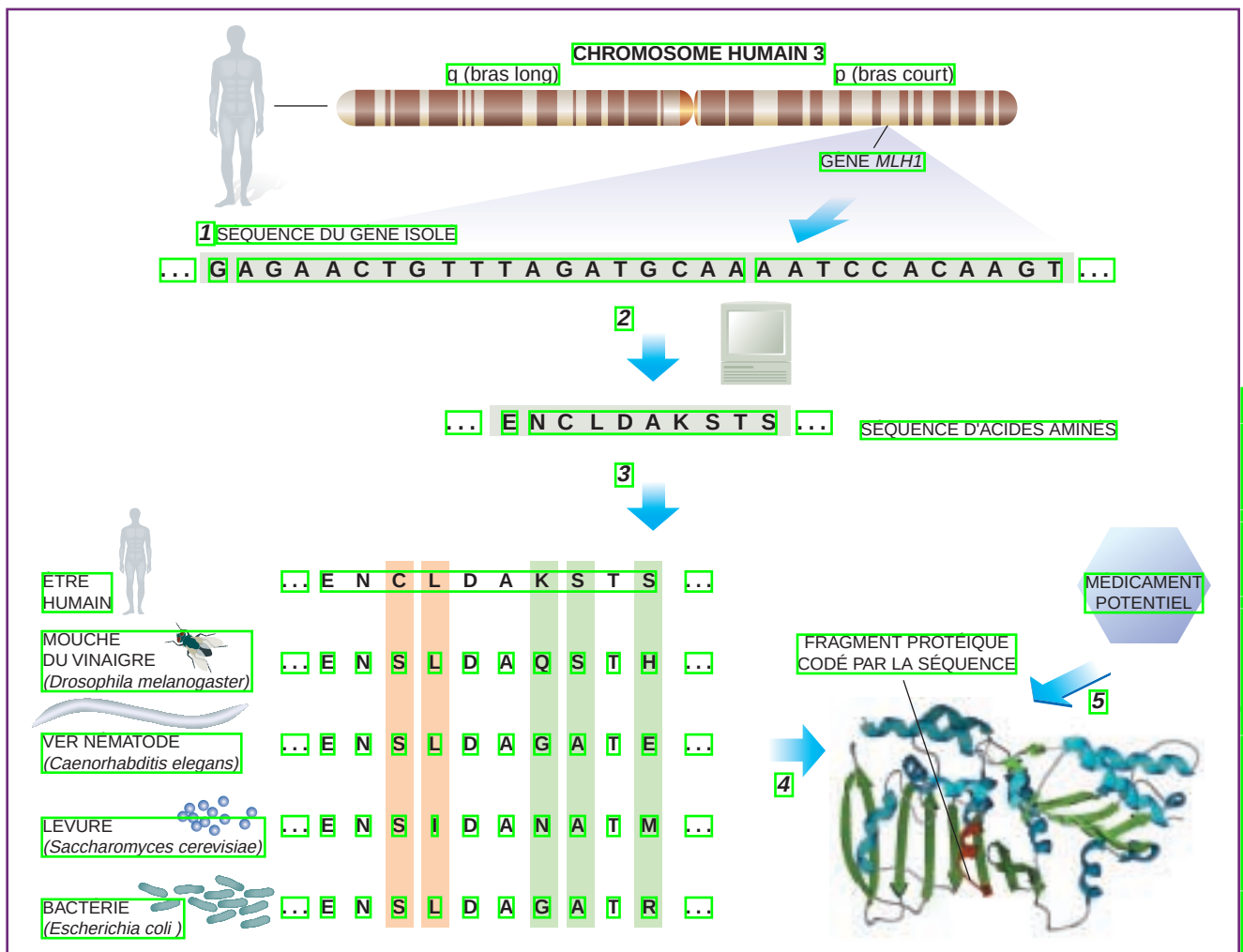


«Dans ce livre, Philippe Boulanger, Directeur de la revue Pour la Science, réussit le tour de force de vulgariser des concepts difficiles en charmant son lecteur par une subtile danse... des neurones».

Hervé Ponchelet
Le Point

Code 2445 • 240 pages • Prix 100 F
Voir bon de commande p. 98

BELIN • POUR LA SCIENCE



AURÉ GRÉCH, ASSISTANT DE MARK CHERBON ET PAUL BERT, DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS VI, ET DAVID WINEGAR, DE L'UNIVERSITÉ DE PENNSYLVANIE (NCH)

3. LA COMPARAISON DE GÈNES HUMAINS avec ceux d'animaux modèles offre parfois des pistes pour la recherche de nouveaux médicaments. Par exemple, quand on connaît la séquence du gène humain *MLH1* (1), associé au cancer du côlon, un programme informatique peut traduire cette séquence d'ADN en une séquence d'acides aminés, qui compose la protéine codée (2). On cherche ensuite des séquences similaires dans des banques de données

de protéines synthétisées par des organismes modèles (3). Les bandes vertes indiquent des zones de grande variabilité (les acides aminés sont peu conservés d'un organisme à un autre), et les bandes orange, des zones de faible variabilité. On modélise la protéine humaine à partir des structures des protéines similaires des organismes modèles (4) et, enfin, on crée une molécule qui se fixe à la protéine modélisée (5).

produits, de la formulation, de la toxicologie et des essais cliniques.

Naguère, ces services étaient excessivement cloisonnés, et les données d'un service restaient inaccessibles aux autres équipes. La bio-informatique donnera la même information à tous, et chacun fera un usage individuel des données.

En outre, les services internes communs de bio-informatique réduisent les investissements informatiques. Par exemple, les moyens logiciels individuels, utilisés par les différents chercheurs d'une même entreprise pour l'accès aux bases de données et le traitement de ces données, sont remplacés par une plate-forme logicielle unique : les économies se comptent en millions de francs.

Afin d'intégrer pleinement la bio-informatique à leurs sociétés, des

groupes pharmaceutiques concluent parfois des alliances stratégiques ou même acquièrent des sociétés de génie génétique plus petites ; ainsi munis de partenaires et de réseaux commerciaux, ils augmentent leurs compétences bio-informatiques et s'adaptent aux nouvelles techniques sans réorganiser leurs propres structures.

Toutefois, le regroupement des banques de données est notoirement périlleux. On cherche à éviter les mauvaises communications à l'aide de systèmes de nomenclature des données comprise aussi bien des diverses banques de données que des systèmes d'appellation. Imaginons qu'une banque A communique avec une banque B, celle-ci avec une banque C, C avec D, et ainsi de suite. Si A change ses données, les références de la banque D

risquent d'être périmées, surtout quand le renouvellement des données est permanent. Ce problème s'aggrave, car les connaissances en biologie et les analyses par ordinateur sont de plus en plus complexes.

Des améliorations systématiques seront d'une grande aide, mais le vrai progrès semble reposer sur l'ingéniosité des utilisateurs : le succès de la bio-informatique n'est pas une affaire de matériel, ni de logiciel, mais bien d'intelligence.

Ken HOWARD est journaliste scientifique.

D. B. SEARLS, *Using Bioinformatics in Gene and Drug Discovery*, in *Drug Discovery Today*, vol. 5, n° 4, pp. 135-143, avril 2000.

Au-delà du génome

CAROL EZZELL

Le séquençage de l'ADN d'un être humain n'est qu'une première étape dans l'étude du fonctionnement d'une cellule : on doit aujourd'hui explorer les protéines codées par ces gènes.

Au moment où les gènes sont d'actualité, ils sont supplantés par les protéines. Un savoir est acquis : les séquences des milliers de gènes humains. Les biologistes doivent en conquérir un autre : le fonctionnement de ces gènes ; on cherche où et quand ils s'expriment, et quelles sont les propriétés des protéines qu'ils codent. Ce nouveau champ du savoir, nommé protéomique concentre la majorité des efforts financiers et humains des organismes publics et des sociétés privées.

Pour comprendre la protéomique, examinons comment un gène code une protéine. Dans le noyau d'une cellule, un segment d'ADN qui correspond au gène est d'abord transcrit en une molécule d'ARN, également formée de nucléotides. Cet ARN est composé de régions codantes, nommées exons, et de régions non codantes, les introns. L'ARN est débarrassé des introns par des enzymes d'«épissage» : ainsi se forme l'ARN messager. Si l'ADN est la série de plans qu'une cellule utilise pour synthétiser les protéines, l'ARN messager est la copie d'une partie du plan que l'entrepreneur emmène sur le chantier chaque jour. Le chantier est à l'extérieur du noyau, dans le cytoplasme, où la séquence en nucléotides de l'ARN messager est traduite en une séquence en acides aminés, qui composent la protéine.

Bien que chaque cellule de l'organisme contienne l'ensemble de l'ADN utile à la fabrication et au fonctionnement d'un être humain, beaucoup de ces gènes ne s'expriment jamais, c'est-à-dire ne sont jamais transcrits en ARN messagers, lorsque le développement embryonnaire est achevé. En outre, les gènes ne s'expriment qu'en fonction de leur situation dans les tissus et de leur rôle dans l'organisme. Par

exemple, dans une cellule bêta du pancréas, le gène de l'insuline s'exprime intensément (la cellule est pleine d'ARN messagers qui codent l'insuline), alors qu'il reste muet dans un neurone.

Jusqu'au début des années 1980, les biologistes pensaient qu'à un gène correspondait un seul ARN messager et une seule protéine. Il n'en est rien : un gène peut être transcrit par segments, qui sont ensuite coupés et regroupés en une variété d'ARN messagers ; en outre, les protéines ainsi synthétisées sont parfois modifiées : ajout de groupes méthyle ($-CH_3$), liaison à des sucres, etc. Ainsi la connaissance du génome humain n'est pas celle du fonctionnement cellulaire : les biologistes doivent étudier le «transcriptome», c'est-à-dire l'ensemble des ARN messagers produits par les cellules, et le «protéome», c'est-à-dire l'ensemble des protéines synthétisées à partir des ARN messagers.

Des puces biologiques

L'étude du transcriptome bénéficie d'un progrès technique récent : la mise au point de biopuces. Sur des plaques de verre d'environ un centimètre carré, on ancre les molécules d'ADN complémentaires des ARN messagers que l'on recherche. Ces molécules d'ADN complémentaires sont obtenues à partir des ARN messagers. Ces derniers s'associent spécifiquement à leurs ADN complémentaires selon le même principe que les deux brins de la double hélice d'ADN. L'ARN messager d'un gène ne s'associera qu'au seul ADN qui lui est complémentaire. Celui-ci est une sorte de copie du gène sans intron.

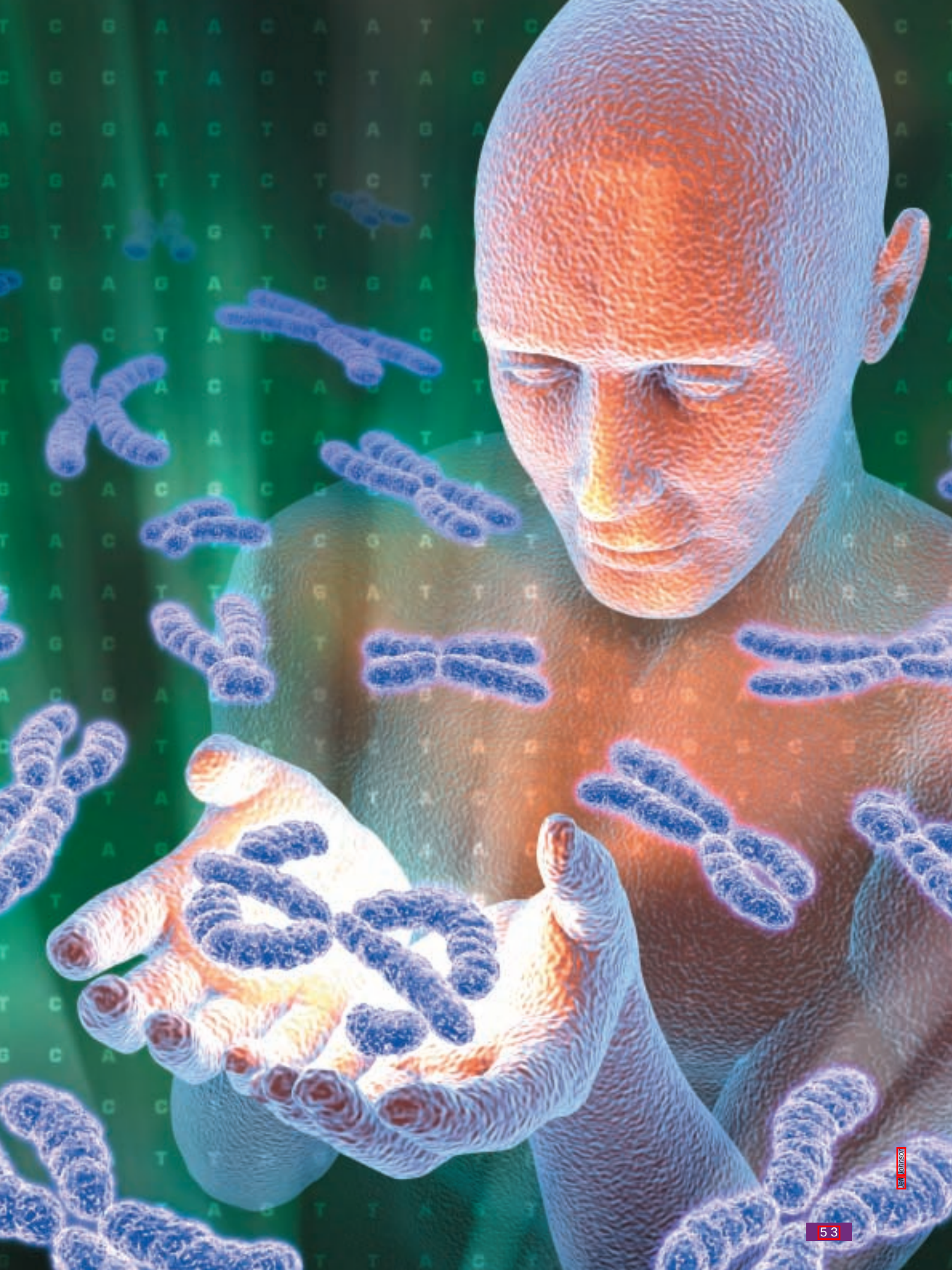
Pour utiliser ces biopuces, les biologistes extraient les ARN messagers d'un échantillon, ils les marquent par une molécule fluorescente, puis les ver-

sent sur la puce. La lame de verre de la biopuce est divisée en microsurs (jusqu'à plusieurs dizaines de milliers). Sur chacune d'elles, on n'ancre qu'un seul ADN complémentaire bien identifié. Chaque ARN fluorescent de l'échantillon s'associe à l'ADN qui lui est complémentaire. À l'aide d'un microscope, on repère les microsurs fluorescentes : selon les parties des biopuces auxquelles les ARN messagers fluorescents se lient, les biologistes déduisent, de la séquence des ADN complémentaires, les séquences des ARN messagers de l'échantillon. De telles puces détectent simultanément plus de 60 000 ARN messagers ; par exemple, des biopuces détectent spécifiquement les ARN messagers humains associés au cancer.

Depuis 1998, des centres de recherche publics et privés utilisent de tels systèmes pour identifier les ARN messagers produits par divers types de cellules cancéreuses. Grâce aux biopuces, les généticiens savent, par exemple, que 5 692 gènes sont actifs dans les cellules de cancer du sein et que, parmi eux, 277 sont inactifs dans les cellules des autres tissus. Des composés qui bloqueraient les protéines codées par ces 277 gènes pourraient être des médicaments anticancéreux qui auraient moins d'effets secondaires que les chimiothérapies actuelles. Aussi des millions de francs ont-ils été récemment investis dans l'analyse des protéines impliquées dans le cancer.

L'étude des ARN messagers n'est qu'un moyen : on veut surtout mieux connaître les protéines qui, replacées dans le fonctionnement d'une

1. APRES AVOIR ANALYSE ses chromosomes, l'espèce humaine doit aujourd'hui déterminer où et quand les gènes sont actifs, et identifier les protéines que ces gènes codent.



cellule, constituent les cibles des médicaments. Seules, mais nombreuses! On suppose que les milliers de gènes humains produisent plus d'un million de protéines différentes. Certains experts estiment qu'au cours de la prochaine décennie l'industrie pharmaceutique disposera de plus de 10 000 protéines humaines contre lesquelles on pourra chercher des principes actifs : c'est 25 fois plus de cibles que l'industrie pharmaceutique n'en a évaluées depuis qu'elle existe. Pour satisfaire leurs actionnaires, les

grandes sociétés pharmaceutiques doivent identifier trois à cinq nouveaux médicaments potentiels chaque année, soit deux à cinq fois plus qu'aujourd'hui. Aussi, elles s'associent avec des petites sociétés spécialisées qui leur fournissent des cibles potentielles de médicaments déjà testées.

Des machines à protéines

Des sociétés privées qui ont participé au séquençage du génome s'intéressent aujourd'hui à l'étude de

l'expression protéique. La Société *Celera genomics*, en association avec l'Institut suisse de bio-informatique, a créé une entreprise qui veut identifier tout le protéome humain. Simultanément, les techniques d'analyse se perfectionnent : en 1999, une équipe a ainsi publié les plans d'un scanner moléculaire qui automatiserait le processus fastidieux de séparation et d'identification des milliers de protéines d'une cellule.

Aujourd'hui, pour étudier les protéines, on utilise souvent la technique

La protéomique fonctionnelle

L'étape suivant le séquençage du génome et l'identification des gènes consiste à étudier les protéines que ces derniers codent. Cependant, les protéines n'interviennent pas de façon isolée dans les processus biologiques cellulaires : elles constituent avec d'autres protéines une ou plusieurs cascades d'interactions, qui sont l'expression de fonction biologiques. La caractérisation de ces interactions entre protéines est le champ d'application de la protéomique fonctionnelle qui met en correspondance les données du génome et les observations biologiques.

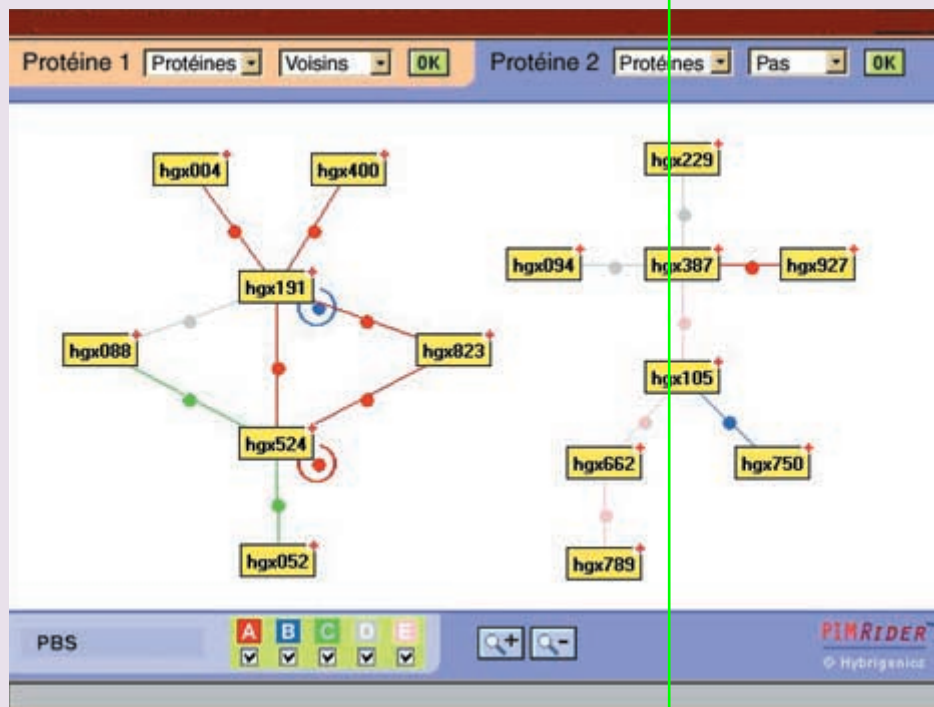
Les techniques de la protéomique fonctionnelle s'appliquent à trois niveaux de complexité croissante : l'identification des protéines qui agissent directement avec quelques protéines choisies ; l'identification des cas-

cades d'interactions complètes ; enfin, l'identification des connexions entre les différentes cascades d'interactions.

En France, la Société *Hybrigenics* met au point des méthodes d'étude de la protéomique fonctionnelle. Par exemple, elle a amélioré la technique de double hybride de la levure décrite dans l'article. Ainsi, au lieu de mettre en présence dans une levure deux protéines entières qui déclencheront une réaction observable lorsqu'elles interagissent, on segmente les protéines «proies» en de nombreux fragments, puis on cherche les éventuelles interactions de la protéine «appât» et ces nombreux «fragments proies». Les résultats obtenus sont plus fiables et plus précis. Grâce à cette méthode, on détermine quel fragment d'une «protéine proie» agit avec une protéine «appât» donnée.

En contrepartie, le nombre d'expérimentations et de

la complexité du traitement des données issues de ces expérimentations, augmente, en particulier lors de l'identification des réseaux d'interactions. Le nombre d'interactions étudiées atteint souvent plusieurs centaines de millions à quelques milliards : l'exploitation des données requiert alors des systèmes informatiques adaptés. Les systèmes bio-informatiques mis en œuvre effectuent un «criblage à haut débit», c'est-à-dire le tri de plusieurs centaines de millions d'interactions testées en quelques semaines. On obtient ainsi une cartographie des réseaux d'interactions protéiques (voir la figure) que les utilisateurs visualisent directement à partir de leur ordinateur via le réseau Internet.



Sur son ordinateur, un utilisateur obtient une cartographie d'interactions protéiques. Les rectangles jaunes représentent les protéines et les lignes de couleur, les interactions.

Donny STROBERG, PDG de la Société *Hybrigenics*

d'électrophorèse bidimensionnelle, qui sépare les protéines selon leur charge électrique et leur taille : on dépose une solution qui contient de nombreuses protéines sur une étroite bande de polymère dont l'acidité varie d'un bord à l'autre. Quand on applique au gel une différence de potentiel électrique, chaque protéine du mélange se déplace à une vitesse qui dépend de sa charge et de l'acidité du milieu. On place ensuite la bande au bord d'un gel plat et on applique une nouvelle différence de potentiel électrique, perpendiculaire au premier ; les protéines migrent sur le gel à une vitesse qui dépend de leur masse moléculaire. Finalement, chacune des taches obtenues (après une réaction chimique de «révélation») contient une protéine différente.

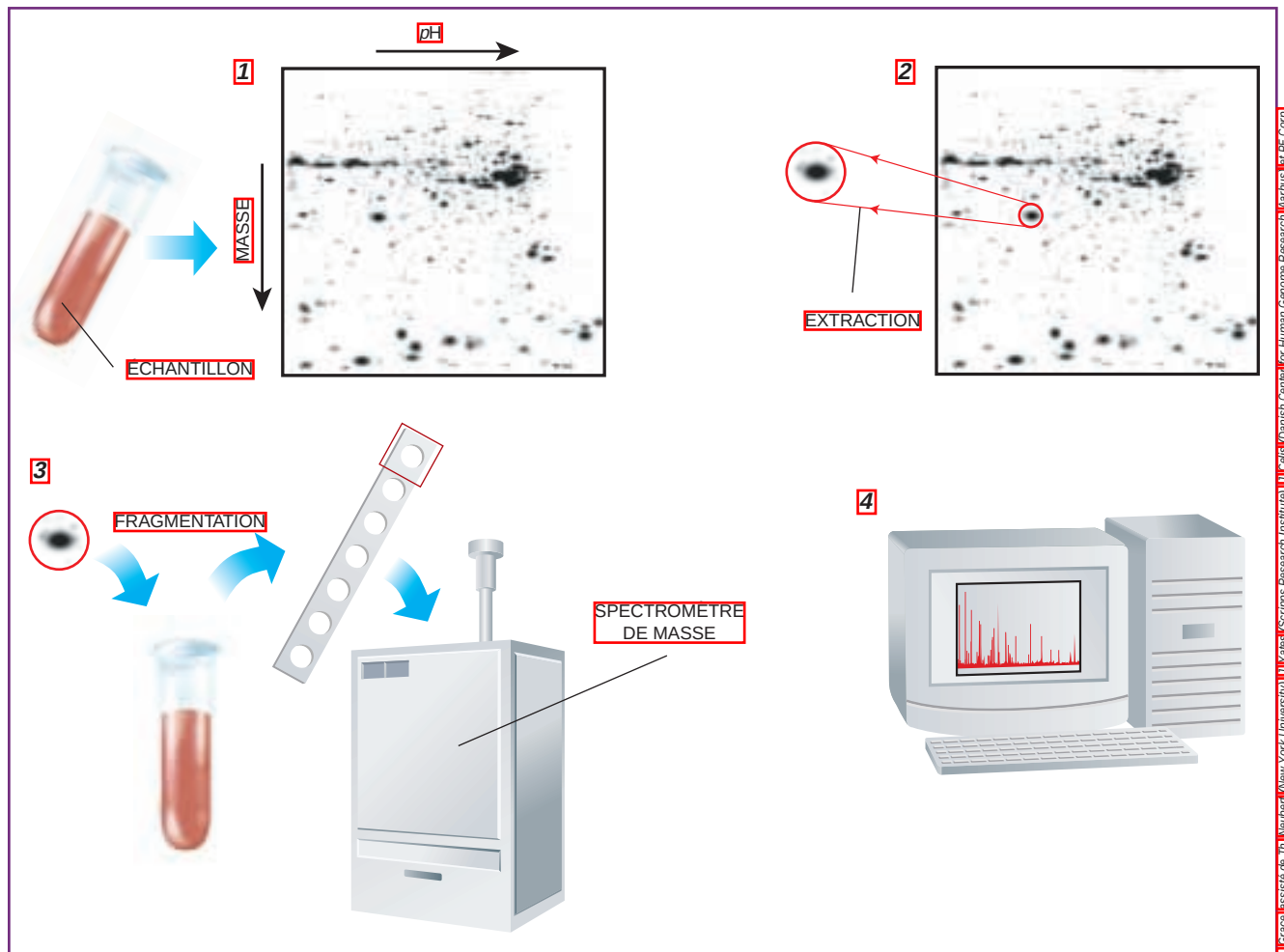
Dans les laboratoires universitaires, les taches sont généralement extraites du gel grâce à un perforateur, et les protéines de chaque tache sont analysées par spectrométrie de masse : à

l'aide d'enzymes, on découpe les protéines en peptides (des courtes chaînes d'acides aminés) dont on identifie la masse et la charge électrique ; à partir de ces informations, des programmes d'ordinateur retrouvent dans les banques de données de séquences le gène dont la séquence peut coder pour de tels peptides. Un gène est ainsi relié à une tache : on déduit enfin la séquence de la protéine de la tache analysée (voir la figure 2). Aujourd'hui, les robots remplacent progressivement les biologistes dans cette tâche : des machines entièrement automatiques extraient les taches des gels, utilisent les enzymes pour couper les protéines en morceaux, transmettent les fragments à un spectromètre de masse laser et transfèrent les informations à un ordinateur en vue de leur analyse.

Toutefois, l'automatisation ne pallie pas les inconvénients de l'électrophorèse bidimensionnelle. Notamment, leur préparation est délicate, et les

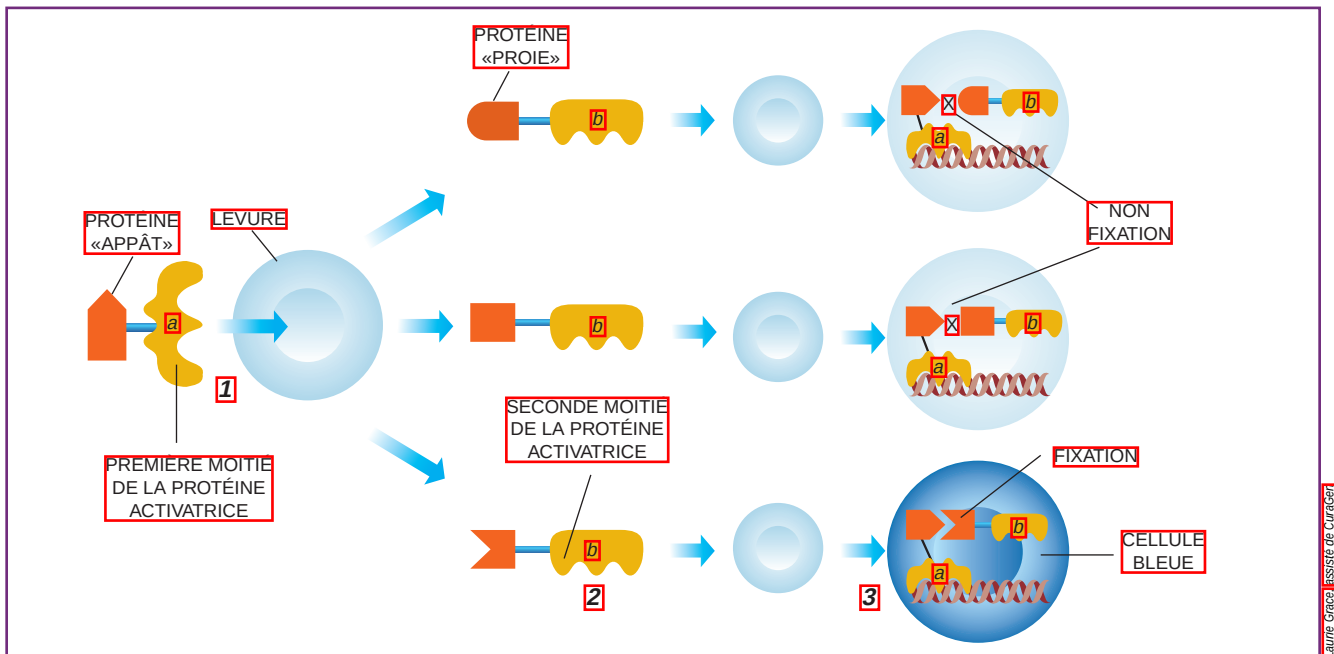
protéines fortement chargées, ou de masse faible, sont mal séparées. Les protéines qui ont des régions hydrophobes, telles les protéines membranaires, sont également difficiles à étudier par cette technique ; or, les récepteurs transmembranaires sont des cibles thérapeutiques importantes.

Dans les cas complexes, les biologistes utilisent alors la méthode de «culpabilité par association» : on a des indications sur la fonction d'une protéine en connaissant ses interactions avec une autre protéine déjà connue. Ainsi, en février 2000, des généticiens ont identifié 957 interactions parmi les 1 004 protéines de la levure de boulangerie *Saccharomyces cerevisiae*. Ils ont employé un système de double hybride : une protéine qui active un gène est coupée en deux ; une moitié est fixée à une protéine «appât» dont on connaît la fonction, l'autre est fixée à la protéine «proie» que l'on étudie. Quand les protéines



2. L'IDENTIFICATION DE PROTÉINES INCONNUES s'effectue sur un gel bidimensionnel. On sépare les protéines selon leur charge (pH) dans une direction et leur masse dans la direction perpendiculaire (1). Chaque tache obtenue contient une protéine (2) que des enzymes

découpent en plusieurs fragments (3). L'ordinateur d'un spectromètre de masse établit un diagramme des fragments de protéines en fonction de leur masse (4). Ce diagramme est caractéristique de la protéine initiale.



3. DANS LA TECHNIQUE DE «DOUBLE HYBRIDE» de la levure, on utilise deux moitiés (a et b) d'une protéine qui active un gène, tel celui qui active la synthèse d'un pigment bleu. Grâce à cette technique, on détermine quelle protéine d'un ensemble de protéines «proies» inconnues se lie à une protéine «appât» connue : l'ADN codant la protéine «appât»,

lié à l'ADN codant la moitié (a) de la protéine activatrice, est introduit dans le noyau de la levure (1). Puis, l'ADN codant l'autre moitié (b) de la protéine activatrice liée à l'ADN codant une des protéines «proies» est également introduit dans le noyau de la levure (2). Lorsque la couleur de la cellule change, la protéine «proie» s'est liée à la protéine «appât» (3).

«proie» et «appât» interagissent, les deux moitiés de la protéine activatrice sont réunies : le gène s'exprime, et la présence de la protéine codée par le gène révèle l'association (voir la figure 3).

Depuis le séquençage du génome de la levure en 1996, les fonctions d'un tiers de ses 6 000 gènes restent mystérieuses. Cependant, grâce au système de double hybride, une partie des protéines codées par ces gènes ont été classées en catégories fonctionnelles, telles la production d'énergie, la réparation de l'ADN, le vieillissement... Le plan des interactions protéiques de la drosophile est également en cours de déchiffrement.

La levure était un prototype ; avec la drosophile, on obtient des informations sur un organisme multicellulaire, et on utilise la protéomique pour trouver de nouveaux médicaments.

Certaines sociétés appliquent une variante du système de double hybride de la levure à l'étude des voies métaboliques spécifiques de maladies. Par exemple, l'une d'elles teste les interactions biochimiques des protéines codées par le gène *MMAC1*, qui, quand il est muté, conduit parfois à un cancer du cerveau et de la prostate.

Enfin, des biopuces d'un type nouveau apparaissent. Certaines, sous la forme de bandelettes, adsorbent, c'est-

à-dire retiennent à leur surface, les protéines selon des propriétés telles que leur solubilité dans l'eau, leur affinité pour des ions métalliques, etc. Ensuite placées dans un lecteur de puces, qui inclut un spectromètre de masse, les protéines des bandes sont identifiées.

En mars 2000, une telle biopuce à protéines a été utilisée pour la découverte de 12 marqueurs potentiels d'une maladie bénigne de la prostate et de six marqueurs du cancer de la prostate. On espère que les tests fondés sur les marqueurs ainsi identifiés seront plus fiables et précis que le test utilisé aujourd'hui.

De la structure à la fonction

L'identification des protéines humaines sera un premier travail, qui devra se poursuivre par l'étude de la fonction des protéines, l'élucidation de leur forme et de leur structure. Un groupe de biologistes a récemment proposé un programme d'exploration de la structure des protéines normales et anormales par des techniques de radiocristallographie quasi automatisées.

Classiquement, pour déterminer la structure d'une protéine, on doit utiliser un cristal pur de cette protéine, que l'on irradie avec des rayons X. Ces derniers rebondissent sur les atomes

de la molécule et forment une figure de diffraction dont on déduit la forme tridimensionnelle de la molécule entière. Le programme proposé veut perfectionner et automatiser les techniques actuelles.

Connaissant la structure exacte de chacune des protéines du protéome humain, les concepteurs de médicaments élaboreront des molécules qui s'adapteront aux sites protéiques et les activeront ou les empêcheront d'agir. À ce jour, de telles tentatives de conception rationnelle ont eu peu de succès. Cependant, l'espoir subsiste pour les 99 pour cent de protéines humaines dont on ne connaît pas encore la structure.

Carol EZZELL est journaliste à *Scientific American*.

The Chipping Forecast, supplément spécial de *Nature Genetics*, vol. 21, n° 1, janvier 1999.

A. ABBOTT, *A Post-Genomic Challenge: Learning to Read Patterns of Protein Synthesis*, in *Nature*, vol. 402, pp. 715-720, 16 décembre 1999.

R. JAMES, *Differentiating Genomics Companies*, in *Nature Biotechnology*, vol. 18, pp. 153-155, février 2000.

R.F. SERVICE, *Structural Genomics Offers High-Speed Look at Proteins*, in *Science*, vol. 287, pp. 1954-1956, 17 mars 2000.

Les ponts légers

DAVID BILLINGTON

L'ingénieur suisse Robert Maillart a construit quelques-uns des ponts les plus remarquables du XX^e siècle. Grâce à ses innovations, il a obtenu des ouvrages fins et élancés, qui supportent des charges énormes.

Les ouvrages d'art les plus remarquables du XIX^e siècle sont les ponts ferroviaires. Au XX^e siècle, ce sont les ponts routiers : pour l'automobile, qui se développe, on construit des routes et des ponts. Ces derniers sont fondamentalement différents des ponts de chemin de fer : ils doivent supporter des charges inférieures, mais le tracé des routes exige parfois qu'ils soient en courbe ou en pente. Pour les réaliser, les constructeurs du début du siècle utilisent un

nouveau matériau : le béton armé. Ingénieur suisse, Robert Maillart est un de ceux qui construisirent les ponts les plus originaux et les plus modernes.

Né en 1872 à Berne, Maillart fait ses études d'ingénieur en génie civil à l'École polytechnique de Zurich. Dès les débuts de sa carrière, il utilise une démarche originale, qu'il applique aux ponts et aux bâtiments en béton : il rejette l'analyse mathématique des charges et des contraintes que prônent

ses contemporains ; il rompt avec les styles architecturaux du passé ; il évite les ornements inutiles.

Maillart est un créateur intuitif : il a le don de concevoir de nouvelles formes qui résolvent parfaitement les problèmes classiques de construction. Il a aussi le souci de l'économie : souvent, il décroche ses contrats parce que les ponts qu'il propose sont moins chers que les projets concurrents. Pour comprendre la démarche de Maillart, examinons la structure de quelques

de Robert Maillart

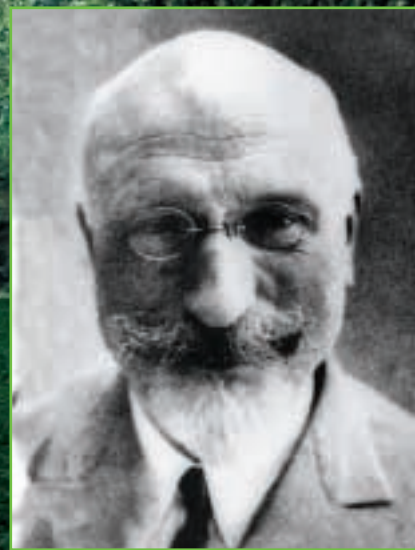


ponts, où transparaît le mieux son esprit original.

Les méthodes mathématiques occupent une place importante dans la conception moderne des ouvrages d'art : en appliquant les principes de la mécanique, les ingénieurs calculent les contraintes et les déformations des futurs édifices sous l'action des forces auxquelles ils seront soumis, tels le poids des véhicules sur un pont ou la force du vent sur un gratte-ciel. Ainsi, les ingénieurs estiment

la résistance de leurs ouvrages aux séismes ou aux ouragans. Néanmoins, ces méthodes mathématiques ont souvent entravé la créativité de nombreux ingénieurs. Trop souvent, on suppose qu'on ne doit pas construire une structure dont on ne sait pas calculer le comportement.

Le premier grand pont de Maillart réfute ce principe. En 1900, la Société *Froté et Westermann* confie à Maillart la réalisation d'un pont de 30 mètres de long au-dessus de l'Inn, dans la



Avec l'autorisation de Marie-Claire Blumer-Maillart

1. LE PONT DES GORGES DE SALGINA, qui enjambe un ravin de 80 mètres de profondeur, est le plus connu des ponts de Robert Maillart. Cet ouvrage élancé, qui date de 1930, se trouve en Suisse, dans le canton des Grisons.

petite ville suisse de Zuoz. La ville a demandé un pont en acier, mais Maillart propose un pont en béton armé, plus élégant, pour un coût presque identique. Ses plans prévoient un seul arc, articulé à la clé et près des culées (les blocs de béton qui s'opposent à la poussée de l'arc, aux extrémités du pont) pour limiter les contraintes de flexion. Ce projet est novateur parce qu'il intègre

en une même structure l'arc et le tablier (la chaussée du pont) ; il invente ainsi l'«arc caissonné», qui réduit considérablement les quantités de béton nécessaires à la construction du pont et, par conséquent, son coût.

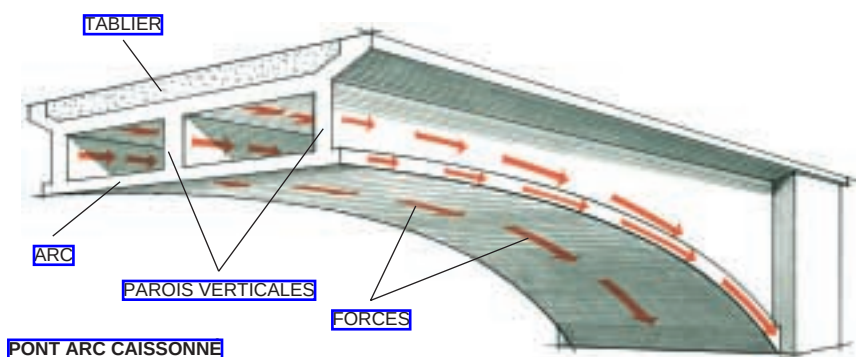
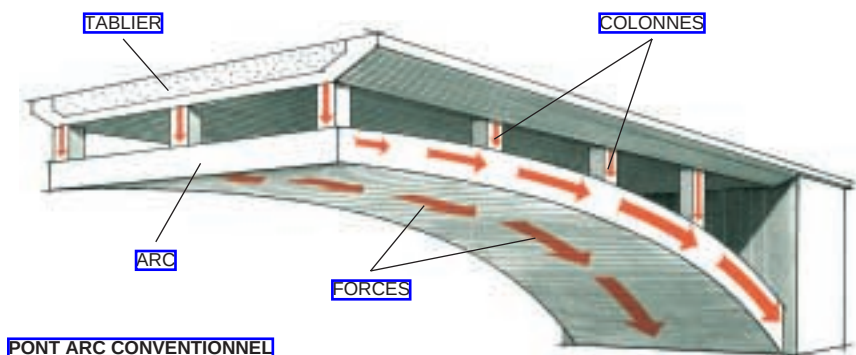
L'arc d'un pont classique supporte le poids du tablier par l'intermédiaire de piliers, qui doivent être assez solides pour résister aux contraintes de flexion

engendrées par la charge de la circulation routière. Dans l'ouvrage conçu par Maillart, le tablier routier et l'arc sont reliés par trois parois verticales qui courent sur toute la longueur du pont, formant deux caissons sous le tablier (voir la figure 2). Ainsi, la charge se répartit sur les trois faces des caissons (le tablier, l'arc et les murs d'appui) et sur presque toute la longueur du pont (aux articulations des culées, seul l'arc supporte la charge). L'arc, n'ayant pas à supporter la charge à lui seul, est trois fois moins épais que celui d'un pont classique.

Maillart évalue la faisabilité de son projet à l'aide d'une analyse graphique simplifiée : une analyse mathématique rigoureuse est impossible à l'époque, car les calculs sont trop complexes pour être effectués à la main, sans ordinateur. L'expert Wilhelm Ritter, à qui le projet est soumis, ne réussit pas à résoudre le problème mathématique que pose le pont, mais il trouve sa forme intéressante et en conseille la construction. Le pont est testé dès son achèvement, en 1901 : on mesure les déformations de la structure au passage de lourdes charrettes attelées ; malgré son mystère mathématique, le pont est une réussite.

Au cours des deux années qui suivent, les murs d'appui se fissurent près des culées : leur raccourcissement, dû à leur dessèchement progressif, est bloqué par l'arc et par le tablier, dont le dessèchement est plus lent (ils sont plus exposés à l'humidité ambiante). Pour son deuxième pont, Maillart corrige ce défaut, qui ne menace toutefois pas le pont de Zuoz.

Ce deuxième ouvrage, le pont de Tavanasa, enjambe le Rhin dans les Alpes suisses. Dans ce premier grand chef-d'œuvre, construit en 1905, Maillart évite les murs verticaux : à ces endroits, les pans de mur sont inutiles, car ils ne supportent aucune charge. Il évite ainsi la fissuration et affine la silhouette de l'ouvrage (voir la figure 3). Cette forme est bien adaptée aux contraintes internes du pont engendrées par les charges appliquées : peu épaisse à la clé et aux culées, elle est plus massive aux quarts de portée (à mi-chemin entre la clé et les culées), où la charge due à la circulation est maximale sur un pont à trois articulations. Malheureusement, le pont de Tavanasa sera détruit, en 1927, par une avalanche à laquelle aucun pont n'aurait résisté.



2. L'ARC CAISSONNE fut la première grande innovation de Maillart. Dans un pont classique, l'arc supporte le poids du tablier (de la chaussée) par l'intermédiaire de piliers, qui doivent être suffisamment épais pour compenser les contraintes de flexion. Dans un pont arc caissonné, des murs verticaux remplacent ces piliers. La charge se répartit sur les trois éléments du caisson : les murs verticaux, l'arc et le tablier. Maillart appliqua ce principe lors de la construction du pont de Zuoz, en 1901.

Citernes et entrepôts

Les innovations de Maillart passent d'abord inaperçues. Le pont de Tavanasa n'est guère apprécié en Suisse, où l'on préfère les copies de styles anciens, avec revêtement en pierre. Toutefois, Maillart a créé sa propre entreprise de construction en 1902 : comme il n'a pas assez de commandes de ponts, il construit des bâtiments, des réservoirs hydrauliques et d'autres structures en béton armé.

À Saint-Gall, en Suisse, il réalise les enceintes en béton de deux citernes à gaz : dans ces enceintes cylindriques, de l'eau bloque les fuites éventuelles de gaz. Il cherche un dessin qui allège l'ouvrage... et n'utilise finalement que le quart des quantités de béton prévues : comme ses ponts, ses enceintes sont affinées. Il s'inspire de la structure des tonneaux, où les douves (les lattes) sont maintenues par des cerceaux métalliques, qui compensent la pression exercée par le liquide. Afin de réduire l'épaisseur de ses enceintes, Maillart arme le béton avec des anneaux en acier, comparables aux cerceaux des tonneaux (voir la figure 7).

Maillart publie l'analyse graphique de ses enceintes en 1907 : applicable à n'importe quel réservoir cylindrique, elle évite une analyse mathématique que l'on n'obtient que cette même année et qui se révèle si complexe que les ingénieurs ne trouvent de solutions que pour quelques formes simples. Cependant, cette approche gagne progressivement du terrain dans la profession.

Lorsque Maillart étudie des bâtiments industriels, tels des entrepôts, il rencontre un autre problème technique : comment soutenir les dalles formant le plancher de chaque étage, destinées à supporter des charges particulièrement lourdes ? Dans les bâtiments classiques, les dalles (de grandes plaques en béton) sont soutenues par des poutres horizontales, elles-mêmes soutenues par des colonnes. Maillart veut éliminer les poutres, pour simplifier la structure et réduire son coût. Il sait en outre que d'autres ingénieurs ont échoué dans l'analyse mathématique du problème. Au lieu d'y perdre son temps, il réalise des maquettes de dalles en béton et il teste divers dessins dans la cour de son entreprise.

Pour son premier entrepôt à plancher-dalle (le plancher de chaque étage est formé de dalles), construit en 1910 à Zurich, Maillart imagine des colonnes

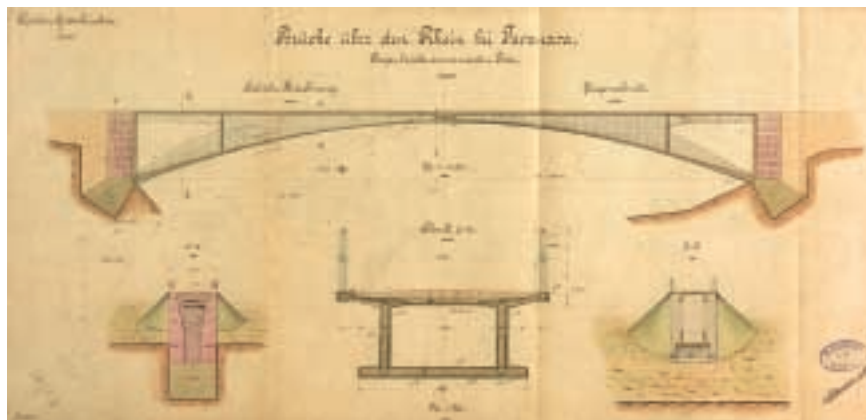
dont les chapiteaux évasés se fondent dans le plafond, c'est-à-dire dans les dalles de l'étage supérieur (voir la figure 8). Ces élégantes colonnes octogonales, avec leur profil hyperbolique, réduisent considérablement la portée libre des dalles, qui sont ainsi mieux soutenues. Maillart utilise le même type de colonnes pour l'immeuble Filter, qu'il construit en 1912, à Rorschach, en Suisse. De telles structures illustrent l'objectif que Maillart s'était fixé : réaliser des édifices à la fois élégants, fonctionnels et peu coûteux.

Un esprit libre

À partir de 1912, l'entreprise de Maillart prospère grâce à des grands projets en Russie, où l'industrialisation est naissante. Quand la Première Guerre mon-

diale éclate, Maillart et sa famille sont contraints de rester en Russie. Maillart perd toute sa fortune et évite la mort de peu pendant la révolution communiste. Il rentre en Suisse en 1919 et se remet à travailler sur des ponts en béton quelques années plus tard. Il met alors au point les arcs raidis par le tablier, dont le pont de Flienglibach, de 1923, est le plus bel exemple. L'idée lui vient quand il cherche à prendre simultanément en compte le poids du pont lui-même et celui de la charge utile (la charge engendrée par la circulation) qui s'exercent sur l'arc d'un pont.

Un pont arc est comme un câble inversé : le câble, tendu horizontalement, se déforme quand il soutient une charge (il forme une ligne brisée), de sorte que sa tension compense le poids de la charge. De même, dans un pont,



3. LES PLANS DU PONT DE TAVANASA montrent les améliorations que Maillart apporta à ses ponts arc caissonnés. Dans cet ouvrage, deux murs d'appui seulement supportent le tablier. Les pans de mur proches des culées, où la charge se répartit entre l'arc et le tablier, sont inutiles : Maillart les évita. Achévé en 1905, ce pont, qui traversait le Rhin, fut détruit par une avalanche en 1907.

la poussée de l'arc, due aux forces de pression exercées par les culées, compense le poids du tablier. Toutefois, la poussée de l'arc dépend de sa forme qui, une fois le pont construit, ne varie plus. La charge utile provoque un fléchissement de l'arc (exagéré sur la figure 4), surtout quand elle est asymétrique (par exemple, quand un lourd camion passe au quart de la portée du pont). L'arc doit alors être suffisamment robuste et épais pour que la flexion reste minime.

Pour des raisons esthétiques, Maillart veut toutefois amincir l'arc. Il trouve une solution : reliant le tablier par des parois verticales transversales (voir la figure 4), il contraint ces deux éléments à fléchir ensemble. Les efforts de flexion se répartissent entre l'arc et le tablier, en fonction de leur rigidité relative. Selon le raisonnement de Maillart, si le tablier est beaucoup plus rigide que l'arc, le

moment de flexion se reporte presque entièrement sur le tablier ; il est quasi nul sur l'arc, qui peut alors être aminci. Maillart rigidifie le tablier du pont de Flienglibach en renforçant l'armature des parapets (en béton armé).

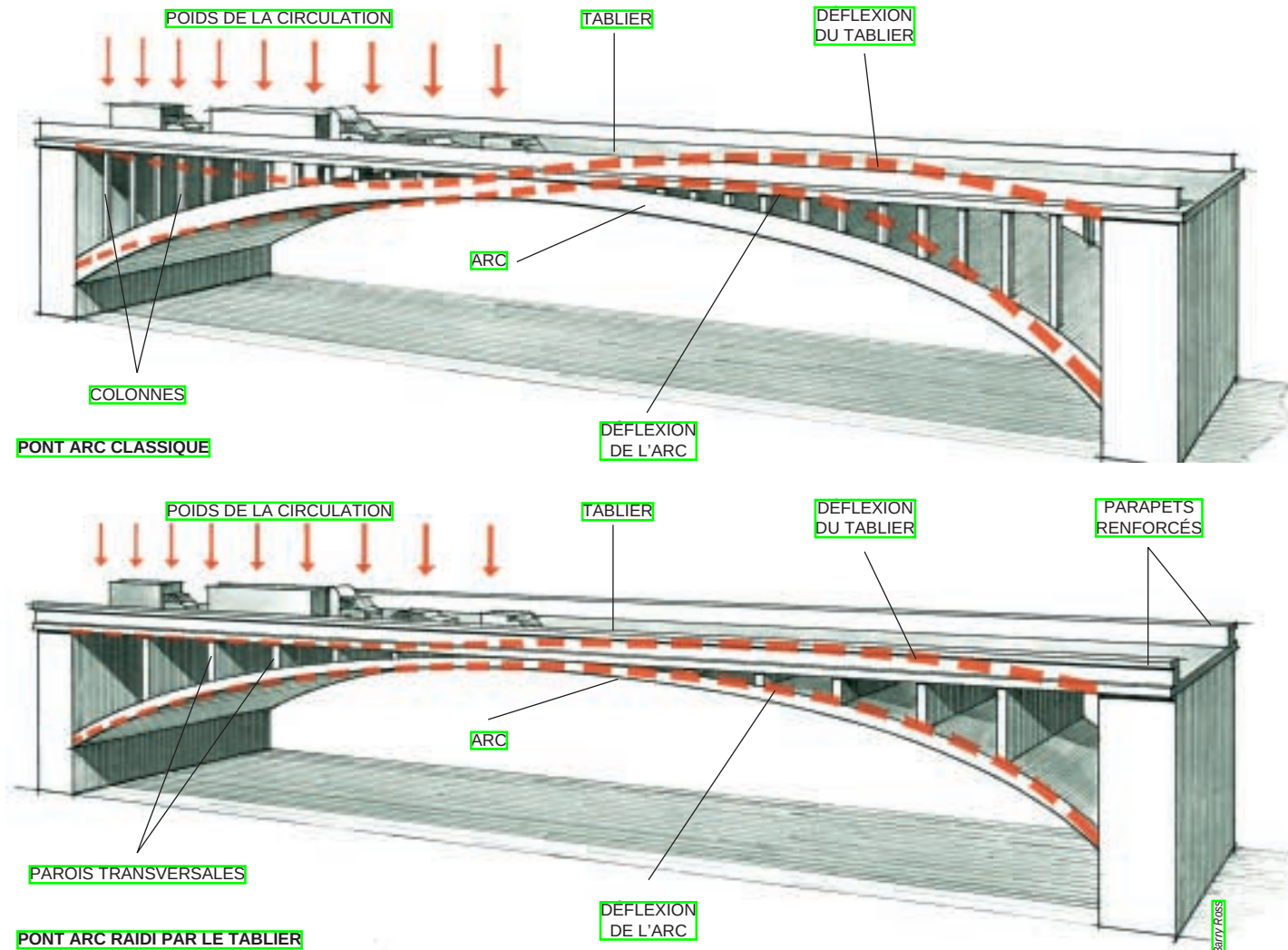
Les essais du pont confirment les prévisions. Cependant, les principaux experts suisses en génie civil – les anciens professeurs de Maillart – décrieront ses méthodes pendant près d'un quart de siècle : ils les jugent négligentes et dangereuses. Ils réclament une analyse mathématique approfondie de l'interaction du tablier, des parois et de l'arc... bien qu'un tel traitement soit souvent irréaliste, en raison du nombre colossal d'équations à résoudre, même pour un petit pont (aujourd'hui, les ordinateurs se chargent des calculs).

Au cours des dix années suivantes, Maillart cherche à embellir ses arcs rai-

dis par le tablier. On a une idée des progrès quand on compare le pont de Valterschielbach, de 1925, au pont de Schwandbach, de 1933. Dans les deux cas, l'arc est extraordinairement fin, mais le premier pont est plus classique : ses culées sont de style roman, l'arc est arrondi et le tablier rectiligne. En revanche, les culées du pont de Schwandbach sont en béton, l'arc est polygonal et le tablier décrit une courbe (voir la figure 5). Grâce à ces innovations, ce pont, en pleine forêt suisse, est l'un des plus ingénieux et des plus originaux de ce siècle.

Ingénierie contre architecture

L'ouvrage de Maillart le plus connu est le pont de Salginatobel, achevé en 1930 (voir la figure 1). Son arc à caisson est



4. L'ARC RAIDI PAR LE TABLIER améliore la résistance aux charges asymétriques. Sur un pont classique, lorsque la charge est supérieure sur la moitié gauche du pont, la moitié droite du tablier se soulève. L'arc doit alors être suffisamment épais pour que la déformation reste

minime. En revanche, dans un arc raidi par le tablier, les parapets sont armés de barres d'acier. Le tablier est relié à l'arc par des parois transversales, qui empêchent le pont de se déformer. Les efforts de flexion qui s'exercent sur l'arc sont moindres, de sorte qu'il peut être aminci.



5. EN COMPARANT LE PONT DE VALTSCHIELBACH, de 1925 (*en haut*), au pont de Schwandbach, de 1933 (*au milieu et en bas*), on constate une évolution des conceptions de Maillart. Le premier, dans le Sud-Est de la Suisse, a des culées en pierre de style roman ; son arc est arrondi, et sa chaussée rectiligne. Le second, au Sud de Berne, ne possède pas de culée en pierre ; son arc est polygonal, et sa chaussée décrit une courbe.

une version améliorée de celui du pont de Tavanasa. Maillart a supprimé les éléments de style ancien, telles les culées romanes en pierre. Son projet est retenu, car il est le moins coûteux des 19 projets proposés : l'arc et le tablier ne coûtent que 20 millions de francs d'aujourd'hui. Avec une portée de 90 mètres, le pont de Salginatobel est le plus long que Maillart ait construit, et aussi le plus spectaculaire : son arc s'élance à 80 mètres au-dessus des gorges de la Salgina. En 1991, il est classé monument international de génie civil.

Toutefois, après la construction du pont, Maillart regrette d'avoir fait un arc arrondi, ce qui manque d'originalité à son goût. Pour le pont de Fel-segg, qu'il réalise en 1933, il conçoit un

David H. Hill photo

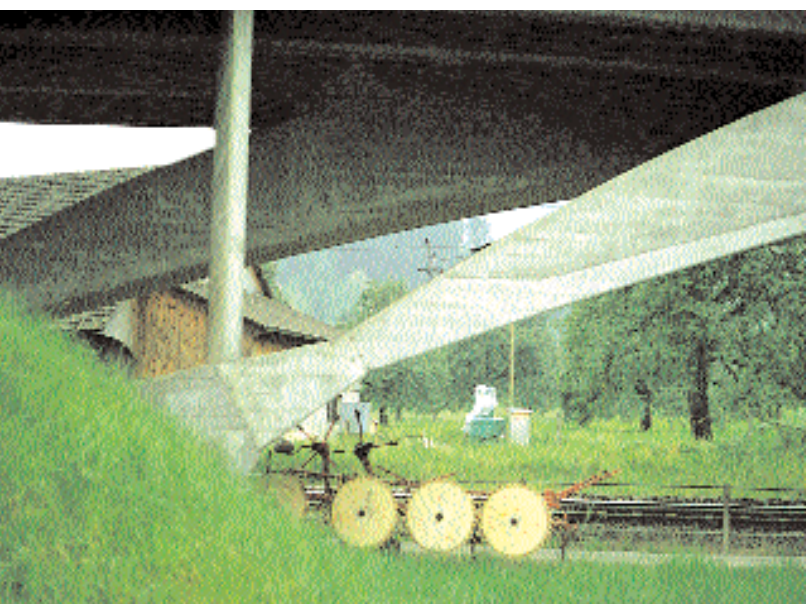


arc brisé, constitué de deux demi-arcs qui se rejoignent à la clé du pont, formant une ligne brisée.

En 1936, Maillart construit un autre pont à Vessy, dans les environs de Genève. Il peaufine la conception de l'arc brisé en décalant les articulations des extrémités vers la clé ; une coupure verticale, à l'endroit de l'articulation centrale, accentue encore la discontinuité de l'arc (voir la figure 6). Les parois transversales qui supportent le tablier ont une forme de X qui fait l'originalité de l'ouvrage. Elles donnent une impression de mouvement, tout en résistant parfaitement aux efforts de flexion : avec leur forme en X, elles compensent les déformations induites par la dilatation thermique du



David H. Hill photo



David H. Hill photo



David H. Hill photo

6. LES DERNIERS PONTS DE MAILLART ont des formes très modernes. L'arc du pont de Vessy, de 1936, est brisé en son milieu. Les murs d'appui, en X, sont ornés de traits horizontaux, produits par les cof-

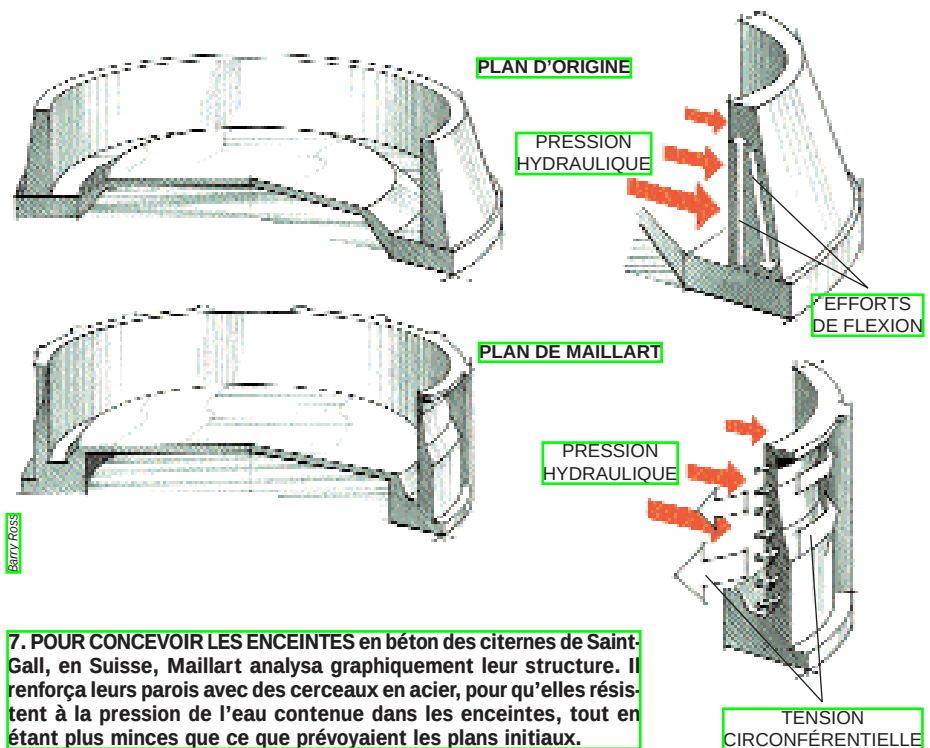
frages en bois utilisés lors de la construction. Sur le pont de Lachen, de 1940, ces traits horizontaux soulignent à la fois la finesse de l'arc et son épaississement, près des articulations des culées.

tablier. En effet, les moments de flexion sont importants en haut et en bas des parois transversales, mais presque nuls à mi-hauteur. Les traits horizontaux que présentent ces parois sont produits par les coffrages en bois qui ont servi à les fabriquer. L'ensemble du pont, avec ses traits et sa forme en X, rappelle le tableau de Paul Klee (un compatriote et contemporain de Maillart), intitulé *Doppelzelt* (double tente).

Les ingénieurs utilisent souvent les coffrages pour créer des motifs ou des textures sur les surfaces visibles des ouvrages. En 1939, Maillart reprend ce système pour le pont de Lachen, au bord du lac de Zurich : la surface de l'arc et les parois verticales des caissons qui le surmontent sont striées de traits horizontaux (voir la figure 6). Ces traits soulignent à la fois la finesse de l'arc et son épaississement près des articulations des culées.

Maillart meurt en 1940, après une vie indépendante. Pendant toute sa vie, il s'est préoccupé d'esthétique, sans jamais faire appel à un architecte, sauf au début de sa carrière, lorsqu'on l'y contraignait, afin de satisfaire les autorités communales. D'après lui, celles-ci avaient une «antipathie atavique» pour ses innovations. Il conçut seul tous ses grands ouvrages, méprisant les architectes qui voulaient donner aux ponts une allure «monumentale». En revanche, il partageait avec eux et avec quelques journalistes spécialisés un goût pour l'analyse esthétique des ouvrages d'art. D'ailleurs, les architectes furent les premiers à reconnaître l'intérêt des structures de Maillart, bien avant les ingénieurs en génie civil. En 1947, la galerie architecturale du Musée d'art moderne de New York consacra une grande exposition à ses travaux, alors que la plupart des ingénieurs américains n'avaient jamais entendu parler de lui.

Quelques années plus tard, les experts en génie civil comprirent enfin que les ponts de Maillart étaient des merveilles techniques. Aux États-Unis, après la Seconde Guerre mondiale, l'arc à caisson s'imposa pour les ponts en béton à moyenne ou longue portée. En Suisse, les professeurs de l'École polytechnique finirent par enseigner les concepts de Maillart. L'un des plus éminents adeptes de Maillart est l'ingénieur suisse Christian Men, qui a conçu plusieurs ponts arc raidi par le tablier, dès la fin des années 1950. Les ingé-



7. POUR CONCEVOIR LES ENCEINTES en béton des citernes de Saint-Gall, en Suisse, Maillart analysa graphiquement leur structure. Il renforça leurs parois avec des cerceaux en acier, pour qu'elles résistent à la pression de l'eau contenue dans les enceintes, tout en étant plus minces que ce que prévoyaient les plans initiaux.



8. LES COLONNES EVASEES de l'immeuble Filter (construit par Maillart en 1912, à Rorschach, en Suisse), se fondent dans le plafond, c'est-à-dire dans les dalles de l'étage supérieur, qu'elles soutiennent à elles seules, sans poutres horizontales.

nieurs américains ne construisirent ce type de ponts qu'après 1970.

Avec du recul, on comprend que Maillart appartient à l'école de John Roebling, qui conçut le pont de Brooklyn, et de Gustave Eiffel, qui construisit également de nombreux ponts et

viaducs. La préoccupation première de ces trois hommes était l'esthétique : ils commençaient par dessiner la silhouette de leur ouvrage et, ensuite seulement, ils utilisaient des techniques d'analyse simples pour les rendre viables.

David BILLINGTON est professeur en ingénierie à l'Université de Princeton.

Sigfried GIEDION, *Space, Time and Architecture : The Growth of a New Tradition*, Harvard University Press, 1963.

Max BILL, *Robert Maillart : Bridges and*

Constructions, Artemis, 1969.

Elizabeth B. MOCK, *The Architecture of Bridges*, Ayer, 1972.

David P. BILLINGTON, *Robert Maillart : Builder, Designer and Artist*, Cambridge University Press, 1997.

La lumière en cage



JEAN-MICHEL LOURTIOZ • DANIEL MAYSTRE

Par une analogie entre la physique du solide et l'optique, les physiciens contrôlent la lumière en construisant des cristaux photoniques qui piègent, filtrent et véhiculent les photons. Ces cristaux serviront dans les communications optiques de demain.

Le miroir est le moyen le plus connu de contrôler la lumière : il réfléchit et donc réoriente les rayons lumineux issus d'une source ou d'un objet situé devant lui. Tous les rayons ? Non, car les objets rayonnent dans toutes les directions de l'espace, et seule une petite partie des rayons arrive sur le miroir. De surcroît, une fraction de la lumière incidente est absorbée et transformée en chaleur dans le miroir. Cette faible absorption n'affecte pas notre perception visuelle, mais elle diminue le rendement des dispositifs optiques. Les cristaux photoniques qui sont, comme nous le verrons, des miroirs particuliers, sont nés du besoin de mieux contrôler la lumière dans toutes les directions de l'espace : comment pouvons-nous optimiser les perfor-

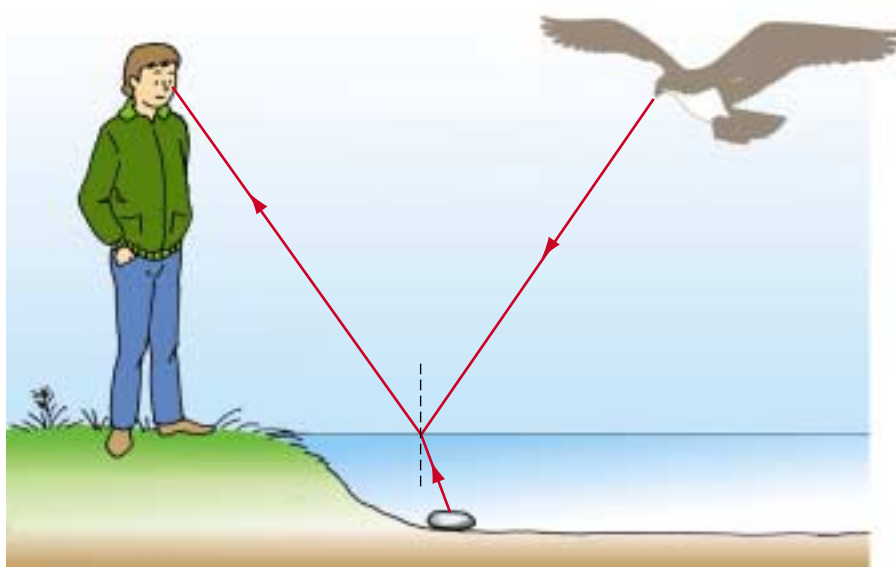
mances des sources optiques à l'état solide, telles les diodes lumineuses ? Comment pouvons-nous récupérer tous les photons issus d'un émetteur ?

Après la fabrication du premier cristal photonique, en 1991, cette motivation a perduré, mais ce n'est plus la seule. L'avènement des cristaux photoniques s'inscrit dans le processus plus général de la miniaturisation des composants optoélectroniques. Cette nouvelle manière de domestiquer la lumière permettrait de la guider sans perte le long de guides d'ondes orientables dans l'espace. Le physicien se prend alors à rêver de « processeurs » photoniques, où les électrons seraient remplacés par des photons, beaucoup plus rapides que les processeurs actuels.

Avant d'arriver à cette commande ultime de la lumière, notons l'analogie entre la propagation de la lumière et la propagation des électrons dans un cristal solide. Un cristal est un assemblage périodique d'atomes dans les trois dimensions. Dans un cristal de silicium pur, les quatre électrons de valence (ou de liaison) sont utilisés pour former les quatre liaisons covalentes du cristal périodique. Ainsi, il ne reste plus d'électrons pour la conduction. Pour obtenir un électron conducteur, il faut casser des liaisons, ce qui requiert de l'énergie. La bande de valence (les électrons sont liés aux atomes) et la bande de conduction sont séparées par cette énergie, qui définit une bande interdite. Un électron ne pourra pas se propager dans le cristal si son énergie est dans cette bande.

Existe-t-il pour les photons des bandes interdites du même type qui permettraient d'en contrôler la progression ? Considérons un assemblage tridimensionnel de matériaux transparents dont les caractéristiques optiques diffèrent. Les caractéristiques optiques, notamment l'indice optique qui détermine la vitesse de la lumière dans le milieu, jouent un rôle analogue pour les photons à celui du potentiel atomique pour les électrons, et l'on voit apparaître ces bandes interdites pour les photons, c'est-à-dire des gammes d'énergie où les photons ne peuvent pas se propager. N'étant pas non plus absorbée, puisque ces matériaux sont transparents, la lumière émise dans ces assemblages est réfléchie, quelle que soit sa direction d'incidence.

Cet assemblage est un cristal photonique, aussi nommé matériau à bande interdite photonique. Le lien entre cristal solide et cristal photonique résulte de l'analogie formelle



1. UNE SURFACE D'EAU, comme la surface d'un lac, altère le trajet des rayonnements lumineux. Un observateur peut voir en même temps un caillou dans l'eau et un oiseau dans le ciel. L'interface entre l'eau et l'air réfléchit l'image de l'oiseau et transmet celle du caillou. Les propriétés simultanées de réflexion et de transmission des interfaces permettent des interférences.

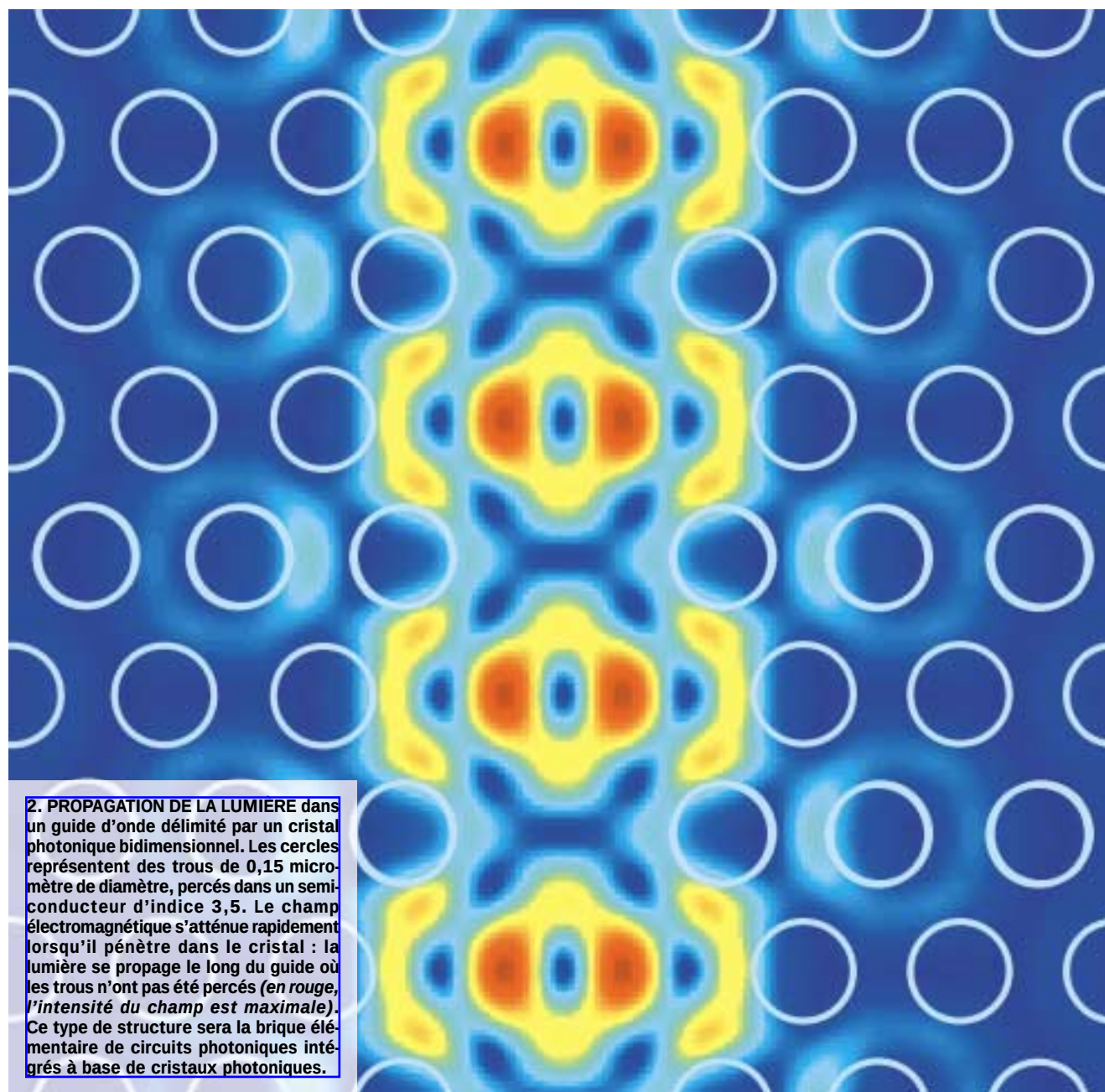
qui existe entre l'équation qui régit le comportement des électrons (l'équation de Schrödinger) et les équations de propagation de la lumière (les équations de Maxwell) : si l'on compare ces équations terme à terme, elles ont la même forme. À l'aube du XX^e siècle, les pionniers de la mécanique quantique cultivaient l'analogie inverse, montrant pour chaque particule la dualité de sa représentation corpusculaire et de son caractère ondulatoire. C'est sans doute un juste retour des choses si, à l'aube du XXI^e siècle, le savoir accumulé en physique du solide sert à contrôler le flux des ondes lumineuses.

De la transparence à l'opacité

Poursuivant l'analogie entre électrons et photons, nous examinerons comment un empilement de lames transparentes permet d'obtenir, à une dimension, un système à bande photonique interdite. Nous verrons ensuite que le cas unidimensionnel peut être étendu en deux et en trois dimensions. L'exemple de quelques cristaux photoniques nous permettra de mesurer la distance qui reste à franchir avant l'intégration de ces structures novatrices dans les outils de télécommunication.

Qu'est-ce qu'un matériau transparent ? La question peut paraître saugrenue, tant ces objets sont familiers : les lunettes sont d'usage courant. Les fibres de silice, qui transportent la lumière sur plusieurs kilomètres sans atténuation sont au cœur des télécommunications optiques.

Les matériaux transparents, l'eau, l'air, le verre ou les films en plastique, sont des diélectriques. En apparence, la lumière traverse ces matériaux sans rencontrer d'obstacles. Pourtant, il suffit de se placer sur la berge d'un lac calme pour constater que la présence d'un matériau diélectrique agit sur la propagation de la lumière.



2. PROPAGATION DE LA LUMIÈRE dans un guide d'onde délimité par un cristal photonique bidimensionnel. Les cercles représentent des trous de 0,15 micromètre de diamètre, percés dans un semi-conducteur d'indice 3,5. Le champ électromagnétique s'atténue rapidement lorsqu'il pénètre dans le cristal : la lumière se propage le long du guide où les trous n'ont pas été percés (*en rouge, l'intensité du champ est maximale*). Ce type de structure sera la brique élémentaire de circuits photoniques intégrés à base de cristaux photoniques.

FOTON - PHOTOGRAPHY - SCIENCE - PHOTOGRAPHY - SCIENCE

En observant la surface du lac, on peut voir en superposition un caillou posé sur le fond du lac et un oiseau dans le ciel. L'eau transmet la lumière issue du caillou jusqu'à la surface, et l'air achève la propagation jusqu'à l'œil. En revanche, pour l'image de l'oiseau, la surface du lac agit comme un miroir (voir la figure 1). Ainsi, au passage entre deux milieux transparents, la lumière se scinde en deux composantes, l'une transmise, l'autre réfléchie. La transparence d'un matériau n'est qu'une illusion, car, quelles que soient ses qualités de transparence, le matériau est observé au travers d'une interface qui altère toujours la transmission.

Ce phénomène résulte d'une réalité physique : la lumière ne se propage pas à la même vitesse dans tous les diélectriques transparents. Dans l'air comme dans le vide, la lumière se déplace à environ 300 000 kilomètres par seconde. Dans l'eau, dans le verre et dans un semi-conducteur, elle se propage respectivement 1,33 fois, 1,5 fois

et 3 à 4 fois moins vite. C'est d'ailleurs une manière de caractériser un milieu diélectrique : son indice optique, ou indice de réfraction, est le quotient de la vitesse de la lumière dans le vide et de la vitesse de la lumière dans le milieu (l'indice de l'eau est de 1,33, celui du verre est égal à 1,5, etc.). Nous verrons que nous pouvons mettre à profit ces différences d'indice pour construire un système où la réflexion est considérablement augmentée, notamment à l'aide de couches minces.

De la couche mince au cristal unidimensionnel

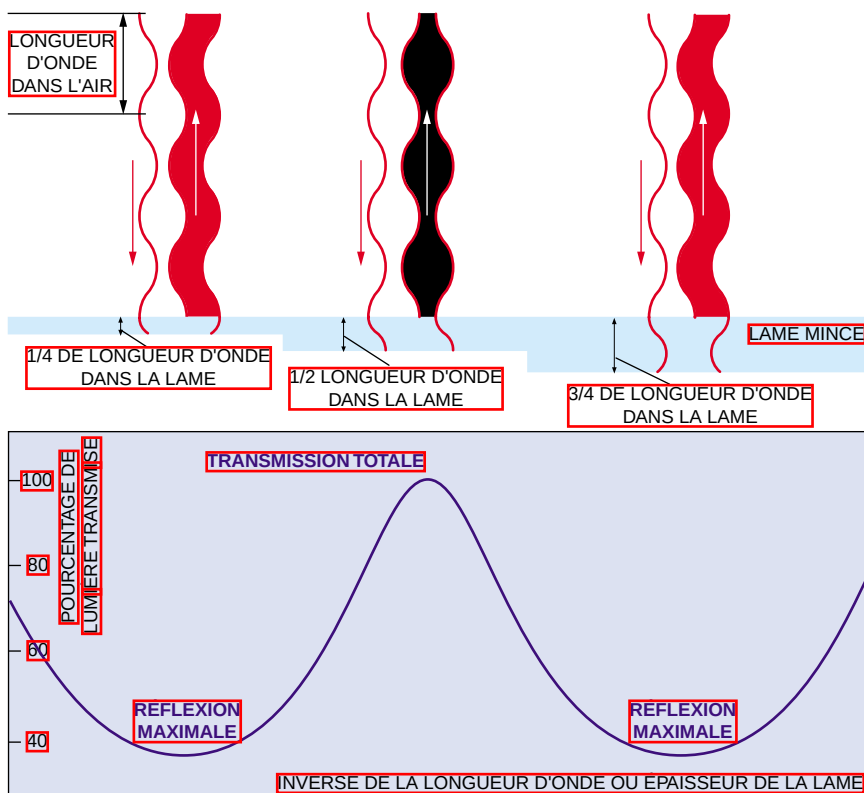
Une couche mince est une tranche de matériau diélectrique délimitée par deux plans parallèles qui la séparent de l'air. Éclairons une couche mince par une lumière d'incidence perpendiculaire à la surface de la couche. À l'interface supérieure, la lumière se scinde en deux composantes : une partie réfléchie et une autre transmise, qui

pénètre dans la couche. La composante transmise se sépare à nouveau à la frontière inférieure, et la nouvelle fraction réfléchie subit elle-même une réflexion et une transmission à son retour sur le plan supérieur. Le phénomène se poursuit indéfiniment, de sorte que la lumière initiale est séparée en une infinité de composantes.

Comme les vaguelettes à la surface de l'eau, la lumière est de nature ondulatoire. Poursuivons cette analogie par quelques observations. D'abord, quand on regarde un point à la surface de l'eau, on constate que le niveau en ce point oscille à une fréquence donnée. Ensuite, on note que les sommets (ou les creux) des vaguelettes sont séparés par une distance constante, la longueur d'onde. Enfin, on remarque que les vaguelettes se déplacent : l'onde se propage à une vitesse donnée. Dans le cas de la lumière, ces caractéristiques s'appliquent, même si l'onde ne se manifeste pas par une oscillation mécanique, mais par une vibration simultanée et coordonnée du champ électrique et du champ magnétique. La longueur d'onde λ est le quotient de la vitesse de propagation v et de la fréquence f .

Au changement de milieu diélectrique, la lumière conserve sa fréquence, mais, puisque sa vitesse est modifiée, sa longueur d'onde l'est également (la longueur d'onde dans le milieu est le quotient de la longueur d'onde dans le vide et de l'indice du milieu). Dans la lame diélectrique, quand les maximums des ondes coïncident, leur amplitude s'ajoute et l'interférence est constructive ; s'ils sont décalés, l'interférence est destructive. En choisissant l'épaisseur de la lame par rapport à la longueur d'onde utilisée, on obtient une interférence constructive ou destructive.

L'accord ou l'opposition de phase tient compte du changement de phase de la lumière lors du passage du milieu d'indice le plus faible vers le milieu d'indice le plus élevé : ceci correspond à un trajet virtuel de la lumière d'une demi-longueur d'onde. À l'inverse, quand la propagation se fait du milieu d'indice élevé vers celui d'indice faible, il n'y a pas de changement de phase. Remarquons maintenant qu'une onde qui pénètre perpendiculairement à la lame revient à l'interface supérieure après avoir parcouru une distance de deux fois l'épaisseur de la lame. Si cette distance est un multiple impair de la demi-longueur d'onde (autrement dit,



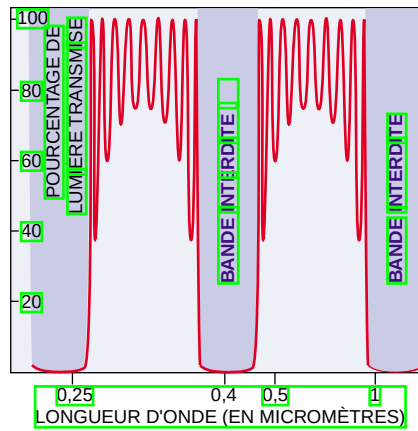
3. LA LUMIERE QUI ENTRE DANS UNE LAME MINCE subit des réflexions multiples. Les composantes ainsi créées interfèrent. La composante qui est réfléchie par la face inférieure parcourt une distance supplémentaire par rapport à la composante réfléchie par la face supérieure, égale à deux fois l'épaisseur de la lame. Lorsque cette dernière est un multiple impair du quart de la longueur d'onde, ces deux ondes réfléchies, qui sont en phase, interfèrent constructivement à l'extérieur et la réflexion est maximale (la transmission est minimale). À l'inverse, lorsque l'épaisseur de la lame est un multiple pair du quart de la longueur d'onde, les deux composantes sont déphasées et la réflexion est minimale (la transmission est maximale), comme l'atteste la courbe de transmission en fonction de l'épaisseur de la lame ou, ce qui revient au même, en fonction de l'inverse de la longueur d'onde à épaisseur fixée (en bas).

si l'épaisseur de lame est un multiple impair du quart de la longueur d'onde), il y aura accord de phase entre l'onde retour et la première onde réfléchi. L'interférence sera donc constructive et la réflexion de la lame sera maximale (voir la figure 3).

Ainsi, avec une seule lame diélectrique d'indice optique égal à trois, et aux longueurs d'onde où l'interférence est constructive, on obtient une réflexion de 60 pour cent de la lumière incidente, soit une transmission de 40 pour cent. Cette valeur est supérieure à celle de la réflexion par une seule interface air-diélectrique (environ 25 pour cent), mais elle ne permet pas de classer la lame comme un bon réflecteur. Comment augmenter encore la réflexion et réduire la transmission? En empilant des couches minces à des distances régulières.

En première analyse, la transmission de deux couches sera égale au carré de la transmission d'une couche unique, puisque l'onde qui arrive sur la première couche subit deux transmissions successives avant de sortir de la seconde couche. La transmission avec deux couches devrait être égale à 16 pour cent ($0,4 \times 0,4$), à 6,4 pour cent avec trois couches et, finalement, à un pour cent avec cinq couches superposées.

En fait, cette analyse néglige les réflexions dans l'air qui sépare les couches. Ces réflexions sont profitables : il se crée dans les couches d'air un système de réflexions multiples, semblable à celui qui existe dans les couches de diélectrique. Lorsque l'épaisseur des couches d'air est aussi un multiple impair du quart de la longueur d'onde, les maximums de réflexion de ces couches coïncident avec ceux des couches diélectriques. Or, pour une lumière incidente donnée, la longueur d'onde dans l'air sera trois fois supérieure à celle dans le diélectrique (si l'indice optique est égal à trois). L'épaisseur des couches d'air devra, pour un effet optimal, être trois fois celle des couches diélectriques. Avec un empilement de cinq couches diélectriques séparées par quatre couches d'air d'épaisseur adéquate, on obtient un véritable dispositif réflecteur, puisque le coefficient de réflexion maximal atteint 99,99 pour cent dans une gamme de longueur d'onde où les interférences sont constructives en réflexion, ce qui correspond à des bandes interdites.



4. UN EMPILEMENT de cinq couches minces, d'indice $n = 3$ et d'épaisseur égale à un micromètre, séparées par de l'air, est un excellent réflecteur, puisque la transmission minimale est inférieure à 1 pour 10 000. La totalité de ce qui est perdu en transmission est réfléchi, de sorte que l'on obtient 99,99 pour cent de réflexion dans les bandes interdites.

Un tel empilement de couches diélectriques est nommé miroir de Bragg, en référence aux premières expériences sur la diffraction de rayons X menées au début du XX^e siècle. Les miroirs de Bragg sont vraiment efficaces lorsque l'éclairage est perpendiculaire aux couches, mais, pour une incidence oblique, les bandes interdites (en transmission) deviennent plus étroites et se décalent en longueur d'onde.

Les dimensions supérieures

En deux dimensions, on obtient une structure périodique aux propriétés équivalentes à celles des superpositions de couches en répartissant des tiges sur un plan selon un motif triangulaire. Comme dans le miroir de Bragg, cette structure est un assemblage périodique de deux diélectriques d'indices optiques différents : le matériau d'indice le plus faible est l'air et celui d'indice le plus élevé est un diélectrique agencé en cylindres parallèles de longueur supposée infinie. Cette structure a une symétrie hexagonale (voir la figure 5).

On peut aussi concevoir cette structure comme un empilement de grilles ou de rangées de tiges diélectriques, séparées par des couches d'air. On a ainsi «troué» les lames diélectriques de l'empilement de Bragg. L'analogie va plus loin : lorsque l'empilement de grilles est éclairé perpendiculairement par une onde lumineuse, les conditions de réflexion maximales sont obtenues lorsque les épaisseurs des grilles

et des couches d'air sont voisines du quart de la longueur d'onde.

En raison de la symétrie hexagonale de cette structure, la lumière se propage de manière identique dans les six directions hexagonales. Ainsi, lorsque la transmission est empêchée dans l'une des six directions, elle l'est suivant les autres. Le cristal bidimensionnel n'est pas encore une structure qui réfléchit la lumière dans toutes les directions, mais il s'en rapproche. Quelques remarques tempèrent pourtant cet optimisme. D'abord, les six directions équivalentes sont dans le plan orthogonal aux tiges : suivant les directions de propagation extérieures à ce plan, le cristal bidimensionnel ne présentera pas le même intérêt. Ensuite, la transmission dépend aussi ici d'une caractéristique de la lumière que nous n'avons pas encore mentionnée, la polarisation.

Comme l'onde à la surface de l'eau qui s'accompagne de déplacements verticaux du niveau de l'eau, l'onde de lumière est une onde transversale : les oscillations du champ électrique et celles du champ magnétique sont perpendiculaires à la direction de propagation de l'onde. Dans ce plan perpendiculaire, toutes les directions d'oscillation sont autorisées, mais, comme les oscillations des deux champs sont liées, l'oscillation d'un champ définit l'oscillation de l'autre. La direction d'oscillation du champ électrique est nommée direction de polarisation. Si cette direction est fixée, l'onde est polarisée de manière rectiligne. Deux ondes qui se propagent dans la même direction et à la même fréquence peuvent différer par la polarisation, et une bande de transmission interdite d'un cristal photonique pour une polarisation donnée ne sera pas forcément une bande interdite pour une autre polarisation. Dès que l'incidence est oblique, ou dès que le cristal est bidimensionnel, la polarisation joue un rôle, apportant une contrainte supplémentaire.

Au final, le cristal photonique bidimensionnel n'est pas encore le réflecteur parfait, efficace dans toutes les directions de propagation et quelle que soit la polarisation, mais c'est une étape importante pour toutes les applications à l'optique guidée (voir la figure 2). Dans ce domaine, qui est celui des diodes lasers et des autres composants utilisés aux extrémités des fibres optiques, la lumière est déjà guidée suivant un plan

horizontal et le cristal bidimensionnel va permettre de contrôler la lumière dans les autres directions du plan.

La preuve expérimentale

Dans les années 1990, Eli Yablonovitch eut l'idée d'imiter la structure des cristaux solides existants, plus particulièrement celle des cristaux semi-conducteurs, tels le silicium ou le germanium. Comme ces semi-conducteurs ont de larges bandes d'énergie interdites pour les électrons, on peut imaginer qu'il en serait de même pour les photons. La structure cristalline correspondante, qui est aussi celle du diamant, résulte de l'emboîtement de deux structures cubiques à faces centrées (la maille cristalline est un cube, et les atomes sont au sommet et au centre des faces du cube), l'une étant décalée de l'autre par un quart de la grande diagonale du cube. Comment fabriquer une telle structure ?

Les symétries de ces structures, d'une importance capitale pour la physique des semi-conducteurs, ont été étudiées et recensées en détail depuis des dizaines d'années. En particulier, les physiciens du solide savent que, dans certaines directions, il y a des galeries vides d'atomes, de véritables canaux au sein de l'édifice atomique. Autrement dit, dans ces directions, on peut traverser le cristal sans ren-

contrer d'atomes : si le cristal était plus gros, on pourrait voir à travers ! On peut concevoir un cristal de silicium comme un bloc percé de galeries judicieusement orientées.

Partant d'un bloc de plexiglas d'indice optique élevé, E. Yablonovitch et son équipe ont percé selon trois directions à 120 degrés, simulant les galeries du cristal de silicium (voir la figure 6). Par des mesures de transmission, ils ont observé que cette structure était parfaitement opaque, quelle que soit la direction d'incidence de la lumière. C'était un cristal photonique parfait. Cette expérience fut capitale pour son aspect démonstratif, mais elle concernait des longueurs d'onde de quelques centimètres, plusieurs ordres de grandeurs supérieures aux longueurs d'onde micrométriques utilisées pour les télécommunications optiques. Durant les dix années suivantes, les physiciens se sont évertués à réduire la taille de ces motifs tridimensionnels, imaginant des moyens de structurer la matière à petite échelle.

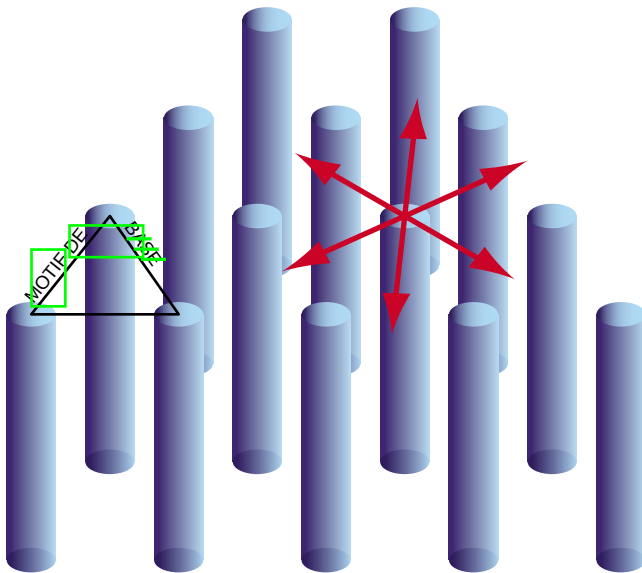
Vers les nanostructures

Au début des années 1990, la fabrication de miroirs de Bragg constitués de multicouches de semi-conducteurs avec des épaisseurs de l'ordre du dixième de micromètre venait juste d'être maîtrisée grâce aux techniques de dépôt de

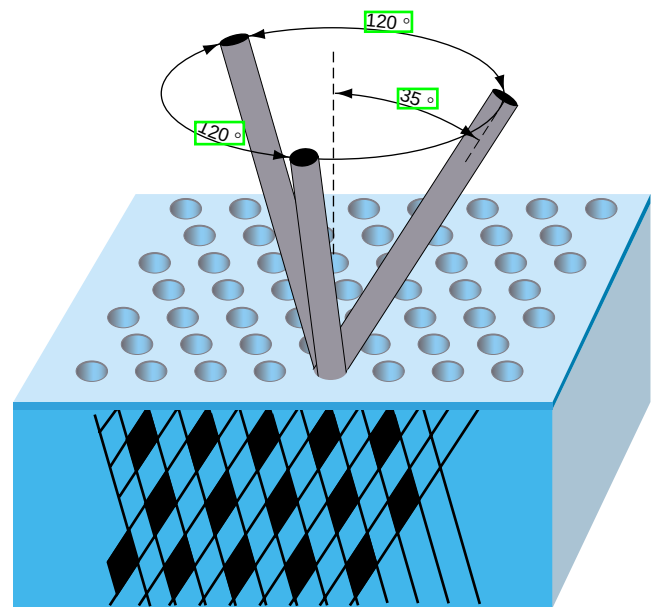
diélectrique sous vide, tandis que les premiers composants optoélectroniques utilisant des microcavités étaient expérimentés. Rares étaient ceux qui imaginaient alors qu'en moins de dix ans les physiciens fabriqueraient les premiers cristaux photoniques en deux et en trois dimensions dans le domaine infrarouge et visible : ils ne prévoyaient pas les progrès en miniaturisation qui ont accompagné les progrès de la microélectronique durant cette fin de siècle.

Les circuits de nos ordinateurs comportent des millions de transistors dont les tailles sont de l'ordre de quelques micromètres. Les multiples techniques de fabrication de ces circuits ont aiguillonné la fabrication de cristaux photoniques. Nous présenterons deux exemples de structures récemment obtenues, qui ont l'avantage de posséder des bandes interdites photoniques aux longueurs d'onde des télécommunications optiques (vers 1,5 micromètre).

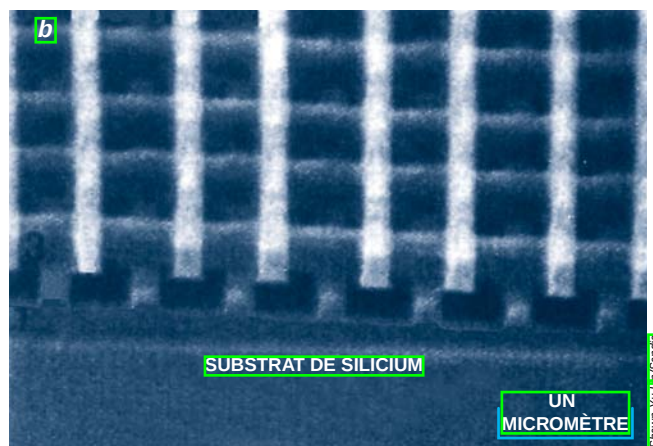
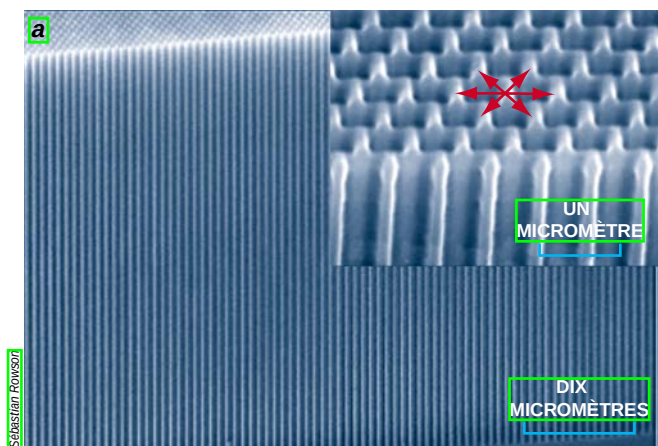
En 1999, Sebastian Rowson, Alexis Chelnokov et l'un de nous (J.-M. Lourtioz) ont fabriqué un cristal bidimensionnel obtenu par gravure photoélectrochimique d'un substrat de silicium (voir la figure 7a). On utilise d'abord un masque de silice percé de trous qui reproduit le motif hexagonal que l'on veut obtenir. Le masque est déposé sur le substrat de silicium, qui est alors soumis à une



5. UN CRISTAL PHOTONIQUE BIDIMENSIONNEL est constitué d'un assemblage de tiges diélectriques cylindriques séparées par de l'air. Le motif périodique est un triangle équilatéral, et la structure possède une symétrie hexagonale : la lumière se propage de manière identique dans les six directions (flèches rouges). Grâce à cette symétrie, si la transmission de la lumière est interdite suivant une direction, elle le sera pour les cinq autres.



6. LE PREMIER CRISTAL PHOTONIQUE TRIDIMENSIONNEL a été construit en 1991 par percement d'un bloc de plexiglas selon trois directions à 120 degrés. En creusant ces trous, on laisse dans le bloc des zones qui reproduisent à grande échelle la structure cristalline du silicium. C'est un cristal photonique idéal, parfaitement opaque quelles que soient la direction d'incidence de la lumière et sa polarisation.



7. DEUX CRISTAUX PHOTONIQUES fabriqués en 1999. Un cristal bidimensionnel (a) est façonné selon une symétrie hexagonale (flèches rouges). Une autre structure, tridimensionnelle, est un

empilement de tiges horizontales de section carrées, placées sur un substrat de silicium (b). En raison de leurs symétries, ces cristaux réfléchissent parfaitement la lumière.

attaque chimique, ce qui crée une ébauche du motif cristallin.

Ensuite, le substrat est utilisé comme anode dans un bain électrochimique : les trous amorcés se creusent selon une direction privilégiée du cristal de silicium. En moins de deux heures de ce régime, on obtient des trous de 100 micromètres de profondeur. La structure obtenue ressemble à celle d'une brique poreuse, les trous verticaux jouant le rôle des tiges cylindriques du cristal bidimensionnel décrit précédemment. En réduisant la distance entre les trous (la période du cristal) à 0,680 micromètre, la propagation était interdite à la longueur d'onde des télécommunications optiques (1,5 micromètre), quelles que soient la direction (indiquée par les flèches, sur la figure 7a) et la polarisation.

La même année, une autre structure a été fabriquée aux Laboratoires Sandia, à Albuquerque, par Shawn-Yu Lin et ses collègues. C'est un cristal tridimensionnel fabriqué couche par couche, par combinaison des techniques de dépôt sur silicium et des techniques de gravure. Chaque couche gravée est un réseau de tiges horizontales de section carrée (voir la figure 7b). Les tiges des couches adjacentes sont perpendiculaires et les tiges à une couche d'intervalle sont parallèles entre elles, mais décalées latéralement, de sorte que le motif se répète à l'identique toutes les quatre couches. L'empilement obtenu reproduit la structure d'un cristal atomique : les intersections des

tiges de l'empilement sont disposées selon deux réseaux cubiques à faces centrées, comme le sont les atomes d'un cristal de silicium. Une bande interdite a été obtenue pour une longueur d'onde voisine de dix micromètres, puis, après une diminution de la période du cristal, pour une longueur d'onde de 1,5 micromètre.

Ces exemples ne doivent pas nous laisser croire que les problèmes de fabrication de tels cristaux sont résolus. L'obtention d'un cristal tridimensionnel requiert un nombre considérable d'étapes, et la superposition ne serait-ce que d'une période (quatre couches) relève encore de l'exploit technique. L'observation de la nature nous invite à un peu de modestie, car l'homme ne fait que réinventer ce qui existe déjà : la similitude entre du silicium poreux et une aile d'oiseau est à ce titre frappante (voir la figure 8). Les ailes de certains papillons ou les opales sont également des cristaux photoniques naturels.



8. L'OBSERVATION MICROSCOPIQUE d'une aile d'oiseau (un minstre mâle) révèle des microstructures qui se comportent comme un cristal photonique dont la bande interdite est située dans le bleu : la lumière bleue est totalement réfléchie, de sorte que l'aile apparaît bleue, bien qu'elle soit totalement dépourvue de pigments colorés.

La cage aux photons

Le contrôle de l'émission spontanée de lumière par les atomes du milieu solide est l'une des principales motivations des travaux sur les cristaux photoniques. Or, jusqu'ici, nous avons uniquement décrit les cristaux photoniques comme des réflecteurs omnidirectionnels. Autrement dit, nous avons décrit les barreaux de la cage de lumière. Si l'on désire placer un émetteur dans le cristal et piéger des photons, il faudra creuser une microcavité au sein du cristal photonique. Cette cavité s'obtient simplement en rompant la périodicité du cristal, en y créant un défaut, pour reprendre la terminologie de la physique du solide. La lumière qui se trouverait dans ce défaut ne pourrait donc pas en sortir, entourée de toutes parts de parois parfaitement réfléchissantes. Toute émission de lumière serait inhibée.

Toute? En réalité, et fort heureusement, le piège ne sera pas total, car il permettra d'extraire de la lumière dont la longueur d'onde correspond à la taille de la cavité. Même avec une paroi très réfléchissante (99,999 pour cent de réflexion, par exemple), la transmission résiduelle suffira à extraire tous les photons qui ont la longueur d'onde adéquate, à condition que les pertes d'absorption des matériaux soient réellement négligeables : le moindre photon ne pouvant être absorbé finira par sortir.

Grâce à la faible taille de la cavité et à la forte

réflectivité de ses miroirs, l'émission spontanée du matériau émetteur placé en son sein sera même considérablement renforcée par rapport à ce qu'elle serait dans l'espace libre : on dit que la luminescence est exaltée. On parle aussi de laser sans seuil, car les photons s'accumulent dans la cavité, et on aboutit rapidement à un effet d'avalanche, c'est-à-dire à une amplification de l'émission stimulée. Le matériau émetteur, quant à lui, peut être le même que celui qui constitue le cristal photonique (un semi-conducteur, par exemple). Ce peut être aussi un matériau différent, que l'on introduit dans la cavité pour ses propriétés émissives.

Pour illustrer l'effet de sélectivité en longueur d'onde de la microcavité, considérons un cristal photonique bidimensionnel de tiges diélectriques au sein duquel on a créé un défaut en ôtant l'une des tiges diélectriques (voir la figure 9). Comparons la transmission de ce cristal à celui du cristal périodique. La transmission est analogue dans les deux cas, avec une bande interdite de transmission comprise entre 0,9 et 1,3 micromètre, dans l'infrarouge proche. Toutefois, dans le cas du cristal avec lacune, un pic de transmission très étroit apparaît pour une longueur d'onde voisine de 1,1 micromètre. Ce pic, où la transmission est voisine de l'unité, résulte de la présence

de la cavité au sein du cristal. À ce phénomène de résonance de cavité, bien connu en électromagnétisme, sont le plus souvent associées de nombreuses fréquences (ou de longueurs d'onde). Ici, la fréquence de résonance est unique et reste inchangée lorsque l'incidence de la lumière sur le cristal varie. De surcroît, le pic est très étroit, ce qui résulte de la bonne réflectivité de la cavité.

Dans cet exemple, la lumière provient de l'extérieur de la cavité, et non de l'intérieur. Suivons son trajet à travers la structure. À la longueur d'onde de résonance, la lumière pénètre dans le cristal, s'accumule quelques instants dans la cavité et finit par ressortir du cristal avec un flux égal au flux entrant. Ainsi, à cette longueur d'onde, la lumière est « aspirée » par la cavité, au sein de laquelle une forte énergie lumineuse reste stockée. La cavité agit donc comme un « relais » pour la lumière incidente, qui traverse alors facilement le cristal. C'est aussi un filtre, puisque le cristal qui l'entoure reste opaque à toutes les autres longueurs d'onde.

Une autre propriété serait utile pour les communications : la directivité de l'émission. Or, une cavité dont la symétrie est hexagonale ne peut émettre de manière directionnelle, car les photons ont une probabilité équivalente d'être émis suivant les six directions. De la même façon, dans une cavité sphérique, il n'y aurait pas de direc-

tion privilégiée. Pour pallier cet inconvénient, on crée un défaut asymétrique dans le cristal photonique.

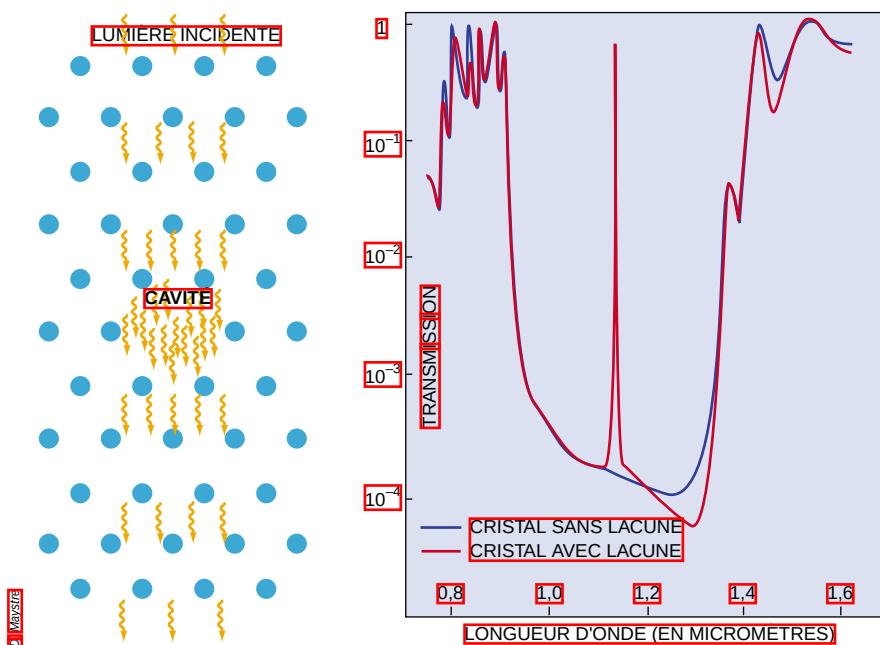
Alex Scherer et ses collègues, à l'Institut de technologie de Californie, ont fabriqué un cristal photonique bidimensionnel formé d'un réseau hexagonal de trous percés dans une membrane d'un semi-conducteur composite, qui a la propriété d'émettre vers 1,5 micromètre. Tous les trous sont identiques, sauf deux, de rayons supérieurs, qui délimitent la microcavité (voir la figure 10). Ayant rompu la symétrie, l'émission peut se faire de manière privilégiée dans la direction où la cavité est la plus allongée. Lors de cette expérience, les physiciens ont obtenu la première émission laser à partir d'une microcavité insérée dans un cristal photonique. C'est l'un des plus petits lasers jamais construits avec un volume de moins d'un dixième de micromètre cube. Des expériences similaires sont menées par l'équipe de Pierre Viktorovitch, à l'École centrale de Lyon.

Prévoir pour construire

Avant de fabriquer cristaux et cavités, les physiciens évaluent le comportement des structures et optimisent leurs performances. Ces études ont beaucoup profité des travaux de la physique du solide, qui permettent de prévoir les propriétés des électrons dans un matériau solide, notamment pour prédire l'ensemble des bandes permises ou interdites. Cependant, à la différence des cristaux atomiques qui possèdent un très grand nombre de périodes, les cristaux photoniques réels sont le plus souvent limités à une dizaine de périodes.

De ce fait, des effets de bords empêchent l'application rigoureuse des traitements issus de la physique du solide pour l'analyse du comportement des cristaux photoniques. La description détaillée de la propagation d'une onde lumineuse dans un cristal limité dans l'espace est alors nécessaire. Ces modélisations consistent donc à résoudre les équations de Maxwell, qui décrivent le comportement des ondes électromagnétiques, dans des géométries complexes. Seules les modélisations informatiques permettent ce travail.

Dans des cas très complexes, notamment lorsque l'on associe des cristaux photoniques avec d'autres éléments optiques, tels des émetteurs, les moyens de calcul mis en œuvre



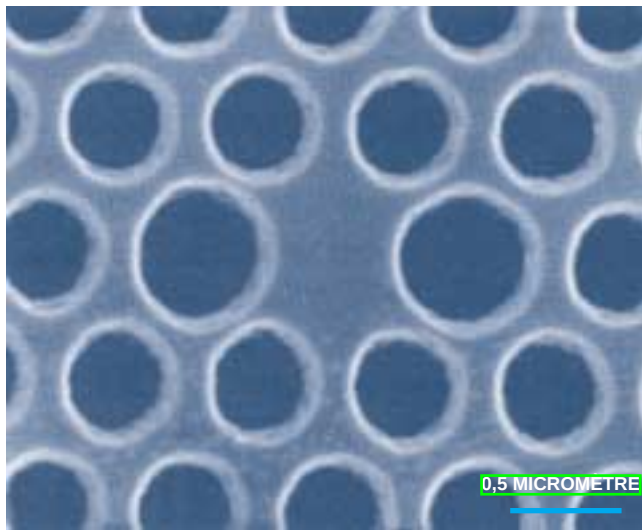
9. LA RUPTURE DE LA PERIODICITE dans un cristal crée une cavité constituée par la suppression d'une barre diélectrique dans un cristal bidimensionnel à symétrie hexagonale. Cette cavité sélectionne la lumière d'une longueur d'onde précise qui est transmise presque sans pertes après quelques instants d'accumulation dans la cavité, comme l'atteste le pic de transmission (à droite).

ne permettent encore qu'une modélisation partielle.

Le domaine des cristaux photoniques est en plein essor, et les physiciens rivalisent d'imagination dans la conception de nouvelles structures et de nouvelles applications. Toutefois, il convient d'être prudent : les recherches dans un domaine en pleine exploration débouchent parfois dans des directions inattendues. Nous avons souligné qu'une motivation importante de ces recherches concernait les sources optiques à l'état solide. À ce titre, la mise au point d'un microlaser à cristal photonique est encourageante, mais le chemin est encore long avant que ce type de source puisse être utilisé dans un système optoélectronique plus élaboré.

Les physiciens rêvent également de pouvoir faire émettre ces sources, photon par photon, en plaçant au centre de la cavité un minuscule émetteur de lumière en matériau semi-conducteur, nommé boîte quantique. Le contrôle du flux de lumière, photon par photon, ouvrirait des perspectives sans précédent dans le domaine de la cryptographie quantique et des communications optiques. Dans cette veine, l'application la plus concrète, avant même l'émission de lumière, est le filtrage en longueur d'onde à l'entrée et à la sortie des fibres optiques. Nous avons vu que les cristaux photoniques creusés de cavités permettaient, grâce à leur sélectivité, de filtrer la lumière en transmission ou en réflexion. On pourrait alors réduire d'un facteur 100 l'encombrement des composants utilisés pour le filtrage des longueurs d'onde.

À plus court terme, les études des cristaux photoniques débouchent peut-être sur des applications dans le domaine des micro-ondes, domaine où le premier cristal photonique a été mis au point. Comme les échelles de longueur en jeu sont plus grandes (du millimètre à quelques centimètres), la fabrication de structures à ces échelles est facilitée. Or, ces longueurs d'onde sont aussi celles des télécommunications, civiles ou militaires, les signaux se propageant le plus souvent dans l'air et non plus dans des fibres. Pour les téléphones portables notamment, les réflecteurs



10. UN RESEAU HEXAGONAL DE TROUS percés dans une membrane d'un semi-conducteur composite, qui a la propriété d'émettre vers 1,5 micromètre, est le premier laser obtenu à partir d'une microcavité insérée dans un cristal photonique. La microcavité est bordée des deux trous d'un diamètre supérieur à ceux du reste du réseau.

à cristaux photoniques ont certainement leur rôle à jouer. Des ingénieurs pensent les utiliser pour éliminer, par réflexion, le rayonnement de l'antenne des téléphones portables qui n'est pas directement utilisé pour la communication, ce qui réduirait des risques potentiels pour l'utilisateur.

Le champ d'application qui s'ouvre aujourd'hui aux cristaux photoniques est vaste. À cet égard, il est étonnant de pouvoir réunir autour d'un thème unique les études sur les antennes et les recherches sur les sources optiques ultimes. D'une certaine façon, cette vision tridimensionnelle de l'optique ressemble aux architectures à trois dimensions qui apparaissent dans les mémoires de nos ordinateurs sous la forme d'empilements de circuits micro-électroniques séparés par des plans métalliques. Au-delà du matériau à bande interdite photonique et des dispositifs élémentaires qu'il permet de réaliser, les physiciens envisagent de véritables circuits optiques ou optoélectroniques à deux ou à trois dimensions. Des microcanaux de lumière, plus communément nommés guides d'onde électromagnétique, y remplaceraient les conducteurs métalliques : les parois du guide seraient formées de cristaux photoniques réflecteurs à tous les angles d'incidence. Cette conception pose bien évidemment de redoutables problèmes de modélisation et de fabrication, et beaucoup d'efforts seront nécessaires avant d'aboutir à une application pratique.

L'engouement pour les cristaux photoniques tient aussi à l'analogie fascinante entre la propagation de la lumière et celle des ondes électroniques dans un cristal solide. En science, l'analogie est courante, car elle stimule l'imagination et entraîne souvent une vision nouvelle des objets étudiés. Des travaux récents explorent plus avant cette analogie, en évoquant notamment les concepts de cristal photonique non linéaire en optique et de cristal sonique en acoustique.

Dans le premier cas, on imagine des alternances périodiques de matériaux dont les propriétés optiques sont altérées par un flux lumineux intense. La structure apparente du matériau se modifiera en conséquence avec l'intensité de l'éclairement, et ce qui était une bande de transmission pourra, par exemple, devenir une bande interdite photonique. Autrement dit, on disposera d'un système susceptible de nous protéger contre les flux lumineux intenses, tels ceux des lasers de puissance, à des longueurs d'onde données. Dans le cas du cristal sonique, on sait que le son est une onde de vibration des milieux matériels dont les équations de propagation sont très proches des équations de propagation de la lumière. Il n'y a qu'un pas à franchir pour élaborer des matériaux ou des objets qui empêchent la propagation des sons dans des plages de fréquence et des directions de l'espace choisies à l'avance (bandes interdites soniques). De la lumière au son, le pas est presque franchi.

Jean-Michel LOUTIOZ est chercheur à l'Institut d'électronique fondamentale de l'Université d'Orsay. Daniel MAYSTRE est chercheur au Laboratoire d'optique électromagnétique de la Faculté des sciences et techniques de Saint-Jérôme, à Marseille.

J.D. JOANNOPOULOS, R.D. MEADE et J.N. WINN, *Photonic crystals*, Princeton University Press, 1995.

J. RARITY et C. WEISBUCH, *Microcavities and Photonic Bandgaps : Physics and Applications*, NATO ASI Series, Kluwer Academic Publishers, 1996.

Le Grand Collisionneur de hadrons

CHRIS LLEWELLYN SMITH

Cet accélérateur de particules, d'une puissance inégalée, sera construit par des chercheurs et des ingénieurs de tous les pays du monde. Les physiciens l'utiliseront pour tester les théories actuelles de physique des particules.

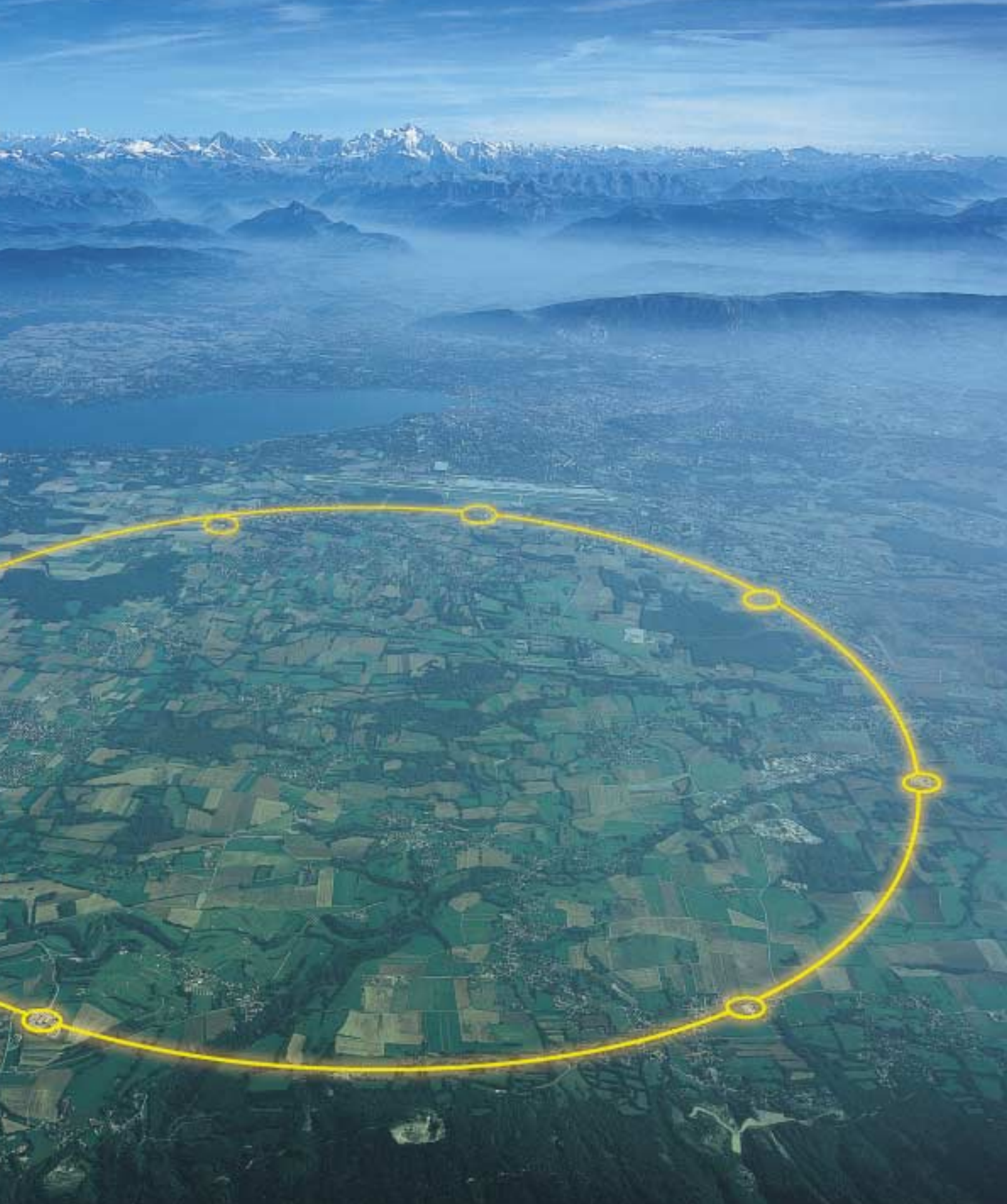
Avec le gigantesque accélérateur de particules qui se construit sous la frontière franco-suisse, les physiciens accéléreront des protons jusqu'à une vitesse égale à 99,999999 pour cent de la vitesse de la lumière, afin de provoquer ensuite des collisions frontales de ces particules : le choc libérera 14 téraélectronvolts (TeV), soit 14 000 milliards d'électronvolts. Cette énergie, 14 000 fois supérieure à celle qui est stockée dans un proton au repos (par la célèbre relation $E = mc^2$), se partagera entre les particules qui composent le proton : les quarks, et les gluons qui lient les quarks. La plupart de ces particules se disperseront, et une gerbe de particules sera émise tangentielle-ment à l'axe de la collision. Cependant, parfois, deux quarks se heurteront de front avec une énergie qui atteindra deux téraélectronvolts. Les physiciens prévoient que des nouveautés les attendent, soit sous forme de particules que l'on a nommées «bosons de Higgs», soit en manifestant une propriété merveilleuse nommée «supersymétrie», soit par un phénomène imprévu qui bouleversera toute la physique des particules.

La dernière collision frontale de quarks avec une énergie de deux téraélectronvolts date de tout premiers moments de l'Univers : une picoseconde (10^{-12} seconde, soit un millionième de millionième de seconde) après le Big Bang, l'Univers était si chaud et

si dense que les quarks étaient encore indépendants. La prochaine collision de ce type aura probablement lieu en 2005, dans le tunnel circulaire qui est creusé sous la frontière franco-suisse, près de Genève. À cette date, des milliers de chercheurs et d'ingénieurs, venus de dizaines de pays différents, auront sans doute achevé la construction des détecteurs géants du Large Hadron Collider (LHC), ou Grand Collisionneur de hadrons, et les expériences commenceront. Ce projet extraordinaire, coordonné par le CERN (le laboratoire européen de physique des particules), est déjà bien entamé.

Le LHC communiquera aux particules des énergies sept fois supérieures à celles qui sont obtenues dans le Tevatron du Laboratoire Fermi, dans l'Illinois, lequel a révélé le quark «top», prévu théoriquement depuis longtemps. Le LHC sera construit dans un tunnel long de 27 kilomètres, qui abrite aujourd'hui le grand collisionneur d'électrons et de positrons, le LEP. Celui-ci a déjà précisé les paramètres de la physique des particules pour des énergies environ 100 fois inférieures à celles qui seront accessibles au LHC. La construction du LHC dans le tunnel du LEP est évidemment avantageuse : on économise les coûts considérables de creusement d'un nouveau tunnel, de construction des préaccélérateurs d'injection, et d'une infrastructure générale. Toutefois, pour faire suivre à des

CERN



1. UN TUNNEL de 27 kilomètres de circonférence, à cheval sur la frontière franco-suisse, abritera le Grand Collisionneur de hadrons, ou LHC (en jaune). Les petits cercles indiquent les emplacements des

salles souterraines (à 100 mètres sous terre) où seront placés les détecteurs et les divers équipements nécessaires au fonctionnement de l'accélérateur et des détecteurs.

particules rapides la trajectoire qui leur est dévolue dans le tunnel, les ingénieurs devront produire des champs magnétiques plus intenses que tous ceux qui ont été appliqués jusqu'à ce jour. Ces champs seront produits par 1 232 aimants de 15 mètres de long chacun, occupant 85 pour cent de la longueur de l'accélérateur. Des câbles supraconducteurs, refroidis par de l'hélium superfluide, à la température de deux kelvins (deux degrés au-dessus du zéro absolu, soit $-271,15^{\circ}\text{C}$), transporteront les 12 000 ampères nécessaires à l'alimentation des aimants.

On n'observera pas de phénomènes physiques nouveaux si l'on se contente d'accélérer quelques protons, car leur énergie se répartit au hasard entre leurs constituants, les quarks et les gluons. Pour observer les rares collisions frontales de quarks, on devra augmenter considérablement l'intensité des faisceaux de protons. L'intensité produite par le LHC, ce que l'on nomme sa «luminosité», sera 100 fois supérieure à celle du Tevatron. La luminosité supérieure du LHC augmentera la difficulté des expériences, car les grandes intensités de faisceau défocalisent les protons.

Un milliard de collisions par seconde seront produites en quatre endroits du LHC ; chacune engendrera une centaine de particules secondaires. De gigantesques détecteurs – le plus grand est haut comme un immeuble de six étages –, assemblages de milliers de composants, suivront à la trace toutes ces particules secondaires. Des programmes d'ordinateur élaborés cribleront toutes les données, afin de sélectionner les quelques événements (de 10 à 100 par seconde) qui devront être mieux analysés.

Des questions sans réponse

Sonder la nature à de hautes énergies, c'est explorer la structure fine de la matière : les gigantesques accélérateurs de particules sont, en fait, des microscopes très puissants. Les accélérateurs actuels ont sondé la matière à l'échelle du milliardième de milliardième de mètre (10^{-18} mètre). Avec le LHC, on verra des structures dix fois plus petites. Cette avancée seule intéresserait déjà les physiciens, mais ceux-ci sont surtout impatients d'accéder à des domaines nouveaux de la physique.

Lors des 30 dernières années, les physiciens des particules ont élaboré une représentation concise de la réalité, qui décrit correctement la matière jusqu'aux échelles de 10^{-18} mètre : ce «Modèle standard» (voir l'encadré de la page 79) décrit les caractéristiques des particules connues, ainsi que trois des quatre forces qui s'exercent entre les particules. La matière est formée à partir de six quarks et de six leptons distincts. L'interaction «forte» lie les quarks en particules nommées hadrons, tels le proton et le neutron, et un effet résiduel de cette interaction forte regroupe les hadrons dans les noyaux atomiques. Les deux autres types de forces sont les interactions électromagnétique et faible. Cette dernière s'exerce seulement à très courte portée ; elle est responsable de la désintégration bêta et joue ainsi un rôle essentiel dans le fonctionnement des étoiles et, notamment, du Soleil. Le Modèle standard donne une description unifiée des interactions faible et électromagnétique, sous la forme d'une interaction «électrofaible».

Plus de 20 physiciens qui ont contribué à l'élaboration du Modèle standard ont été récompensés par le prix Nobel. Cependant, le Modèle standard présente des insuffisances. Tout



EUROPEAN ORGANIZATION FOR NUCLEAR RESEARCH

2. LE TRONÇON D'ESSAI d'un aimant supraconducteur a été réalisé dans le hall d'assemblage ; 1 232 aimants de ce type dévieront les deux faisceaux de protons accélérés par le LHC et leur feront suivre une trajectoire circulaire dans le tunnel de l'accélérateur.

d'abord, s'il décrit les phénomènes observés avec une précision parfois extraordinaire, il n'intègre pas la théorie de la relativité générale d'Einstein, qui relie les forces de gravitation et les déformations de l'espace-temps. Or la relativité, également bien confirmée expérimentalement, est une bonne description de la quatrième force de la nature : la gravitation. Le Modèle standard est une théorie purement quantique, ce qui n'est pas le cas de la relativité générale, et les deux théories ne devraient se rejoindre qu'à des échelles bien inférieures à celles qui sont accessibles expérimentalement. En l'absence d'une description quantique de la gravitation, le Modèle standard demeure incomplet.

De surcroît, malgré sa simplicité et sa puissance, le Modèle standard présente de nombreuses particularités qui semblent arbitraires. Les physiciens pensent qu'il est trop «baroque» et trop «byzantin» pour être la représentation complète de l'Univers. Il n'explique pas pourquoi le nombre de quarks et de leptons est égal à six, ni pourquoi ces deux nombres sont égaux : est-ce une coïncidence ? Les physiciens ont élaboré diverses théories qui lient intimement les quarks et les leptons, mais aucune expérience n'indique encore quelle théorie est préférable.

Troisièmement, le test expérimental du Modèle standard n'est pas achevé, et les prévisions invérifiées sont capitales : elles concernent le mécanisme qui donne leur masse aux particules. La masse est un paramètre crucial : si l'on changeait celle de l'électron, par exemple, toute la chimie serait bouleversée ; la masse des neutrinos, elle, détermine l'expansion de l'Univers (la masse des neutrinos est inférieure à quelques millièmes de la masse de l'électron, mais des expériences récentes indiquent qu'elle n'est pas tout à fait nulle).

Le mécanisme de Higgs

Les physiciens pensent que la masse de chaque particule est engendrée par des interactions avec un champ qui emplit tout l'espace : plus cette interaction est forte, plus la masse est élevée (voir l'encadré de la page 79). Cependant la nature exacte de ce champ reste inconnue. Soit c'est un nouveau champ élémentaire, nommé «champ de Higgs» (d'après le nom du physicien britannique Peter Higgs) ; soit il correspond à un ensemble de

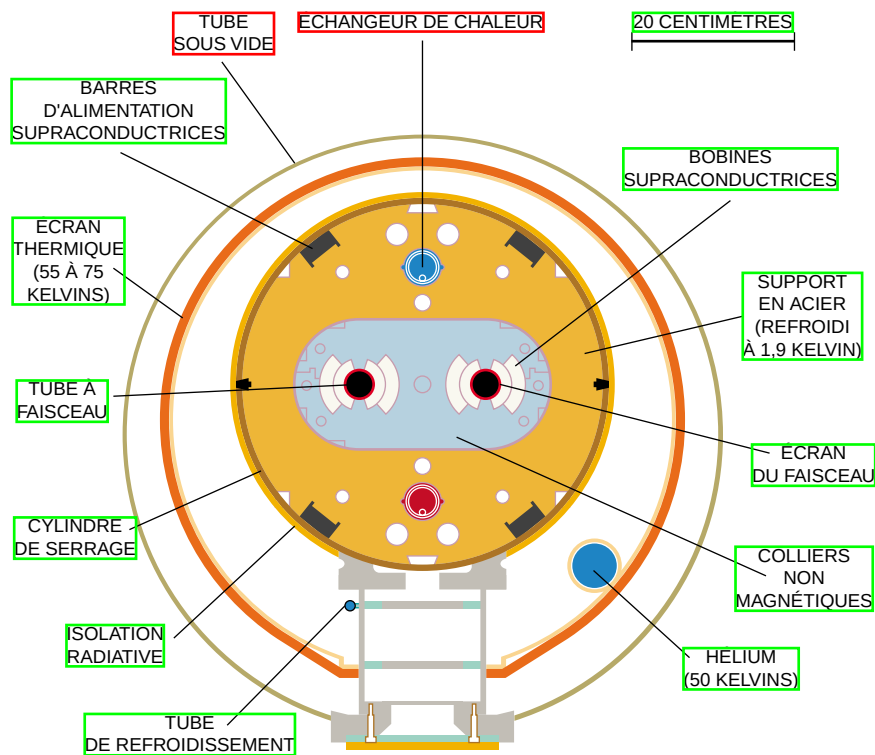
particules, les «techniquarks», associées à une interaction nouvelle, la «technicouleur». Même la théorie de Higgs admet des variantes : il pourrait exister plusieurs champs de Higgs, dont on ignore les propriétés.

Néanmoins, les physiciens ont une certitude quasi absolue : quel que soit le mécanisme réel, il produira de nouveaux phénomènes aux énergies qui seront communiquées aux particules par le LHC ; par exemple, on espère l'apparition des particules de Higgs (qui correspondraient à des ondes dans le champ de Higgs) ou la découverte des «techniparticules».

Avec le LHC, les physiciens testeront également les théories qui étendent ou qui complètent le Modèle standard. Ainsi, une théorie complète doit probablement être «supersymétrique» : les relations entre les particules et les interactions seraient considérablement resserrées. En outre, la «supersymétrie locale» inclurait la gravitation ; inversement, la théorie des cordes, la seule qui unifie la mécanique quantique et la relativité générale, est supersymétrique. De ce fait, si la supersymétrie s'applique effectivement, les physiciens espèrent que le LHC révélera les particules qu'elle prédit.

Les phénomènes et particules attendus pourraient arriver avant la mise en fonctionnement du LHC, car on augmente aujourd'hui l'énergie du LEP à plus de 100 giga-électronvolts, et, en 2001, le Tevatron projettera des protons contre des antiprotons, après une remise à niveau qui s'est achevée en 1999 (aujourd'hui, le Fermilab explore d'autres domaines de la physique en projetant ses protons sur des cibles fixes). Un de ces accélérateurs devancera-t-il le LHC ? C'est possible, mais il ne pourrait que montrer la partie émergée d'un iceberg que seul le LHC explorera.

Si le LEP et le Tevatron ne détectent aucun phénomène nouveau, le LHC donnera des indications inédites à des échelles inexplorées : il permet d'étudier tous les phénomènes qu'explorent les accélérateurs actuels, avec un systématisme qui ne laisse pas de zones d'ombre. De surcroît, les mesures faites depuis sept ans au LEP, à l'accélérateur linéaire de Stanford (SLAC) et au Fermilab ont certifié que le LHC détectera le boson de Higgs s'il existe. Avec le LHC, les physiciens seront fixés : soit on découvrira le boson de Higgs, soit on trouvera un autre mécanisme qui expliquera la masse des particules.



3. UN DES AIMANTS DE L'ACCELERATEUR du LHC est représenté ici en coupe transversale. Les bobinages supraconducteurs seront parcourus par un courant de 12 000 ampères et ils seront refroidis à une température inférieure à deux kelvins (-271,15 °C). Chaque tube à faisceau sera parcouru par un faisceau de protons. D'autres aimants focaliseront les faisceaux et les dévieront dans les zones de collision, au centre des détecteurs.

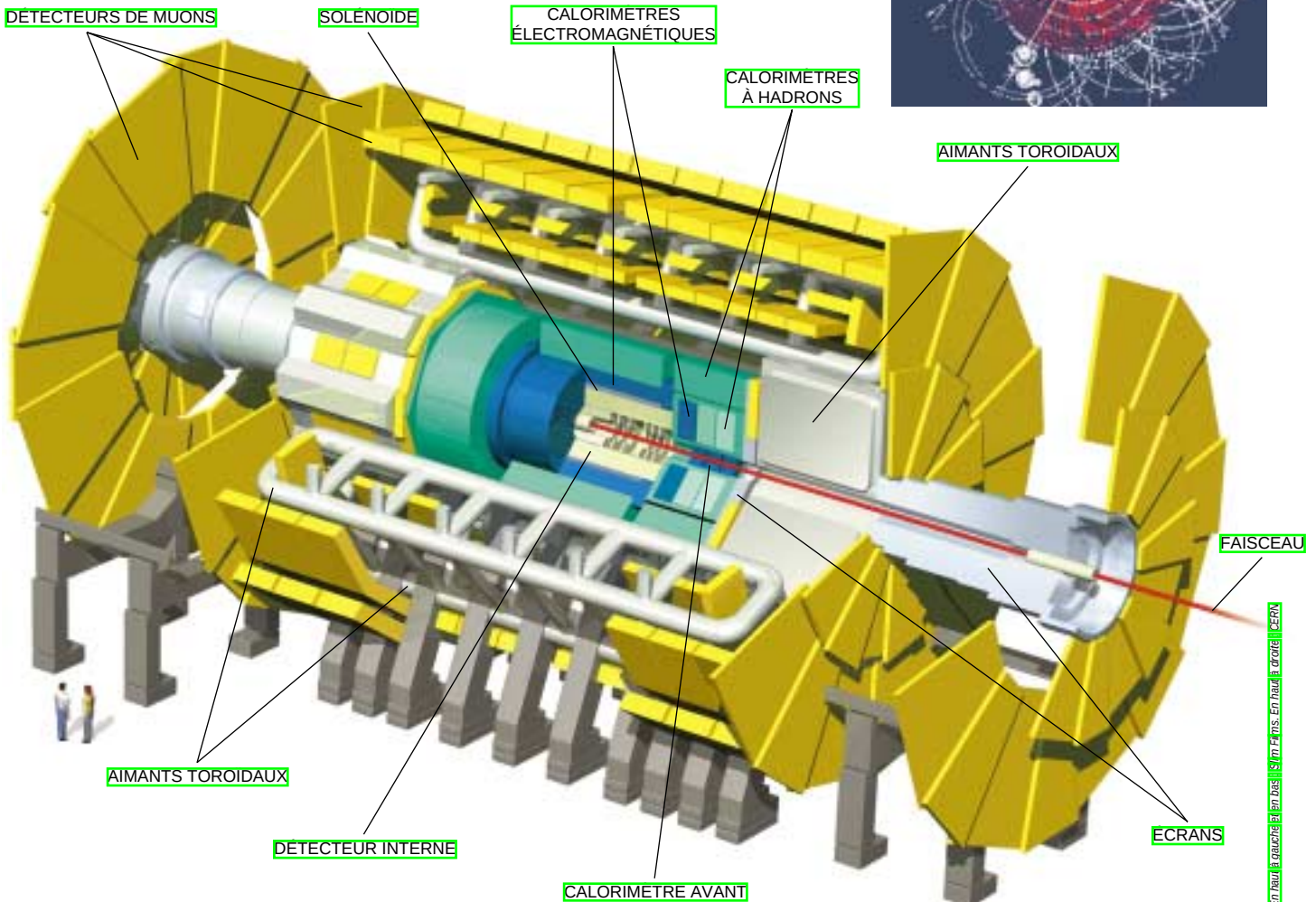
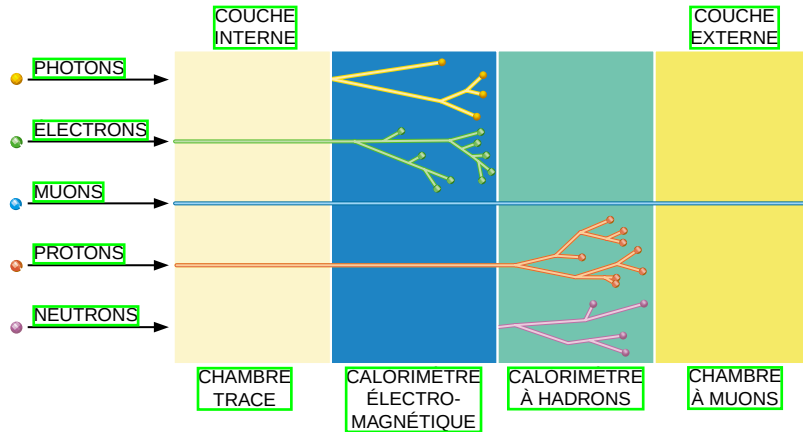
Imiter le Big Bang

Pour mieux connaître la physique aux toutes petites distances, on doit recréer des conditions analogues à celles qui régnaient une picoseconde après le Big Bang. Comment reproduire

un tel environnement? Examinons trois des problèmes techniques les plus difficiles : la construction des aimants de l'accélérateur, l'acquisition des données et les détecteurs.

Pour confiner les protons de 7 téraélectronvolts sur leur trajectoire, on doit

appliquer un champ magnétique de 8,3 teslas, soit 100 000 fois le champ magnétique terrestre. Comme des bobinages classiques, en cuivre, ne produiraient pas une telle intensité, on devra utiliser des aimants supraconducteurs, dont les bobinages conduisent le courant sans résistance (voir la figure 3). Pour que l'état supraconducteur subsiste pendant toute la durée de fonctionnement, les conducteurs étant parcourus par un courant électrique d'intensité égale à 12 000 ampères, les 22,4 kilomètres d'aimants devront rester à une température de -271°C (deux kelvins seulement au-



4. DANS LE DÉTECTEUR ATLAS (en bas), les protons qui seront projetés les uns contre les autres engendreront des gerbes de particules. Les couches concentriques de composants détecteront diverses sortes de particules ; certains composants suivront la trajectoire de ces particules, et d'autres mesureront leur énergie (les « calorimètres »). Le schéma montre le fonctionnement

de ces couches de détecteurs. Des aimants toroïdaux d'un type nouveau incurveront la trajectoire des particules, ce qui permettra la mesure de leur quantité de mouvement. L'image en haut à droite est une simulation d'une collision enregistrée par ce détecteur : une particule de Higgs se désintègre en quatre muons (trajectoires jaunes).

dessus du zéro absolu). Les systèmes cryogéniques n'ont encore jamais été si importants.

En décembre 1994, le CERN a testé pendant 24 heures le fonctionnement d'un tronçon d'essai complet du LHC : le succès de l'expérience a montré que le choix technique était pertinent. Depuis, les essais ont reproduit dix années de fonctionnement du LHC (voir la figure 2).

Depuis l'abandon du Supercollisionneur supraconducteur, qui aurait communiqué aux particules une énergie de 40 téraélectronvolts, la plupart des projets de recherche en physique des hautes énergies se fondent sur les 14 téraélectronvolts du LHC. Au début des années 1990, alors que s'achevait la conception du Supercollisionneur supraconducteur, la stratégie envisagée pour le LHC – l'utilisation de faisceaux de particules très intenses – paraissait osée, parce que l'on ignorait comment les détecteurs suivraient toutes les particules engendrées par les collisions et comment ils supporteraient les radiations correspondantes. Aujourd'hui la détection semble bien maîtrisée, au moins théoriquement.

Les grandes intensités de faisceau du LHC ont nécessité des conceptions nouvelles des systèmes d'acquisition de données. Les faisceaux sont constitués de bouffées de protons qui se succèdent à des intervalles de 25 nanosecondes. Aux points de collision, des bouffées circulant en sens inverse s'interpénètrent 40 millions de fois par seconde, donnant lieu, chaque fois, à une vingtaine de collisions entre deux protons : les collisions seront si fréquentes que les particules issues d'une collision traverseront encore les détecteurs quand la collision suivante se produira. Sur ces 800 millions de collisions par seconde, seule une par milliard provoquera un choc frontal de deux quarks. Pour analyser tous les événements, on devra envoyer l'information produite par chaque détecteur dans des « pipelines électroniques » qui stockeront les données de quelques milliers de collisions successives. Ainsi les circuits électroniques en aval auront le temps de sélectionner les événements intéressants et de les enregistrer avant que les données se perdent en fin de pipeline. Les détecteurs du LHC disposeront de dizaines de millions de canaux : le suivi de toutes les informations, pour reconstituer une collision entre deux protons, est un casse-tête.

Quand des quarks se heurtent

Les détecteurs de particules sont les « yeux électroniques » des physiciens : ils scrutent chaque collision, à la recherche d'événements intéressants. Le LHC sera équipé de quatre détecteurs. Deux seront des poupées russes monstrueuses, composées de modules emboîtés, autour des points de collision.

Chaque module fera ses observations quand il sera traversé par les particules. Ces détecteurs à usage général, ATLAS et CMS, avec une hauteur de 22 mètres, chercheront les bosons de Higgs et les particules supersymétriques, ainsi que les particules inattendues, tirant le maximum de données des débris issus des collisions. Deux autres détecteurs, ALICE et LHCb, analyseront des phénomènes plus spécifiques.

Le Modèle standard

Le Modèle standard de la physique des particules est une théorie qui résume tout ce que l'on sait aujourd'hui sur les particules élémentaires et leurs interactions. Il distingue deux types de particules : celles qui constituent la matière, et celles qui assurent les interactions de particules. Par exemple, la force électromagnétique qu'exerce un proton sur un électron résulte de l'échange mutuel de photons (les particules de la lumière).

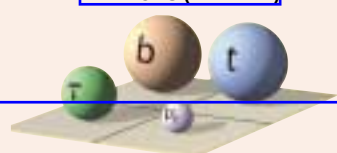
Les particules qui constituent la matière forment trois familles de quatre membres, chaque famille ne se distinguant des autres que par la masse de ses membres. Toute la matière que nous voyons autour de nous est composée par les particules les plus légères : ce sont les deux quarks « up » et « down », l'électron et le neutrino électronique. Les particules des deux autres familles n'apparaissent que lorsqu'elles sont produites par des collisions à haute énergie ; à l'exception des neutrinos, elles sont éphémères.

Les quarks sont liés en « hadrons » (du mot grec qui signifie « lourd ») par l'interaction forte, dont les vecteurs sont les gluons. Le proton et le neutron, qui constituent les noyaux atomiques, sont ainsi des hadrons. Les protons de ces noyaux attirent les électrons, grâce à la force électromagnétique, transmise par les photons, ce qui donne des atomes et des molécules. L'interaction faible, transmise par les bosons W et Z, contribue à l'émission d'énergie dans le Soleil et est à l'origine de la forme de désintégration radioactive où un noyau émet un électron et un neutrino.

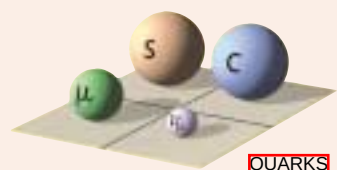
La gravitation est l'interaction la plus faible, mais elle est familière parce qu'elle s'exerce sur tout objet possédant une masse, et que nous-mêmes vivons sur un objet massif, la Terre. Des particules nommées gravitons devraient transmettre cette interaction, mais les forces gravitationnelles sont si faibles qu'on n'a jamais détecté les gravitons. Aujourd'hui, le Modèle standard ne décrit pas le comportement des gravitons.

L'intégralité des comportements de la matière soumise aux diverses forces (sauf la gravitation) est décrite par un nombre limité d'équations élémentaires, construites à partir d'une fonction (un « lagrangien ») conçue selon un principe fondateur nommé « invariance de jauge ». Le Modèle standard n'explique pas pourquoi la nature a conçu trois familles de particules. Bien qu'il soit considéré comme l'une des plus belles constructions de la science du xx^e siècle, le Modèle standard pourrait ainsi n'être qu'un jalon vers une description encore plus fidèle des forces de la Nature.

FERMIONS (MATIÈRE)



QUARKS



BOSONS (FORCES)

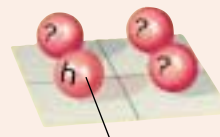
GLUONS



PHOTON



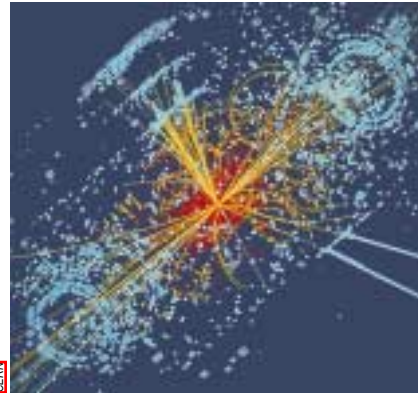
BOSON DE HIGGS



ATLAS et CMS détecteront surtout les muons, les électrons et les photons de haute énergie, qui semblent être révélateurs de la formation de nouvelles particules, tels les bosons de Higgs. Conçus différemment, ces deux détecteurs sont complémentaires. Des années de simulations ont montré qu'il détecteraient n'importe quel phénomène nouveau qui surviendrait lors d'une collision. Le détecteur ATLAS (*A Toroidal LHC ApparatuS*, soit «appareil toroïdal du LHC») contient un gigantesque aimant torique, truffé de détecteurs qui identifieront les muons au vol. Le détecteur CMS (*Compact Muon Solenoid*, soit «solénoïde compact à muons») est plus classique : des détecteurs de muons sont insérés dans le circuit magnétique d'un solénoïde extrêmement puissant.

Certains des détecteurs de CMS seront des cristaux qui émettent de la lumière lorsque des électrons ou des photons les traversent. La fabrication de ces cristaux est très difficile, mais on bénéficie de l'expérience acquise lors de la construction du détecteur L3,

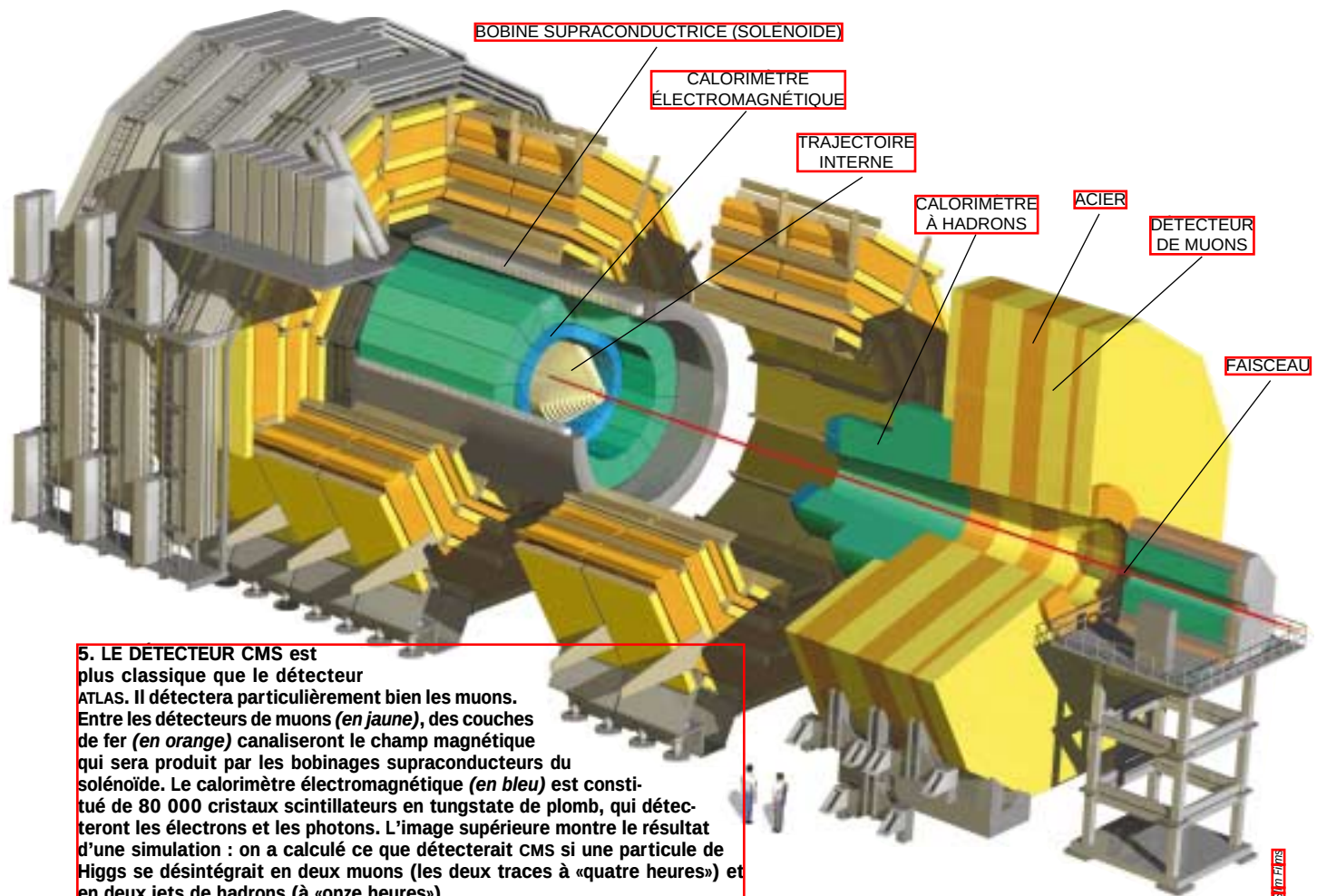
en fonctionnement au CERN (depuis 1989, L3 est un des quatre détecteurs du LEP). On n'avait jamais fabriqué de cristaux scintillateurs en grand nombre avant de construire le détecteur L3, qui en comporte 11 000. Toutefois ces cristaux élaborés pour L3 sont désormais d'un usage courant dans les dispositifs d'imagerie médicale. Le détecteur CMS du LHC aura besoin de plus de sept fois plus de cristaux que L3, et ces cristaux devront être plus robustes. On pense que les travaux



nécessaires à leur réalisation feront également progresser la médecine.

Le détecteur ALICE (*A Large Ion Collider Experiment*, soit «expérience de collision d'ions lourds») sera utilisé pour une expérience plus limitée, qui commencera quand le LHC produira des collisions entre des noyaux de plomb accélérés : en se heurtant avec une énergie considérable (1 150 téraélectronvolts), les noyaux libéreront leurs 400 protons et neutrons, qui formeront un plasma de quarks et de gluons analogue à celui qui emplissait l'Univers dix microsecondes après le Big Bang. Le détecteur ALICE est construit à partir de l'aimant du détecteur L3 et équipé de dispositifs avec lesquels on sondera le plasma de quarks et de gluons.

Des expériences, au CERN, semblent avoir déjà créé des plasmas de quarks et de gluons. Dans les toutes prochaines années, le collisionneur relativiste d'ions lourds (RHIC), Brookhaven, étudiera mieux cet état de la matière, en communiquant dix fois plus d'énergie par nucléon que les programmes



5. LE DÉTECTEUR CMS est plus classique que le détecteur ATLAS. Il détectera particulièrement bien les muons. Entre les détecteurs de muons (*en jaune*), des couches de fer (*en orange*) canaliseront le champ magnétique qui sera produit par les bobinages supraconducteurs du solénoïde. Le calorimètre électromagnétique (*en bleu*) est constitué de 80 000 cristaux scintillateurs en tungstate de plomb, qui détecteront les électrons et les photons. L'image supérieure montre le résultat d'une simulation : on a calculé ce que détecterait CMS si une particule de Higgs se désintégrait en deux muons (les deux traces à «quatre heures») et en deux jets de hadrons (à «onze heures»).

Comment le champ de Higgs produit la masse



L'espace «vide» où règne le champ de Higgs est comme une pièce remplie de personnes qui bavardent tranquillement.



Une particule qui traverse cet espace est comme une célébrité qui entre...



... provoquant autour d'elle un attroupement d'admirateurs qui ralentissent sa progression : elle acquiert de la «masse».

actuels du CERN. Puis, quand le LHC fonctionnera, une énergie encore 30 fois supérieure par nucléon donnera une idée plus précise de l'Univers quand il était dans une phase déterminante de son évolution.

Les études des mésons B, au LHC, devraient expliquer pourquoi l'Univers contient apparemment plus de matière que d'antimatière. Un tel déséquilibre ne s'explique que si les quarks et les antiquarks lourds se désintègrent à des vitesses différentes. Le Modèle standard rend compte de ce déséquilibre nommé «violation CP» (pour conjugaison, qui transforme la matière en antimatière, et parité, qui transforme un objet en son image dans un miroir), mais il en sous-estime probablement l'ampleur. Les physiciens ont étudié expérimentalement une violation CP, lors de la désintégration des quarks «étranges», mais ils ignorent si elle se produit aussi avec les quarks lourds de type bottom et avec leurs antiquarks, qui constituent le méson B. L'étude de ces désintégrations sera donc un test important du Modèle standard.

Des études des mésons B ont commencé en 1999, dans deux «usines à B», en Californie et au Japon : ces machines produisent annuellement plusieurs dizaines de millions de ces mésons. Avec sa luminosité importante, le LHC en fournira annuellement un million de milliards, ce qui augmentera notablement la précision des mesures et révélera éventuellement des modes de désintégrations inédits, indétectables par les autres usines à B.

Le LHC est un accélérateur trop ambitieux – et trop coûteux – pour un seul pays. La collaboration internationale a toujours été active, en physique des particules, car les physiciens ont besoin d'équipements lourds, rarement proches de leur laboratoire ou de

La formation des particules de Higgs



L'énergie issue d'une collision de particules est comme une rumeur propagée dans la même pièce...



... créant encore un attroupement : c'est une particule de Higgs.

leur pays d'origine. Progressivement, la taille et le coût des détecteurs ont augmenté, les frais ont été partagés par un nombre croissant de pays, et les collaborations internationales se sont intensifiées (c'est pour rapprocher ceux qui collaboraient au projet du LEP que Tim Berners-Lee, du CERN, a inventé le Web).

Un laboratoire mondial

Initialement le projet du LHC a été décidé par 19 pays, qui étaient tous membres du CERN ; on envisageait alors une construction en deux tranches, avec un calendrier de travaux largement étalé dans le temps, ce qui était scientifiquement frustrant et financièrement moins avantageux qu'une construction en une seule fois. Grâce à des fonds supplémentaires accordés par d'autres pays, le projet sera amélioré et accéléré. Simultanément, les collaborations scientifiques seront renforcées. Notamment le Canada, les États-Unis, l'Inde, Israël, le Japon et la Russie participeront à la construction des composants de l'accélérateur (et aussi des détecteurs). Le laboratoire japonais KEK, par exemple, fournira 16 aimants de focalisation

spéciaux. Les États-Unis fabriqueront des parties de l'accélérateur (à Brookhaven, au Fermilab et à Berkeley).

Les détecteurs ATLAS et CMS occuperont quatre fois plus d'ingénieurs et de chercheurs que les détecteurs de la génération précédente. Au total, 5 000 chercheurs et ingénieurs, provenant de plus de 300 universités et plus de 50 pays, travailleront au LHC. Les composants seront, autant que possible, élaborés par les pays participants : leurs étudiants y travailleront, acquérant ainsi une expérience irremplaçable, et leurs industries seront sollicitées. Le travail d'analyse des données sera également réparti. Le CERN n'était naguère qu'un institut de recherche européen. Avec le LHC, il deviendra mondial. Déjà plus de la moitié des physiciens des particules y travaillent : 7 000 personnes!

Chris Llewellyn SMITH est doyen de l'Université de Londres. De 1994 à 1998, il a occupé le poste de directeur général du CERN.

The Particle Century, sous la direction de Gordon Fraser, Institute of Physics, 1998. Gordon KANE, *Supersymmetry*, Perseus Publishing, 2000.

L'influence de Darwin sur la pensée moderne

ERNST MAYR

Les grands esprits façonnent la pensée des périodes successives de l'histoire. Luther et Calvin ont inspiré la Réforme ; Locke, Leibniz, Voltaire et Rousseau, l'époque des Lumières. C'est à l'influence de Charles Darwin que la pensée moderne est le plus attachée.

A l'aube du XXI^e siècle, notre conception du monde et de la place que nous y tenons est radicalement différente de ce qu'elle était au début du XIX^e siècle. À qui doit-on cette transformation révolutionnaire ? On cite souvent Karl Marx et Sigmund Freud. Le biographe d'Albert Einstein, Abraham Pais, alla jusqu'à déclarer que «les théories de la relativité ont profondément modifié la manière dont les hommes et les femmes modernes abordent les phénomènes de la nature inanimée». Pais n'eut pas plus tôt prononcé ces paroles qu'il reconnut son exagération. «Il eût été sans doute mieux de dire «scientifiques modernes» que «les hommes et les femmes modernes»», écrit-il, car pour apprécier pleinement les travaux d'Einstein, on doit avoir étudié le style de pensée des physiciens et les techniques mathématiques. Cette restriction vaut d'ailleurs pour toutes les théories originales de la physique moderne, qui ont peu modifié la manière dont le grand public appréhende le monde. Il en va tout autrement des concepts biologiques. Depuis 150 ans, beaucoup d'idées biologiques sont entrées en conflit avec ce que chacun admettait comme vrai. L'acceptation de ces idées exigeait une révolution idéologique. De tous les biologistes, Charles Darwin a été celui à qui l'on doit les changements les plus nombreux et les plus radicaux dans notre vision du monde.

L'œuvre de Darwin est si vaste et si variée que l'on gagne à distinguer trois domaines où sa contribution fut

majeure : la biologie de l'évolution, la philosophie de la science et le *Zeitgeist*, ou «esprit du temps». Nous nous intéresserons principalement à ce dernier, mais nous examinerons d'abord rapidement les deux premiers, car ils apportent un éclairage utile sur ses idées ultérieures.

Une vision laïque de la vie

Darwin a créé une nouvelle branche des sciences de la vie : la biologie de l'évolution. Quatre de ses apports à cette discipline ont une importance spéciale, car leur emprise, considérable, s'exerce bien au-delà de ses limites. Le premier est la non-constance des espèces, c'est-à-dire la conception moderne de l'évolution. Le deuxième est la notion d'évolution ramifiée, qui admet une origine commune à toutes les espèces vivantes. Jusqu'en 1859, les évolutionnistes, tel le naturaliste Jean-Baptiste Lamarck, défendaient l'idée d'une évolution linéaire, d'une avancée téléologique vers une plus grande perfection (par «téléologie», on entend l'idée que l'évolution a un but, une finalité). Cette idée régnait depuis Aristote et sa conception de l'«échelle de la nature», la grande chaîne des êtres. Darwin remarqua ensuite que l'évolution était progressive et qu'elle ne présentait ni interruptions ni discontinuités importantes. Enfin, il a expliqué que le mécanisme de l'évolution est la sélection naturelle.

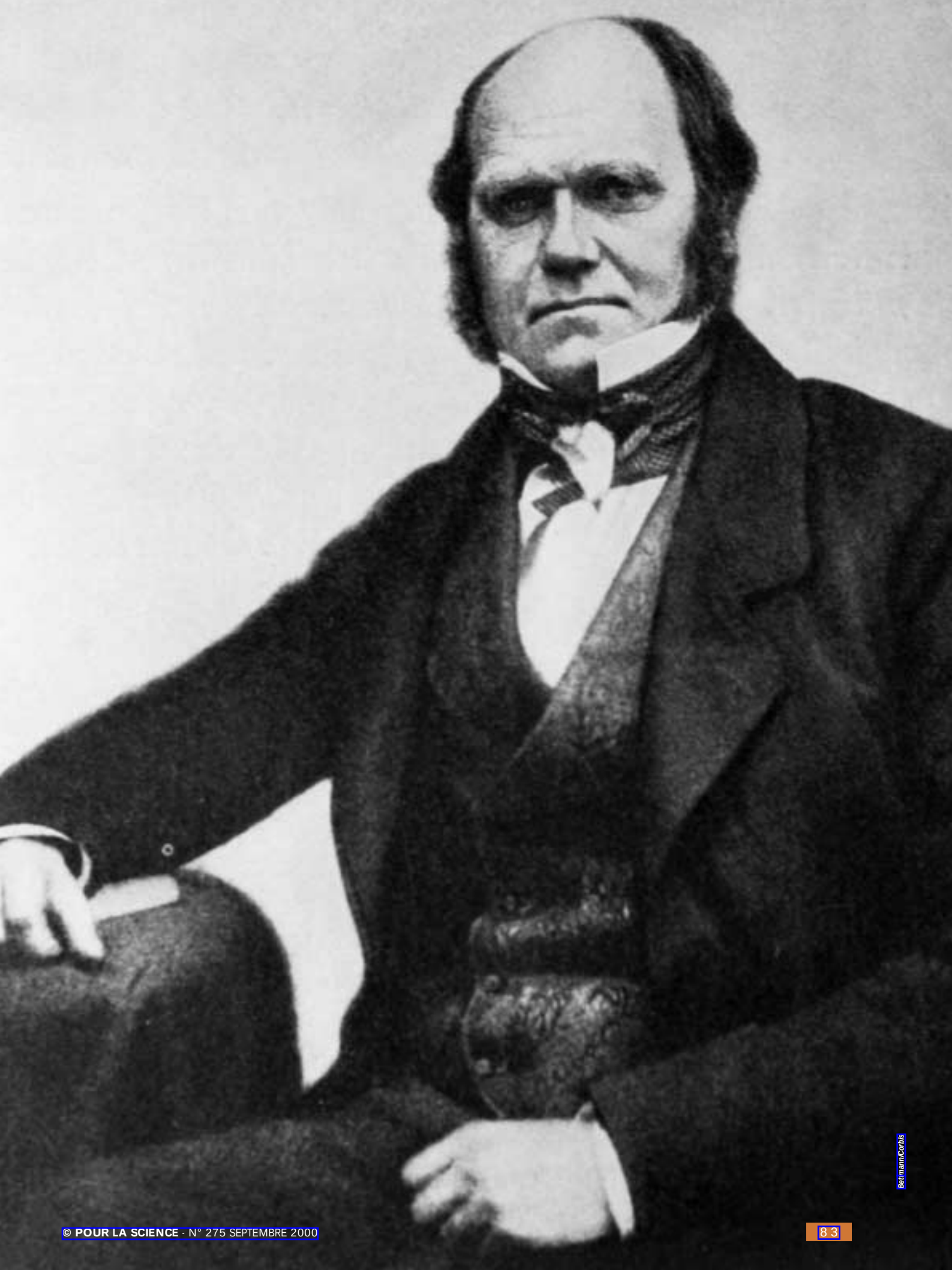
Avec ces quatre clés, Darwin a fondé une nouvelle branche de la philosophie

de la science : la philosophie de la biologie. Un siècle plus tard, elle repose encore sur ces mêmes concepts darwiniens. Notamment, Darwin a introduit la dimension historique dans les sciences. Contrairement à la physique et à la chimie, la biologie de l'évolution est une science historique : les évolutionnistes essayent d'expliquer des événements et des processus passés. Ce n'est pas avec des lois et des expériences que l'on explique ces événements ou que l'on reconstitue les processus qui ont conduit aux événements étudiés.

Par exemple, la brusque disparition des dinosaures, à la fin du Crétacé, a été expliquée par trois scénarios : une épidémie dévastatrice, une modification catastrophique du climat et l'impact d'un astéroïde (la théorie de Luis et Walter Alvarez). Des observations ont contredit les deux premiers, qui ont été rejetés. En revanche, les études et observations restent compatibles avec la troisième, qui est désormais largement admise. La procédure de test appliquée aux récits historiques fait que le large fossé entre la science et les humanités, qui troublait tant le physicien britannique Charles Percy Snow, n'est plus une réalité : la biologie de l'évolution, avec sa méthodologie originale qui prend en compte le temps, est un pont.

La philosophie progressa considérablement avec la découverte de la sélection naturelle par Charles Darwin et Alfred Russel Wallace. Pendant les 2 000 ans qui séparent les philosophes

1. CHARLES DARWIN, vers 1855.



grecs de Hume, de Kant et de l'époque victorienne, ce principe resta ignoré. D'une grande simplicité, il explique à merveille les transformations adaptatives et directionnelles des êtres vivants. La sélection naturelle n'est pas une force comparable à celles que décrivent les lois physiques. Elle est fondée sur un mécanisme simple : les individus «inférieurs» – animaux ou végétaux – sont éliminés. Le philosophe Herbert Spencer, contemporain de Darwin, décrit l'évolution comme «la survie des mieux adaptés», des termes qui nous sont aujourd'hui familiers. Cependant, cette définition sembla longtemps circulaire : «Qui sont les mieux adaptés? Ceux qui

survivent. Et qui survit? Ceux qui sont le mieux adaptés.» En fait, une analyse minutieuse établit généralement pourquoi certains individus ne survivent pas ou ont moins de descendants dans des conditions données.

Le principe de sélection naturelle a l'avantage remarquable d'éviter la notion de «causes finales», de finalité, de téléologie : l'évolution s'effectue sans que des forces supra-naturelles conduisent à ce que l'on a longtemps cru être une fin. En réalité, rien n'est prédéterminé. En outre, quand l'environnement se modifie, la sélection peut changer de cours, parfois en l'espace d'une génération seulement.

La sélection naturelle se fonde sur la diversité naturelle. Darwin observa notamment que le point de vue des typologistes, pour lesquels tous les membres d'une même classe sont par essence identiques, est indéfendable. Les variations entre individus sont très importantes, et la sélection naturelle résulte de deux mouvements : la production d'une abondante diversité, suivie de l'élimination des individus moins adaptés, cette dernière étape étant directionnelle. Le principe de sélection naturelle a mis fin au débat sur le rôle du hasard et de la nécessité, qui divisait les philosophes depuis plusieurs milliers d'années. Ces deux éléments contribuent à l'évolution ; il faut d'abord le hasard pour qu'il y ait ensuite la nécessité.

Darwin était «holiste» : pour lui, la cible de la sélection était la totalité de l'individu. À partir de 1900 environ, les généticiens ont adopté un point de vue plus réducteur : ils ont considéré que la cible de l'évolution n'était pas l'individu, mais le gène. Toutefois, ces 25 dernières années, beaucoup sont revenus au point de vue de Darwin.

À partir de 1859, et pendant près de 80 ans, le débat fut passionné : quatre théories de l'évolution avaient été proposées ; quelle était la bonne? La «transmutation» stipulait que les nouvelles espèces ou les nouveaux types résultaient chacun d'une mutation unique, ou «saltation». L'«orthogénèse» soutenait que des forces téléologiques intrinsèques provoquaient les transformations des êtres vivants. L'évolution lamarckienne admettait une transmission héréditaire de caractères acquis. Et il y avait maintenant la théorie variationnelle de l'évolution par la sélection naturelle de Darwin. Cette dernière sortit victorieuse de la synthèse évolutionniste des années 1940, lorsque les découvertes en génétique furent confrontées aux observations taxonomiques concernant la systématique (la classification des organismes en fonction de leurs caractères). Aujourd'hui, le darwinisme est presque unanimement accepté par les évolutionnistes. Il est le fondement de la nouvelle philosophie biologique.

Il a fallu un siècle après la publication de *De l'origine des espèces* pour que l'on comprenne que la double nature des phénomènes biologiques est l'un des principes les plus importants de cette nouvelle philosophie : ces phénomènes sont gouvernés par



2. ALFRED RUSSEL WALLACE, voyageur et naturaliste anglais, fit des observations zoologiques lors de son exploration de l'Australie et des archipels voisins, qui l'amènèrent à reconnaître le rôle de la sélection naturelle dans l'évolution des espèces, indépendamment de Darwin. Une lettre qu'il lui adressa en 1858, dans laquelle il exposait ses résultats, décida Darwin à présenter sa théorie devant la société linnéenne de Londres, un an avant la parution de *De l'origine des espèces*. À l'époque, cette communication passa presque complètement inaperçue.

les lois universelles de la physique et de la chimie, et aussi par un programme génétique, que la sélection naturelle a façonné au cours de millions de générations. La possession d'un programme génétique est l'apanage des organismes vivants. À l'époque de Darwin, la biologie moléculaire et la génétique balbutiaient, et cette observation était impossible.

Dans la nouvelle philosophie biologique, les lois disparaissent au profit des concepts. En sciences physiques, les théories sont en général fondées sur des lois. Par exemple, les lois cinétiques ont conduit à la théorie de la gravitation. Toutefois, en biologie de l'évolution, les théories sont principalement fondées sur des concepts tels que la compétition, le choix exercé par les femelles, la sélection, la succession et la dominance. On ne peut réduire ces concepts biologiques, et les théories qui en découlent, aux lois et théories de la physique. Darwin n'a jamais clairement exprimé cette idée, mais mon analyse de la théorie darwinienne au cours du siècle dernier m'a bien montré l'importance de Darwin dans la pensée moderne. Pendant cette période, la méthodologie utilisée en biologie a radicalement changé. Darwin n'en est pas le seul responsable ; les progrès en biologie de l'évolution y ont aussi largement contribué. L'observation, la comparaison, la classification, l'analyse des reconstitutions paléobiologiques sont devenues les principales méthodes de la biologie évolutive, reléguant l'expérimentation au second plan.

La plupart des progrès intellectuels de l'époque étaient « dans l'air », et Darwin n'en fut pas le seul acteur. C'est le cas par exemple de la réfutation du déterminisme du mathématicien et physicien français Pierre-Simon Laplace. Toutefois, Darwin fut souvent un précurseur ou celui qui soutint le plus ardemment les nouveaux points de vue.

Darwin dans « l'esprit du temps »

Les individus du XXI^e siècle voient le monde différemment de ceux des années folles, notamment à cause des progrès considérables des techniques. Néanmoins, on ignore à quel point ce changement de la pensée est imputable aux idées de Darwin.

En 1850, de nombreux philosophes et scientifiques en vue étaient chrétiens. Ils admettaient que le monde avait été créé par Dieu et que celui-ci avait



3. KARL POPPER, philosophe et épistémologue britannique d'origine autrichienne, définit la scientificité en 1935, dans *La logique de la découverte scientifique* : une théorie ne serait scientifique que si elle conduit à des prévisions testables expérimentalement. Ce test de réfutabilité ne s'applique pas à la biologie de l'évolution. Malgré une réticence initiale des philosophes et des physiciens, le rôle de la contingence et du hasard dans les processus naturels est aujourd'hui reconnu.



4. CHARLES PERCY SNOW, auteur et physicien anglais, a produit de nombreux ouvrages sur les rapports entre science et société. Lors de l'une de ses conférences, qu'il donna en 1959, il regrettait l'existence d'un large fossé entre la science et les humanités, à cause de la procédure de test appliquée aux récits historiques. La biologie de l'évolution, avec sa méthodologie originale qui prend en compte le temps, est un pont entre ces deux domaines.

institué des lois permettant une parfaite adaptation de tous les organismes les uns aux autres ainsi qu'à leur environnement. Les architectes de la révolution scientifique avaient bâti une vision du monde fondée sur le «physicalisme» (une réduction aux choses ou événements spatio-temporels, ou à leurs propriétés), la téléologie, le déterminisme et d'autres principes fondamentaux. Les principes fondamentaux qui étaient proposés dans *De l'origine des espèces*, en 1859, s'opposaient radicalement aux idées en vigueur.

Premièrement, le darwinisme rejette l'intervention de toute cause ou de tout phénomène surnaturel. La théorie de l'évolution par la sélection naturelle explique l'adaptation et la diversité du monde d'une façon matérialiste, sans

faire appel à un Dieu créateur ni à un «Grand Horloger» (on demeure toutefois libre de croire en Dieu quand on admet la théorie de l'évolution). Darwin a montré que la création, telle qu'elle est décrite dans la Bible ou dans les mythes des origines des autres cultures, est contredite par presque tous les aspects du monde du vivant. En revanche, la sélection naturelle explique toutes les composantes de «l'admirable création», tant louée par les théologiens. En y regardant de plus près, on s'aperçoit que, souvent, cette création n'est pas si admirable (voir *L'origine des maladies*, par R. Nesse et G. Williams, *Pour la Science*, janvier 1999). L'éviction de Dieu laissa la place aux explications purement scientifiques des phénomènes naturels ; elle conduisit au positivisme

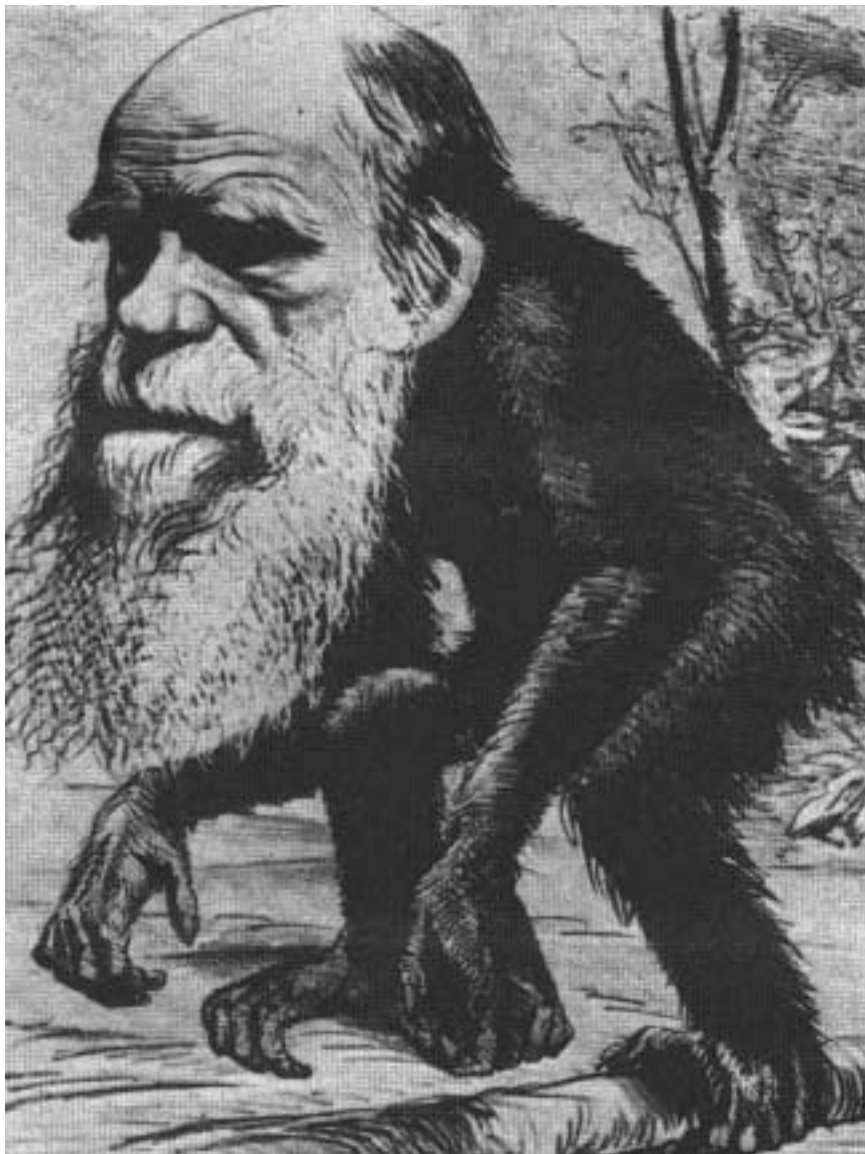
et engendra une puissante révolution intellectuelle et spirituelle, dont les effets se font toujours sentir aujourd'hui.

Deuxièmement, le darwinisme réfute la typologie. Depuis l'époque des pythagoriciens, la pensée typologique, ou essentialisme, a insisté sur la stabilité du vivant. Les essentialistes considéraient que la diversité n'était qu'apparente, qu'il n'existait qu'un nombre limité de formes naturelles (types ou essences), chacune formant une classe ; les membres de chaque classe auraient été identiques, constants et nettement séparés des membres des autres types.

La variation n'est pas essentielle, mais accidentelle. Un exemple géométrique éclaire la position essentialiste : tous les triangles ont les mêmes caractéristiques fondamentales, et se distinguent nettement des quadrilatères ou de toute autre figure géométrique ; un intermédiaire entre un triangle et un quadrilatère est inconcevable. La pensée typologique n'admet pas les variations et conduit à une conception erronée des races humaines. Pour les typologistes, les Caucasiens, les Africains, les Asiatiques ou les Inuits sont des types nettement distincts des autres groupes ethniques. Ce mode de pensée mène au racisme (on a souvent accusé le «darwinisme social», extrapolation erronée de la théorie de l'évolution, de justifier le racisme ; c'était plutôt l'essentialisme, largement répandu avant Darwin, qu'on aurait dû critiquer).

Darwin rejeta complètement la pensée typologique, qu'il remplaça par ce que l'on nomme aujourd'hui le populationnisme. Tous les rassemblements d'organismes vivants, y compris l'humanité, sont des populations constituées d'individus différents. Aucun des six milliards d'hommes n'est identique à un autre. Les variations entre individus n'affectent pas leur essence, mais correspondent seulement à de légères différences statistiques. En rejetant la stabilité des populations, Darwin a introduit une composante historique dans la pensée scientifique et promu une approche nouvelle de l'interprétation explicative dans le domaine des sciences.

Troisièmement, la théorie de la sélection naturelle de Darwin rend toute invocation téléologique inutile. Depuis l'antiquité, on croyait en l'existence de forces téléologiques qui aurait conduit à une perfection croissante.



5. CONTRAIREMENT A CE QUE SUGGÈRE CETTE CARICATURE de 1871, parue dans le *Horner*, Darwin n'a jamais affirmé que l'homme descendait du singe, mais que tous deux avaient un ancêtre commun.



JEAN LOUIS CHARME

6. «OU S'ARRÊTERONT LES MAGNIFICENCES DE L'HIPPODROME? On y parle de l'engagement du célèbre Darwin qui viendrait fournir la preuve de sa généalogie en exhibant l'agilité prestigieuse qu'il

tient de ses aïeux (les singes). M. Littré, qui partage la foi et les ancêtres du savant anglais, le seconderait dans ses exercices.» Caricature par Gilles, 1879, Musée Carnavalet.

Aristote avait mentionné cette «cause finale». Dans sa *Critique du jugement*, Kant s'était rabattu sur des forces téléologiques qui auraient été à l'œuvre dans les phénomènes biologiques, et avait essayé sans succès de les décrire à l'aide d'explications physicalistes newtoniennes. Après 1859, les biologistes de l'évolution conservèrent pendant quelque temps des conceptions téléologiques (l'orthogénèse), se référant toujours à l'«échelle de la nature». Le darwinisme a totalement balayé ces considérations.

L'adjectif «téléologique» s'appliquait au monde inanimé comme au monde du vivant. Dans le premier, de nombreux phénomènes semblaient avoir un but, une fin, alors qu'ils découlent seulement de lois physiques : une pierre tombe et un morceau de métal chaud se refroidit, mais la pierre n'a pas pour but de tomber, ni le métal de se refroidir. Chez les organismes vivants, l'apparente finalité évolutive provient de l'intervention du pro-

gramme génétique inné ou d'un programme acquis. Les systèmes adaptés, tels le cœur ou les reins, semblent «jouer leur rôle» parce qu'ils résultent de milliers d'années d'évolution et qu'ils sont perpétuellement ajustés par la sélection naturelle. Une téléologie cosmique s'ajoutait à la téléologie biologique : chaque chose aurait eu un but prédéterminé dans la nature. Cependant, on n'a jamais trouvé le moindre indice qui laisse présumer l'existence d'une quelconque téléologie cosmique.

Quatrièmement, Darwin mit un terme au déterminisme laplacien. Laplace soutenait que l'on pourrait prédire le futur grâce à une parfaite connaissance du monde, à l'instant présent. En revanche, Darwin accepta l'universalité de l'aléatoire et du fortuit dans les processus de sélection naturelle. John Herschel, astronome et philosophe, qualifia avec mépris la sélection naturelle de «théorie de la pagaille». De nombreux physiciens ont mal accepté que le hasard intervienne dans les phéno-

mènes naturels. Einstein lui-même a exprimé cette aversion dans la fameuse phrase : «Dieu ne joue pas aux dés.» Cependant, la première étape de la sélection naturelle, la production de la diversité, résulte du hasard. La seconde étape, la sélection, est directionnelle.

Malgré une réticence initiale des philosophes et des physiciens, le rôle de la contingence et du hasard dans les processus naturels est aujourd'hui reconnu. De nombreux biologistes et philosophes nient l'existence de lois universelles en biologie ; les variations interindividuelles s'expriment en termes statistiques, et la plupart des lois biologiques souffrent d'exceptions. Le célèbre test de réfutabilité du philosophe des sciences Karl Popper (une théorie ne serait scientifique que si elle conduit à des prévisions testables expérimentalement) ne s'applique pas à la biologie de l'évolution.

Cinquièmement, Darwin a développé une nouvelle vision de l'humanité, et, avec elle, un nouvel

anthropocentrisme. De toutes les propositions de Darwin, la théorie de l'ancêtre commun à toutes les espèces est celle que ses contemporains ont eu le plus de mal à accepter. Pour les théologiens comme pour les philosophes, l'homme est une créature au-dessus et différente des autres organismes vivants. Aristote, Descartes et Kant s'accordaient sur ce point, même si leurs idées différaient

par ailleurs. Cependant, Thomas Huxley et Ernst Haeckel ont démontré, grâce à de rigoureuses études d'anatomie comparée, que l'homme et les grands singes avaient un ancêtre en commun : à partir de ce moment, l'application à l'homme de la théorie de l'ancêtre commun l'a définitivement privé de son statut exceptionnel.

Paradoxalement, ces travaux n'ont pas mis fin à l'anthropocentrisme, car

malgré ses origines, l'homme occupe une position unique au sein du monde du vivant : son intelligence est inégalée, et il est le seul animal à avoir un véritable langage, avec une grammaire et une syntaxe. Darwin a aussi observé qu'il est le seul à avoir une morale. Grâce à son intelligence, à son langage et à des soins parentaux prolongés, l'espèce humaine est la seule espèce animale à posséder une

Darwin, la morale et la civilisation

Publiée en 1871, *La Filiation de l'Homme*, de Darwin, établit qu'un renversement s'est opéré, chez l'homme, à mesure que progressait le processus de civilisation. La marche conjointe du progrès (sélectionné) de la rationalité et du développement (également sélectionné) des instincts sociaux, l'accroissement corrélatif du sentiment de sympathie, l'essor des sentiments moraux en général et de l'ensemble des conduites et des institutions d'assistance permettent à Darwin de constater que la sélection naturelle n'est plus, à ce stade de l'évolution, la force principale qui gouverne le devenir des groupes humains, mais qu'elle a laissé place dans ce rôle à l'éducation. Or, cette dernière dote les individus et les groupes de principes et de comportements qui s'opposent, précisément, aux effets anciennement éliminatoires de la sélection naturelle, et qui orientent à l'inverse une partie de l'activité sociale vers la protection et la sauvegarde des faibles de corps et d'esprit, aussi bien que vers l'assistance aux déshérités. La sélection naturelle a ainsi sélectionné les instincts sociaux, qui à leur tour ont favorisé des dispositions éthiques ainsi que des dispositifs institutionnels et légaux antisélectifs et anti-éliminatoires.

Ce faisant, la sélection naturelle a travaillé à son propre déclin (sous la forme éliminatoire qu'elle revêtait initialement), en suivant le modèle même de l'évolution sélective. À l'ancienne forme, qui a dé péri, s'est substituée une forme nouvelle : en l'occurrence, une compétition dont les fins sont de plus en plus la moralité, l'altruisme et les valeurs de l'intelligence et de l'éducation. Sans rupture, Darwin, à travers cette dialectique évolutive qui passe par un renversement progressif que nous avons nommé l'effet réversif de l'évolution, installe toutefois, entre biologie et civilisation, un effet de rupture qui interdit que l'on puisse rendre son anthropologie responsable d'une quelconque dérive en direction des désastreuses «sociologies biologiques». Il s'oppose ainsi expressément au racisme, au malthusianisme et à l'eugénisme, contrairement à l'erreur courante qui lui attribue la justification de ces trois systèmes de prescriptions éliminatoires. Cette remarquable dialectique du biologique et du social, qui se construit pour l'essentiel entre les chapitres III, IV, V et XXI de *La Filiation* et qui, en plus de s'opposer à toutes les conduites oppressives, préserve l'indépendance des sciences sociales en même temps qu'elle autorise, et même requiert le matérialisme éthique déductible d'une généalogie scientifique de la morale, n'a

été reconnue dans toute sa force logique qu'à partir du début des années 1980.

La persistance extraordinairement tenace d'erreurs d'interprétation concernant le versant anthropologique de la pensée darwinienne s'enracine dans le moment précis qui sépare la publication en 1859 de *L'Origine des espèces* et celle, en 1871, de *La Filiation de l'Homme*. Cette décennie décisive, au cours de laquelle les partisans de Darwin – lesquels étaient pour la plupart loin d'être «darwiniens» – incitèrent sans relâche ce dernier à étendre à l'homme son propos transformiste dans un livre qui, pour avoir été trop longtemps attendu, ne sera pratiquement jamais lu dans sa littéralité ni entendu dans sa logique, a vu en effet se développer le «système de l'évolution» du philosophe Herbert Spencer et son «darwinisme social», application impitoyable du principe de l'élimination des moins aptes au sein d'une concurrence sociale généralisée. Cette décennie a également vu la naissance de l'eugénisme de Francis Galton, recommandant l'application compensatoire d'une sélection artificielle aux membres du groupe social pour lutter contre la dégénérescence issue de l'affaiblissement du rôle de la sélection naturelle en milieu de civilisation.

Ces discours – parfois inconciliables dans leurs principes, mais convergents dans leurs effets – développaient ensemble une référence également réductrice à la théorie darwinienne de la sélection, dans un accord global avec les tendances dominantes de la société industrielle anglaise emportée par l'ivresse de sa métamorphose libérale. Aucune de ces deux «déviation» n'a reçu l'aval de Darwin, qui s'est opposé, dans l'ouvrage de 1871, aux positions et recommandations sociales et politiques qui en émanaient. Cependant, la confusion était née, soutenue par un système de pensée et ancrée dans le vocabulaire théorique, de sorte qu'aujourd'hui encore, un travail idéologique incessant s'obstine, contre l'évidence historique, logique et textuelle qui ressort de l'examen approfondi de l'œuvre darwinienne, à parer du nom et du prestige de Darwin – le plus souvent au moyen de montages citationnels – des doctrines ou des pratiques, telles que l'anti-interventionnisme social radical, l'impérialisme, le racisme, le «sexisme» ou l'eugénisme, que Darwin a toujours expressément combattues.

Patrick TORT

Directeur de l'Institut Charles Darwin International

riche culture. Grâce à ces avantages, la domination de l'homme sur la planète est inégalée, pour le meilleur ou pour le pire.

Sixièmement, Darwin a fourni les bases scientifiques de l'éthique. L'évolution explique-t-elle l'éthique humaine? On a souvent soulevé cette question en observant que la sélection récompense l'individu dont le comportement favorise sa propre survie et son succès reproductif. Comment une conduite aussi égoïste conduirait-elle à des valeurs éthiques? La thèse du darwinisme social, proposée par Spencer à la fin du XIX^e siècle, montrait que les explications évolutionnistes et le développement de l'éthique étaient contradictoires.

Aujourd'hui, nous savons que, chez les espèces sociales, ce n'est pas seulement l'individu, mais le groupe entier qui est la cible de la sélection. Darwin a appliqué ce raisonnement à l'espèce humaine dans *La Filiation de l'homme*, paru en 1871. La survie et la prospérité d'un groupe social dépendent dans une large mesure de la coopération harmonieuse des membres du groupe. Ainsi, l'altruisme, en favorisant la survie et la prospérité du groupe, participe indirectement à l'adaptation des individus qui le composent. Ce processus aboutit à une sélection des comportements altruistes.

L'influence des nouveaux concepts

La sélection de parentèle (entre individus apparentés) et l'entraide mutuelle ou réciproque sont avantageuses dans les groupes sociaux. Ces dernières années, les éthologistes ont démontré qu'une telle sélection des comportements altruistes était largement répandue chez les animaux sociaux. L'évolution est la base de l'éthique, parce que la sélection naturelle encourage l'altruisme et la coopération harmonieuse au sein des groupes sociaux. La vieille théorie du darwinisme social, purement égoïste, reposait sur une compréhension incomplète des animaux et, en particulier, des espèces sociales.

Aujourd'hui, aucun individu cultivé ne doute plus de la théorie de l'évolution, qui, nous le savons désormais, est une simple reconnaissance des faits. Les biologistes ont confirmé la plupart des thèses de Darwin, telles celles de l'ancêtre commun et du caractère pro-

gressif de l'évolution, ainsi que son explication théorique par la sélection naturelle.

L'influence de Darwin a eu une immense portée sur la pensée moderne. Il a établi une philosophie de la biologie, en faisant intervenir le facteur temps, en prouvant l'importance du hasard et de la contingence, et en montrant qu'en biologie évolutive, les théories se fondent plus sur des concepts que sur des lois. Surtout, il a introduit une série de concepts nouveaux. Par l'évolution, il a expliqué le monde vivant sans recours au surnaturel. Il a réfuté l'essentialisme et la typologie, qu'il a remplacés par le populationnisme, où chaque individu est unique, ce qui est primordial pour l'éducation et contre le racisme. La sélection naturelle ayant pour cible les groupes suffit pour expliquer l'origine et la persistance de systèmes éthiques altruistes. La téléologie cosmique, processus intrinsèque donnant automatiquement à la vie une plus grande perfection, est fautive : des processus strictement matériels expliquent tous les phénomènes dits téléologiques. Le prédéterminisme n'existe pas. Notre destin est entre nos mains évoluées.

«Il y a de la grandeur dans cette manière d'envisager la vie», disait Darwin. Les modes de pensée ont évolué et évoluent toujours, mais, d'une manière ou d'une autre, les principes darwiniens sont présents dans toutes les convictions de l'homme moderne.

Ernst MAYR est professeur de zoologie à l'Université Harvard.

Howard E. GRUBER, *Darwin on Man : A Psychological Study of Scientific Creativity*, deuxième édition, University of Chicago Press, 1981.

Ernst MAYR, *One Long Argument : Charles Darwin and the Genesis of Modern Evolutionary Thought*, Harvard University Press, 1993.

Janet BROWNE, *Charles Darwin : Voyaging : A Biography*, Princeton University Press, 1996.

Charles DARWIN, *La Filiation de l'Homme*, Paris, Syllepse, 1999.

Charles DARWIN, *L'Origine des espèces*, Verviers, Marabout-Université, 1973.

Patrick TORT, *Darwin*, Gallimard, «Découvertes», septembre 2000.

Patrick TORT, *Dictionnaire du darwinisme et de l'évolution*, PUF, 1996.

Conférence internationale

Le bien-être des enfants au XXI^e siècle

Aspects biologiques et psychosociaux du développement positif de l'enfant (âge 0 à 5 ans)



16
17
NOV 2000

Centre de conférences européen, Luxembourg-Kirchberg

Co-parrainé par



Organisation Mondiale de la Santé

Organisé par

Healthy Children Foundation
Luxembourg

www.healthychildrennetwork.org

Des lacs meurtriers

MARGUERITE HOLLOWAY

Au Cameroun, deux lacs risquent à tout moment de libérer des gaz qui tueraient les populations riveraines. Une équipe internationale de scientifiques tente de prévenir un accident tel celui qui eut lieu dans les années 1980.

Un samedi matin, dans un village du Nord-Ouest du Cameroun, Mohammed Musa Abdulahi s'éveilla sans pouvoir bouger son bras droit qu'il ne sentait plus. Il se rappela que, ne se sentant pas bien, il s'était couché dans l'école au lieu de s'occuper des enfants plus jeunes, comme

il le faisait parfois. Il se leva et secoua son collègue, qui avait également fait une sieste : celui-ci s'éveilla en sursaut, poussa un cri sans raison apparente et partit en courant. M. Abdulahi prit le chemin de son domicile, traversant son village. Ce qu'il découvrit était horrible : les rues et les cours en terre battue étaient jonchées de cadavres. Les villageois gisaient, comme s'ils étaient soudainement tombés. Les chiens étaient morts. Le bétail était mort. Les oiseaux et les insectes étaient tombés des arbres.

Lorsque M. Abdulahi arriva à la maison de son père, il découvrit que toute sa famille avait également péri : ses frères, ses sœurs, son père, les deux épouses de celui-ci. Pendant un instant, cependant, il eut un espoir : quand il toucha l'un des nourrissons, ce dernier se mit à pleurer. M. Abdulahi voulut le prendre contre lui, mais il n'y parvint pas, en raison de son bras paralysé ; il confectionna une écharpe gros-

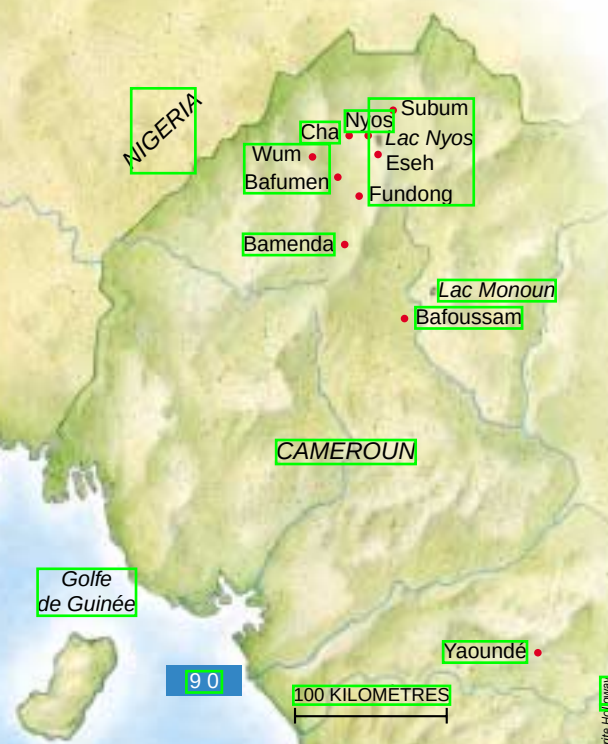
sière à l'aide d'un vêtement, mais quand il toucha à nouveau l'enfant, il vit que celui-ci avait cessé de vivre.

M. Abdulahi avait décidé de ne plus vivre sur les bords Sud du lac Nyos, ce lac qui a vomi un nuage de gaz mortel dans la soirée du jeudi 21 août 1986, tuant plus de 1 700 personnes. Le lac pourrait tuer encore, mais M. Abdulahi a décidé de guider et d'aider une équipe scientifique qui est venue analyser les causes de la catastrophe et «désarmer» le lac, si possible.

L'équipe est d'abord arrivée à la ville de Bamenda, puis elle est descendue débarquer son matériel sur les rives du lac Nyos : un équipement de surveillance, des matériaux pour construire des radeaux, des canaux pneumatiques, des tentes, des réfrigérateurs... Ce débarquement est une étape importante dans l'histoire de la gestion de l'environnement. Depuis 1986, les scientifiques qui étudiaient le lac Nyos



1. LE DIOXYDE DE CARBONE dissous dans les profondeurs du lac Nyos (ci-dessous) a jailli en août 1986, tuant 1 700 personnes et tout leur bétail.



cherchaient à débarrasser ce dernier du gaz qui s'accumule dans ses eaux profondes. Techniquement, un tel dégazage est simple et peu coûteux, mais le travail est compliqué par la pauvreté du pays et les difficultés politiques.

Effervescence meurtrière

Le lac Nyos est très beau, bordé de champs cultivés, de parois rocheuses et de collines verdoyantes. Toutefois, son eau ne dort pas : elle occupe un cratère, formé il y a cinq siècles environ par une éruption volcanique qui laissa un bouchon de magma au fond du cratère. Ce bouchon s'est refroidi, et la dépression s'est emplie d'eau ; la profondeur atteint aujourd'hui 210 mètres. De nombreux lacs occupent des cratères, dans les chaînes volcaniques du

Globe, mais le lac Nyos est un des deux seuls qui aient tué. L'autre, le lac Monoun, est également au Cameroun, à 95 kilomètres au Sud-Est du lac Nyos.

L'activité du volcan libère du dioxyde de carbone (CO_2), qui remonte jusqu'au lac. Il se dissout alors dans l'eau, libérant des ions en réagissant avec les minéraux du fond du lac. L'eau ainsi chargée de dioxyde de carbone s'accumule lentement, mais elle reste généralement concentrée, séparée des couches supérieures d'eau douce. Dans la plupart des lacs de cratère, les couches d'eau alternent périodiquement, par convection, amenant de l'eau enrichie en gaz à la surface, où le gaz se dégage dans l'atmosphère sans nuire, mais les eaux chargées de gaz des lacs Nyos et Monoun stagnent au fond : la limite, nommée chémocline, entre l'eau pro-

fonde, dense et minéralisée, et l'eau douce des couches supérieures n'évolue pas (c'est également le cas du lac Kivu, à la frontière du Rwanda et de la République démocratique du Congo, bien que l'on n'ait jamais enregistré d'éruption de ce lac).

Dans ces lacs volcaniques, le gaz saturé les eaux profondes, qui remontent après une perturbation externe : un vent violent, une tempête, un temps froid qui fait descendre une poche d'eau superficielle, un glissement de terrain, un tremblement de terre, nul ne le sait. Lors de la remontée des eaux du fond, le dioxyde de carbone n'est plus sous pression, de sorte qu'il ne reste pas en solution ; les bulles qui montent vers la surface entraînent davantage d'eau des couches profondes. On suppose que l'effervescence



s'intensifie progressivement, comme dans du champagne que l'on sabre : l'eau chargée de gaz jaillit violemment en une gigantesque fontaine (à Nyos, le jet a atteint 80 mètres), et le dioxyde de carbone se répand dans l'atmosphère.

Une fois et demie plus lourd que l'air, le dioxyde de carbone stagne au-dessus du lac et sur les sols environnant, asphyxiant les êtres vivants. Ainsi, le lac Monoun a tué 37 personnes, le 15 août 1984. Le lac Nyos fut plus meurtrier parce qu'il est plus vaste et plus profond. Le nuage de gaz a dévalé les collines à une vitesse d'environ 70 kilomètres par heure, atteignant les vallées et les villages à 20 kilomètres alentour. Selon George Kling, biologiste de l'Université du Michigan qui dirige l'équipe d'étude de ces deux lacs, la dernière victime du lac fut une jeune fille qui, le lendemain matin suivant le dégazage, descendit dans un ravin où stagnait le dioxyde de carbone. M. Abdulahi suppose que son collègue et lui-même ont été sauvés, parce qu'ils dormaient dans une pièce qui les a protégés du gaz. Abdulahi est resté inconscient pendant deux jours, appuyé sur son bras droit : c'est la raison pour laquelle ce bras est resté paralysé (pendant plusieurs mois). Le dérangement mental de son collègue semble également résulter de l'intoxication.

Une menace qui persiste

Les lacs Nyos ou Monoun peuvent encore tuer. Selon les calculs de G. Kling et de Williams Evans, le lac Nyos contient deux fois plus de dioxyde de carbone qu'il ne s'en est dégagé lors de l'effervescence de 1986. En outre, un nouvel accident risque de rompre la digue fragile qui a été construite à l'extrémité Nord du lac : les eaux risqueraient de couler jusqu'au Nigeria, noyant (ou déplaçant) 10 000 personnes. Bien que les environs du lac aient été évacués après la catastrophe, de nombreuses personnes se sont réinstallées, attirées par la richesse de la région. Des champs de maïs bordent la rive du côté Sud. Des troupeaux paissent sur les collines entourant le lac, sous l'œil vigilant de leurs gardiens

peuls. En outre, au début des années 1990, des ichtyologistes ont lâché des poissons dans ce lac qui n'en contenait pas : ces poissons ont prospéré, perturbant l'écosystème et attirant les populations pauvres de la région.

L'accès difficile au lac limite les installations, mais il complique également les études et les entreprises de dégazage. Les équipes d'études qui partent de Yaoundé doivent ainsi gagner d'abord Bamenda, pour s'y ravitailler, avant d'emprunter la route carrossable qui conduit à Fundong. Au Nord de Fundong, la très mauvaise piste qui conduit dans la région du lac Nyos isole ce dernier : c'est une succession de fosses boueuses reliées, quand le temps est sec, par une piste poussiéreuse et accidentée. De surcroît, les ponts à traverser pour gagner le lac



Photographies : Marquerte Ndongo

2. DU MAIS est cultivé sur les rives du lac Nyos (en haut). Pour atteindre cette zone, les équipes d'étude du lac mettent plusieurs jours, sur des pistes non carrossables. Les ponts qu'empruntent ces pistes sont souvent emportés par les crues. Enfin les équipes doivent apporter tout le matériel avec le campement.



sont fréquemment emportés. Les véhicules tous terrains et les camions tombent souvent en panne, et il faut plusieurs jours de route, avec des campements sous les averses nombreuses pour atteindre le dernier village accessible. Ensuite, le matériel doit être porté pour parcourir les six derniers kilomètres, escarpés et glissants.

Lors de l'expédition, le campement était organisé autour d'une caisse de bonbonnes d'oxygène : toutefois il n'y en avait que dix minutes pour dix personnes. L'équipe aurait souhaité monter le camp en hauteur, sur les collines voisines, mais leur accès était trop difficile. La première tâche fut la construction d'un radeau. Après l'explosion de 1986, G. Kling et ses collègues avaient placé une petite station météorologique sur un radeau, au milieu du lac, afin de mesurer la température, la vitesse du vent, l'ensoleillement et la pluviosité. Dégradée par les intempéries, cette station a dû être remplacée ; des capteurs de température, qui pendent du nouveau radeau à différentes profondeurs, enregistrent les variations de température de l'eau, révélant les mouvements de convection. Des capteurs mesureront également la pression du dioxyde de carbone dissous. L'opération de dégazage devra se fonder sur une meilleure connaissance de l'écosystème.

Le dégazage

Avec leur dernière expédition, G. Kling et ses collègues peuvent aujourd'hui préparer l'opération de dégazage, qui devrait commencer dans quelques mois. Il en coûtera 20 millions de francs, alloués par l'Agence de coopération internationale japonaise : 12 tuyaux seront plongés à trois profondeurs différentes, afin que l'eau chargée de CO_2 perde spontanément son gaz, peut-être à une vitesse initiale de 320 kilomètres par heure (à Monoun, trois tuyaux suffiraient).

Ce projet a été beaucoup discuté depuis l'explosion du lac Nyos, et son principe a été testé dans le lac Monoun en 1992 : Michel Halbwachs, de l'Université de Savoie, Gregory Tanyileke, de l'Institut camerounais de recherches géologiques et minières, et leurs collègues ont descendu dans l'eau un tuyau de cinq centimètres de diamètre et un tuyau de 14 centimètres de diamètre ; puis, à l'aide d'une motopompe, l'équipe a aspiré de l'eau profonde. En raison de



3. UNE STATION METEOROLOGIQUE a été construite sur un radeau (on voit ici la mise à l'eau). De ce radeau pendent des câbles équipés de thermomètres à leur extrémité ; on mesure la température de l'eau du fond, afin de surveiller les évolutions éventuelles. En bas, on voit le déploiement de ces câbles, sur les berges, avant leur installation.

PHOTOGRAPHIES : M. KLEIN (1986)



4. LE LAC MONOUN.



Photographies : Marguerite HOLLOWAY

5. LE DÉVERSOIR sur le côté Nord du lac Nyos.

la différence de pressions en dioxyde de carbone entre le fond et la surface, une fontaine d'eau riche en gaz, auto-entretenue, a jailli dans les deux tuyaux, et du dioxyde de carbone s'est dissipé dans l'atmosphère. L'équipe ferma des valves dans les tuyaux pour arrêter ce premier dégazage.

Le succès de cette expérience a conduit à une tentative analogue, en 1995, au lac Nyos. Avec le soutien de Gaz de France, M. Halbwachs et ses collègues ont alors descendu un tuyau de

14 centimètres de diamètre et de 205 mètres de long. Toutefois, après la formation de la fontaine, les frottements de l'eau et des bulles ascendantes contre le tuyau projetèrent ce dernier en l'air.

M. Halbwachs avait un projet différent de celui d'une équipe japonaise dirigée par Yutaka Yoshida et Minoru Kusakabe : il envisageait d'immerger cinq tuyaux seulement, au lieu de 12, pour dégazer le lac Nyos, avec un système de pompage télécommandé. Les ministres camerounais

hésitèrent longuement, mais ils ont finalement décidé le dégazage avec le projet japonais. Le gouvernement a amélioré les routes, évacué les abords du lac et mobilisé l'armée pendant les premières expériences de dégazage avec des réservoirs à oxygène en cas d'explosion.

Bien que l'opération de dégazage semble être aujourd'hui en bonne voie, de nombreux chercheurs pensent que la présentation des dangers au public a été insuffisante : les populations des environs doivent être mieux averties des dangers ; à l'étranger, les offices d'aide au développement doivent augmenter leur soutien aux opérations de dégazage, et l'on doit mettre fin à une rumeur qui naquit lorsqu'un prêtre visita les villages dévastés et décrivit la scène comme ressemblant aux suites du largage d'une bombe à neutrons. Cette rumeur de la bombe a des variantes : certains prétendent que des Américains et des Israéliens auraient fait sauter le lac pour s'emparer de diamants qu'il abrite ; d'autres qu'un membre de l'organisme américain de coopération aurait préparé l'installation des Américains dans la région. Cette rumeur risque de gêner les évacuations, avant le dégazage.

Marguerite HOLLOWAY est journaliste à la revue *Scientific American*.



Numérologie et coïncidences

JEAN-PAUL DELAHAYE

L'utilisation de chiffres n'est pas une garantie de scientificité : les mathématiques sont souvent efficaces, mais... Il y a des exceptions, à double titre sataniques, qu'il est intéressant de comprendre.

Eugène Wigner, dans un célèbre article intitulé «La déraisonnable efficacité des mathématiques en sciences», s'étonnait que l'utilisation de quelques règles ou modèles mathématiques pour étudier et représenter notre univers permette de prédire avec une exactitude inattendue le comportement de systèmes complexes. Récemment, Arthur Lesk s'est similairement étonné de «La déraisonnable efficacité des mathématiques en biologie moléculaire» : même dans les sciences de la vie, penser en termes numériques et mathématiques conduit au succès.

La philosophie des mathématiques est ainsi confrontée à un double et troublant mystère : (a) pourquoi le monde se conforme-t-il à des lois numériques et mathématiques ? ; (b) comment se fait-il que nous réussissions à identifier et à comprendre ces lois ?

Nous ne chercherons pas à détailler les diverses solutions proposées à cette énigme philosophique, aucune ne semble d'ailleurs véritablement convaincante, mais nous nous intéresserons à un problème lié et également difficile : «la déconcertante absurdité des mathématiques lorsqu'on les utilise de manière superstitieuse».

La question posée est celle-ci : «Pourquoi certains usages des mathématiques sont-ils efficaces et scientifiquement satisfaisants, alors que d'autres, peu éloignés, sont d'une invraisemblable naïveté ? Par où passe la frontière entre les utilisations sérieuses des chiffres et celles que l'on doit qualifier de fantaisistes et, par conséquent, éviter à tout prix ?»

Tout le monde connaît des exemples d'utilisations efficaces des mathématiques : votre poste de télévision est un assemblage de concepts mathématiques ; les avions volent grâce aux équations, aux chiffres qu'on a manipulés en grande quantité pour les concevoir et les mettre

au point ; un ordinateur est un montage d'objets logiques, arithmétiques et algorithmiques qui fonctionne avec fiabilité... ou presque.

LA PERSONNALITÉ DE PAUL DUPOND

En revanche, comme beaucoup de lecteurs de *Pour la Science* sans doute, j'ignorais jusqu'à récemment que quantité de gens font un usage des chiffres qui n'est pas fondé sur la raison. Des ouvrages proposent une utilisation magique des chiffres, appelée numérologie. Cette prétendue science vous surprendra par sa crédulité et son manque de fondement. Le petit livre *La numérologie* du Professeur Sydney Parker servira d'exemple mais il y a en a bien d'autres du même tonneau.

D'abord l'auteur explique qu'il vous faut identifier votre chiffre personnel. Pour cela, vous devez convertir chacune des lettres qui composent votre nom en un chiffre par le système A=1, B=2, C=3, D=4, E=5, F=6, G=7, H=8, I=9, J=1, K=2, L=3, M=4, N=5, O=6, P=7, Q=8, R=9, S=1, T=2, U=3, V=4, W=5, X=6, Y=7, Z=8. Puis vous devez en faire la somme et réduire de proche en proche, comme quand on fait une preuve par 9 (ce qui revient à calculer le reste de la division du nombre obtenu par 9, ce que peu de numérologues semblent savoir). Ainsi, aux lettres de chacun est associé un chiffre. Celles de Paul Dupond, par exemple, donnent : $7+1+3+3+4+3+7+6+5+4 = 43$, donc 7.

Le chiffre obtenu est le chiffre personnel de Paul Dupond. «Ce chiffre, nous explique-t-on, révèle son individualité, son comportement social et affectif, ses tendances, sa véritable nature.» D'après le livre, Paul Dupond est philanthrope, excentrique, vaniteux et sera attiré par les sciences occultes. Si votre chiffre est 3, réjouissez-vous, vous serez riches ; «le numéro

4 favorise, lui, les sciences exactes» (le fichier des abonnés de *Pour la Science* en établirait la preuve), etc.

Les différents ouvrages de numérologie se contredisent souvent, mais pas systématiquement, car ils se copient sans vergogne. À de rares exceptions près, ils sont mal écrits, répétitifs et ennuyeux. Qualifier ces ouvrages de sous-littérature n'est pas exagéré, tant transparait le manque de soin et la précipitation qui ont présidé à leur écriture.

Je ne vous ferai pas la liste des arguments qui établissent que tout cela est idiot. Il suffit de dire que, si une seule des affirmations de ces livres avait été confirmée, voire prouvée, une véritable révolution s'en serait suivie, pour deux raisons au moins. D'une part, cela remettrait en cause notre conception de la causalité : rien ne peut expliquer que les lettres d'un nom puissent déterminer la philanthropie ou la capacité à gagner de l'argent. Même après sa naissance, en choisissant correctement son prénom (donc son nombre personnel) vous feriez d'un enfant quelqu'un de loyal et honnête (si vous vous arrangez pour que son chiffre soit 3), ou d'inconstant et léger (chiffre 6), etc.

L'autre raison qui provoquerait une révolution est que de telles régularités, si elles étaient véritables, auraient une grande valeur commerciale. Pour les sociétés faisant des envois publicitaires, une application de ce petit livre fournirait des consignes pour cibler les envois, ce qui permettrait des centaines de millions de francs d'économie : les éditeurs de livres d'occultisme doivent envoyer leur catalogue à Paul Dupond, mais surtout pas à Paul Dupont !

Que des tests d'embauche utilisent la numérologie ne prouve pas que la numérologie est sérieuse : certains critères de recrutement sont, hélas, pire que douteux...

Le plus étonnant peut-être avec la numérologie est que les savants numérologues ne prennent pas la peine d'argumenter. Ils ne s'adressent pas, semble-t-il, aux capacités de raisonnement de leurs lecteurs ou clients. En fait, ils ne prennent pas même la peine d'être cohérents entre eux. Certains proposent de trouver votre chiffre personnel en partant de votre date de naissance plutôt que votre nom, ce qui évidemment change tout. D'autres suggèrent de calculer votre numéro personnel en utilisant un autre mode de calcul, la réduction progressive, en additionnant les chiffres consécutifs par paires :

P	A	U	L	D	U	P	O	N	D
7	1	3	3	4	3	7	6	5	4
8	4	6	7	7	1	4	2	9	
3	1	4	5	8	5	6	2		
4	5	9	4	4	2	8			
9	5	4	8	6	1				
5	9	3	5	7					
5	3	8	3						
8	2	2							
1	4								
5									

On remplit ligne par ligne en faisant la somme modulo 9 des deux chiffres situés au-dessus, ce qui, sauf exception, donne un autre résultat que la méthode «classique». D'autres livres de numérologie encore proposent de calculer modulo 12, ce qui établit des correspondances (estimées intéressantes) avec les signes du zodiaque, ou de ne prendre que les initiales des noms et prénoms, ou de ne considérer que les voyelles d'une part et les consonnes d'autre part, ou de classer les lettres de l'alphabet dans un ordre différent de l'ordre usuel. D'un ouvrage à l'autre, les conclusions et méthodes changent prouvant un étonnant manque de cohérence chez les adeptes de la numérologie.

Certains, pour justifier cette liberté, et espérant gagner sur tous les tableaux, indiquent que la numérologie est non seulement une science, mais aussi un art. C'est là une prétention absurde, car ce que produit la numérologie, et particulièrement en matière littéraire, n'a vraiment rien d'une œuvre d'art. Toute méthode numérologique peut d'ailleurs se traduire en un programme d'ordinateur, souvent simple, qui fera mécaniquement le travail du numérologue : or l'art ne se laisse pas si facilement «mettre en programme».

Nulle part, dans les ouvrages de numérologie, les experts ne s'interrogent sur le pourquoi des affirmations qu'ils vous assènent, sur leur confirmation. Ils ne recherchent pas quel système est le meilleur, ni bien sûr à quelle proportion d'erreurs on peut s'attendre (nul ne prétend, j'espère, que 100 pour cent des

1. LES RÉPÉTITIONS DE 1 ET L'ABOMINABLE NUMÉRO 666

Lorsqu'on vous présente une coïncidence, il faut évaluer dans quel espace celui qui a trouvé la coïncidence numérique menait ses recherches. Si l'espace est très grand, la coïncidence ne doit pas surprendre.

Ainsi, doit-on estimer remarquable que 11, 11...1 (19 fois le "1"), 11...1 (23 fois le "1"), 11...1 (317 fois le "1"), 11...1 (1031 fois le "1") sont des nombres premiers? Non, car on a trouvé ces nombres premiers en essayant systématiquement tous les nombres de la forme 11...1 et la proportion de nombres premiers parmi ces nombres n'est pas supérieure à celle que l'on trouve en recherchant parmi des nombres quelconques. Le nombre 666 est parfois considéré comme maléfique, et de nombreux numérologues passent des jours entiers à le faire apparaître par des combinaisons variées.

Voici quelques-unes de leurs trouvailles. C'est amusant, mais il serait absurde d'y attribuer de l'importance, car en regard des millions de formules qui ont été essayées et qui n'ont pas fait apparaître 666, ces relations ne sont finalement pas surprenantes. En se donnant de la peine, on en trouverait tout autant pour 432 ou 254 ou n'importe quel nombre.

$$16 - 2^6 + 3^6 = 666$$

$$666 = 6 + 6 + 6 + 6 + 6^3 + 6^3 + 6^3$$

$$666 + 6 + 6 + 6 = (6 - 6/6)^{(6+6+6)/6} + 6^{(6+6+6)/6} + (6+6/6)^{(6+6+6)/6}$$

Les nombres de Fibonacci $f(0)=1$, $f(1)=1$, $f(2)=2$, $f(3)=3$, $f(4)=5$, ...

$f(n) = f(n-1) + f(n-2)$ sont liés à 666, car, par exemple :

$$f(1)^3 + f(2)^3 + f(3)^3 + f(4)^3 + f(5)^3 + f(6)^3 = 666$$

(remarquons que $1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6 = 6 + 6 + 6$)

$$(f(1)^3 + (f(2) + f(3) + f(4) + f(5))^3)/2 = 666$$

$$f(6)^2 + f(7)^2 + f(8)^2 - f(3)^3 = 666 \quad (\text{remarquons que } 6 + 7 + 8 - 3 = 6 + 6 + 6)$$

$$f(15) + f(11) - f(9) + f(1) = 666 \quad (\text{remarquons que } 15 + 11 - 9 + 1 = 6 + 6 + 6)$$

666 est la somme des carrés des 6 + 6/6 premiers nombres premiers :

$$2^2 + 3^2 + 5^2 + 7^2 + 11^2 + 13^2 + 17^2 = 666$$

L'année 1998 aurait dû être terriblement maléfique, car 1998 est fortement lié à 666. En effet :

$$1998 = 666 + 666 + 666$$

$$666^4 = 196\,741\,925\,136 \text{ et } 196 + 741 + 925 + 136 = 1998$$

$$666^6 = 87\,266\,061\,345\,623\,616 \text{ et } 87 + 266 + 61 + 345 + 623 + 616 = 1998$$

$$666^7 = 58\,119\,196\,856\,185\,328\,256$$

$$\text{et } 58 + 119 + 196 + 856 + 185 + 328 + 256 = 1998$$

2. ORIGINE ET RÉALITÉ DES COÏNCIDENCES NUMÉRIQUES

Certaines coïncidences numériques proviennent d'illusions.

Le classique exemple des anniversaires montre que notre intuition peut nous jouer de mauvais tours et nous faire accroire que certains événements normaux sont extraordinaires.

Sans faire de calcul, posez-vous la question : est-il fréquent que deux personnes dans une assemblée de 30 personnes aient le même jour anniversaire? Vous répondrez sans doute : non, c'est sans doute assez rare. Peut-être préciserez-vous, cela doit se produire dans moins d'un cas sur 10, puisqu'il y a 365 jours par an et que 30/365 est inférieur à 1/10.

Pourtant la probabilité d'un tel événement est de 70,63 pour cent.

En dessous de 23 personnes, la probabilité est inférieure à 50 pour cent, mais dès que 23 personnes sont réunies, la probabilité que deux d'entre elles aient le même jour anniversaire dépasse 50 pour cent.

Expliquons cela : le raisonnement consistant à évoquer que 30/365 est inférieur à 1/10 est faux. Le raisonnement exact est celui-ci (on néglige la complication créée par les années bissextiles).

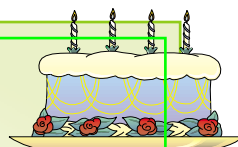
Calcul de la probabilité que deux personnes ou plus aient le même jour anniversaire dans une assemblée de n personnes.

- nombre de cas possibles : 365^n

- nombre de cas défavorables : $365 \times 364 \times \dots \times (365 - n + 1) = 365!/(365 - n)!$

- probabilité recherchée $p = 1 - \{365! / [(365 - n)! 365^n]\}$

Pour $n = 22$ $p = 0,4757...$ Pour $n = 23$, $p = 0,5073$. Dès que 23 personnes sont réunies, il est plus probable qu'il y ait un anniversaire commun que non.



gens dont le numéro personnel est 7 sont vaniteux). Les «vérités» numérologiques sont affirmées sans arguments ni vérifications, et elles se contredisent presque systématiquement d'un expert à l'autre!

Le plus triste est que la maladie numérologique semble accroître sa prévalence. Que des revues comme *Mystéria*, ou *Science et magie* s'adonnent à ces navrants laisser-aller n'est pas gênant, car celui qui les achète recherche cela. En revanche, que des magazines comme *Elle* ou *Femme pratique*, ou la télévision du service public se permettent d'offrir à leurs lecteurs ou spectateurs des pages numérologiques est affligeant.

BABYLONIENS, EGYPTIENS OU PYTHAGORICIENS?

Les ouvrages numérologiques évoquent une tradition ancienne et finalement, plutôt que de fonder leur savoir par un rigoureux travail d'enquête (seule démarche raisonnable, mais qui risquerait fort d'aboutir à la conclusion qu'aucun des systèmes numérologiques n'a la moindre valeur), ces ouvrages suggèrent que leur science remonte à la nuit de temps. Parfois des arguments d'autorités invo-

quent «le grand numérologue X» ou le «très réputé Docteur Y».

L'un de ces ouvrages, après s'être posé la grave question «Stonehenge fut-il le premier ordinateur de tous les temps?» (je n'invente rien) évoque l'idée que les Babyloniens et les Égyptiens ont peut-être pratiqué la numérologie, mais précise honnêtement que «rien ne le confirme». Il semble en effet qu'aucun mysticisme numérique ait jamais existé dans ces civilisations.

Le nom de Pythagore (-560, -480 avant notre ère) est généralement cité comme origine antique attestée de leur science... ce qui cette fois est justifié. La philosophie pythagoricienne autant qu'on la connaisse (la secte des Pythagoriciens imposait le secret à ses membres) est à l'origine du développement des mathématiques dans ce qu'elles ont de plus sérieux et aussi d'une étrange valeur symbolique et mystique attribuée aux nombres, voire plus généralement aux figures mathématiques.

On évoque parfois une scission entre les disciples de Pythagore à sa mort, qui aurait, d'un côté réuni ceux intéressés par les mathématiques elles-mêmes, et, de l'autre, ceux attachés au mysticisme numérique. Le mysticisme mathématique de

Pythagore est résumé dans l'affirmation que «Tout est nombre» (sous entendu «nombre entier»), mais sa forme précise n'est pas connue directement, car Pythagore n'a laissé aucun écrit ; tout ce que l'on en sait est donc indirect et souvent très postérieur à la mort du maître Pythagore, dont, par ailleurs, la vie est sujette à controverse au point que certains ont douté de son existence historique.

Deux choses sont certaines : Pythagore n'a pas écrit d'ouvrages qui nous soient parvenus, et la tradition mathématique s'est rapidement libérée du mysticisme numérique, qu'on ne retrouve pas, par exemple, chez Euclide.

Bien sûr, ni Pythagore ni ses disciples n'ont jamais proposé de compter A pour 1, B pour 2, etc., et d'attacher à chaque personne un nombre personnel tiré de la valeur numérique de son nom, ou de sa date de naissance. D'ailleurs notre alphabet ne possède 26 lettres que depuis peu et s'est passablement éloigné de l'alphabet grec. La cuisine étrange consistant à associer des nombres aux gens semble avoir été inventée par une Américaine L. Dow Balliet, au début du xx^e siècle. Depuis, une multitude de variantes ont fleuri, toutes arbitraires.

En revanche, l'idée plus générale d'associer des nombres aux mots (pas aux gens) est rattachée de manière certaine à la guématrie (on dit parfois gematria, guématrie ou même guématria), qui est une tradition d'interprétation des textes sacrés où, en calculant les valeurs numériques des mots, on établit des relations cachées permettant de repérer le sens secret de documents comme la Bible. Le codage est différent de ceux évoqués plus haut et utilisés aujourd'hui en numérologie moderne, et quoique, là encore, les variantes ne manquent pas (ce qui permet à chaque expert de faire ses propres découvertes), le codage le plus fréquemment utilisé consiste à attribuer aux 22 lettres de l'alphabet hébreu les valeurs respectives 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 200, 300, 400. Un codage analogue est fréquemment mentionné pour l'alphabet grec.

LA GUÉMATRIE DE PI

Passionné par la guématrie, Robert Gold, ancien homme d'affaires à la retraite, a appliqué cette science, ou plutôt sa variante personnelle, à l'étude des décimales du nombre π et en est arrivé à la conclusion formelle que «la Bible est dans π et π est dans la Bible». Lors d'un entretien téléphonique, Robert Gold m'a d'ailleurs confié que, pour lui : «les décimales de π sont le génome du monde», affirmation dont le charme

3. AMOUREUX DES NOMBRES, MAIS PAS FOUS

L'amour fou des chiffres conduit certains mathématiciens à des activités peu sérieuses, mais qui ne sont qu'un amusement sans prétention, contrairement aux activités des superstitieux du 666 ou des numérologues qui croient lire les secrets du monde dans les décimales de π .

La recherche des nombres premiers raccourcissables est un jeu numérique sans prétention. Même s'il semble improbable que de telles recherches conduisent à de véritables découvertes mathématiques, ces jeux numériques (et non pas numérologiques) ne font de mal à personne.

Un nombre premier raccourcissable à gauche est un nombre, comme par exemple 4643, qui est premier, ainsi que les nombres obtenus en les raccourcissant par la gauche : 643, 43 et 3 sont premiers. Les nombres premiers raccourcissables à gauche maximaux (NPRAGM) sont ceux qu'il est impossible de prolonger plus.

Récemment, à la suite d'une recherche exhaustive, Steven Kahan et Sol Wientraub de la City University de New York ont calculé tous les nombres premiers raccourcissables à gauche (*Journal of recreational mathematics*, 29-4-1998). Voici quelques-unes de leurs conclusions.

Le seul NPRAGM à trois chiffres est 773. Les seuls NPRAGM à quatre chiffres sont 3373 3947 4643 5113 6967 7937.

Il y a 21 NPRAGM à 5 chiffres, Il y a 61 NPRAGM à 6 chiffres.

Il y a 114 NPRAGM à 7 chiffres, Il y a 148 NPRAGM à 8 chiffres.

Il y a 184 NPRAGM à 9 chiffres, Il y a 189 NPRAGM à 10 chiffres.

Il y a 188 NPRAGM à 11 chiffres, Il y a 144 NPRAGM à 12 chiffres.

Il y a 117 NPRAGM à 13 chiffres, Il y a 116 NPRAGM à 14 chiffres.

Il y a 59 NPRAGM à 15 chiffres, Il y a 39 NPRAGM à 16 chiffres.

Il y a 22 NPRAGM à 17 chiffres, Il y a 15 NPRAGM à 18 chiffres.

Il y a 7 NPRAGM à 19 chiffres, Il y a 1 NPRAGM à 20 chiffres.

Il y a 3 NPRAGM à 21 chiffres, Il y a 1 NPRAGM à 22 chiffres.

Il y a 2 NPRAGM à 23 chiffres.

Il y a un seul NPRAGM à 24 chiffres, qui est : 357686312646216567629137.

Il n'y a pas d'autres NPRAGM.

Un seul NPRAGM est palindrome : 76367.

Il y a seulement neuf NPRAGM n'utilisant que des chiffres impairs. Le plus grand est : 933739397.

poétique et cosmique ne manquera pas de toucher les biologistes qui ont séquencé à grand mal le génome humain, il y a quelques mois. Robert Gold pense avoir prouvé que π et la Bible sont intimement liés en repérant de nombreuses coïncidences dont rend compte son livre *Dieu et le nombre π* (paru en 1997 aux Éditions Otniel Bène Kénane).

La base de son exposé est complexe et utilise un système qui associe principalement quatre nombres à chaque lettre de l'alphabet hébreu : (a) l'entier entre 1 et 22 indiquant la position de la lettre dans l'alphabet ; (b) la valeur traditionnellement attribuée par la guématrie, entre 1 et 400, appelée valeur simple ; (c) la valeur pleine que l'on obtient en écrivant chaque lettre phonétiquement ce qui donne plusieurs lettres dont on additionne les valeurs simples ; (d) la valeur finale obtenue en comptabilisant de manière particulière les dernières lettres des mots. D'autres associations complètent et enrichissent le système, mais l'en passe le détail.

Robert Gold calcule alors les valeurs des quelques mots importants de la Bible en se reportant à leur écriture en hébreu. Parmi les mots pris en considération, on trouve bien sûr «Bible», «Au commencement» (qui est le premier mot de la Bible), «terre» (dernier mot du premier verset de la Bible), Jérusalem, etc. Parmi les nombres qu'il retient ainsi (une vingtaine) se trouvent les valeurs simples et finales du nom de Jérusalem : 596 et 1 156 qui vont nous servir à donner des exemples des découvertes de Gold.

Le nombre $31^2 + 14^2$ (somme des carrés des paires de chiffres qu'on trouve dans 314, les trois premiers chiffres de π) vaut 1157 qui est l'un des deux nombres... à une unité près.

Le calcul de 3^{14} (très naturel à partir des trois premiers chiffres de π) donne 4 782 969. Or ce nombre, si on lui enlève 597 (notre premier nombre à une unité près 1) conduit à 4 782 372 qui est égal à 4 137 fois 1 156, notre second nombre.

L'élévation au carré de 3 141 (les quatre premiers chiffres de π) donne 9 865 881, or la somme de 588 et de 568 obtenue à partir du 5 central est à nouveau 1156.

1413^2 (le carré des quatre premières décimales de π lues à l'envers) vaut 1 996 569, ce qui suggère en s'appuyant encore sur le «5», de calculer $569 + 569 + 19 = 1157$, à nouveau 1 156 à une unité près.

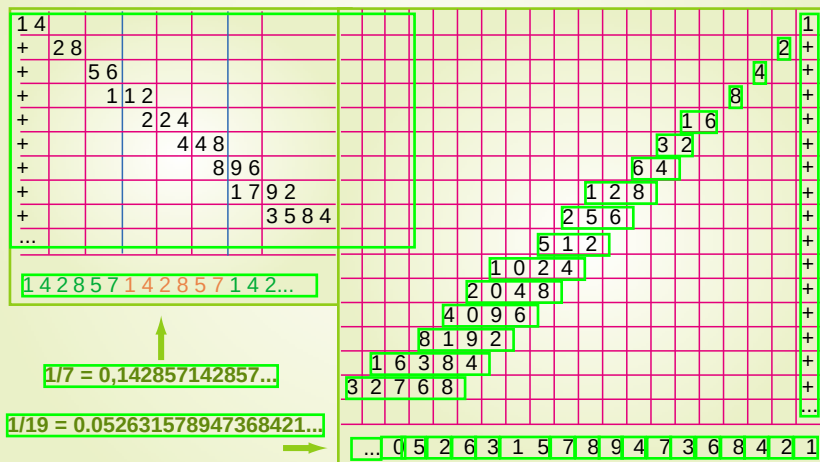
On part des huit premières décimales de π , 31 415 926, que l'on sépare en trois groupes 31, 415 et 926 dont on inverse l'ordre ; on obtient ainsi $13 + 514 + 629 = 1 156$.

4. DEUX CURIOSITÉS NUMÉRIQUES À EXPLIQUER

Voici deux curiosités arithmétiques (proposées par M. Lines, *A Number for your Thoughts*, Institute of Physics Publishing, Bristols, 1993). Ces curiosités ne sont pas numérologiques car il s'agit de propriétés intramathématiques dont l'exactitude ne fait pas de doute. J'ignore comment on montre ces propriétés et je remercie par avance les lecteurs qui me feront parvenir les démonstrations de ces belles bizarreries numériques.

Partant de 14 et doublant à chaque fois le résultat précédent qu'on dispose en une grande addition avec un décalage de deux chiffres d'une ligne à la suivante on obtient 142857142857142857... répété indéfiniment.

Or cette suite de chiffres est exactement celle qu'on obtient quand on effectue la division de 1 par 7 : $1/7 = 0,142857142857...$



Pour le second exemple, on dispose une grande addition des puissances de 2 en décalant d'un chiffre à chaque fois. La suite de chiffres obtenus se répète périodiquement ensuite. Il s'agit cette fois des décimales de $1/19$.

$1/19 = 0,052631578947368421...$

Dernier exemple, où l'on considère cette fois les 22 premières décimales de π : 3141592653589793238462. On les regroupe par deux (sauf 31), soit : $41+59+26+53+58+97+93+23+84+62=596$.

Certaines autres remarques portant uniquement sur la cohérence interne de π ne font pas intervenir la Bible, mais, d'après Gold, attestent à l'évidence que π comporte un message.

En considérant 31415926, les huit premiers chiffres de π , Robert Gold remarque (je cite) : «314 est une valeur approximative de π puisque sa valeur exacte nécessite la totalité des décimales.» Jusque-là tout va bien, nous sommes dans l'orthodoxie archimédienne. Il note alors que 159 est une valeur approximative de la moitié de π et que 926 lu de gauche à droite donne 629, qui est proche de 2π . Plus remarquable encore pour lui $31+41+59+26=157$, la moitié exacte de 314, à quoi s'ajoute que $59+26$ en inversant les chiffres donne $62+95=157$ à nouveau. Nombre d'autres remarques de cette nature achèvent de convaincre notre numérologue de la thèse d'une intime et profonde connexion entre π , la Bible et Dieu, qui justifie finalement son affirmation que les décimales 314159... sont à l'univers, ce que les 3 milliards de bases de notre génome sont à l'humanité.

LONGUE PÊCHE ET PETITS POISSONS

Reconnaissons que nous serions plus impressionnés si les trois mille premières décimales de π regroupées par paquets de 3 avaient donné les valeurs numériques des mille premiers mots dans l'ordre du texte de la Bible, ou si le carré du nombre composé des 100 premières décimales de π avait donné les 200 suivantes. Malheureusement, ce n'est pas le cas, et tout dans les découvertes de Robert Gold est beaucoup plus subtil et... évanescent. En fait de preuve, le sceptique risque de considérer qu'il n'y a rien à expliquer, tant les calculs de Gold sont contournés et ses résultats peu spectaculaires.

Examinons e par exemple : le test qui consiste à prendre la constante $e = 2,71828182845904523...$ et à s'interroger sur la possibilité de trouver de semblables coïncidences conduit immédiatement à noter que la répétition 1828-1828 et l'étrange 45-90-45 sont déjà plus extraordinaires que toutes les découvertes de Gold, qui peut-être se serait trompé de constante mathématique et aurait dû se consacrer à un livre plus convaincant intitulé *Dieu et le nombre e*. En recherchant au hasard quelques minutes, j'ai

5. COINCIDENCE EXTRAORDINAIRE

$$\begin{aligned}
 1/1 &= 1,000 \\
 1/2 &= 0,500 \\
 1/3 &= 0,333 \\
 1/4 &= 0,250 \\
 1/5 &= 0,200 \\
 1/6 &= 0,167 \\
 1/7 &= 0,143 \\
 1/8 &= 0,125 \\
 e &= 2,718
 \end{aligned}$$

La somme de ces fractions, les termes de la série harmonique, est-elle égale à e ?

aussi noté que $2\,718 \times 1\,156$ est égal à $3\,142\,008$, ce qui établit un lien entre π , e et le nombre $1\,156$, confirmant la piste du nombre e . De plus on peut s'étonner que la somme des inverses des premiers huit nombres entiers donne... e .

Finalement rien n'a sans doute été caché dans les décimales de π (ou de e) par le Créateur, et c'est seulement l'essai d'un grand nombre de combinaisons et l'utilisation d'un système très ouvert (rappelons qu'à chaque mot Gold associe quatre nombres et parfois plus) qui a permis à Gold de pêcher quelques coïncidences... qu'il aurait été étonnant finalement qu'il ne trouve pas.

Remarquons aussi qu'il n'est pas évident pour un croyant que Dieu possède le pouvoir de décider quoi que ce soit concernant les décimales de π : les propriétés mathématiques ne se décident pas. Pas plus qu'une loi ne peut fixer π (comme cela a été tenté en 1897 dans l'État de l'Indiana, aux États-Unis, où un texte législatif prévoyait d'imposer $\pi = 3,2$), Dieu ne peut décider que 87 est un nombre premier, ou forcer ne serait-ce qu'une seule décimale de π .

LES COÏNCIDENCES :
PAS TOUTES ABSURDES!

Même si on reste incrédule concernant la numérologie lorsqu'elle prétend déterminer votre personnalité et votre avenir à partir de votre nombre personnel (calculé par l'une des vingt ou cinquante méthodes concurrentes proposées par les systèmes incompatibles des numérologues), et même si on est sceptique à propos des prétendues découvertes faites dans les décimales de π (Robert Gold n'est pas le seul, et d'autres calculateurs acharnés ont su y voir d'autres choses : l'un d'eux a prétendu y voir partout codé la nom de la Vierge Marie), il n'en reste pas moins que la recherche de coïncidences numériques peut être une véritable méthode d'exploration mathématique et scientifique.

Léonard Euler repéra la relation remarquable $1+1/4+1/9+1/16+1/25+\dots=\pi^2/6$ en découvrant par le calcul une coïncidence numérique. Récemment la formule

de Simon Plouffe qui a permis de créer des algorithmes de calcul des chiffres binaires de π qui déterminent un chiffre sans avoir à s'occuper des précédents (voir *Le fascinant nombre pi*, Belin/Pour la Science, 1997) a été découverte par une méthode de recherche de coïncidences, programmée et menée systématiquement à l'aide de programmes informatiques subtils. D'autres formules mathématiques ont aussi été repérées par l'observation de coïncidences, et certains mathématiciens étudient comment perfectionner ces méthodes pour les rendre plus efficaces.

Toutefois la différence entre cet usage moderne de la recherche de coïncidences numériques et l'usage numérologique réside dans les faits suivants :

- on ne recherche que des relations de nature mathématique et non pas un message religieux, concernant le futur ou la personnalité d'un individu ;

- une fois la coïncidence déterminée, elle se confirme en poussant le calcul plus loin : la formule de Simon Plouffe, par exemple, ne donne pas une coïncidence d'une longueur de 10 décimales, mais de 100 décimales et si on la pousse plus loin de mille décimales ou plus encore.

- si l'on évalue la probabilité que les coïncidences soient fortuites, en mathématiques on tombe sur des probabilités extraordinairement faibles, alors qu'en numérologie les coïncidences notées quand on les rapporte aux nombres de formules essayées (dont la grande majorité ne marchent pas) conduisent à la conclusion que ne rien trouver était improbable.

- finalement, et c'est sans doute le plus important, les coïncidences repérées en mathématiques sont ensuite démontrées rigoureusement par le raisonnement logique : c'est ce que fit Euler pour sa formule concernant $\pi^2/6$, et c'est aussi ce que fit Simon Plouffe pour sa formule nouvelle de calcul des chiffres binaires de π .

ILLUMINÉS
OU MALHONNÊTES?

Se moquer de la numérologie est sans doute trop facile tant le domaine est intellectuellement inconsistant, cependant, il semble qu'un penchant irréprouvable pour les chiffres et leur manipulation élémentaire pousse un public curieux et qu'on ne prend jamais la peine de mettre en garde à écouter les numérologues... et parfois à les croire. On a souvent le sentiment que les auteurs peu scrupuleux des ouvrages de numérologie n'y croient pas vraiment eux-mêmes et qu'ils offrent simplement aux esprits avides de mystères et de superstitions les révélations auxquelles ils aspirent.

Toutefois, même si le type de règles que recherchent les numérologues n'existent pas, c'est quand même bien des régularités mathématiques qui ordonnent le monde réel et que la science recherche avidement. Pythagore avait raison en professant que le monde est mathématique ; le développement de la science le confirme chaque jour.

Ce qui échappe aux numérologues, c'est la richesse et la variété du monde mathématique, qui s'accroît et se consolide en permanence. On n'est jamais certain de disposer du bon type de mathématiques, et les additions idiotes des numérologues ne représentent qu'une infime part de la richesse du l'univers abstrait des mathématiques. Ensuite, seul un rigoureux dialogue avec les faits permet de sélectionner les mathématiques cachées dans le monde réel. Ce travail d'exploration et de confrontation aux faits, les numérologues, contrairement aux scientifiques, ne le pratiquent pas. La capacité d'autopersuasion, le manque d'esprit critique, associé sans doute aussi à la paresse intellectuelle (apprendre des mathématiques demande plus d'efforts que de faire obsessionnellement des manipulations élémentaires de chiffres), et parfois à l'appât du gain sont les explications de cette maladie mentale qu'est la numérologie moderne.

La numérologie prend sa source dans la secte du maître Pythagore comme notre science actuelle. Mais, à l'inverse de la science, la numérologie n'a rien gardé de l'inventivité et du génie des pythagoriciens, qui rapidement conduisirent à Euclide. Chez les numérologues, il ne reste qu'un délire pathétique.

A. CUGNOT, *Incroyable, mais faux*, Éditions L'horizon chimérique, Bordeaux, 1989.

J. DUDLEY, *Numerology or What Pythagoras Wrought*, Mathematical Association of America, 1977.

R. GOLD, *Dieu et le nombre π* , Éditions Otniel Bène Kénane, Jérusalem, 1997.

A. LESK, *The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in Molecular Biology*, in *The Mathematical Intelligencer*, pp. 28-37, 22 février 2000.

S. PARKER et S. CAMPILIAN, *Numérologie. Avec les chiffres vous connaîtrez votre destin*, France Sud Publication, Paris. Sans date de publication.

E. WIGNER, *The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in the Natural Sciences*, in *Communications in Pure and Applied Mathematics*, n° 13, pp. 1-14, 1960.

Sciences et pseudo-sciences, revue publiée par l'AFIS (Association française pour l'information scientifique, 14, rue de l'École polytechnique, 75005, Paris).



La topologie marine

IAN STEWART

Des bouts de ficelle révèlent les principes de la symétrie.

Au siècle dernier, l'étude des nœuds est devenue une discipline mathématique importante. Avec les nœuds apparaît une des grandes questions de la topologie : quelles sont les différentes manières de placer une forme géométrique dans une autre ? Dans le cas des nœuds, les deux formes prises en compte sont un cercle (que l'on peut représenter par une boucle de ficelle) et l'espace à trois dimensions pris dans son ensemble : un nœud est un cercle qui a été plongé dans l'espace de façon qu'il ne puisse pas être défilé par une déformation continue de l'espace.

Cette définition semble bien éloignée de l'idée intuitive de nœud : dans notre monde, les ficelles ont des extrémités, et l'on défile les nœuds en déformant la ficelle, pas l'espace. Bien que la définition topologique décrive bien le « nouement » des nœuds, d'autres aspects des nœuds ne se réduisent pas à cette formulation topologique. Par exemple, comment nouer deux morceaux de ficelle pour

en faire un seul morceau plus long ? La seule contrainte est que le nœud ne se défasse pas quand on tire sur l'une des extrémités d'une des deux ficelles. Dans un tel problème, les frottements entre les deux ficelles jouent un rôle important, que la topologie ne considère pas.

Les mathématiciens ont donc examiné de tels problèmes et jeté les bases d'une théorie de tels nœuds. Roger Miles, de l'Université de Canberra, est un de ceux qui ont le plus contribué à cette nouvelle branche des mathématiques. Il considère des « nœuds d'ajut symétriques », reprenant le terme de marine pour décrire le problème. R. Miles a cherché à classer systématiquement les géométries de ces nœuds, afin d'en découvrir d'autres, qui glisseraient moins par exemple.

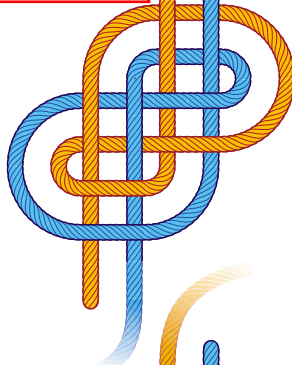
Le nœud d'ajut le plus simple et le plus connu est le nœud plat : sur la figure 2, un brin est coloré en bleu et l'autre en orange. Chaque brin a une extrémité qui dépasse du nœud : c'est le courant ; son autre extrémité, le dormant, se poursuit

par le reste du brin et n'est représenté qu'en partie (estompé). Le diagramme du nœud plat comporte deux types de croisements : bleu sur orange, orange sur bleu. Dans les nœuds d'ajut plus compliqués, il existe aussi des croisements bleu sur bleu ou orange sur orange.

Souvent les néophytes – les marins les nomment des éléphants – confondent le nœud plat avec le nœud de vache, qui tient moins bien. Les deux types se transforment en nœuds classiques de topologie quand on relie le courant et le dormant de chaque brin. Cependant, les nœuds plat et de vache, pour la topologie classique, forment une famille isolée, alors que les nœuds d'ajut correspondants ont des cousins proches, qui ne diffèrent que par le type d'extrémité libre ; ce sont le nœud de voleur et le nœud de passeresse.

Ces quatre nœuds d'ajut sont ceux dont les diagrammes sont les plus simples, ceux qui ont le moins de croisements de brins. Les frottements qui empêchent

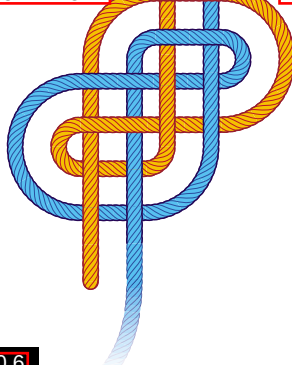
NŒUD FLAMAND



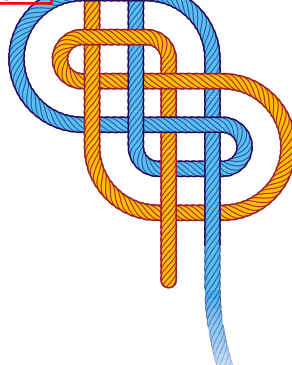
RETOURNE



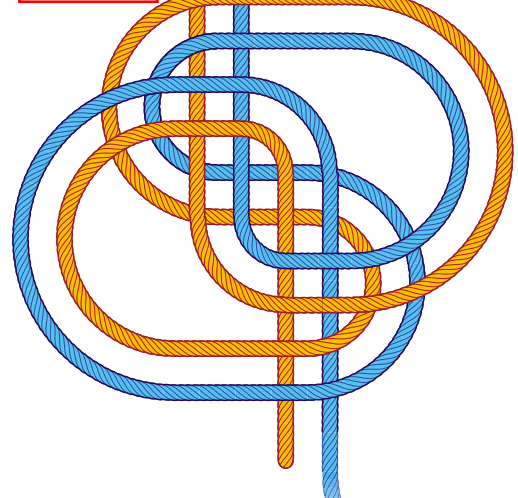
IMAGE DANS UN MIROIR



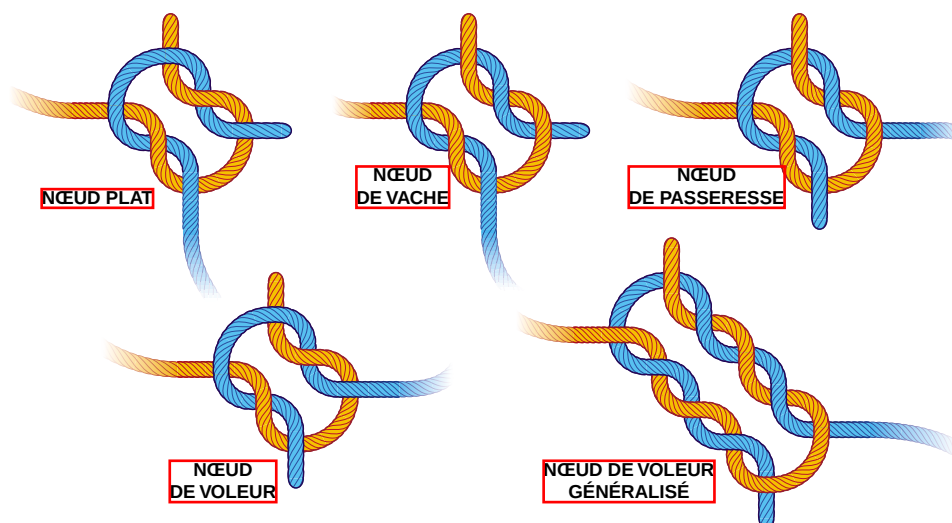
RETOURNEMENT DE L'IMAGE



NŒUD DE CAMÉLÉON



1. Le nœud d'ajut flamand a trois variantes : le nœud obtenu par retournement, le nœud obtenu par réflexion dans un miroir et l'image dans un miroir retournée (à gauche). Les nœuds retournés ont été tournés de 180 degrés autour de l'axe perpendiculaire à leur plan. Les quatre nœuds sont centrosymétriques. Un cinquième nœud, le nœud de caméléon (ci-dessus), est topologiquement équivalent aux quatre précédents, et il est symétrique par rotation de 180 degrés autour d'un axe perpendiculaire à son plan.



2. Les quatre nœuds d'ajut élémentaires (rangée supérieure) ont peu de croisements de brins : ils tiennent mal. Le nœud de voleur généralisé (ci-dessus) tient mieux.

Les nœuds de glisser ont généralement lieu à ces croisements, de sorte que l'on pourrait supposer que des nœuds avec plus de croisements tiendraient mieux. Cette règle n'est pas absolue. La tenue des nœuds dépend aussi de la façon dont la série des croisements de brins se répartit dans l'espace. Les quatre nœuds d'ajut élémentaires tiennent assez mal ; ils se défont quand les brins sont déplacés, par exemple. La façon dont ils se défont est instructive : l'un des brins se redresse (pas toujours complètement), puis glisse à travers les boucles de l'autre brin.

Les nœuds d'ajut élémentaires ont également de passionnantes propriétés de symétrie. Quand on tourne le diagramme du nœud plat de 180 degrés, autour de la diagonale qui joint le coin inférieur gauche et le coin supérieur droit, on retrouve le même diagramme, mais les couleurs des brins sont inversées. Le nœud de vache a la même propriété. En revanche, le nœud de passeresse a une symétrie de rotation : on le retrouve identique à lui-même, à l'exception de l'échange des couleurs, quand on le fait tourner de 180 degrés dans son plan (autour d'un axe perpendiculaire à son plan, donc). Le nœud de voleur, lui, est à symétrie centrale : une symétrie par rapport à son centre qui transforme chaque point de coordonnées (x, y, z) en un point de coordonnées $(-x, -y, -z)$, laisse le nœud inchangé, à la couleur près. Je vous conseille de vérifier ces propriétés en réalisant les nœuds à l'aide de ficelle.

En utilisant les trois symétries considérées, R. Miles a mis au point un formalisme qui décrit les nœuds d'ajut symétriques et qui conduit à de nouveaux nœuds. Par exemple, en généralisant le nœud de voleur, on obtient une famille infinie. Toutefois les symétries précédentes ne sont pas les seules que l'on

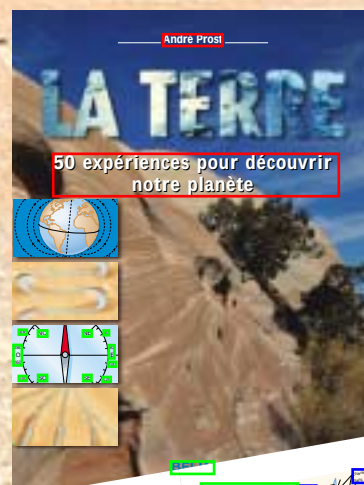
connaisse. On peut aussi utiliser les réflexions par rapport à un plan : dans les diagrammes à deux dimensions, cette opération inverse les croisements à chaque intersection. Puis on peut se limiter à inverser les couleurs. Enfin le «retournement» consiste à changer le dormant et le courant de chaque brin.

Le premier spécimen de nœud d'ajut symétrique est la double figure en huit, encore nommée nœud flamand. Les quatre premières illustrations de la figure 1 montrent ce nœud, son image dans un miroir, le nœud obtenu par retournement et le retournement de l'image dans un miroir. Tous les quatre sont à symétrie centrale. La cinquième représentation est celle d'un nœud de symétrie différente : il a une symétrie de rotation. Tous les cinq sont topologiquement équivalents : à partir de n'importe lequel d'entre eux, des manipulations continues conduisent à n'importe quel autre. Je vous invite, par exemple, à manipuler le cinquième, que R. Miles nomme le nœud de caméléon, pour obtenir les autres. Je vous laisse découvrir les transformations nécessaires.

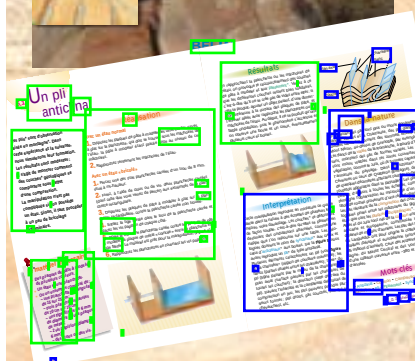
Le livre de R. Miles, *Symmetric Bends* (Éditions Word Scientific), contient un catalogue de 60 nœuds d'ajut symétriques. Existe-t-il un nœud d'ajut optimal ? R. Miles indique que non, car la résistance au glissement n'est pas le seul critère de bon nœud ; on doit le faire et le défaire facilement, régler simplement la taille du courant, obtenir un beau motif... À la fin de son livre, R. Miles invite les lecteurs à l'informer de leurs découvertes, afin qu'il les présente dans une prochaine édition de son livre (son adresse est : RMB 345, Queanbeyan, NSW 2620, Australie). Il ajoute une promesse : «L'inventeur d'un nouveau nœud a le privilège de le nommer, comme le découvreur de comètes ou de novae.»

LA TERRE

50 expériences pour découvrir notre planète



50 expériences pour découvrir notre planète



Comment naissent les dunes ?
Comment une rivière creuse-t-elle une vallée ?
Comment se forment les grottes ?
Pourquoi les pierres éclatent-elles sous le froid ?
Ce livre propose une série d'expériences pour comprendre comment le vent, la pluie, la glace, les cours d'eau modelent le visage de la Terre.

ANDRÉ PROST est géologue, ancien enseignant à l'université d'Orléans et à Paris VI, et ingénieur au Bureau des Recherches Géologiques et Minières à Orléans.

Code 2401-100 F-128 pages

Voir bon de commande page 98

BELIN • POUR LA SCIENCE



L'air chaud qui descend de la montagne

ROLAND LEHOUCQ • JEAN-MICHEL COURTY

Des phénomènes météorologiques simples et parfois surprenants résultent de l'action combinée du relief et du vent.

Pour nos lecteurs suisses, le mot «foehn» désigne un sèche-cheveux. C'est aussi le nom d'un vent chaud et sec qui descend de la montagne pour balayer les vallées des Alpes du Sud, Munich et Milan. Il est encore connu sous le nom d'autan dans les Pyrénées et de chinook aux États-Unis. Étrangement, lorsque ce vent descend de la montagne, le vent qui monte de l'autre côté de la montagne est froid et humide et la pluie ou la neige s'abat sur les cimes. Comment expliquer ce réchauffement ?

La compréhension de la plupart des phénomènes météorologiques nécessite la prise en compte de nombreux bilans d'échanges d'énergie. Pourtant, certaines manifestations, comme le foehn, ne sont dues qu'au seul déplacement des masses d'air. Pour le comprendre, intéressons-nous au déplacement d'un air sec puis d'un air humide.

DU VENT ET DES MONTAGNES

Les montagnes forment un obstacle au passage du vent. Si le vent ne peut les contourner par le côté, l'air passera par dessus et s'élèvera en longeant le relief. Durant cette ascension, la pression de la masse d'air diminue avec la pression atmosphérique qui décroît avec l'altitude. La diminution relative de pression est d'environ dix pour cent par kilomètre d'altitude. Comme la montée d'une masse d'air est adiabatique, sans échange de chaleur avec le

milieu extérieur, lorsque la pression de la masse d'air diminue, le volume augmente et, ce qui nous intéresse particulièrement ici, la température diminue (tout randonneur sait que le vent d'altitude est glacial). Ainsi, un vent doux à 20 °C qui souffle au fond d'une vallée située à 1 500 mètres d'altitude se refroidira à 5 °C à 3 000 mètres. En redescendant sur l'autre flanc de la montagne, la pression et la température augmentent jusqu'à leur valeur initiale.

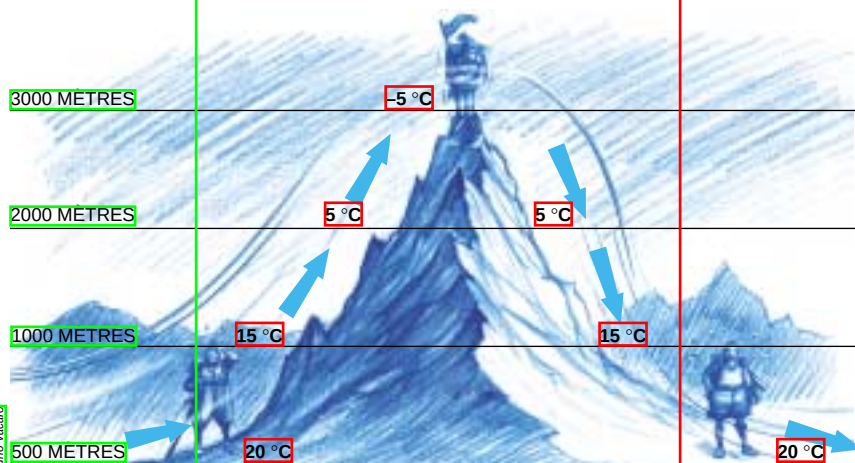
ET UN ZESTE D'EAU

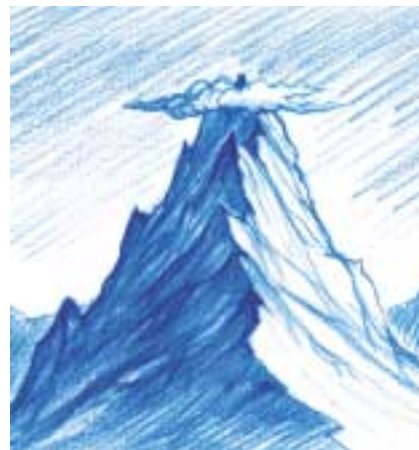
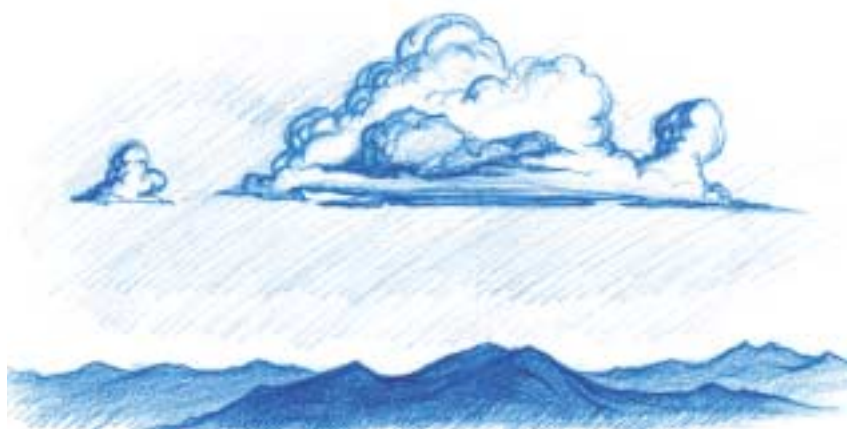
Pour faire naître des nuages, humidifions l'air. Sous forme de vapeur, l'eau est un gaz incolore et inodore. La quantité de vapeur d'eau présente dans l'atmosphère est caractérisée par la «densité d'eau», la masse d'eau contenue dans un mètre cube d'air. À température fixée, cette densité ne peut excéder une quantité nommée densité de vapeur saturante quand l'air humide est en équilibre avec de l'eau liquide. L'air est ainsi saturé juste au-dessus d'un lac ou dans une bouteille d'eau minérale fermée que l'on a laissé repo-

ser quelque temps. Lorsque la densité d'eau de l'atmosphère est inférieure à la densité de vapeur saturante, l'eau liquide s'évapore.

La densité de vapeur saturante dépend fortement de la température de l'air : entre - 20 °C et 40 °C, la densité de vapeur saturante double tous les 10 degrés. À 10 °C un mètre cube d'air peut contenir jusqu'à 9 grammes de vapeur d'eau, et à 20 °C, cette valeur passe à plus de 17 grammes par mètre cube (la masse d'un mètre cube d'air est égale à un kilogramme environ). Le contenu en vapeur d'eau de l'atmosphère est souvent rapporté à la densité de vapeur saturante et le quotient de ces deux quantités est l'humidité relative. Une humidité relative de zéro pour cent correspond à de l'air parfaitement sec, alors que 100 pour cent d'humidité relative correspond à un air saturé.

La densité de vapeur saturante diminue avec la température et, à quantité d'eau égale, l'humidité relative double lorsque la température diminue de dix degrés. Le refroidissement de l'air augmente son humidité relative, sans toutefois pouvoir dépasser la valeur de 100 pour cent qui correspond à de l'air saturé en vapeur d'eau. Cette valeur atteinte, la vapeur d'eau excédentaire se condense en fines gouttelettes d'eau liquide : des nuages ou du brouillard se forment. La rosée qui apparaît durant la nuit résulte aussi de la condensation de l'humidité de l'air et est favorisée par une diminution importante de la température nocturne.





NUAGES À L'HORIZON

Cette condensation se manifeste aussi lors de ces belles journées de printemps où l'on voit des nuages dont la base parfaitement horizontale est située à une altitude précise. Dans cette situation, l'air monte en raison de la convection thermique due à la chaleur du sol. À une certaine altitude, c'est-à-dire à une certaine température, la saturation est atteinte et une élévation supplémentaire provoque la condensation (c'est la buée qui s'échappe de l'haleine lorsque la température est inférieure à 15 °C). Le plafond nuageux se place donc à l'altitude où l'humidité de l'air atteint 100 pour cent. Plus bas il n'y a pas de condensation, plus haut se forment les nuages.

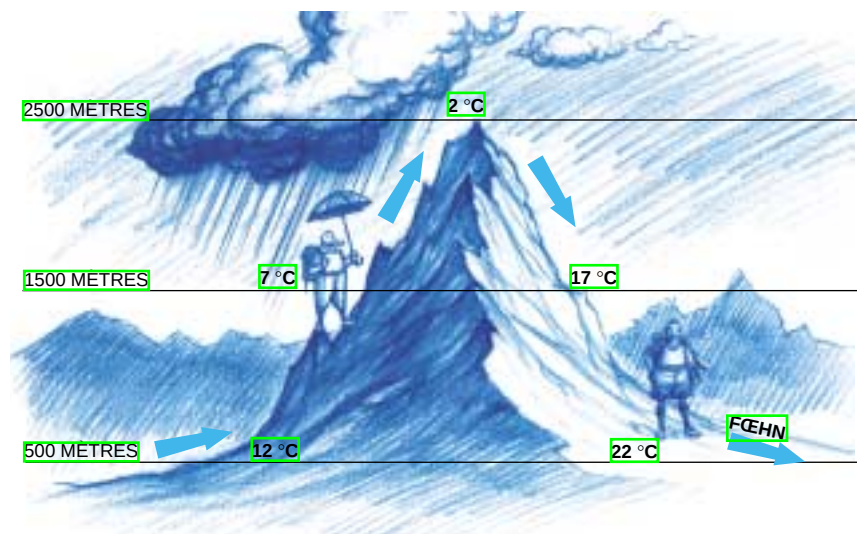
L'air qui grimpe sur la montagne se refroidit lui aussi et devient saturé en vapeur d'eau à une altitude donnée. Toute élévation supplémentaire engendre la condensation, mais, lors de la descente, l'humidité relative revient à sa valeur initiale et le brouillard dis-

paraît. C'est ce mécanisme qui forme les nuages accrochés aux montagnes, particulièrement visibles sur des sommets isolés comme le Fuji-Yama ou le Kilimandjaro. On observe alors un nuage au flanc de la montagne ou encore un chapeau nuageux fixe couronnant le sommet que le vent semble impuissant à dissiper. En réalité, ce nuage est en perpétuel renouvellement, car il est le siège de la condensation de l'humidité consécutive à l'élévation de l'air humide amené en permanence.

TIENS VOILÀ LA PLUIE!

À l'inverse de l'évaporation qui nécessite de la chaleur, la condensation cède de la chaleur au milieu environnant. La condensation d'un gramme d'eau élève de deux degrés la température d'un mètre cube d'air. Ainsi, l'air en ascension dans un nuage se refroidira moins vite qu'en l'absence d'eau liquide, environ 5 °C par kilomètre de dénivelé. Si la condensation est suffisante, le

brouillard se transforme en pluie ou en neige ce qui diminue le contenu de l'air en eau liquide. Lors de la descente, l'air est comprimé et se réchauffe plus fortement qu'il ne s'est refroidi pendant la montée, car il n'y a plus d'eau liquide à évaporer. Ainsi, sa température au pied opposé de la montagne est supérieure à la température en bas de la montée. Par exemple un vent à 12 °C quasiment saturé d'humidité à 500 mètres d'altitude aura une température de 2 °C en arrivant au sommet à 2 500 mètres. Le déclenchement d'une pluie à cette altitude réduit de moitié la quantité d'eau présente et la température de l'air augmente alors de 20 °C au cours de la descente. L'air qui descend dans la vallée est donc chaud, sa température est égale à 22 °C, et très sec avec une humidité relative inférieure à 25 pour cent. C'est le *föhn*. Des phénomènes hydrodynamiques dus à la forme de la montagne augmentent parfois la force du vent et amplifient la variation de température. Il suffit qu'il pleuve de l'autre côté de la montagne pour que la température augmente d'une dizaine de degrés en moins d'une demi-heure. Ajoutée à la température, la faible humidité relative de l'air peut faire fondre très rapidement la neige éventuellement présente. Toutes ces caractéristiques font un vent lourd et désagréable dont les dictons populaires disent qu'il rend fou.



Roland LEHOUCQ est astrophysicien au Service d'astrophysique du CEA. Jean-Michel COURTAY est chargé de recherche au CNRS et travaille au laboratoire Kastler-Brossel (CNRS, ENS, UPMC).

Judith CURRY et Peter WEBSTER, *Thermodynamics of atmospheres and oceans*, in *International Geophysics Series*, vol. 65, 1998.

Le lecteur intéressé trouvera de nombreux liens sur notre site web : www.pourlascience.com

Éthologie

Les animaux pensent-ils ?

Avec la collaboration de Gérard Lenclud. Éditions du Patrimoine, Terrain 34, 2000 (174 pages, 90 francs).

Avec cette phrase : « Il faut être un homme pour se poser des problèmes auxquels on ne trouve pas de solution ou dont la solution est toujours discutable », Gérard Lenclud lance un débat qui ressemble à un défi : les animaux pensent-ils ?

Les philosophes grecs en discutaient déjà. Pour Aristote, seul l'homme possède le *logos* (la raison humaine incarnée par le langage), mais l'animal fait preuve de différentes formes d'intelligence dans sa vie et dans ses relations sociales (accès à la nourriture, reproduction, soins aux jeunes). D'autres philosophes se placent sur le terrain de la morale : si les dieux ont accordé la raison aux animaux, alors le sage ne doit pas les manger. Pour les ethnologues, la représentation de l'animal varie selon des croyances locales. Chez les Vezos (un groupe de la côte Ouest de Madagascar), la différence porte sur les tabous : les hommes ne doivent pas les transgresser, sous peine de maladie, de malchance et, même, de mort, tandis que les animaux les ignorent. Les Cris (des Indiens du Nord du Québec) ne savent pas si les animaux pensent, mais leurs coutumes et leurs pratiques de la chasse leur donnent une connaissance intime des animaux ; ils respectent les âmes des « personnes autres qu'humaines », et leur hommage se traduit dans leur façon de transporter les dépouilles des animaux tués ou de suspendre leurs crânes dans les arbres.

Le préalable au débat n'est-il pas d'admettre vraiment (et non du bout des lèvres) une origine commune aux êtres vivants et, à partir de cet ancêtre commun, d'inclure les humains dans ce vaste arbre phylogénétique aux branches manifestement reliées ? Après tout, Darwin a imposé ce paradigme depuis 1859 en publiant *L'origine des espèces*. Ensuite, on se demandera si le cerveau des animaux abrite des phénomènes analogues à ceux qui ont lieu dans le nôtre. Enfin, s'il demeurerait en nous la moindre réticence, si nous nous sentions humain avant d'être animal, quelles pourraient être nos particularités ? La pensée et le langage ? La pensée est un état mental conscient, intentionnel, chargé de sens, et qui permet de distinguer l'objectif et le subjectif, le vrai et le faux, de repérer une erreur et de la cor-

riger ; toutefois, elle peut être également inconsciente lorsqu'elle mobilise des savoirs familiaux non appris. Une définition qui livre une vérité et son contraire est-elle applicable aux animaux ? Ensuite, on croit pouvoir affirmer que la pensée est véritable grâce au langage. Est-ce là une frontière avec l'animal ? Bien des bêtes communiquent avec une sorte de langage qui n'est pas parole, mais un ensemble de sons et de signes.

Les scientifiques qui se consacrent à l'étude des animaux devraient fournir des connaissances incontestables sur leurs capacités. Toutefois, selon leur discipline, leurs interprétations sont différentes, et une discussion contradictoire se poursuit sur la pensée. Ainsi les animaux reçoivent-ils de leur environnement des informations qui sont stockées dans leur mémoire, à l'aide desquelles ils font face à des situations imprévues et nouvelles. Est-ce la preuve d'une conceptualisation ? Les représentations mentales individuelles peuvent-elles agir sur les congénères ?

On peut envisager que les animaux sociaux aient une forme de pensée conceptuelle portant sur les relations de



A l'époque de la Première Guerre mondiale, Wolfgang Köhler a décrit pour la première fois la résolution de problèmes par des chimpanzés. Ici, l'empilement de boîtes pour atteindre des bananes.

dominance, de subordination, de recherche de nourriture ou du partenaire sexuel, d'évitement du prédateur, d'alliances... Cependant, certains considèrent que ces comportements relèvent d'une théorie sociale, et non d'une théorie de l'esprit. Ils font une distinction entre des indices comportementaux et des indices d'acquisition des connaissances.

Nous sommes là au cœur d'une polémique où se mêlent dans certains cas, hélas, dogmatisme et intolérance de ceux qui veulent opposer les éthologistes de terrain et les expérimentalistes : les premiers observent (sur la durée) les comportements individuels (leur apparition, leur fréquence) des animaux dans leur milieu naturel et ils supposent que les stratégies animalières sont intentionnelles ; les seconds jugent ces observations anecdotiques et affirment que les primates non humains ne se représentent pas l'état des connaissances de leurs semblables. Ainsi les macaques de l'île de Koshima lavent leurs patates douces pour les débarrasser de la terre ou du sable. Ce savoir-faire local est-il un simple comportement efficace dans une situation donnée ou un fait culturel qui se transmet dans une communauté ?

Les primatologues de terrain comme Jane Goodall (40 ans d'observations des chimpanzés) ou Biruté Galdikas (30 ans de surveillance attentive des orangs-outans) ont tranché : « leurs » grands singes pensent. Frans de Waal, primatologue de laboratoire dont la connaissance sur les bonobos fait autorité, opte pour une approche multidisciplinaire sans exclusive (terrain et captivité). C'est peut-être l'intervention d'une autre discipline, l'anthropologie sociale, qui permettra de trancher. Les singes, en particulier les chimpanzés, développent des compétences qualifiées d'habiletés pour « pêcher » des termites à l'aide de bâtons ou casser des noix grâce à une pierre creusée d'une cupule, ou percuteur. On peut parler d'outils aménagés et adaptés à la tâche à accomplir : la pêche ou le cassage. Une telle pratique suppose une représentation mentale et une conscience d'opérations complexes et intentionnelles, tout comme la transmission de leur savoir-faire spécialisé aux jeunes. N'est-ce pas la démonstration qui incite tous les spécialistes à se « débarrasser des prêts-à-penser », comme le souligne Frédéric Joulain ?

La thématique abordée par la revue *Terrain 34* est originale, les contributions sont variées, voire hétérogènes. Le lecteur a le choix entre lire séparément les articles ou bien tenter une synthèse assez difficile en raison de problématiques différentes. Des lectures préalables sont recommandées.

Michèle FEBVRE

Paléo-anthropologie

L'origine de l'homme. L'odyssée de l'espèce

Pascal Picq. Éditions Tallandier-Historia, 1999 (150 pages, 189 francs)

« D'où venons-nous ? Que sommes-nous ? Où allons-nous ? » Ces trois questions, merveilleusement illustrées par Paul Gaugin, traduisent bien le questionnement de l'homme sur ses origines. Les croyances anciennes confondaient l'origine de l'Univers, de la Terre et de l'homme. C'est seulement dans les dernières décennies que l'on a montré que ces événements sont en réalité dissociés, et séparés par des milliards d'années.

Aussi n'est-il pas surprenant que la notion d'homme fossile soit récente : elle date du milieu du XIX^e siècle, après la découverte de restes de Néanderthaliens en Allemagne (1856). Cependant l'idée que l'on se fait alors de cet ancêtre «présentable» (de préférence un Européen à grande capacité cérébrale) qui reste introuvable conduira très tôt (1912) à la «mise au jour» de l'homme de Pilt-down (dans le Sussex). On montrera en 1953 que la prétendue découverte était une supercherie : un crâne d'homme actuel avait été associé à une mandibule d'orang-outan...

Pourtant, dès 1924, en Afrique du Sud, dans la carrière de calcaire de Taung, le crâne d'un jeune «enfant» était mis au jour. Raymond Dart l'étudiera et le nommera *Australopithecus africanus*, en 1925. Dart devra mener un combat d'un quart de siècle – en fait, jusqu'à la mise en évidence de la supercherie de Pilt-down – pour faire admettre que l'enfant de Taung est bien un hominidé ancien qui a appartenu aux toutes premières phases de notre histoire.

Ensuite les découvertes se succèdent : d'abord en Afrique du Sud, puis, dès 1959, en Afrique de l'Est avec le *Paranthropus boisei* de Louis et Mary Leakey ; en 1973, la très célèbre Lucy est mise au jour par l'équipe franco-américaine codirigée par Yves Coppens, Donald Johanson et Maurice Taieb. La répartition géographique singulière de ces préhumains et le fait que les plus anciens soient connus en Afrique orientale ont conduit au paléoscénario nommé «East Side Story» par Y. Coppens (1983).

Ces dernières années, les découvertes se sont multipliées, de sorte que des cinq espèces attribuées au genre *Australopithecus*, trois ont été décrites depuis 1995. Notre histoire, souvent considérée comme rectilinéaire (avec une seule lignée), apparaît aujourd'hui très buissonnante, avec la coexistence dans le temps de plusieurs espèces d'Hominidés ; l'*Homo sapiens* n'est seul que depuis 30 000 ans.

De surcroît, la découverte que nous avons faite en 1996 au Tchad, c'est-à-dire à plus de 2 500 kilomètres à l'Ouest



Homo rudolfensis (en haut) avait un crâne et un cerveau plus gros que ceux d'*Homo habilis*, dont il est contemporain. **Homo neanderthalensis (au milieu)** a coexisté en Europe et au Proche-Orient avec les hominidés anatomiquement modernes. **Homo erectus (en bas)** a peut-être aussi coexisté avec les hominidés anatomiquement modernes. Il vivait à Java.

de la vallée du Rift, d'un *Australopithecus bahrelghazali* montre que, très tôt, et au moins dès quatre millions d'années, l'histoire humaine est pan-africaine. Tout cela augure de découvertes futures qui modifieront la vérité d'aujourd'hui.

Dans son ouvrage sur *L'odyssée de l'espèce* (titre déjà utilisé par Thierry Gaudin dans un ouvrage paru aux éditions Payot en 1993), Pascal Picq offre à tous la possibilité de suivre le cheminement de la pensée scientifique à propos de notre origine, d'Aristote à nos jours. En les replaçant dans le contexte socioculturel, l'auteur met en exergue à la fois les difficultés liées au conservatisme et les remarquables progrès des sciences et des techniques.

A condition que les recherches sur le terrain s'intensifient et se multiplient, de nouveaux fossiles seront mis au jour ; leur analyse ne manquera pas de faire progresser nos connaissances. Ainsi la découverte, la description et l'interprétation du «dernier ancêtre commun» partagé avec les grands singes africains (notamment les chimpanzés) ne sauraient se faire attendre très longtemps.

Pour une iconographie de qualité, abondante et judicieusement choisie, l'auteur et son éditeur méritent des félicitations. L'ouvrage de P. Picq invite le lecteur à suivre l'hominisation : acquisition de la bipédie, accroissement du volume cérébral, fabrication d'outils, acquisition d'un langage articulé, apparition de l'art...

Ce livre se destine à un public jeune ou peu averti. On se plaît à imaginer que son agréable facture donnera l'envie à ses lecteurs d'approfondir leur quête sur notre origine.

Michel BRUNET

Botanique

Flore vasculaire de Basse-Normandie

Michel Provost. Éditions des Presses universitaires de Caen, 1998 (deux volumes).

D e puis plus de 30 ans, Michel Provost se consacre, avec rigueur scientifique et passion, à l'étude et à la préservation de la flore de Basse-Normandie. À son remarquable *Atlas de répartition des plantes vasculaires de Basse-Normandie* (1993), présenté dans cette rubrique en son temps, succède aujourd'hui la synthèse de

Marcel Bournérias



***Centaurea scilloides* est une plante exceptionnelle en France : on ne la rencontre que dans la pointe Nord-Ouest du Cotentin.**

ses recherches floristiques et écologiques. Ce travail magistral rassemble, sous une présentation de grande qualité, une quantité considérable d'informations. Malgré le titre de l'ouvrage, l'ajout des 75 taxons végétaux normands (espèces et sous-espèces) absents de Basse-Normandie en fait une «somme», qui succède dignement, en les actualisant, aux célèbres flores normandes du XIX^e siècle : celles de A. Brébisson (1879) et de L. Corbière (1893).

Cette richesse d'informations provoque une tendance à «l'embonpoint» que l'auteur a tenté de résoudre par la division de son ouvrage en deux tomes. Le tome 1, seul indispensable sur le terrain (ce qui justifie son autonomie), est une flore au sens strict, aux clés dichotomiques originales, utilisables «aussi bien par le débutant que par le botaniste aguerri». Outre d'intéressantes réflexions de l'auteur sur la conception de son œuvre et sur les problèmes relatifs à l'identification des plantes, cette flore est accompagnée de conseils relatifs à la confection de l'herbier et aux précautions nécessaires à la préservation des espèces rares («Code du botaniste herborisant», comportement souhaitable lors des sorties collectives...). De nombreux dessins au trait, de bonne qualité, et 192 belles photographies en couleurs, prises dans le milieu naturel, permettent le contrôle des identifications réalisées.

Les clés ne conduisent qu'au nom des espèces, à propos desquelles les données habituelles (synonymes, écologie, phytogéographie...) sont réservées au tome 2. Signalons cependant le danger éventuel de cette identification «brute», qui peut porter sur des

espèces protégées ou rares. Le néophyte observant fortuitement l'une d'elles risque de n'avoir pas conscience de l'importance de sa découverte et, même (cela s'est produit), d'être incapable de retrouver une station de grand intérêt, en vue de sa validation par des botanistes confirmés. D'autre part, le même néophyte peut, en toute innocente illégalité, être tenté de réaliser un bouquet ou une «belle planche d'herbier» au détriment d'une plante légalement protégée à divers titres dans sa région, s'il n'a pas l'idée de consulter la liste donnée en fin de volume. Signaler nettement ces espèces à côté de leur nom permettrait d'éviter les risques.

Si l'ordre de présentation de la clé des familles ne surprend pas, on est ensuite intrigué par la succession alphabétique des familles et, au sein de celles-ci, des genres et des espèces. L'auteur juge cet ordre «d'un usage très commode puisqu'il évite de fastidieuses recherches dans un index», mais on voit rapidement l'inconvénient de ce choix, qui a obligé à mettre en annexe... deux index alphabétiques de rattachement aux familles.

D'autres difficultés résultent de l'ordre alphabétique. D'une part, dispersant les groupes, il fait disparaître les affinités morphologiques ou évolutives entre espèces ou genres voisins. D'autre part, le «botaniste non aguerri» qui recherche dans la flore les Composées, les Crucifères, les Graminées... (termes qu'il s'imaginait, naïvement, consacrés) n'a aucun moyen d'être aiguillé vers la nomenclature actuelle, respectivement les Astéracées, les Brassicacées, les Poacées... Réciproquement, il s'étonnera de l'absence des Pruniers et des

Pommiers au sein des Rosacées, famille maintenant démembrée.

En fait, l'ordre alphabétique serait parfait s'il portait sur une nomenclature systématique figée (ou définitive... ne rêvons pas), mais il est hors de doute que des changements de noms (notamment pour les genres et, particulièrement, pour les Poacées littorales), des transferts d'espèces d'un genre à un autre, des remaniements au sein de grandes familles, etc., sont en cours ou prévisibles, à la lumière d'études actuelles, notamment en biologie moléculaire.

La première partie du tome 2 apporte sur les groupes cités (indigènes, adventices, naturalisés, subspontanés, etc.) de nombreuses informations : synonymie, noms français, éventuellement normands, phénologie (aspects saisonniers), chorologie (répartition géographique), écologie, phytosociologie, rareté, statut de protection, usages... Le botaniste aura tout le loisir, à sa table de travail, de confronter ces données avec ses notes de terrain. Les genres et les espèces sont, ici encore, présentés dans l'ordre alphabétique, indépendamment des familles auxquelles ils appartiennent. La liste des unités phytosociologiques reconnues sur le territoire de la flore, synthèse originale de Bruno de Foucault, donne une bonne idée des cortèges floristiques relatifs aux divers groupements végétaux normands.

La dernière partie du tome 2 dépasse largement le cadre de la Normandie. En 110 pages, l'auteur a réalisé un traité de botanique générale, rarement présent sous cette forme dans les flores usuelles et susceptible d'intéresser un large public. Sont données, de façon très didactique, la définition de chaque unité taxonomique, les relations entre les familles, les particularités morphologiques de celles-ci (avec de nombreux diagrammes floraux), la présence dans chacune d'elles d'espèces utiles ou toxiques, etc.

Parmi les annexes (index, glossaires), notons la liste des «personnages, réels ou fictifs, auxquels un nom de genre ou d'espèce a été dédié». On voit que rien d'essentiel n'a échappé à l'auteur. Les quelques critiques amicales qui précèdent ne sauraient occulter la valeur considérable de cet ouvrage. S'il constitue bien l'«œuvre d'une vie», qui «fera date dans l'histoire de la botanique française» (selon l'élogieuse et belle préface de Jean-Marie Gehu), on attend de Michel Provost la réalisation de bien d'autres travaux sur son domaine de prédilection et sur la nécessaire protection des richesses naturelles de sa Normandie.

Marcel BOURNÉRIAS

Biologie

Les canaux ioniques cellulaires

Jean-Marc Dubois (avec la collaboration de Laurent Combettes, Édouard Corabœuf et Jean-François Faivre). Polytechnica, 1999 (198 pages, 198 francs).

« Canaux ioniques cellulaires » : on est troublé par l'accumulation de termes dont le sens exact échappe au non-spécialiste. Pourtant les mots sont explicites : les objets ainsi désignés sont des passages qui permettent la circulation des ions entre l'intérieur et l'extérieur des cellules. De tels objets, que le public n'a jamais vus, existent-ils vraiment ?

Dans son ouvrage *Les canaux ioniques cellulaires*, Jean-Marc Dubois démontre que ces canaux sont bien réels, et qu'ils ont des applications dans l'ensemble du monde vivant, aussi bien chez les végétaux que chez les animaux ; ils sont essentiels aux fonctions physiologiques des cellules.

Ces canaux ont leur histoire, qui a commencé par des questions que se posaient les biologistes et les électrophysiologistes : comment un stimulus atteint-il le cerveau ? quelle est la cause de l'électricité animale ?

À la base de tous ces phénomènes se trouvent les canaux ioniques. En effet, la vie, de la cellule à l'organisme, est fondée sur une différence de concentrations en ions, entre l'extérieur et l'intérieur des cellules, et sur le mouvement de ces ions. À chaque type de cellule correspond un canal caractéristique, qui règle spécifiquement les échanges. Par exemple, les cellules nerveuses qui se transmettent les influx électriques, les neurones, possèdent des canaux qui ne deviennent perméables aux ions que pour certaines différences de potentiel entre l'intérieur et l'extérieur de la cellule. Les cellules cibles des hormones, elles, ont des canaux dont l'ouverture est commandée par une liaison avec l'hormone dont ils sont spécifiques.

Ainsi l'auteur présente les divers types de canaux sans établir de liste rébarbative. Il les recense selon leur importance, montrant leur rôle physiologique : transmission des informations nerveuses, entre les neurones, aux zones nommées « synapses », réception et amplification des messages hormonaux, défense immunitaire, excitation,

contraction, division et sécrétion cellulaires (hormones, sucs digestifs...).

Les explications et les modèles sont donnés à partir de cas concrets. Le lecteur comprend l'importance des canaux et leur localisation. Ainsi de celui de nos plantes vertes. Même s'il n'est pas un guide de jardinage, n'est-il pas utile d'avoir une idée des causes du flétrissement de nos plantes !

Moins anecdotique est l'application thérapeutique des canaux ioniques dans les traitements analgésiques, anticancéreux, ou contre la mucoviscidose. D'infimes variations moléculaires des canaux ioniques ont parfois des conséquences dramatiques : les différentes échelles du vivant sont interconnectées.

Le livre proposé par J.-M. Dubois et ses collaborateurs est facile d'accès, et il permet à toute personne désireuse d'appréhender le fonctionnement du vivant d'accéder à une connaissance de base à la fois complète et à la pointe des découvertes. En bon pédagogue, l'auteur fait les rappels nécessaires en électrophysiologie au début du livre ; ses schémas sont clairs, précis et commentés avec pertinence. Utile au scientifique qui souhaite se recycler, à l'étudiant biologiste qui veut comprendre la communication cellulaire, à l' amateur de sciences qui s'informe sur la science actuelle, le livre donne à un large public des informations sur des mécanismes complexes.

Charlotte CLERGEAU

Physique

Physique des transitions de phases. Concepts et applications. Cours avec exercices corrigés

Pierre Papon, Jacques Leblond et Paul H.E. Meijer, Éditions Dunod, 1999.

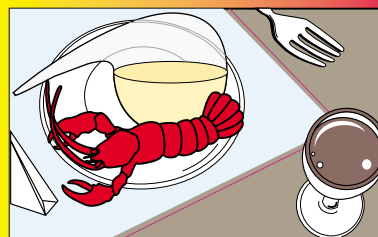
De nombreuses transitions de phase nous sont familières, au point que l'on pourrait penser que tout ce champ de la physique est parfaitement compris. Ainsi, nous mettons en œuvre des transitions entre états solide, liquide et gazeux quand nous préparons des glaçons ou quand nous faisons bouillir de l'eau, et des transitions dans les cristaux liquides nématiques permettent l'affichage de l'heure dans les

FRANCE INFO et POUR LA SCIENCE

vous invitent à écouter la chronique de Marie-Odile Monchicourt :

Info Sciences

Tous les jours sur **France Info** à 15 heures 41, 17 heures 10, 20 heures 12, 22 heures 12, et 23 heures 42



Les prochains résultats présentés dans la rubrique Science et Gastronomie seront annoncés sur **France Info** le 28 août 2000.



SCIENCE

8, rue Férou 75278 PARIS CEDEX 06
Tél : 01-55-42-84-00
<http://www.pourlascience.com>

POUR LA SCIENCE Directeur de la rédaction : Philippe Boulanger. Hervé This (Rédacteur en chef), Françoise Cinotti (Rédactrice en chef), Philippe Pajot, Loïc Mangin, Claire Le Poulennec (Rédacteurs). Secrétariat de rédaction/Maquette: Annie Tacquenet, Pascale Thiollier, Céline Lapert, Laurence Cristofoli, Sylvie Sobelman. Site Internet : Cyril Lamotte. Marketing et Publicité : Stéphane Montouchet, assisté de Séverine Merviel et Christophe Vitiello. Direction financière : Anne Gusdorf. Direction du personnel : Jean-Benoît Boutry. Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Géraldine Le Coz. Presse et communication : Sylvie Gillet, assistée de Lucie Romier. Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet.

Ont également collaboré à ce numéro : Julien Baillot, Olivier Burdet, Claire Chaufour, Paul Decaix, Marie-Thérèse Landousy, Jean-François Laporte, Guillaume Lecointre, Yann Loupp, Valérie Martin-Rolland, Alain Mermet, Claude Olivier, Christophe Pichon, Donny Strosberg, Daniel Tacquenet, Patrick Tort, Guy Vayssex, Jean Weissenbach.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor: John Rennie. Board of editors: Michelle Press, Mark Alpert, Carol Ezzell, Wayt Gibbs, Kristin Leutwyler, Madhusree Mukerjee, George Musser, Sasha Nemecek, Ricki Rusting, Sarah Simpson, Gary Stix, Philip Yam, Glenn Zorpette. Chairman Emeritus: John Hanley. Chairman: Rolf Grisebach. President and Chief Executive Officer: Gretchen Teichgraber. Vice-President: Chuck McCullagh and Frances Newburg.

PUBLICITE France

Chef de Publicité : Jean-François Guillotin, jf.guillotin@pourlascience.fr
8 rue Férou 75278 Paris Cedex 06
Tél. : 01 55 42 84 28
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 : 01 55 42 84 04

SERVICE DE VENTE RÉSEAU NMPP

Christophe Vitiello : 01 55 42 84 81.

DIFFUSION DE LA BIBLIOTHEQUE

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).

Nos lecteurs trouveront des bulletins d'abonnement en pages 18A, 18B, 98A et 98B.

montres. Important domaine de la physique, l'étude des transitions de phase a une grande unité : depuis plusieurs années, on sait que des transitions aussi différentes que les transitions solide-liquide, paramagnétique-ferromagnétique (celles des aimants qui perdent leur aimantation quand on les chauffe) ou nématique-smectique (celles des affichages) sont décrites par les mêmes théories. Pourtant avant d'arriver aux théories générales, telles que le groupe de renormalisation ou la percolation, un effort s'impose : on doit identifier les paramètres d'ordre, comparer expérimentalement les diverses transitions de phase.

Le livre de P. Papon, J. Leblond et P.H.E. Meijer commence par ce classement expérimental et descriptif dès les premiers chapitres, ce qui donne au lecteur une vision globale du sujet. Le livre part de la description thermodynamique et du critère de Gibbs-Duhem (l'état d'une phase à c constituants indépendants peut être décrit à l'aide des $c + 2$ variables que sont la pression, la température, et les «potentiels chimiques» des divers constituants) pour expliquer les diagrammes de phase de solutions solides, en l'appliquant à des cas qui sont aujourd'hui l'objet de recherche, tels que les cristaux liquides ou les pérovskites (les oxydes supraconducteurs à «haute température» explorés ces dernières années sont des composés de ce type).

Puis les auteurs présentent la dynamique de manière moderne, expliquant très clairement la nucléation (dans de l'eau à la température de 100 °C, par exemple, les bulles de vapeur se forment autour de «germes», telles des irrégularités du fond de la casserole ou des impuretés ; c'est pour cette raison que l'ébullition d'une casserole d'eau est stimulée quand on y jette une poignée de sable) et de la décomposition spinodale (c'est le phénomène que l'on observe quand on verse de l'eau dans du pastis : l'anéthole, qui n'est pas soluble dans l'eau, précipite en micro-domaines, dispersés dans l'eau ; la diffusion de la lumière sur ces domaines donne la couleur blanche du système). La solidification et la fusion sont traitées, ainsi que les états métastables de sur-refroidissement (on peut refroidir de l'eau très pure à des températures inférieures à 0 °C) et de surchauffe (parfois l'eau chauffée dans un four à micro-ondes se met à bouillir tumultueusement quand on sort le bol : l'eau était à une température de plus de 100 °C, et le déplacement du bol a provoqué l'ébullition de cette eau surchauffée).

Le chapitre sur la transition vitreuse (dans un polymère, elle correspond à la mise en mouvement des molécules,

ou, au contraire, à leur immobilisation) présente de manière très claire la théorie de couplage de modes qui a eu, encore récemment, tant de succès dans la description de la dynamique des liquides surfondus ou très visqueux : en substance, des mouvements de grande amplitude se bloquent petit à petit quand l'on baisse la température, au point de «geler» complètement le liquide sur-refroidi qui va avoir les propriétés macroscopiques d'un solide, tout en conservant la structure désordonnée de l'état liquide. C'est la transition vitreuse. Mais, une partie des mouvements reste active au-dessous de la température de la transition vitreuse. Sa dynamique est expliquée par les théories de couplage de mode. Puis on examine la transition de gélification, bien décrite par la théorie de percolation, et les transitions magnétiques et de supraconduction, si importantes en science des matériaux.

Les derniers chapitres abordent des sujets qui sont encore, en large partie, du domaine de la recherche fondamentale. C'est le cas des transitions observées dans les nanostructures ou les films minces. Plusieurs transitions sont traitées un peu plus en détail ; chaque fois, les auteurs mettent en valeur l'universalité de la théorie.

Les exemples et les exercices proposés à la fin de chaque chapitre sont empruntés aux domaines les plus modernes de la recherche universitaire et de l'industrie. Issu de l'expérience pédagogique des auteurs, à l'École de physique et chimie industrielles de Paris et à la Catholic University of Washington, ce livre s'adresse aux étudiants universitaires et d'écoles d'ingénieurs, mais il sera utile à un vaste public d'ingénieurs et de chercheurs. On y retrouve les qualités du précédent ouvrage de deux des auteurs – *Thermodynamique des états de la matière* – la clarté, l'orientation expérimentale, l'actualité des exemples.

Dans le paysage clairsemé de la littérature scientifique pédagogique en langue française, il faut saluer la qualité de ce livre. Le très large domaine scientifique couvert par les auteurs en fait un outil de travail essentiel non seulement pour des étudiants mais aussi pour des ingénieurs et des chercheurs qui y trouveront un texte scientifique riche, moderne et clair.

José TEIXEIRA

La liste de tous les livres reçus en service de presse par la rédaction de *Pour la Science* est donnée sur notre site Internet, à l'adresse : <http://www.pourlascience.com>